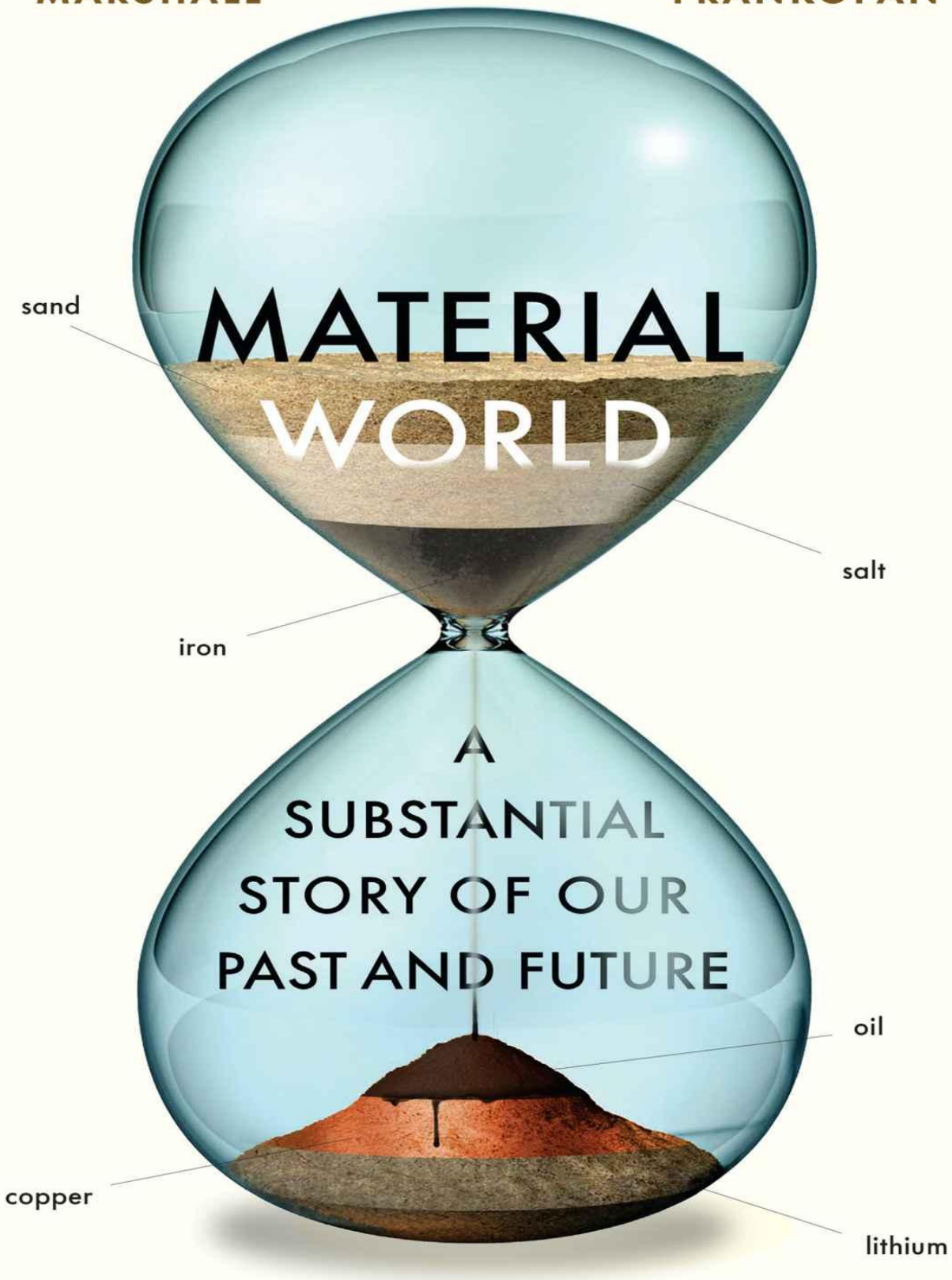
'A compelling narrative of the human story'
TIM MARSHALL

'Lively, rich and exciting... full of surprises'
PETER FRANKOPAN



MATERIAL WORLD

A SUBSTANTIAL STORY OF OUR PAST AND FUTURE

ED CONWAY

Mục lục

Giới thiệu về tác giả
Bởi cùng tác giả
Trang tiêu đề
Cống hiến
Giới thiệu
PHẦN MỘT: Cát
1: Người đồng tính Faber
2: Xây trên cát
3: Hành trình dài nhất
PHẦN HAI: Muối
4: Tuyến đường muối
5: Muối của trái đất
6: Thuốc chữa cháy
Lời kết: Nhiều muối
PHẦN BA: Sắt
7: Bạn Không Có Đất Nước
8: Bên trong núi lửa
9: Vụ nổ cuối cùng
PHẦN BỐN: Đồng
10: Điều tuyệt vời nhất tiếp theo
11: Cái lỗ
12: Vực sâu
PHẦN NĂM: Dầu
13: Con voi
14: Ống
15: Mọi thứ
Phần tái bút: Đỉnh dầu
PHẦN SÁU: Liti
16: Vàng trắng
17: Bánh cuộn thạch
18: Phi sản xuất
Phần kết luận
Ghi chú
Thư mục

Sự nhìn nhận
Mục lục
Bản quyền

Giới thiệu về tác giả

Ed Conway là một nhà văn và phát thanh viên. Ông là Biên tập viên Kinh tế và Dữ liệu của Sky News và là người phụ trách chuyên mục thường xuyên của *The Times* và *Sunday Times* . Ông đã viết hai cuốn sách được giới phê bình đánh giá cao và bán chạy nhất, đồng thời đã giành được nhiều giải thưởng về báo chí. Anh ấy sống ở Luân Đôn.

CỦA CÙNG TÁC GIẢ

50 ý tưởng kinh tế bạn thực sự cần biết
Hội nghị thượng đỉnh: Trận chiến lớn nhất trong Thế chiến thứ hai – Chiến đấu đằng sau những cánh cửa đóng kín

Ed Conway

THẾ GIỚI VẬT CHẤT

Một câu chuyện quan trọng về quá khứ và tương lai của chúng ta

Nội dung

Giới thiệu

PHẦN MỘT Cát

1 Homo Faber

2 Xây trên cát

3 Hành trình dài nhất

PHẦN HAI Muối

4 tuyến đường muối

5 Muối của trái đất

6 Thuốc chữa cháy

Lời tái bút Nhiều muối

PHẦN BA Sắt

7 Bạn không có đất nước

8 Bên trong núi lửa

9 Vụ nổ cuối cùng

PHẦN BỐN Đồng

10 điều tuyệt vời nhất tiếp theo

11 cái lỗ

12 vực sâu

PHẦN NĂM Dầu

13 Con Voi

14 ống

15 Mọi thứ

Phần tái bút: Đỉnh dầu

PHẦN SÁU Lithium

Vàng trắng 16

17 Bánh Cuốn Thạch

18 Phi sản xuất

Phần kết luận

Ghi chú

Thư mục

Sự nhìn nhận

Mục lục

Dành cho Eliza

Giới thiệu

Tôi đang đứng trên bờ vực thẳm nhìn xuống cái hố sâu nhất mà tôi từng thấy. Ở phía dưới là một nhóm người đội mũ cứng, hoặc ít nhất là tôi được kể như vậy; chúng ở quá xa để có thể nhận ra bằng mắt thường. Trên mặt đất gần họ có hàng trăm pound chất nổ mạnh. Tôi được thông báo rằng điều này là đủ để phá hủy một khu phố.
Trước mặt tôi là một tấm bảng kim loại có hai nút bấm, bên cạnh tôi là một người đàn ông cầm bộ đàm. Chúng tôi đang lắng nghe trong phòng điều khiển nơi có người đang đếm ngược. Tôi đã được yêu cầu nhấn đồng thời hai nút khi đồng hồ đếm ngược về 0. Điện tích từ ngòi nổ sẽ mất một tích tắc để chạm tới đáy hố, lúc đó một hình vuông có kích thước bằng sân bóng đá trên đất Nevada sẽ bốc hơi trước mắt chúng ta.
“Trước tiên, bạn sẽ cảm nhận được sóng xung kích,” người đàn ông đeo bộ đàm nói. 'Sau đó, bạn sẽ thấy trái đất bay lên, sau đó bạn sẽ nghe thấy tiếng nổ. Theo thứ tự đó. Thật kì lạ.'
Tôi đã không đi vào vùng sa mạc cao để kích nổ bom; Tôi đã đến vì một bảng tính. Vài tháng trước đó, khi xem xét số liệu thống kê thương mại của Anh, tôi đã nhận thấy một điều kỳ lạ: dòng vàng chảy vào đã làm sai lệch các số liệu, và do đó làm sai lệch bức tranh của chúng ta về nền kinh tế quốc gia. Hóa ra, vàng đã nhanh chóng vượt qua ô tô và dược phẩm để trở thành mặt hàng xuất khẩu lớn nhất của Vương quốc Anh. Do Anh không có ngành khai thác vàng nên điều này thật khó hiểu. Làm thế nào một quốc gia không có trữ lượng vàng đáng kể có thể trở thành một trong những quốc gia sản xuất vàng lớn nhất? Theo những gì tôi có thể hiểu, một phần câu trả lời là phần lớn vàng vật chất của thế giới đi qua London trên đường đi đến một nơi khác. Để giải câu đố, tôi đã đi đến nơi thực sự khai thác kim loại quý, để lập biểu đồ hành trình của vàng từ lòng đất đến nhà máy lọc dầu và sau đó, dưới dạng các thanh thỏi, vòng quanh thế giới. Nhưng khi chúng tôi bắt đầu quay phim, tôi chợt nhận ra rằng có một câu chuyện thậm chí còn hấp dẫn hơn để kể, một câu chuyện nói lên khá nhiều điều về mối quan hệ của loài người với thế giới.

Phải mất vài tháng nhà sản xuất của tôi mới thuyết phục được công ty khai thác được đề cập, Barrick Gold Corporation, mở cửa và mất vài ngày để đến đó từ London. Mỏ Cortez không phải là nơi bạn vô tình gặp phải. Trong trường hợp của chúng tôi, phải mất hai chuyến bay và bốn giờ lái xe về phía tây qua vùng đồng bằng muối của Utah, sau đó là một chuyến hành trình kéo dài hai giờ bằng ô tô khác với sự hướng dẫn của Barrick. Có một con đường cao tốc, hầu như vắng tanh ngoại trừ thỉnh thoảng có xe tải hạng nặng chạy qua, rồi một con đường sa mạc dài, rồi một con đường đất uốn lượn vào một thung lũng dài khô cằn không có người ở. Đất nước cao bồi.
Bản thân mỏ nằm trên sườn đồi có tên là Núi Tenabo, một địa điểm linh thiêng đối với người dân bộ lạc Shoshone phía Tây. Quá trình khai thác tương đối đơn giản và lặp lại các kỹ thuật được sử dụng bởi những người khai thác vàng vào thế kỷ 19, mặc dù ở quy mô khổng lồ. Những tảng đá được thổi ra khỏi lòng đất, nghiền nát rồi nghiền thành bụi mịn, cuối cùng được trộn với dung dịch xyanua giúp tách vàng ra.
Đây là thực tế của việc khai thác tài nguyên ở thế kỷ 21: biến khối lượng lớn đá thành hạt và xử lý những gì còn sót lại bằng phương pháp hóa học. Nó vừa đáng kinh ngạc vừa đáng lo ngại. Một rủi ro là xyanua và thủy ngân được sử dụng trong phương pháp này có thể thoát ra hệ sinh thái xung quanh. Sau đó tất cả, trong khi những người khai thác như Barrick khẳng định họ tuân theo tất cả các quy tắc do Cơ quan Bảo vệ Môi trường Hoa Kỳ (EPA) đặt ra, thì các nhà vận động lại cảnh báo rằng ô nhiễm thường tìm đường ra khỏi mỏ. Thật vậy, một vài năm trước đó, EPA đã phạt Barrick và một thợ mỏ khác gần đó 618.000 USD vì không báo cáo việc phát thải các hóa chất độc hại bao gồm xyanua, chì và thủy ngân. Nhưng điều khiến tôi ấn tượng nhất khi quan sát từng giai đoạn trong quá trình này là ngày nay chúng ta sẽ đi bao xa để có được một mảnh kim loại sáng bóng nhỏ xíu.
Thứ nhất, quy mô thật đáng kinh ngạc. Khi nhìn xuống hố, tôi gần như có thể nhìn thấy vài chiếc xe tải ở phía dưới, nhưng chỉ khi chúng nhô lên trên đỉnh, tôi mới nhận ra rằng chúng lớn hơn những tòa nhà ba tầng; chỉ riêng lốp xe đã có kích thước bằng một chiếc xe buýt hai tầng. Bạn phải loại bỏ bao nhiêu đất để tạo ra một thỏi vàng? Tôi hỏi

những người tư vấn của tôi. Họ không biết, nhưng họ biết rằng chỉ trong một ngày làm việc, những chiếc xe tải đó sẽ chuyển được những tảng đá có trọng lượng tương đương với tòa nhà Empire State. Sau đó tôi đã tính toán cho chính mình. Để có một thỏi vàng tiêu chuẩn (400 troy ounce), họ sẽ phải đào khoảng 5.000 tấn đất. Trọng lượng này gần bằng trọng lượng của 10 chiếc siêu máy bay Airbus A380, loại máy bay chở khách lớn nhất thế giới, với giá một thỏi vàng.

Có lẽ bạn đã biết đây là cách khai thác vàng ngày nay - nó không đến từ trái đất dưới dạng cốm hay như một đường may phong phú do Mẹ Thiên nhiên tạo ra. Có lẽ bạn biết rằng thay vào đó, nó là sản phẩm của một phản ứng hóa học liên quan đến một trong những loại cocktail độc hại nhất mà loài người biết đến, nó được chiết xuất không phải bằng cách đào sâu xuống lòng đất mà bằng cách phá bỏ toàn bộ ngọn núi. Có lẽ tôi đã ngây thơ nhưng tôi chưa nhận ra được điều đó.

Khi tôi nhìn xuống hố lộ thiên với những chiếc xe tải cỡ một ngôi nhà và những người thợ mỏ chạy nhốn nháo như kiến quanh khu vực vụ nổ, tôi bắt đầu cảm thấy hơi khó chịu. Đó không chỉ là cảnh tượng trước mắt tôi – mà còn là thứ tôi đang đeo trên ngón tay.

Vài tháng trước tôi đã kết hôn. Tôi và vợ đứng trước mặt gia đình, bạn bè và trao nhau những chiếc nhẫn vàng để thể hiện tình yêu. Khi bộ đàm bên cạnh tiếp tục đếm ngược, tôi bấm chuông và suy ngẫm. Rất có thể nó đã được khai thác từ lòng đất bằng chính những kỹ thuật mà tôi đang chứng kiến. Tại sao tôi không kiểm tra xem nó đến từ đâu? Tôi đã quan tâm đến việc kiểm tra những viên kim cương trong chiếc nhẫn đính hôn của vợ tôi không phải là những viên kim cương xung đột, vậy tại sao tôi không tìm ra thứ gì đã bị con người và đất đai hy sinh để lấy vàng? Sau này tôi mới biết rằng mặc dù trước đây có thể cần khoảng 0,3 tấn quặng, được khai thác bằng các phương pháp khai thác truyền thống hơn, để có đủ vàng cho một chiếc nhẫn cưới thông thường, nhưng ngày nay có thể cần từ 4 đến 20 tấn đá. Đứng đó với ngòi nổ trước mặt, tôi có cảm giác như người vừa thưởng thức bữa sáng xúc xích và trứng trước khi được dẫn đi tham quan lò mổ.

Sau đó chính là ngọn núi. Cái hố mà tôi đang nhìn vào không chỉ ở đâu đó gần Núi Tenabo. Đó là núi Tenabo. Quả thực mỏ đã được đào vào vai của đỉnh núi. Khi tôi nhìn sang phía bên kia của cái hố, tôi có thể đếm được từng lớp từng lớp đá nhiều màu tạo nên phần bên trong của ngọn núi này. Tôi không tin vào các vị thần nước mà các bộ lạc Shoshone bản địa phương Tây tôn thờ nhưng dù vậy, thật khó để không cảm thấy có điều gì đó, à, tàn bạo và quan trọng khi lột bỏ lớp da đất và nhìn xuống bên dưới bề mặt.
Khi đồng hồ đếm ngược tiếp tục, tôi quay lại và nhìn về phía nhà sản xuất của mình một cách tuyệt vọng. 'Bạn có muốn vinh dự này không?'
Cô ấy nhìn tôi với vẻ hoài nghi rồi ngồi vào chỗ của tôi. Tôi xấu hổ lùi lại và quan sát.
Việc đếm ngược đã đạt tới con số 0. “Bắn một phát đi, Cortez Hills,” người đàn ông nói vào bộ đàm và chỉ vào các nút. Cô ép cả hai. Có một khoảng dừng nhất thời - khoảng một giây. Sau đó, một làn sóng áp lực ập đến với chúng tôi – không có gì đáng chú ý, giống một luồng không khí hơn. Sau đó, mặt đất rung chuyển và tôi nhìn xuống hàng trăm feet về phía đáy hố, nơi đất đã chuyển sang dạng lỏng. Vụ nổ lan dọc theo chân mỏ, tung bụi bẩn và khói lên không trung. Lúc đó chúng tôi mới nghe thấy tiếng ầm ầm. Nó bùng nổ và vang vọng khắp thung lũng trong khoảng thời gian như vài phút.

Nhà kinh tế học John Maynard Keynes từng gọi vàng là “di tích man rợ”. Quan điểm của ông là mặc dù nó có thể trông đẹp trên một chiếc vòng cổ hoặc bên trong quan tài nhưng nó không thực sự có tác dụng nhiều đến thế.
Rõ ràng là nó có giá trị - tại sao chúng ta lại cho nổ tung cả ngọn núi chỉ vì một vài thanh nó? Nhưng hãy suy nghĩ một chút xem vàng thực sự *có tác dụng gì* . Nó đóng một vai trò quan trọng dù có phần ngoài lề trong điện tử và hóa học, nhưng ngày nay nó chỉ chiếm chưa đến 1/10 nhu cầu. Thay vào đó, công dụng chính của nó là làm đồ trang sức, trang trí và làm tài sản cho những người lo lắng về thảm họa kinh tế. Một số vàng mà tôi thấy được khai thác ở Nevada giờ đây có lẽ đã nằm trên ngón đeo nhẫn của người khác. Hoặc có thể nó sẽ quay trở lại lòng đất một lần nữa, lần này dưới dạng một quán bar trong kho

tiền ngân hàng. Điều này nghe có vẻ phạm thượng đối với các thợ kim hoàn và các nhà đầu tư thất thường, nhưng thế giới có thể sẽ không ngừng hoạt động, nền văn minh cũng sẽ không ngừng hoạt động nếu chúng ta đột nhiên hết vàng. [1]

Vì vậy trong nhiều tháng sau khi từ Nevada trở về, tôi vẫn tiếp tục quay lại với một số câu hỏi. Nếu đây là những gì cần thiết để chiết xuất một loại kim loại mà chúng ta hầu như có thể sống mà không cần, thì cần những gì để chiết xuất những vật liệu mà chúng ta *thực sự* cần? Hãy đề cập đến nó, những vật liệu mà chúng ta thực sự phụ thuộc vào *là gì?* thành phần vật chất là gì nếu không có nền văn minh nào sẽ thực sự bị đình trệ, và chúng thực sự đến từ đâu?

Tôi có linh cảm rằng thép sẽ phải nằm trong số đó. Hầu hết các tòa nhà và ô tô - chưa kể đến máy móc mà chúng ta dùng để chế tạo mọi thứ khác - đều được làm từ hợp kim của sắt, carbon và một số nguyên tố quan trọng khác. Chúng ta cũng không thể tạo ra không gian hiện đại mà không có bê tông. Đồng chắc chắn rất cần thiết vì nó làm nền tảng cho mạng lưới điện mà chúng ta phụ thuộc vào. Vì chúng ta vẫn dựa vào nhiên liệu hóa thạch để tạo ra phần lớn năng lượng nên tôi đoán rằng chúng cũng đủ tiêu chuẩn là vật liệu thiết yếu - mặc dù có lẽ người ta cũng nên xem xét thứ gì đó như lithium, nguyên tố trung tâm của tất cả các loại pin mà chúng ta sẽ cần trong tương lai. Nhưng làm thế nào để định lượng được sự phụ thuộc của chúng ta vào những vật liệu này? Và có phải việc khai thác chúng luôn dẫn đến sự tàn phá tương tự như tôi đã chứng kiến ở mỏ Cortez?

Kinh tế học, ngành học mà tôi đã theo đuổi trong phần lớn cuộc đời làm nghề của mình, dường như có rất ít câu trả lời dứt khoát cho những loại câu hỏi này. Giá trị của một thứ gì đó là số tiền mà ai đó sẵn sàng trả cho nó, theo lời giải thích thông thường. Nếu thứ gì đó thiếu hụt, mọi người sẽ cắt giảm, tìm thứ thay thế phù hợp (nếu thứ đó tồn tại) và tiếp tục. Kết thúc câu chuyện.

Tuy nhiên, câu chuyện dường như không phù hợp với thực tế, bởi vì nội dung này rõ ràng rất quan trọng. Đối với tất cả những gì chúng ta được dạy, chúng ta đang sống trong một thế giới ngày càng phi vật chất hóa, nơi ngày càng có nhiều giá trị nằm ở những thứ vô hình – ứng dụng, mạng và dịch vụ trực tuyến – thế giới vật chất tiếp tục củng cố mọi thứ khác. Điều này không đặc biệt rõ ràng khi bạn nhìn vào

bảng cân đối kế toán của các nền kinh tế của chúng ta, ví dụ cho thấy rằng, chẳng hạn, cứ 5 đô la được tạo ra ở Mỹ thì có 4 đô la có thể bắt nguồn từ lĩnh vực dịch vụ và một phần ngày càng biến mất là do năng lượng. , khai thác và sản xuất. Nhưng gần như mọi thứ từ mạng xã hội từ bán lẻ đến dịch vụ tài chính hoàn toàn phụ thuộc vào cơ sở hạ tầng vật chất hỗ trợ nó và năng lượng cung cấp năng lượng cho nó. Nếu không có bê tông, đồng và cáp quang thì sẽ không có trung tâm dữ liệu, không có điện, không có internet. Tôi dám nói rằng thế giới sẽ không kết thúc nếu Twitter hay Instagram đột nhiên không còn tồn tại; Tuy nhiên, nếu chúng ta đột nhiên hết thép hoặc khí đốt tự nhiên thì đó sẽ là một câu chuyện rất khác.

Tất cả chúng ta đều biết điều này theo bản năng. Và những nguyên tắc như vậy là hiển nhiên trong thời kỳ chiến tranh, thiếu hụt hoặc khủng hoảng tài chính. Tuy nhiên, đối với các số liệu thống kê quan trọng như tổng sản phẩm quốc nội (GDP), một đô la là một đô la, cho dù nó được chi cho Facebook hay cho thực phẩm. Có một sự logic và tao nhã trong vấn đề này, nhưng nó không trả lời chính xác những câu hỏi của tôi. Biết *giá của một thứ gì đó* là điều rất tốt , nhưng giá cả không có nghĩa là *tầm quan trọng* .

Cuốn sách này khởi đầu là nỗ lực của tôi để trả lời những câu hỏi này - một sự suy ngẫm không chỉ về giá trị thị trường của các chất mà còn về *sự phụ thuộc của chúng ta* vào chúng. Nhưng khi tôi đi sâu hơn, vượt ra ngoài vùng an toàn của kinh tế học thông thường, nó lại trở thành một thứ khác: một câu chuyện đầy ngạc nhiên. Càng hiểu nhiều về những vật liệu này – tầm thường, buồn tẻ và thường, vâng, rẻ tiền – chúng càng có vẻ kỳ diệu hơn.

Hãy xem xét một điều gì đó đơn giản như một hạt cát. Không có nguyên tố nào trong lớp vỏ trái đất, ngoại trừ oxy, chất phổ biến hơn thành phần chính của cát - silicon. Tuy nhiên, hãy quỳ xuống và xem xét những gì trong lòng đất và bạn sẽ sớm nhận ra rằng mình đang chìm vào một vũ trụ phức tạp. Có những hạt thô, góc cạnh, hoàn hảo cho xây dựng. Có những bãi cát biển nằm dưới đáy biển cho đến khi chúng được nạo vét và biến thành vùng đất mới. Có những bãi cát sa mạc, bị gió bào mòn đến nỗi khi nghiên cứu chúng dưới kính hiển vi, bạn sẽ thấy thứ trông giống như một đống viên bi - các cạnh của hạt được làm tròn xuống hàng ngàn của nhiều năm xói mòn. Có những

bãi cát do các đại dương nhiệt đới cổ xưa để lại có độ tinh khiết đến mức chúng được buôn bán trên khắp thế giới.
Trộn cát và đá nhỏ với xi măng, thêm một ít nước và bạn sẽ có bê tông, theo đúng nghĩa đen là vật liệu nền tảng cho các thành phố hiện đại. Thêm nó vào sỏi và nhựa đường và bạn sẽ có nhựa đường, loại đường mà hầu hết đều được làm bằng nhựa đường - nghĩa là những con đường không được làm bằng bê tông. Nếu không có silicon, chúng ta sẽ không thể tạo ra những con chip máy tính hỗ trợ thế giới hiện đại. Làm tan chảy cát ở nhiệt độ đủ cao với các chất phụ gia phù hợp và bạn sẽ tạo ra thủy tinh. Thủy tinh – thủy tinh đơn giản, đơn giản – hóa ra là một trong những bí ẩn lớn của khoa học vật liệu; không phải chất lỏng cũng không phải chất rắn với cấu trúc nguyên tử mà chúng ta vẫn chưa hoàn toàn hiểu được. Và kính bạn có trong kính chắn gió chỉ là bước khởi đầu của nó, vì, được dệt thành sợi và kèm theo nhựa, thủy tinh sẽ trở thành sợi thủy tinh: chất mà từ đó các cánh tuabin gió được tạo ra. Được tinh chế thành những sợi dây thuần túy, nó trở thành sợi quang mà từ đó mạng Internet được dệt nên. Thêm lithium vào hỗn hợp và bạn sẽ có được một loại thủy tinh chắc chắn, đàn hồi; thêm boron và bạn sẽ có được thứ gọi là thủy tinh borosilicat.
Bạn chắc hẳn đã từng gặp phải thủy tinh borosilicate trước đây, có thể dưới tên thương hiệu mà nhà sản xuất Corning đặt cho nó: Pyrex. Ổn định, trong suốt và chắc chắn, có khả năng chịu được nhiều loại nhiệt độ, từ ngọn lửa trần của đầu đốt Bunsen đến cái lạnh thấu xương của không gian sâu thẳm, thủy tinh borosilicate là một trong những anh hùng thầm lặng của thời hiện đại. Không giống như thủy tinh thông thường, khi tiếp xúc với hóa chất mạnh có thể lọc các hạt nhỏ vào chất lỏng, thủy tinh borosilicate vẫn trơ về mặt hóa học, khiến nó trở thành vật liệu hoàn hảo cho ống nghiệm, cốc thí nghiệm và lọ y tế. Một điểm chung của hầu hết mọi loại thuốc hoặc vắc xin trong lịch sử - bao gồm cả những loại thuốc được phát triển cho COVID-19 - đều có điểm chung là các thùng chứa borosilicate để chế tạo, bảo quản và vận chuyển chúng.
Nhưng chúng ta có xu hướng không chú ý nhiều đến những thứ này cho đến khi chúng ta thiếu chúng. Đó chắc chắn là trường hợp của thủy tinh borosilicate, loại vật liệu đột ngột nhận được sự quan tâm

sau đại dịch COVID, trong bối cảnh lo ngại rằng nguyên nhân chính cản trở việc phân phối vắc xin có thể không phải là bản thân dược phẩm mà là hộp đựng chúng. được vận chuyển. Trong trường hợp này, hàng nghìn công nhân dọc theo chuỗi cung ứng phức tạp trải dài từ hầm mỏ, nhà máy lọc dầu đến nhà máy đã giúp ngăn chặn thảm họa. Corning thậm chí còn triển khai một loại thủy tinh hoàn toàn mới, không được làm bằng boron mà bằng nhôm, canxi và magie, để giúp đáp ứng nhu cầu về lọ đựng thuốc.

Các lĩnh vực khác không được may mắn như vậy. Trong đại dịch và sau đó, đã xảy ra tình trạng thiếu khẩu trang, tăm bông và thuốc thử chẩn đoán, thiếu xi măng và thép, thiếu gỗ và giấy vệ sinh, thiếu khí và hóa chất công nghiệp, thiếu thịt, mù tạt, trứng và sữa. Sự thiếu hụt chip silicon – chất bán dẫn như chúng thường được gọi – đến mức các nhà sản xuất ô tô trên khắp thế giới đã phải ngừng sản xuất công cụ và đóng cửa nhà máy của họ. Các nhà sản xuất máy tính và điện thoại thông minh không thể thực hiện được đơn đặt hàng. Thậm chí một năm sau khi ra mắt, thế hệ máy chơi game mới vẫn còn thiếu hụt. Chỉ sau khoảng hai năm, tình trạng thiếu hụt đó mới chấm dứt.

Điều buồn cười về những cuộc khủng hoảng chuỗi cung ứng này là mỗi cuộc khủng hoảng dường như đều khiến các chính phủ và nhà hoạch định chính sách trên thế giới hoàn toàn bất ngờ. Họ ngạc nhiên rằng đang thiếu chất bán dẫn, ô tô cần rất nhiều chất bán dẫn và việc thiếu ô tô mới sẽ đẩy giá ô tô cũ lên mức cao kỷ lục.

Chính phủ Anh cũng giật mình tương tự vào cuối năm 2021 khi đột nhiên thiếu hụt lượng carbon dioxide và phát hiện ra rằng nếu không có CO_2, ngành công nghiệp thực phẩm không chỉ đơn thuần là tạo ra đồ uống có ga có ga mà còn để bảo quản, bảo quản thực phẩm cũng như làm choáng lợn, gà trước khi giết mổ. Tất cả điều này có thể bắt nguồn từ việc đóng cửa đột ngột hai nhà máy phân bón ở Cheshire và Teesside. Hóa ra, phần lớn nguồn cung cấp CO_2 của Anh đến từ hai địa điểm này với mục đích chính là tạo ra một thứ hoàn toàn khác: amoniac. Và vì giá khí đốt tự nhiên cao và do amoniac được sản xuất, như chúng ta sẽ thấy trong các chương tiếp theo, từ khí đốt tự nhiên, nên sự sụt giảm về giá đã gây ra sự thiếu hụt đột ngột ở một chất khác, dường như không liên quan.

Nhưng *thực sự* tất cả những điều này có gây ngạc nhiên như vậy không? Để có manh mối về câu trả lời, hãy xem xét bài tiểu luận nổi tiếng viết năm 1958 của Leonard Read, một nhà kinh tế học người Mỹ, có tựa đề 'I, Pencil'. 'Tôi là một cây bút chì', nó bắt đầu, 'loại bút chì gỗ thông thường quen thuộc với tất cả các bé trai, bé gái và người lớn biết đọc và viết.' Tuy nhiên, Read, hay đúng hơn là cây bút chì, tiếp tục, 'không một người nào trên trái đất này biết cách tạo ra tôi'. [2]
Gỗ làm bút chì được lấy từ cây tuyết tùng mọc ở miền Tây nước Mỹ, được xẻ bằng thép sản xuất trong lò cao và hoàn thiện trong xưởng. Nó được xay thành những thanh gỗ rồi sấy khô, nhuộm và sấy khô lại, các thanh gỗ được tạo rãnh và dán vào đúng vị trí. Chì trong lõi bút chì là than chì được khai thác ở Sri Lanka, được tinh chế và trộn với đất sét từ Mississippi, cùng với các hóa chất làm từ mỡ động vật và axit sulfuric. Gỗ và chì của bút chì được phủ một lớp sơn mài làm từ dầu thầu dầu có nguồn gốc từ hạt thầu dầu, nhựa được sử dụng để dán nhãn và được phủ trên đế bằng đồng thau làm từ đồng và kẽm, được khai thác ở bên kia thế giới. . Cục tẩy được làm từ dầu hạt cải từ Indonesia, với nhiều loại hóa chất trong quá trình sản xuất, từ lưu huỳnh clorua đến cadmium sulphide.
Tất cả chỉ vì những điều đơn giản nhất, một cây bút chì. Tuy nhiên, từ những nhà sản xuất làm việc trên từng thành phần cho đến những người vận chuyển chuyển các bộ phận cho những người làm việc trong các nhà máy điện cung cấp năng lượng cho quá trình này, 'hàng triệu người', bút chì của Read viết, 'đã góp tay vào sự sáng tạo của tôi, không ai trong số họ biết nhiều hơn rất ít người khác' .
Có một vài bài học đơn giản ở đây. Đầu tiên là chúng ta hiểu rất ít về cách thức sản xuất các sản phẩm hàng ngày. Thứ hai là, với tất cả sự phức tạp này, không một con người nào có thể thực hiện hoặc trực tiếp thực hiện nhiều quá trình này. Vì những lý do hiển nhiên, 'I, Pencil', được viết vào thời kỳ đỉnh cao của Chiến tranh Lạnh, phần lớn nhấn mạnh vào bài học thứ hai. Bài tiểu luận của Read đã được nhà kinh tế học thị trường tự do Milton Friedman ủng hộ như một minh họa cho lý do tại sao những người đồng nhiệm Liên Xô của ông đã sai lầm khi cố gắng điều hành nền kinh tế của họ thông qua các ủy ban kế hoạch tập trung.

Tuy nhiên, khi tôi suy ngẫm về sự sụp đổ của các chuỗi cung ứng ở thế kỷ 21, tôi chợt nhận ra rằng lẽ ra chúng ta cũng có thể ghi nhớ bài học đầu tiên trong số đó. Chắc chắn nếu chúng ta dành thêm một chút thời gian để suy ngẫm xem những món đồ mà chúng ta dựa vào đó thực sự được sản xuất như thế nào, thì chúng ta có thể không quá bối rối khi chúng sắp hết hàng. Nhờ bài luận của Read, hàng triệu sinh viên kinh tế giờ đây đã biết cách xoay quanh chuỗi cung ứng của một chiếc bút chì, nhưng còn điện thoại thông minh, vắc xin hay pin thì sao? Còn chuỗi cung ứng carbon dioxide hoặc thủy tinh borosilicate thì sao?

Những mạng lưới con người và chuyên môn này, biến những nguyên liệu thô thành những sản phẩm phức tạp rồi giao chúng cho chúng ta, sát cánh cùng chính những chất liệu này như một ngôi sao khác của cuốn sách này. Trong những trang tiếp theo, bạn sẽ tìm thấy sự tôn vinh cách mạng lưới con người, hầu hết không biết nhau, có thể cộng tác để biến những chất trơ, dường như không hứa hẹn thành những điều kỳ diệu. Và tôi phát hiện ra rằng rất ít chuỗi cung ứng có thể kỳ diệu như những chuỗi sản xuất chip silicon.

Rất lâu trước khi xảy ra tình trạng thiếu chip, tôi đã cố gắng kể câu chuyện về một hạt silicon, từ mỏ đá cho đến nhà máy lắp ráp và đúc bán dẫn, nơi nó sẽ trở thành một phần của điện thoại thông minh. Tôi sớm nhận ra rằng, giống như với cây bút chì của Read, không một người nào, kể cả những người làm việc trong chính chuỗi cung ứng, có thể giải thích đầy đủ cho tôi về các quy trình – ngay cả những quy trình rất đơn giản – diễn ra ở mỗi giai đoạn trong suốt hành trình này. Những người làm việc tại các xưởng đúc hiểu rất nhiều về quang khắc và mài mòn hóa học, nhưng lại biết rất ít về cách thức sản xuất các tấm silicon siêu tinh khiết mà họ đang nghiên cứu. Không ai ở mỏ đá đào đá thạch anh từ mặt đất (hóa ra, những con chip bắt đầu cuộc sống của chúng không phải là những hạt cát mà là những cục đá cỡ nắm tay) hiểu nhiều về số phận cuối cùng của nó.

Tuy nhiên, điều đáng chú ý nhất là độ dài và kịch tính phi thường của cuộc hành trình này. Từ việc được thổi lên khỏi mặt đất ở mỏ đá cho đến khi nằm trong điện thoại thông minh, hạt silicon này sẽ đi vòng quanh thế giới nhiều lần. Nó sẽ được làm nóng đến hơn 1.000°C và sau đó được làm lạnh, không phải một hoặc hai lần mà là ba lần. Nó

sẽ được chuyển đổi từ một khối vô định hình thành một trong những cấu trúc tinh thể tinh khiết nhất trong vũ trụ. Nó sẽ bị bắn bằng tia laser được cung cấp bởi một dạng ánh sáng mà bạn không thể nhìn thấy và không thể tồn tại khi tiếp xúc với khí quyển. Đây – quá trình biến silicon thành một con chip silicon nhỏ xíu – là hành trình phi thường nhất mà tôi từng theo dõi.

Nhưng đây chỉ là sự khởi đầu. Trong những tháng tiếp theo, tôi sẽ thấy nhiều mỏ đá hơn. Tôi sẽ đi xuống độ sâu ngột ngạt của khu mỏ sâu nhất châu Âu. Tôi sẽ xem muối đến từ đâu và làm thế nào nó biến đổi thành các chất hóa học mà nếu không có chúng thì tất cả chúng ta sẽ phải vật lộn để tồn tại. Tôi nhìn thấy đá đỏ bị biến thành kim loại nóng chảy và sau đó được rèn thành thép. Tôi đã đi đến những hồ nước xanh kỳ lạ từ nơi chúng tôi lấy lithium và theo dõi chất này khi nó được dán, cuộn lại và ép vào pin cho một chiếc ô tô điện. Và càng đi du lịch, tôi càng nhận ra rằng mình đã dành phần lớn cuộc đời mình để sống ở một thế giới khác, nơi mà tôi dần dần coi là thế giới thanh tao.

Có lẽ bạn cũng sống ở đó: đó là một nơi khá đáng yêu, một thế giới của những ý tưởng. Trong thế giới thanh tao, chúng tôi bán dịch vụ, quản lý và điều hành; chúng tôi xây dựng ứng dụng và trang web; chúng tôi chuyển tiền từ cột này sang cột khác; chúng tôi giao dịch chủ yếu bằng suy nghĩ và lời khuyên, cắt tóc và giao đồ ăn. Nếu những ngọn núi đang bị phá bỏ ở phía bên kia hành tinh, thì điều đó dường như khó có liên quan đặc biệt ở đây trong thế giới thanh tao. Khi tôi bay tới Nevada để quay cảnh ngọn núi bị nổ tung, tôi thực sự muốn quay một phép ẩn dụ bằng hình ảnh, để biến vật chất thành một thứ gì đó thanh tao: một bản tin có thể giúp mọi người hiểu rõ hơn một chút về một ý tưởng như dòng chảy thương mại. Tuy nhiên, đứng ở rìa hố ở đó, tôi nhận ra rằng tầm nhìn của tôi đã nông cạn một cách nguy hiểm. Đột nhiên tôi nhận ra mình đang nhìn từ bờ vực của thế giới này sang một thế giới khác: Thế giới Vật chất.

Thế giới vật chất là nền tảng cho cuộc sống hàng ngày của chúng ta. Nếu không có nơi này, điện thoại thông minh được thiết kế đẹp mắt của bạn sẽ không bật được, chiếc xe điện mới toanh của bạn sẽ không có pin. Thế giới Vật chất sẽ không cung cấp cho bạn một ngôi nhà lộng lẫy, nhưng nó sẽ đảm bảo rằng ngôi nhà của bạn thực sự có

thể đứng vững. Nó sẽ giữ cho bạn ấm áp, sạch sẽ, đủ ăn và khỏe mạnh, tuy nhiên bạn có thể không chú ý nhiều đến nó.
Thế giới Vật chất là nơi bạn sẽ tìm thấy những công ty quan trọng nhất mà bạn chưa từng nghe đến, những công ty như CATL, Wacker, Codelco, Shagang, TSMC và ASML. Những cái tên này có thể chẳng có ý nghĩa gì với bạn, nhưng chúng cũng quan trọng, có lẽ còn quan trọng hơn những thương hiệu quen thuộc mà mọi người đã từng nghe đến – thương hiệu Walmarts, Apples, Teslas và Googles của thế giới này. Bí mật được giữ kín nhất của nền kinh tế hiện đại là những thương hiệu nổi tiếng thế giới này phụ thuộc hoàn toàn vào các công ty vô danh của Thế giới Vật chất để tạo ra sản phẩm và giúp những ý tưởng thông minh của họ thành hiện thực. Đó là nơi ý tưởng trở thành hiện thực hữu hình.
Tại sao các siêu thương hiệu ngày nay lại vui vẻ dựa vào các công ty khác để hoàn thành công việc thực sự? Thành thật mà nói, một phần là vì hoạt động trong Thế giới Vật chất, nơi bạn phải đào bới, khai thác và biến nó thành sản phẩm vật chất, có thể là một công việc kinh doanh khó khăn, nguy hiểm và bẩn thỉu. Trong những trang tiếp theo, chúng ta sẽ chứng kiến nhân loại ở thế kỷ 21 sẵn sàng đi bao xa để có được những vật liệu này, cho dù điều đó có nghĩa là đào một cái hố sâu như hẻm núi hay lùng sục dưới đáy đại dương để khám phá những kim loại có nồng độ cao hơn bất cứ thứ gì có nồng độ cao hơn bất kỳ thứ gì khác. tồn tại trên đất khô.
Điều đó đưa chúng ta đến với điều có lẽ nguy hiểm nhất trong tất cả những huyền thoại thống trị thế giới thanh tao - ý tưởng cho rằng con người chúng ta đang cai dần vật chất vật chất. Một số nhà kinh tế chỉ ra dữ liệu ở Mỹ và Anh cho thấy chúng ta đang tiêu thụ ít tài nguyên hơn bao giờ hết cho mỗi đô la hoặc pound thu nhập mà chúng ta tạo ra. Trong phần lớn lịch sử loài người, sản lượng kinh tế của chúng ta theo dõi chặt chẽ việc khai thác tài nguyên thiên nhiên - và về vấn đề đó là việc sử dụng năng lượng của chúng ta - trong vài thập kỷ qua, hai đường này đã khác nhau: GDP tiếp tục tăng trong khi việc sử dụng các nguồn tài nguyên đó của chúng ta không thay đổi. Họ nói rằng đây là bằng chứng chắc chắn cho thấy chúng ta đang nhận được 'nhiều hơn từ ít hơn'. [3]

Đó là một ý tưởng hấp dẫn - đặc biệt là khi khí hậu thế giới đang nóng lên và mọi người đổ xô đi tìm tin tốt - nhưng vừa chứng kiến một ngọn núi thiêng bị phá hủy vì thứ mà chúng ta không thực sự cần, tôi hơi nghi ngờ. Tôi tự hỏi liệu có cơ hội nào mà thay vào đó chúng tôi chỉ đơn giản là thuê ngoài tất cả những thứ bẩn thỉu này ở một nơi khác mà chúng tôi không cần phải suy nghĩ về nó không? Tóm lại là tới Thế giới Vật chất?

Tôi đã thăm dò thêm một chút và phát hiện ra rằng trong khi mức tiêu thụ nguyên liệu chắc chắn đang giảm ở các quốc gia hậu công nghiệp như Mỹ và Anh, ở phía bên kia thế giới, ở những quốc gia mà người Mỹ và Anh nhập khẩu phần lớn hàng hóa của họ, thì mức tiêu thụ này lại đang tăng lên. với tốc độ chóng mặt. Quả thực, các mỏ vàng ở Nevada chỉ là phần nhỏ nhất trong số đó. Chúng tôi nỗ lực hết sức để khai thác đồng và dầu, sắt và coban, mangan và lithium từ lòng đất. Chúng ta đào tìm cát, đá, muối, đá. Và chúng tôi làm như vậy với một tốc độ đáng kinh ngạc. Không chỉ là một màn trình diễn phụ, hoạt động này ngày càng trở nên quan trọng hơn chứ không hề kém đi. Ví dụ thời sự nhất về điều này là vấn đề biến đổi khí hậu. Điều trớ trêu là việc theo đuổi các mục tiêu môi trường khác nhau của chúng ta trong ngắn hạn và trung hạn sẽ đòi hỏi nhiều vật liệu hơn đáng kể để chế tạo ô tô điện, tua-bin gió và các tấm pin mặt trời cần thiết để thay thế nhiên liệu hóa thạch. Kết quả cuối cùng là trong những thập kỷ tới, chúng ta có thể sẽ khai thác được nhiều kim loại từ bề mặt trái đất hơn bao giờ hết.

Tuy nhiên, đây chỉ là chương mới nhất trong một câu chuyện dài. Chuyện này đang xảy ra *rồi* . Vào năm 2019, năm dữ liệu mới nhất tại thời điểm viết bài, chúng ta đã khai thác, đào và cho nổ nhiều vật liệu từ bề mặt trái đất hơn tổng số mọi thứ chúng ta khai thác được từ buổi bình minh của loài người cho đến năm 1950. Hãy xem xét điều đó trong một chốc lát. Chỉ trong một *năm,* chúng ta đã khai thác được nhiều tài nguyên hơn loài người đã làm trong phần lớn lịch sử của mình - từ những ngày khai thác mỏ đầu tiên cho đến cuộc cách mạng công nghiệp, các cuộc chiến tranh thế giới, v.v. Năm 2019 cũng không phải chỉ xảy ra một lần. Trên thực tế, bạn có thể nói chính xác điều tương tự hàng năm kể từ năm 2012. Và không hề giảm bớt, nhu cầu về nguyên liệu thô của chúng ta tiếp tục tăng, tăng 2,8% vào năm 2019

mà không có một hạng mục khai thác khoáng sản nào, từ cát. và kim loại sang dầu và than, giảm dần.
Bạn không nghe nhiều về điều này hoặc nếu bạn nghe thì chủ yếu thông qua lăng kính nhiên liệu hóa thạch. Vì nhiều lý do có thể hiểu được, chúng ta đang dành rất nhiều sự chú ý cho các hydrocacbon. vẫn đang khai thác. Có thể bạn đã biết rằng trong nhiều thập kỷ, chúng ta đã khai thác một lượng lớn than và dầu từ dưới bề mặt trái đất. Bạn có thể sẽ nhận ra rằng hiện nay chúng ta đang dần bắt đầu loại bỏ những nhiên liệu này - hay đúng hơn là chúng ta đang làm chậm lại tốc độ khai thác chúng khỏi lòng đất.
Khi đó, bạn có thể cho rằng điều này có nghĩa là nhu cầu khoáng sản ngày càng giảm đi của chúng ta. Không một chút về điều đó. Vì hóa ra dầu mỏ và các nhiên liệu hóa thạch khác chỉ chiếm một phần nhỏ trong tổng khối lượng tài nguyên mà chúng ta đang khai thác từ trái đất. Với mỗi tấn nhiên liệu hóa thạch, chúng tôi khai thác 6 tấn vật liệu khác – chủ yếu là cát và đá, ngoài ra còn có kim loại, muối và hóa chất. Ngay cả khi chúng ta là công dân của thế giới thanh tao giảm mức tiêu thụ nhiên liệu hóa thạch, chúng ta đã tăng gấp đôi mức tiêu thụ mọi thứ khác. Nhưng bằng cách nào đó, chúng ta đã tự lừa dối mình và tin vào điều ngược lại.
Linh cảm của tôi là điều này một phần liên quan đến dữ liệu – hoặc thiếu dữ liệu. Chúng ta rất giỏi trong việc tính toán số đô la trong GDP, nhưng sự hiểu biết của chúng ta về số lượng *vật chất* mà chúng ta đang rút ra khỏi mặt đất lại còn thô sơ một cách đáng ngạc nhiên. Liên Hợp Quốc và một số cơ quan dữ liệu quốc gia như Văn phòng Thống kê Quốc gia ở Anh trong những năm gần đây đã bắt đầu tập hợp những gì được gọi là phân tích dòng nguyên liệu – đo lường các chất chúng ta khai thác từ trái đất, tiêu thụ và sau đó tái chế hoặc vứt bỏ. Nhưng dữ liệu này chỉ theo dõi 'vật liệu' đang được khai thác, chứ không phải đất và đá trị giá của mười máy bay phản lực siêu lớn đã bị di dời để nắm giữ nó. Từ góc độ thống kê, 'đá thải' này - ngọn núi thiêng liêng này - đơn giản là không bao giờ được tính đến. Nói cách khác, dấu chân thực sự của loài người trên trái đất lớn hơn nhiều so với những gì chúng ta nhận ra. Và sau này tôi mới biết, dấu chân của hoạt động khai thác vàng bị thu hẹp lại so với dấu chân của các kim

loại như sắt và đồng, và đến lượt chúng, dấu vết của việc khai thác vàng cũng bị thu hẹp bởi cát và đá mà chúng ta đào và cho nổ.
Sự thôi thúc thu được khoáng sản này luôn là một trong những động lực mạnh nhất thúc đẩy loài người. Nó không bắt đầu hay kết thúc ở Núi Tenabo với vùng đất tổ tiên của Shoshone; nó tiếp tục từ Hoa Kỳ đến Trung Quốc tới Châu Phi và Châu Âu và thậm chí đến tận đáy Đại Tây Dương. Tuy nhiên, vì nó ngày càng xảy ra ngoài tầm mắt và không xuất hiện trong các dữ liệu kinh tế thông thường nên chúng ta ngày càng giỏi thuyết phục bản thân rằng điều đó không xảy ra.
Nó không phải luôn luôn như vậy. Trong phần lớn lịch sử của chúng ta, các chính phủ đã đặc biệt chú trọng đến việc kiểm soát những vật liệu này. Cuộc đấu tranh giành quyền kiểm soát này, như chúng ta sẽ khám phá, là yếu tố thúc đẩy đằng sau một số thời đại lịch sử mà di sản mà chúng ta vẫn đang cố gắng tìm hiểu và dung hòa: đế chế, thuộc địa và chiến tranh. Khi Bức tường Berlin sụp đổ, một số nhà kinh tế tuyên bố rằng chúng ta đã bắt đầu một kỷ nguyên mới về tài nguyên toàn cầu - rằng với sự ra đời của chuỗi cung ứng và thương mại toàn cầu thực sự, cuộc chạy đua về nguyên vật liệu đã kết thúc. Kết quả là, nhiều quốc gia, bao gồm cả Hoa Kỳ, bắt đầu cạn kiệt kho dự trữ khoáng sản quan trọng này, được tích lũy trong nửa thế kỷ trước. Khi các rào cản thương mại được dỡ bỏ, hoạt động sản xuất đã trở thành một doanh nghiệp toàn cầu thực sự, bao gồm các chuỗi cung ứng kịp thời vận hành khắp hành tinh.
Nhưng ngày nay, các chính phủ trên toàn thế giới nhanh chóng nhận ra rằng việc kiểm soát các vật liệu và quy trình này quan trọng hơn bao giờ hết. Một trong những hành động đầu tiên của Joe Biden khi trở thành tổng thống Mỹ là ký sắc lệnh hành pháp về 'Chuỗi cung ứng của Mỹ', để kiểm tra xem Mỹ phụ thuộc vào các quốc gia khác ở đâu. Đối với chất bán dẫn, chúng ta sẽ gặp các chip silicon trong quá trình sản xuất ở các trang sau. Đối với pin, nó là tập hợp các kim loại bao gồm coban, niken, kẽm và quan trọng nhất là lithium.
Cuốn sách về Thế giới Vật chất này được kể qua sáu chất liệu: cát, muối, sắt, đồng, dầu và lithium. Đúc các vật liệu này vì các nhân vật chính có vẻ hơi hư hỏng, vì hầu hết các câu chuyện về sự tiến bộ của con người đều đến từ góc nhìn của chính chúng ta. Tại sao một số quốc gia phát triển mạnh mẽ trong khi những quốc gia khác lại thất

bại? Tại sao cuộc cách mạng công nghiệp diễn ra ở Anh mà không phải ở Ethiopia? Quan điểm thời thượng ngày nay là nó chủ yếu bắt nguồn từ sự kết hợp giữa lịch sử, tình cờ và việc có các loại thể chế phù hợp cho phép mọi người đổi mới và phát triển. Nhưng đây chưa bao giờ là câu chuyện đầy đủ, vì bí mật thành công của loài người không chỉ nằm ở DNA hay thể chế chính trị của chúng ta. Số phận của chúng ta luôn gắn liền với những gì chúng ta khai thác từ trái đất và điều chỉnh cho phù hợp với mục đích của chúng ta.
Trong khi các thuật ngữ như Đá, Đồ đồng và Đồ sắt thường được sử dụng để chỉ những thời đại xa xôi, bị lãng quên, thì thực tế sự phụ thuộc của chúng ta vào các công cụ và vật liệu vật chất đã bùng nổ thay vì giảm đi. Với lượng cát và đá mà chúng ta vẫn phun ra từ hành tinh này, chúng ta vẫn gắn bó chặt chẽ với Thời kỳ Đồ đá. Nhu cầu về thép và đồng của chúng ta đã tăng lên gấp bội trong những năm gần đây. Vậy thì đây cũng là Thời đại đồ sắt, chưa kể thời đại của đồng, muối, dầu và lithium.
Sáu vật liệu này là những thành phần thiết yếu của môi trường mà bạn đang đọc cuốn sách này – pin mà không có nó thì điện thoại của bạn sẽ ngừng hoạt động, bê tông mà không có nó thì nền móng ngôi nhà của bạn sẽ sụp đổ. Những vật liệu này hiếm khi xuất hiện trong các câu chuyện về nỗ lực hoặc sự đổi mới của con người, hoặc nếu có thì nó chỉ là một chất trơ được biến đổi một cách kỳ diệu bởi một nhà phát minh lỗi lạc.
Nhưng bây giờ là lúc để những vật liệu này tỏa sáng và kể câu chuyện của chúng ta từ góc nhìn của chúng. Chúng ta gần như có thể sống nếu không có sáu vật liệu này nhưng chúng ta không thể phát triển nếu không có chúng. Chúng là những chất mà phần lớn không có chất thay thế lý tưởng nào. Họ đã giúp chúng ta xây dựng thế giới của mình và chúng ta sẽ rơi vào hỗn loạn nếu đánh mất khả năng tiếp cận chúng - quả thực, như chúng ta sẽ khám phá, sự sụp đổ của một số nền văn minh và chiến thắng của những nền văn minh khác có thể xảy ra trước cửa một hoặc một số trong số sáu nền văn minh đó.
Chúng ta sẽ khám phá việc theo đuổi những vật liệu này đã định hình lịch sử địa chính trị như thế nào và đang bắt đầu định hình tương lai của nó như thế nào. Chúng ta sẽ khám phá ra những hậu quả khó chịu đối với môi trường của chúng ta khi chúng ta thèm ăn vô độ

những vật liệu này. Đôi khi bạn sẽ thấy đó là một trải nghiệm đáng lo ngại – đặc biệt là vì ở một mức độ nào đó tất cả chúng ta đều đồng lõa, tạo ra nhu cầu về nguyên liệu thô mà chúng ta khai thác từ lòng đất. Bạn có thể có ấn tượng rằng giải pháp tốt nhất cho tất cả chúng ta là cố gắng tiêu thụ ít hơn và tái chế nhiều hơn, và điều này, thành thật mà nói, sẽ không có gì xấu.

Nhưng đến cuối cuốn sách, còn có một cái nhìn thoáng qua đầy trêu ngươi về một điều khác: một thế giới mà lần đầu tiên kể từ cuộc cách mạng công nghiệp, chúng ta có thể tự duy trì mà không cần đào sâu hơn nữa vào lòng đất và nổ tung những ngọn núi để thỏa mãn nhu cầu của mình. nhu cầu về hàng hoá. Chúng ta sẽ không bao giờ sống trong một thế giới thực sự phi vật chất; kể từ khi con người nhặt đá và biến nó thành công cụ, chúng ta đã khai thác trái đất và để lại dấu ấn. Nhưng chúng ta *có thể* thu nhỏ dấu chân của mình. Khi làm như vậy, chúng ta có thể giúp giảm thiểu sự gia tăng phát thải khí nhà kính và đối phó với biến đổi khí hậu. Điều nghịch lý, như bạn sẽ thấy, là việc đến được miền đất hứa đó có thể phải đào bới và cho nổ nhiều hơn những gì chúng ta từng làm trước đây.

Ở miền đất hứa đó, có thể chúng ta không còn phụ thuộc vào nhiên liệu hóa thạch nữa nhưng hiện tại chúng ta vẫn phụ thuộc vào chúng một cách vô vọng. Điều đó trở nên rõ ràng vào đầu năm 2022 khi Nga xâm chiếm Ukraine. Cuộc xâm lược đã đẩy giá năng lượng ở châu Âu lên mức cao kỷ lục, từ đó làm tăng chi phí sinh hoạt. Quy mô của sự gia tăng khiến các nhà kinh tế ngạc nhiên - xét cho cùng, trong thế giới thanh tao, thật dễ dàng để thuyết phục bản thân rằng chúng ta đã tách mình ra khỏi những thứ bẩn thỉu như năng lượng và nguyên liệu thô. Nhưng một trong những bài học bạn nhanh chóng học được khi nhảy dù vào Thế giới Vật chất là trong kinh tế học, gần như mọi thứ đều quay trở lại thành năng lượng – ngay cả những thứ bạn ít mong đợi nhất. Phân bón và muối, hóa chất và nhựa, thực phẩm và đồ uống – ở mức độ lớn hơn hoặc ít hơn, tất cả chúng đều là sản phẩm nhiên liệu hóa thạch.

Các sự kiện ở Ukraine có thể đẩy nhanh quá trình chuyển đổi sang năng lượng tái tạo của chúng ta - miễn là nó không đẩy thế giới quay trở lại với than - nhưng điều đó sẽ đặt ra một số thách thức mới. Ngay cả khi chúng ta ít phụ thuộc hơn vào nhiên liệu hóa thạch và các quốc

gia dầu khí như Nga, chúng ta sẽ trở nên phụ thuộc nhiều hơn vào một nhóm kim loại ít người biết đến khác từ các quốc gia khác, nhờ đó chúng ta có thể chế tạo máy móc để cung cấp năng lượng sạch cho chúng ta. Và vì năng lượng tái tạo ít đậm đặc năng lượng hơn nhiều so với nhiên liệu hóa thạch hoặc năng lượng hạt nhân, chúng ta sẽ phải xây dựng nhiều công trình hơn để sản xuất cùng một lượng năng lượng. Vì vậy, nó đi vào Thế giới Vật chất.
Tại sao chỉ có sáu vật liệu? Tại sao chỉ có cát, muối, sắt, đồng, dầu và lithium? Xét cho cùng, có hàng trăm nguyên tố, hợp chất và vật liệu đóng vai trò quan trọng trong việc tạo ra các sản phẩm mà chúng ta phụ thuộc cũng như các dịch vụ chúng ta cần trong thế giới hiện đại. Boron chưa bao giờ được đưa vào bất kỳ kế hoạch chuẩn bị ứng phó với đại dịch nào, tuy nhiên việc nắm giữ đủ đã chứng tỏ là trọng tâm của nỗ lực sản xuất và phân phối vắc xin ngừa COVID-19 – không có nhiệm vụ dễ dàng nào vì boron chủ yếu được tìm thấy ở một số địa điểm có hoạt động núi lửa và khô cằn. khí hậu. Gần một phần ba trữ lượng toàn cầu nằm ở Thổ Nhĩ Kỳ, với các nguồn cung cấp khác nằm ở sa mạc California và vùng Viễn Đông của Nga.
Hơn nữa, borat, muối chứa nguyên tố này, còn có nhiều công dụng khác: chúng là thành phần trong phân bón, giúp phát triển hạt giống và năng suất cây trồng; chúng giúp bảo quản gỗ bằng cách bảo vệ gỗ khỏi côn trùng và nấm mốc. Khi thêm vào thép, boron có thể tăng độ bền của nó; rắc vào một hồ bơi, muối borat có thể giúp giảm độ axit của nước và ngăn ngừa sự tích tụ của tảo.
Hay còn thiếc, chất vừa là thành phần quan trọng trong bảng mạch điện tử, vừa là một trong những kim loại sớm nhất mà tổ tiên chúng ta đã biết cách khai thác? Thế còn nhôm, kim loại phổ biến nhất trong vỏ trái đất – mặc dù chúng ta chỉ mới học cách tinh luyện gần đây thì sao? Còn bạch kim và các kim loại chị em của nó như palladium và rhodium – những thành phần khan hiếm, quan trọng trong các bộ phận điện và bộ chuyển đổi xúc tác thì sao? Thế còn crom, chất đóng vai trò thiết yếu trong sản xuất thép không gỉ, coban, hoặc kim loại đất hiếm như neodymium, dùng để chế tạo nam châm chính xác thì sao? Dòng tôi đã vẽ như sau: mặc dù sáu vật liệu chính trong cuốn sách này không phải là những chất quan trọng duy nhất trên thế giới, nhưng thật khó để tưởng tượng nền văn minh hiện đại mà không có

chúng. Chúng ta có thể tạo ra pin mà không cần coban. Chúng ta có thể chế tạo tai nghe và động cơ điện mà không cần nam châm neodymium – mặc dù chúng sẽ lớn hơn và kém hiệu quả hơn. Những tài liệu trong cuốn sách này là những tài liệu khó thay thế nhất.
Albert Einstein từng được một nhóm phóng viên yêu cầu giải thích về thuyết tương đối của ông. “Tôi có thể giải thích như sau,” anh nói. 'Trước đây người ta tin rằng nếu tất cả vật chất biến mất khỏi vũ trụ thì thời gian và không gian sẽ còn lại. Tuy nhiên, theo thuyết tương đối, thời gian và không gian biến mất cùng với sự vật.” Bạn có thể nói điều tương tự về Thế giới Vật chất. Những chất này là kết cấu của nền văn minh. Không có họ, cuộc sống bình thường như chúng ta biết sẽ tan rã. [4]
Chẳng hạn, không phải ngẫu nhiên mà chúng ta bắt đầu với cát, vì đây là vật liệu mà loài người đã tạo ra rất nhiều cho môi trường của chúng ta. Nó cũng cung cấp cho chúng ta một *chuyến tham quan chân trời* về Thế giới Vật chất. Ở đây, chúng tôi có sản phẩm được sản xuất lâu đời nhất thế giới (thủy tinh) và một trong những sản phẩm tiên tiến nhất (chất bán dẫn). Trong khi cát là chất mà chúng ta tạo ra mọi thứ thì muối là một nguyên liệu kỳ diệu mà chúng ta sử dụng để biến đổi mọi thứ, đồng thời là thành phần quan trọng cho sức khỏe và dinh dưỡng của chúng ta. Các phần về sắt và đồng được sắp xếp theo trình tự như vậy vì câu chuyện về sắt đan xen với câu chuyện về than trong khi đồng là phương tiện tạo ra điện. Đặt chúng theo thứ tự này có nghĩa là chúng ta đề cập đến quá trình chuyển đổi năng lượng lớn đầu tiên và sau đó là thứ hai của thời đại hiện đại: việc sử dụng nhiên liệu hóa thạch và năng lượng điện. Sự chuyển đổi năng lượng thứ ba và thứ tư được đề cập trong phần dầu, thực ra có cả dầu và khí đốt. Sau khi dành phần lớn cuốn sách để xem xét các tài liệu đã giúp mang lại cho chúng ta những cuộc cách mạng công nghiệp trong nhiều thế kỷ qua, chúng tôi kết thúc với tài liệu hứa hẹn sẽ mang đến cuộc cách mạng tiếp theo. Lithium là trung tâm của quá trình chuyển đổi năng lượng tiếp theo – thoát khỏi nhiên liệu hóa thạch và hướng tới các nguồn tài nguyên tái tạo.
Tôi đã có một số quyền tự do trên đường đi. Những người theo chủ nghĩa thuần túy có thể đặt câu hỏi về quyết định của tôi khi gộp dầu và khí đốt lại với nhau trong một phần, hoặc thực tế là phần muối

không chỉ liên quan đến natri clorua mà còn đi đường vòng sang một số loại muối khác. Và các vật liệu khác - ví dụ như than đá và phân bón gốc nitơ - thường xuyên xuất hiện trong quá trình phát triển, mặc dù trên danh nghĩa chúng không nằm trong số sáu vật liệu đó.
Hành trình xuyên qua thế giới này là trải nghiệm thú vị và trí tuệ thú vị nhất trong sự nghiệp của tôi. Nhưng đó còn là một điều khác: có tác dụng chữa bệnh bất ngờ. Khi tôi mạo hiểm sâu hơn và nghiên cứu các thành phần cơ bản của cuộc sống hiện đại, tôi bắt đầu cảm thấy gắn kết hơn một chút với thế giới xung quanh. Đúng là tôi chưa tiến gần hơn tới việc có thể chế tạo pin ô tô, tấm kính hay điện thoại thông minh, nhưng những đồ vật này không còn hoàn toàn là bí ẩn đối với tôi nữa. Sau khi dành phần lớn cuộc đời mình trong thế giới thanh tao, không biết gì về cách chúng ta tạo ra và kiếm được mọi thứ, tôi bắt đầu nhìn ra ngoài với đôi mắt tươi mới. Tôi hy vọng rằng cuốn sách này sẽ truyền cảm hứng cho bạn để có cái nhìn thứ hai về thế giới chúng ta đang sống, nơi có phép thuật trong những vật dụng hàng ngày và điều kỳ diệu trong những chất liệu đơn giản.
Sáu tài liệu được mô tả trong cuốn sách này có thể không hề khan hiếm. Họ có thể không có vẻ ngoài hoặc cảm thấy đặc biệt gợi cảm. Bản thân chúng không có giá trị đặc biệt. Tuy nhiên, chúng là những khối xây dựng chính của thế giới chúng ta. Họ đã thúc đẩy sự thịnh vượng của các đế chế. Họ đã giúp chúng tôi xây dựng các thành phố và phá bỏ chúng. Họ đã thay đổi khí hậu và có thể, kịp thời, sẽ giúp cứu nó. Những tài liệu này là những anh hùng thầm lặng của thời hiện đại và đã đến lúc chúng ta nghe câu chuyện của họ.

Phần một

CÁT

1
Homo Faber

Câu chuyện này bắt đầu bằng một tiếng nổ.
Một vụ nổ có cường độ lớn đến mức có thể nghe thấy ở hai, có thể là ba lục địa. Không phải là có ai xung quanh để nghe thấy nó. Bởi vì thời điểm này là khoảng 29 triệu năm trước - rất lâu trước khi loài *Homo sapiens* ra đời - ở đâu đó gần biên giới ngày nay giữa Ai Cập và Libya.
Ở sa mạc Biển Cát Lớn, một thiên thạch xuyên qua bầu trời và phát nổ. Sức mạnh của vụ nổ thực sự rất lớn, đủ để tạo ra một quả cầu lửa và âm thanh khiến những con mèo và vượn răng kiếm đang lang thang ở bên kia Địa Trung Hải phải kinh hãi.
Cuộc tấn công của thiên thạch này ít được biết đến hơn so với cuộc tấn công được cho là đã xảy ra với loài khủng long 60 triệu năm trước. Theo như chúng tôi biết thì nó không gây ra sự tuyệt chủng trên diện rộng. Các nhà khoa học không đồng ý về việc thiên thạch phát nổ giữa không trung hay do va chạm với mặt đất và việc tìm kiếm một miệng núi lửa hợp lý vẫn đang tiếp tục. Nhưng sao băng châu Phi dù sao cũng có một ý nghĩa đặc biệt, vì nó đưa ra lời giải thích thuyết phục nhất cho một câu chuyện bí ẩn khiến các nhà khảo cổ và địa chất bối rối trong suốt một thế kỷ.
Trong số những báu vật được phát hiện cùng với quan tài của Tutankhamen có một chiếc vòng cổ có hình thần mặt trời Ra. Nó là một món đồ trang sức tuyệt đẹp, tinh tế hơn nhưng không kém phần lôi cuốn so với chiếc mặt nạ tang lễ bằng vàng mang tính biểu tượng của vị vua trẻ Ai Cập. Chiếc ngực này, như đôi khi nó được gọi, được nạm đá quý và kim loại: vàng, bạc, lapis lazuli, ngọc lam và carnelian. Nhưng ở trung tâm của nó là một con bọ được chạm khắc từ một viên đá màu vàng hoàng yến trong suốt. Tất cả những viên đá quý khác đều quen thuộc nhưng vào thời điểm phát hiện ra ngôi mộ, đầu thế kỷ XX, chưa ai từng nhìn thấy thứ gì giống như vật liệu màu vàng này trước đây. Tại sao? Nó là cái gì vậy? Và nó đến từ đâu? Chỉ khi các

nhà thám hiểm mạo hiểm tiến sâu vào sa mạc, họ mới bắt đầu tìm ra câu trả lời.
Biển Cát Lớn được đặt tên như vậy bởi Gerhard Rohlfs, một nhà thám hiểm người Đức, người đã dẫn đầu một đoàn thám hiểm vào năm 1873 về phía tây tới nơi mà thời Pharaon gọi là Vùng đất của người chết. Một trăm dặm sau khi rời khỏi ốc đảo Dakhla, nhiều tuần sau khi để mắt tới bất kỳ dấu vết nào của sự sống con người, anh bất ngờ gặp phải một rào cản không thể vượt qua.
Ông viết: “Những cồn cát và cát xa hơn, thực sự là một đại dương cát”. Anh ta cố gắng vượt qua những cồn cát: không thể, quá cao, cát dưới chân quá lỏng lẻo, ngay cả đối với lạc đà. Anh cố gắng đi vòng quanh chúng: không thể được, vì chúng trải dài về phía bắc và phía nam xa ngút tầm mắt. Anh ấy đã hành quân cùng đội của mình dọc theo cồn cát trong nhiều tuần mà không có kết quả. Cuối cùng anh quyết định quay trở lại phía bắc tới Siwa, ốc đảo gần nhất. Anh ấy và nhóm của mình đã viết một tin nhắn, bỏ nó vào một cái chai đề phòng trường hợp họ không sống sót trong chuyến hành trình trở về, và xây một đống đá phía trên nó. Nếu bạn đi du lịch đến Biển Cát Lớn và đi ngang qua cairn ngày hôm nay, bạn có phong tục để lại lời nhắn của riêng mình trong một cái chai.
Rohlfs hầu như không sống sót trong chuyến hành trình trở về. Trên thực tế, anh ta chắc chắn đã bỏ mạng nếu không có một sự may mắn phi thường. Vì khi quay trở lại một trong những khu vực khô hạn nhất thế giới, nơi nhiều nơi có thể không có mưa trong nhiều thập kỷ, thiên đường bất ngờ mở ra và phi hành đoàn của anh đã có thể bổ sung nước cho họ. nguồn cung cấp nước. Nhiều tuần sau, người Đức gầy gò, may mắn này và những người bạn đồng hành của anh đã đến nơi an toàn. Họ mang theo lời chứng ảm đạm đến mức không ai bận tâm đến việc thực hiện cuộc hành trình trong hơn 50 năm.
Nhìn lướt qua các hình ảnh vệ tinh của lãnh thổ này và bạn sẽ sớm thấy những gì anh ấy gặp phải; những cồn cát dài song song chạy từ bắc xuống nam, được ngăn cách bởi những hành lang bằng phẳng thẳng tắp như con đường La Mã. Những cấu trúc vuông góc này, sản phẩm của những cơn gió thịnh hành, được gọi là cồn cát seif - theo từ tiếng Ả Rập có nghĩa là 'thanh kiếm' - và một số cồn cát chạy dài gần một trăm dặm. Có một sự đồng nhất, một kiểu đối xứng đối với chúng.

Ngoại trừ việc vào thời điểm bạn nhìn thấy những hình ảnh đó thì chúng đã lỗi thời rồi.
Các cồn cát liên tục di chuyển, nuốt chửng bất cứ thứ gì cản đường chúng. Herodotus từng viết về một hoàng tử Ba Tư đã gửi một đội quân vào sa mạc này. Không lâu sau khi họ vào Biển Cát Lớn, họ bị một cơn bão cát nhấn chìm và không bao giờ được nhìn thấy nữa. Thỉnh thoảng, một nhà khảo cổ lại xuất hiện với bằng chứng được cho là về đội quân đã mất.
Nhưng việc khảo sát những cồn cát này từ trên cao không mang lại cảm giác như đang đứng dưới chân chúng. Không phải vô cớ mà hầu hết các nhà thám hiểm đầu tiên đều mô tả những thành tạo này là những sinh vật sống.
“Chúng lớn lên”, Ralph Bagnold, một người Anh đã khám phá sa mạc Sahara vào những năm 1930, viết. ‘Một số… có thể sống độc lập, có thể giữ nguyên hình dạng khi di chuyển từ nơi này sang nơi khác và thậm chí có thể sinh sản.’ [1]
Đôi khi các cồn cát seif sụp đổ trên các vách đá và tạo thành các cồn cát hình lưỡi liềm – barchans, như chúng được biết đến. Đôi khi một seif có thể cưỡi một seif khác và chúng cùng nhau tạo thành một con cá voi lưng, hay mega-barchan.
Cách các hạt này tương tác với nhau, gió và môi trường xung quanh chúng có vẻ bí ẩn và khó đoán, nhưng thực ra tính chất vật lý của cát cực kỳ phức tạp. Đang có gặp phải những đụn cát này khi băng qua sa mạc, Bagnold đã dành phần đời còn lại của mình để cố gắng tìm hiểu chúng.
Bất cứ ai nghiên cứu về cồn cát đều phải lao động dưới cái bóng lâu dài của Bagnold. Ông trở nên có ảnh hưởng đến mức khi NASA cố gắng tìm hiểu các cồn cát trên sao Hỏa, họ đã lật lại những cuốn sách của Bagnold. Thật vậy, nếu bạn theo dõi sứ mệnh của tàu thăm dò *Curiosity* , bạn có thể nhớ lại rằng nó đã mất hai năm để khám phá Cồn cát Bagnold trên sao Hỏa.
Bagnold và một nhóm nhà thám hiểm đồng nghiệp là những người đầu tiên đi qua sa mạc này vào đầu những năm 30, kết thúc cuộc hành trình mà Rohlfs đã không thể hoàn thành nửa thế kỷ trước đó. Họ điều hướng các seif trong các phương tiện cơ giới, để không khí thoát ra khỏi lốp của những chiếc Fords Model A của họ để lái và lướt

trên cát rời của cồn cát. Một trong những đồng nghiệp của Bagnold, một người Ireland tên là Pat Clayton, đang băng qua bờ một cồn cát như vậy vào tháng 12 năm 1932 thì bất ngờ nghe thấy một âm thanh lạo xạo bên dưới bánh xe của mình. Anh ra ngoài để điều tra và phát hiện ra rằng sa mạc được bao phủ bởi những tấm kính lớn màu vàng. Chỉ đến cuối những năm 1990, các nhà khoa học cuối cùng mới xác nhận rằng con bọ cánh cứng màu vàng hoàng yến ở trung tâm chiếc vòng cổ của Tutankhamen được chạm khắc từ chính chất liệu mà Pat Clayton đã nghiền nát cách đó hơn 500 dặm ở Biển Cát Lớn. Vị vua trẻ người Ai Cập được chôn cất tại Thung lũng của các vị thần cùng với một viên đá quý được lấy từ Vùng đất của người chết. Loại đá phát sáng này không được rèn như kim cương, ngọc bích và các loại đá quý khác qua hàng ngàn năm chịu nhiệt và áp suất trong lớp vỏ trái đất. Thay vào đó, nó được tạo ra trong chớp mắt bởi một ngôi sao băng. Thiên thạch đó 29 triệu năm trước đã biến cát thành một loại thủy tinh – thủy tinh sa mạc Libya.

Có những dạng thủy tinh khác xuất hiện trong tự nhiên. Obsidian, một loại đá đen tuyền được tổ tiên thời tiền sử của chúng ta sử dụng làm công cụ, thực chất là một loại thủy tinh núi lửa được hình thành bởi magma khi nó nguội đi nhanh chóng. thành đá. Có tektite: những viên sỏi thủy tinh được tạo ra bởi thiên thạch hoặc sao chổi đập vào bề mặt trái đất, những mảnh vụn sau đó hợp nhất thành những viên đá sáng bóng. Có những điểm sáng: những ống rỗng, gồ ghề mà đôi khi bạn tìm thấy trên bãi biển hoặc cồn cát sau khi bị sét đánh. Nhưng điều làm nên sự khác biệt của loại thủy tinh mà Clayton tìm thấy ở sa mạc là nó hoàn toàn tinh khiết, gần như không thể tin được.

Thành phần chính trong hầu hết các loại cát là silica – silicon dioxide hay đôi khi được biết đến là thạch anh. Và vì thủy tinh, nói một cách hay hơn, là *cát nóng chảy* , nên silica cũng là thành phần chính trong thủy tinh. Nhưng hàm lượng silica đó có thể thay đổi đáng kể. Những chiếc ly chúng ta uống hoặc để trên kính cửa sổ thường có khoảng 70% silica. Hàm lượng silica của obsidian và hầu hết tektite thường nằm trong khoảng từ 65% đến 80%. Mặt khác, hàm lượng silica trong thủy tinh sa mạc Libya lên tới 98%. Điều này không chỉ khiến nó trở thành loại thủy tinh tự nhiên tinh khiết nhất từng được phát hiện ở bất

cứ đâu mà nó còn tinh khiết hơn bất cứ thứ gì mà nhân loại có thể tạo ra - ít nhất là ở thời điểm hiện tại. [2]

Cát là bí ẩn lớn của Thế giới Vật chất.
Đồ đạc không thiếu. Hãy leo lên đỉnh của những cồn cát đó và nhìn ra Biển Cát Lớn và tất cả những gì bạn có thể thấy là một khung cảnh vô tận của silicon. Silicon trong các hạt dưới chân bạn, silicon trong các sàn hành lang ngăn cách các seif, silicon trong sa thạch Paleozoi của Gilf Kebir ở đường chân trời. Sau oxy, chất có khả năng tự gắn vào hầu hết mọi thứ khác, silicon là nguyên tố phổ biến nhất trong vỏ trái đất.
Với sự phổ biến này, có lẽ không có gì đáng ngạc nhiên khi chúng ta tìm thấy rất nhiều thứ khác nhau để làm với nó. Chúng ta đào, khai thác và khai thác nhiều cát từ lòng đất hơn bất kỳ vật liệu nào khác. Tuy nhiên, điều bí ẩn về mặt kinh tế của cát là ở một khía cạnh nào đó nó rất quý giá, nhiều đến mức Liên minh Châu Âu coi dạng tinh khiết nhất, nguyên tố nhất của mình là một nguyên liệu thô quan trọng. Trái đất được làm từ cát nhưng chúng ta vẫn thường xuyên nghe những câu chuyện về tình trạng thiếu hụt trầm trọng. Ở một số nơi trên thế giới có những mafia cát chiến đấu và giết chóc để giành quyền kiểm soát các hạt silicon. Dưới sự che chở của màn đêm, các nhóm nổi loạn đào các bãi biển và lòng sông rồi buôn lậu và buôn bán cát trên thị trường chợ đen.
Một số loại cát được đánh giá cao vì giá trị của chúng, một số vì vẻ đẹp của chúng, một số vì hình dạng hạt của chúng, một số khác vì độ tinh khiết của chúng. Ở Sardinia, chính quyền đã bắt đầu phạt người dân vì loại bỏ bãi cát trắng mang tính biểu tượng khỏi các bãi biển của nước này. Tại bãi biển Cleopatra, một vịnh trên một hòn đảo ngoài khơi bờ biển Anatolian của Thổ Nhĩ Kỳ, cát trắng khác thường được đánh giá cao đến mức bạn phải rửa sạch chân trước khi rời đi, để không vô tình mang theo một hạt nào. Ở nhiều nơi ở châu Á, hệ sinh thái sông đang bị đe dọa do nạo vét quá mức khi các công ty khai thác cát ở thị trường xám cố gắng thỏa mãn nhu cầu dường như không bao giờ ngừng về cát xây dựng và cốt liệu. Cuộc sống bị hủy hoại và môi trường bị đe dọa, tất cả đều nhằm mục đích theo đuổi thứ gì đó dường như có mặt ở khắp mọi nơi.

Ngoại trừ việc nói rằng nó ở khắp mọi nơi là không đúng, vì có nhiều loại cát khác nhau, mỗi loại có những đặc điểm riêng. Trong khi hầu hết các loại cát chủ yếu là silic, một số, đặc biệt là những bãi cát trắng tuyệt đẹp trên các bãi biển nhiệt đới, được cấu tạo chủ yếu từ một thứ khác: tàn tích dưới mặt đất của vỏ sò và san hô. Thật vậy, nếu bạn đang ở trên một bãi biển hoang sơ ở Caribe hoặc Hawaii, rất có thể chân bạn đang chìm trong phân của cá vẹt: cá ăn san hô, hút chất dinh dưỡng và thải lượng canxi cacbonat còn lại xuống đáy biển. Phần lớn, bãi biển càng trắng và ấm thì càng có nhiều khả năng nó đã thoát ra khỏi đáy của một con cá vẹt.

Câu hỏi cát được làm từ gì không chỉ mang tính chất tạm thời. Các nhà địa chất có một thứ gọi là Thang đo Udden–Wentworth, quy định rằng bất kỳ hạt rắn, rời nào có kích thước nhất định (nói đúng ra là nằm trong khoảng từ $0{,}0625$ mm đến 2 mm) đều là một loại cát. Nghịch lý thay, điều này có nghĩa là đường và muối thực chất lại là cát. Nhưng vì lợi ích của chúng ta, hãy bỏ qua thang đo Udden–Wentworth và tập trung chủ yếu vào 70% cát có thành phần chủ yếu là silic.

Hàm lượng silica trong cát rất quan trọng vì điều đó cuối cùng quyết định những gì bạn có thể làm với nó. Một số loại cát, bao gồm cả cát ở Biển Cát Lớn, tương đối giàu silica – đó là một phần lý giải tại sao thủy tinh ở sa mạc Libya lại tinh khiết đến vậy. Nhưng phần lớn cát mà bạn hoặc tôi dẫm lên có quá ít silic và quá nhiều tạp chất để có thể biến thành thủy tinh trong suốt hoặc các chip silicon. Tuy nhiên: một phần nguyên nhân khiến cát trở nên bí ẩn là trong tự nhiên không có hai nắm cát nào giống nhau.

Silicon cũng là một bí ẩn hóa học, kim loại nhưng không hoàn toàn là kim loại, dẫn điện nhưng chỉ theo cách riêng của nó. Nó có thể được chế tạo thành polymer, nhựa. Cát có thể rất mềm khi chạm vào nhưng mỗi hạt lại cực kỳ cứng, sức mạnh đáng kinh ngạc của nó giúp giải thích tại sao nó được sử dụng làm nền tảng vật chất của thế giới thế kỷ XXI. Nó đồng thời là nền tảng của những sản phẩm lâu đời nhất và mới nhất mà nhân loại đã học được cách chế tạo. Nó thúc đẩy nền văn minh.

Bạn thấy đấy, cát là chất cổ xưa nhất và hiện đại nhất. Chính sự biến đổi silicon của chúng tôi thành hạt, cốc và đồ trang sức đã đánh dấu

sự khởi đầu kỷ nguyên của *Homo faber* – nhà sản xuất con người. Tuy nhiên, chất này có thể được sử dụng để tạo ra điện thoại thông minh và vũ khí thông minh của thế kỷ XXI.

Ở đây, trên bãi biển và trên sa mạc, chúng ta có nhân vật chính đầu tiên. Trong một thời gian dài, các nhà hóa học đã tìm kiếm chìa khóa của thuật giả kim – cách biến chì và các kim loại kém hứa hẹn khác thành vàng. Nhiệm vụ đã thất bại, hoặc ít nhất là theo suy nghĩ thông thường. Nhưng chờ đã. Ngày nay, chúng ta thường xuyên biến silicon thành những sản phẩm có giá trị tương đương với vàng. Chúng tôi rèn nên những sản phẩm kỳ diệu từ cát vàng.

Vì chúng ta đã học được cách biến một chất trơ, rẻ tiền thành một thứ có giá trị đến vậy, có lẽ chúng ta không nên ngạc nhiên khi những kỹ năng này đã trở nên được đánh giá cao đến vậy. Khi chiến tranh thương mại nổ ra, cát thường là trung tâm của chúng. Khả năng Trung Quốc tự sản xuất chip silicon với mức độ phức tạp đặc biệt tương tự như chip được sản xuất ở Đài Loan và Hàn Quốc là mối lo ngại thường xuyên ở Washington ngày nay. Liệu nước này có phát triển máy tính lượng tử nhanh hơn và thành công hơn máy tính lượng tử ở Hoa Kỳ không?

Vì Bắc Kinh đã vượt qua các đối thủ của mình trong rất nhiều lĩnh vực kinh tế khác trong những năm gần đây, nên quyền lực tối cao về silicon của Trung Quốc có thể là điều không thể tránh khỏi, nhưng ít nhất tại thời điểm viết bài, chúng ta vẫn chưa đạt đến mức đó. Trung Quốc có thể thống trị ngành sản xuất thép, xây dựng, pin và điện thoại thông minh toàn cầu, và thậm chí gần đây hơn là mạng xã hội, nhưng lại là một ngành công nghiệp bán dẫn dẫn đầu thế giới? Chưa.

Tại sao? Một phần vì quá trình biến cát thành chip silicon, như chúng ta sẽ thấy ở phần sau của phần này, là một trong những kỳ công phi thường nhất của kỹ thuật. Thật vậy, nhiều kỹ thuật được sử dụng để tạo ra các bóng bán dẫn nhỏ đến mức có thể đo bằng nguyên tử nghe có vẻ xa vời đến mức ngay cả những người có trí tưởng tượng phong phú cũng phải chật vật mới hình dung được chúng. Và một phần là do các nhà lãnh đạo phương Tây sẽ không dừng lại ở việc ngăn cản Trung Quốc giành được ưu thế về công nghệ này. Họ quyết tâm ngăn chặn việc sở hữu trí tuệ, công cụ của thuật giả kim thế kỷ 21, trốn

thoát. Tuy nhiên, nghe có vẻ hiện đại nhưng cát vẫn luôn là trung tâm của công nghệ tiên tiến, rất lâu trước kỷ nguyên của chip silicon. Trong nhiều thế kỷ, các chính phủ đã cạnh tranh với nhau để kiểm soát một công nghệ hàng đầu khác có nguồn gốc từ cát, một công nghệ mang lại cho những người sử dụng nó sức mạnh sinh học. Công nghệ đó là kính. Giống như các chính phủ ngày nay cố gắng xây dựng ngành công nghiệp bán dẫn và lĩnh vực ô tô điện, những người tiền nhiệm của họ đã sử dụng mọi đòn bẩy có thể, từ chiến lược công nghiệp đến thủ đoạn công nghiệp, để kiểm soát việc buôn bán kính. Cũng giống như cách các nhà khoa học ngày nay bị ngăn cản buôn lậu bí mật của họ từ phương Tây sang châu Á, điều tương tự cũng xảy ra với các nghệ nhân của Murano, những người thợ thủ công đầu tiên học cách chế tạo ra loại thủy tinh thực sự trong, mỏng và đẹp. Họ bị đe dọa tử vong nếu cố gắng rời hòn đảo trong đầm phá Venice.

Khi khám phá ra cách tạo ra thủy tinh pha lê tuyệt đẹp, với sự giúp đỡ của những người thợ thủ công được đưa lậu ra khỏi Murano, thợ làm thủy tinh người Anh George Ravenscroft và các công nhân của ông đã từ chối tiết lộ thành phần bí mật (điều này có thể có ý nghĩa thương mại vào thời điểm đó, nhưng nhìn lại thì có vẻ vô trách nhiệm, cho rằng thành phần bí mật của anh ta là chì, một kim loại độc hại có thể ngấm vào đồ uống còn sót lại trong bình pha lê). Trong Chiến tranh Napoléon, nước Anh đã cố gắng bỏ đói thủy tinh ở Pháp. Trong những ngày đầu của Hoa Kỳ, các nhà sản xuất thủy tinh ở Anh bị cấm di cư đến đó bởi một chính phủ quyết tâm bảo vệ ngành công nghiệp nội địa thông qua các quy định và thuế. Chúng ta thường nhớ đến sự thất vọng của những người thực dân Mỹ thời kỳ đầu đối với thuế đánh vào trà, nhưng chúng ta ít biết đến sự thất vọng của họ đối với thuế đánh vào thủy tinh của Anh.

Vì vậy, không có gì mới về cuộc chiến công nghệ silicon. Đó là một cuộc chiến đã diễn ra trong nhiều thế kỷ, giữa các siêu cường khác nhau trên nhiều mặt trận và nhiều châu lục. Đó là một cuộc chiến đã xảy ra ở đủ nơi không ngờ tới, kể cả những ngóc ngách bị lãng quên của những vùng đất yên tĩnh, cách xa chiến tuyến hàng trăm dặm.

Thủy tinh

Khi xem xét sự phát triển của loài người, các nhà sử học kinh tế có xu hướng nhìn thẳng qua lăng kính. Tại sao cuộc cách mạng công nghiệp lại xảy ra khi nào và ở đâu: ở châu Âu vào thế kỷ 18 và 19? Có nhiều lý thuyết - về vai trò của các thể chế chính trị hoặc các tập tục xã hội và giáo dục hoặc địa lý. Đôi khi một hoặc hai cải tiến quan trọng có thể xuất hiện: ví dụ như động cơ hơi nước hoặc lò cao. Nhưng nếu bạn thừa nhận rằng chiếc kính có thể đóng một vai trò nào đó, bạn thường sẽ nhận được cái nhìn trống rỗng.

Nhưng thấu kính thủy tinh cho phép chúng ta nhìn vào không gian, giúp các nhà thiên văn học đầu tiên như Galileo khám phá ra rằng trái đất quay quanh mặt trời. Chúng đã giúp thúc đẩy sức mạnh kinh tế của các quốc gia bằng cách cho phép người dân làm việc nhiều hơn; cho đến khi phát minh ra thấu kính, những người mất thị lực sẽ phải nghỉ hưu sớm, nhưng nhờ thấu kính hai mặt lồi trong gọng kính, hàng triệu người đã có thể kéo dài thời gian làm việc của mình. Không ai nghi ngờ tầm quan trọng của những công nghệ mang tính đột phá như máy in. Nhưng thực tế là sự ra đời của nó trùng hợp với thị trường kính đại chúng cho phép một bộ phận đáng kể người biết chữ có thể đọc được thì sao?

Thấu kính và lăng kính thủy tinh cho phép các nhà khoa học như Robert Hooke và Antonie van Leeuwenhoek tạo ra những chiếc kính hiển vi đầu tiên trên thế giới để họ có thể nhìn vào một thế giới mà trước đây con người chưa từng thấy. Chính nhờ những dụng cụ thủy tinh này mà chúng ta đã biết được sự tồn tại của vi khuẩn, sự sinh sản của tế bào. Nhà kính cho phép các nhà làm vườn châu Âu điều chỉnh khí hậu theo ý muốn của họ.

Nhờ sự ra đời của gương thủy tinh – trước đó con người chủ yếu dựa vào bề mặt kim loại bóng loáng, vốn phản chiếu chỉ 1/5 ánh sáng – các nghệ sĩ thời Phục hưng có thể bất ngờ nhìn thấy thế giới từ một góc nhìn khác. Xem qua lời kể của những bậc thầy thời kỳ đầu như Leonardo da Vinci và bạn sẽ không còn nghi ngờ gì về vai trò của chất liệu mới này. Leonardo viết, chiếc gương là 'bậc thầy của các họa sĩ', được sử dụng như một công cụ tham khảo khi vẽ đồ vật. Thật vậy, có một trường phái tư tưởng, được họa sĩ David Hockney trình bày nổi tiếng nhất, cho rằng nhiều tác phẩm của các bậc thầy thời xưa chỉ có

thể được tạo ra với sự trợ giúp của các thiết bị quang học, bao gồm thấu kính và gương cong. [3]
Có phải là sự trùng hợp ngẫu nhiên khi thời kỳ Phục hưng xảy ra ở chính những nơi mà những chiếc gương hiệu quả và giá cả phải chăng đột nhiên xuất hiện - cho dù đó là miền bắc nước Ý hay Hà Lan? Có phải là sự trùng hợp ngẫu nhiên khi các quốc gia theo đuổi nghề sản xuất thủy tinh lại chính là nơi diễn ra thời kỳ Khai sáng và sau đó là cuộc cách mạng công nghiệp, trong khi các khu vực từ bỏ nghề thủ công này, chẳng hạn như Trung Quốc và phần lớn Trung Đông, lại suy thoái về kinh tế trong những thế kỷ tiếp theo? Một vài năm trước, hai nhà sử học, Alan Macfarlane và Gerry Martin, đã tiến hành một cách có phương pháp 20 thí nghiệm vĩ đại nhằm nâng cao kiến thức của con người - mọi thứ từ việc tạo ra buồng chân không của Robert Boyle và Robert Hooke đến lý thuyết ánh sáng của Isaac Newton cho đến những nghiên cứu về điện của Michael Faraday. – và phát hiện ra rằng tất cả ngoại trừ bốn người trong số họ đều dựa vào lăng kính, hộp đựng hoặc thiết bị kỳ lạ bằng thủy tinh. [4]
Nói cách khác, kính là một sự đổi mới nền tảng, một công nghệ có mục đích chung như bánh xe, động cơ hơi nước hoặc chip silicon. Sản phẩm kỳ diệu này quan trọng không chỉ vì bản chất của nó *mà* còn vì *những gì nó cho phép chúng tôi làm* – tạo ra những bước nhảy vọt xa hơn về trí tưởng tượng và những kỳ công trong phát minh. Quả thực, nó vẫn tiếp tục đóng vai trò đó cho đến tận ngày nay. Internet chủ yếu là một mạng lưới thông tin được truyền qua dây thủy tinh và như bạn sẽ thấy ở phần sau của phần này, nếu không có kính chúng ta sẽ không thể tạo ra bộ não của những máy tính tiên tiến nhất. Không tệ đối với một thứ mà cuối cùng chỉ là cát tan chảy.

Sản phẩm được sản xuất đầu tiên trên thế giới

Không ai biết chắc chắn ai là người đầu tiên phát minh ra thủy tinh. Câu chuyện có nguồn gốc sớm nhất và nổi tiếng nhất đến từ Pliny the Elder, một trí thức quân nhân La Mã đã chết trong vụ phun trào Vesuvius vào năm 79 SAU CÔNG NGUYÊN . Câu chuyện kể rằng nhiều thế kỷ trước, các thủy thủ người Phoenician đã đổ bộ lên một bãi biển ở vùng đất ngày nay là Israel. Người Phoenicia, những thương nhân vĩ đại thời cổ đại, đã nhập khẩu các khối natron, một dạng xà phòng giàu

natri ban đầu (natron là lý do tại sao ký hiệu hóa học của natri là Na). Trước khi đi ngủ, người Phoenicia đốt lửa trên bãi biển, và vì không còn nơi nào khác để đặt chậu, họ đặt chúng trên một số khối natron. Khi họ đốt lửa và làm nóng các khối natron, một điều phi thường đã xảy ra. Pliny viết: 'Khi nó chịu tác động của ngọn lửa, kết hợp với cát của bờ biển, họ nhìn thấy những dòng suối trong suốt chảy ra từ một chất lỏng cho đến nay vẫn chưa được biết đến: người ta nói rằng đây là nguồn gốc của thủy tinh.' [5]

Tài khoản nên được thực hiện với một nhúm muối. Trên thực tế, nghề chế tạo thủy tinh có lẽ đã được nhiều thế hệ phát hiện và khám phá lại ở nhiều môi trường khác nhau qua nhiều thời đại. Một số người cho rằng nó là do người Syria, số khác là do người Trung Quốc, số khác là do người Ai Cập. Một số người cho rằng những đổi mới đầu tiên bắt nguồn từ thời kỳ đầu tráng men gốm cách đây gần 10.000 năm. Những người khác đặt nó vào một thời điểm nào đó giữa thiên niên kỷ thứ hai và thứ ba TRƯỚC CÔNG NGUYÊN . Dù vậy, dù có ngụy tạo hay không, câu chuyện của Pliny vẫn nhấn mạnh bài học quan trọng nhất trong quá trình hóa học chế tạo thủy tinh.

Thách thức trong việc chế tạo thủy tinh là thành phần chính của cát, silica (silicon dioxide), tan chảy ở nhiệt độ cực cao—trên $1.700°C$, cao hơn nhiều so với bất kỳ ngọn lửa trần hoặc nguyên thủy nào. lò có thể quản lý. Tuy nhiên, thêm cái gọi là 'dòng' vào hỗn hợp và bạn có thể làm cho silica tan chảy và chảy (dòng) ở nhiệt độ thấp hơn nhiều. Thật vậy, hãy chọn chất trợ dung phù hợp và nó không chỉ làm giảm nhiệt độ nóng chảy hiệu quả của silica mà còn hấp thụ các tạp chất trong thủy tinh, giúp cải thiện sản phẩm cuối cùng.

Đối với tất cả những gì câu chuyện của Pliny nghe có vẻ như một câu chuyện cao siêu, có một số chi tiết có vẻ đúng, bắt đầu từ địa điểm. Theo lời kể của ông, tất cả chuyện này xảy ra gần cửa sông Belus, ngày nay được gọi là Na'aman. Các phân tích hiện đại cho thấy các hạt cát được tìm thấy nơi Na'aman đổ vào Vịnh Haifa có hơn 80% là silic, phần còn lại chủ yếu bao gồm các mảnh vỏ sò và đá vôi. Có rất ít tạp chất bạn thường tìm thấy ở cát ven biển.

Hóa ra người Phoenicia đã tình cờ tìm được loại cát hoàn hảo để chế tạo thủy tinh. Tỷ lệ silica và vôi là vừa phải, do đó nếu bạn thêm một ít natron vào hỗn hợp và đun nóng đủ, bạn sẽ thu được thứ ngày nay

được gọi là thủy tinh soda-vôi. Cùng với silica còn có natri cacbonat (thành phần chính trong natron) làm chất trợ chảy và rắc một ít vôi, giúp củng cố cấu trúc cuối cùng.
Thành thật mà nói, cấu trúc của kính có chút lộn xộn. Rõ ràng và hoàn hảo như nó có thể xuất hiện trước mắt chúng ta, ở cấp độ phân tử, thủy tinh trông giống như một quả bóng nguyên tử ngẫu nhiên. Thuật ngữ kỹ thuật cho sự lộn xộn này tùy thuộc vào người bạn đang hỏi: đối với một số nhà khoa học, nó là 'chất rắn vô định hình', đối với những người khác là 'chất lỏng siêu lạnh'. Về lý thuyết, nó vừa ở dạng lỏng vừa ở dạng rắn, tuy nhiên, xét theo cách hoạt động của nó, trên thực tế, nó thực sự là dạng rắn. Trái ngược với suy nghĩ thông thường, ở nhiệt độ phòng, thủy tinh không bao giờ hoạt động như một chất lỏng, thậm chí là chất lỏng có độ nhớt khó nhận thấy, thậm chí trong thời gian dài (mặc dù nó có thể 'đổ mồ hôi' nếu bạn không thêm đủ vôi vào hỗn hợp). Những tấm kính méo mó mà đôi khi bạn nhìn thấy trong cửa sổ kính màu cũ, phía dưới dày hơn phía trên, nhìn chung không như vậy vì kính dần bị võng theo thời gian. Trừ khi nhà thờ phải chịu đựng nhiệt độ hơn 400°C, rất có thể chúng không đồng đều vì đó là cách chúng bị thổi bay và đông cứng ngay từ đầu. Kính phẳng chỉ được phát triển vào thế kỷ 19 và chúng ta phải đợi đến giữa thế kỷ 20 mới có những tấm kính mỏng, phẳng thực sự.
Điều nghịch lý là, mặc dù nó là một trong những vật chất lâu đời nhất do con người tạo ra, các nhà khoa học vẫn phải vật lộn để hiểu tại sao thủy tinh lại hành xử như vậy. Thủy tinh dường như thách thức hầu hết các định luật phân tử. Như một người thợ thủy tinh đã nói, thủy tinh không phải là một vật liệu; đó là một tiểu bang Nó giống tính từ hơn danh từ. Philip Anderson, người đoạt giải Nobel Vật lý năm 1977, đã viết vài thập kỷ sau: 'Vấn đề chưa được giải quyết sâu sắc và thú vị nhất trong lý thuyết chất rắn có lẽ là lý thuyết về bản chất của thủy tinh và sự chuyển tiếp thủy tinh.' Nó vẫn chưa được giải quyết cho đến ngày nay. [6]
Bạn có thể nói điều gì đó tương tự về phần lớn Thế giới Vật chất của chúng ta. Loài người chúng ta đã làm chủ và tác động đến môi trường tự nhiên nhiều hơn bất kỳ loài nào khác trong lịch sử nhưng sự hiểu biết của chúng ta về chính xác những gì đang *xảy ra* với nó khi chúng ta thử nghiệm nó - đốt cái này hoặc định hình lại cái kia - vẫn còn

nông cạn một cách đáng ngạc nhiên. Cũng giống như việc chúng ta không hiểu đầy đủ tính chất vật lý của thủy tinh, chúng ta không hoàn toàn hiểu được điều gì đang xảy ra ở cấp độ phân tử khi bê tông đông kết, hoặc điều gì đang xảy ra trong lò nung khi chúng ta biến thạch anh thành silicon kim loại. Bí ẩn rất nhiều.
Tuy nhiên, sản phẩm cuối cùng, dù có vẻ bí ẩn, lại bắt đầu từ những hạt cát. Phần lớn được tạo nên từ kỹ năng chế tạo thủy tinh đặc biệt của những người thợ thủ công ở Murano, nhưng người ta lại ít nói về thực tế rằng Venice tình cờ có được vị trí hoàn hảo để cung cấp nguyên liệu thô cần thiết để làm ra loại thủy tinh đó. Cát có thể đến từ Lido – một bãi cát gần đó – và các địa điểm khác dọc theo bờ biển; tro soda có thể được chở từ Ai Cập hoặc Alicante; gỗ dùng cho lò nung có thể được mang xuống từ vùng hạ lưu dãy Alps ở Ý; đất sét từ Vicenza và muối từ Dalmatia. Cuối cùng, những người thợ thủ công nhận ra rằng họ có thể thu được cát tinh khiết hơn bằng cách rang và nghiền đá cuội thạch anh – *cogoli* , như họ gọi chúng – loại cát tốt nhất đến từ lòng sông Ticino, chảy từ dãy Alps của Thụy Sĩ đến miền bắc nước Ý. Thạch anh được nghiền xuống thu được có khoảng 98% silica. Nếu không có những hạt cát này thì sẽ không có ngành công nghiệp thủy tinh ở Venice. Đối với cát như vậy không phải là phổ biến. Điều này đặt ra một câu hỏi: ngày nay chúng ta lấy những cát này từ đâu? Nói cách khác, người ta có thể tìm được loại ngũ cốc hoàn hảo ở đâu? [7]

Hành trình tìm kiếm hạt thánh

Lochaline không phải là thị trấn xa xôi nhất ở Scotland, nhưng vẫn phải mất một chút thời gian để đến được: hành trình kéo dài ba đến bốn giờ từ Glasgow, đi phà và sau đó lái xe dài quanh co dọc theo những con đường một làn xuyên qua thung lũng này đến thung lũng khác, mỗi cái đều ngoạn mục hơn cái trước. Bạn cần một lý do chính đáng để đi du lịch đâu đó như thế này, nhưng thực tế là tôi đã có lý do lý tưởng. Tôi đang săn lùng hạt cát hoàn hảo.
Điều gì tạo nên hạt cát hoàn hảo phụ thuộc vào người bạn đang hỏi. Ai đó hy vọng sử dụng nó làm thành phần trong xi măng hoặc bê tông sẽ có khái niệm về sự hoàn hảo rất khác so với người có ý định rải cát đó trên hố cát hoặc sân bóng chuyền. Nhưng điều tôi theo đuổi thực

sự là một thứ rất đặc biệt: một trong những loại cát silic tinh khiết nhất thế giới.
Cát silic, nghĩa là cát có hơn 95% silic, có rất nhiều công dụng. Chúng ta cần chúng để lọc nước và làm khuôn đúc để bạn có thể đổ kim loại nóng chảy vào. Nếu không có cát silic, hệ thống đường sắt sẽ ngừng hoạt động, hay đúng hơn là nó sẽ không thể ngừng hoạt động vì những hạt cát này được sử dụng trong hệ thống phanh của tàu hỏa hiện đại. Nhưng trên hết, cát silic là thành phần chính trong sản xuất thủy tinh. Và nếu bạn muốn loại thủy tinh trong suốt nhất, tốt nhất, bạn cần loại cát silic tinh khiết nhất, đôi khi được gọi là cát bạc.
Những bãi cát bạc nổi tiếng nhất thế giới - ít nhất là đối với những người biết về những điều này - có lẽ là ở Fontainebleau, một khu rừng ngay phía nam Paris. Kim tự tháp thủy tinh nổi tiếng ở Louvre được làm bằng cát Fontainebleau. Có những bãi cát bạc ở Mol ở Bỉ, ở Maastricht ở Hà Lan và Lippe ở Đức, cũng như ở Canada, Mỹ, Brazil và các nơi khác trên thế giới. Nhưng mặc dù chúng không thực sự khan hiếm và cũng không phổ biến. Một số nước không có loại cát này; thực tế đó đã là giả định ở Anh trong một thời gian dài, cho đến khi phát hiện ra Lochaline khoảng một thế kỷ trước.
Cuộc hành trình của tôi ở đó chủ yếu diễn ra trong điều kiện mưa lớn, dội vào kính chắn gió khi tôi phóng qua Loch Lomond và qua Glen Coe, nhưng ngay khi tôi đến bến phà Corran, nó đột ngột dừng lại và nhường chỗ cho ánh nắng ấm áp tái tạo. Tôi đứng trên sân ga khi chiếc phà đi qua hồ Linnhe và thoáng nhìn thấy một thứ gì đó rất ấn tượng. Ở phía chân trời là một vết nứt dài chạy xa đến mức tôi có thể nhìn thấy, với những ngọn núi ở hai bên.
Thứ tôi đang nhìn chằm chằm là một loại vết sẹo địa chất, một đường đứt gãy cổ xưa đã từng chia đôi Scotland. Đây là Great Glen Fault, một thung lũng băng giá khổng lồ chạy theo hướng đông bắc đến tận Inverness. Vào một thời điểm nào đó trong khoảng từ 300 đến 400 triệu năm trước, vùng đất phía bắc tách ra khỏi vùng đất phía nam và trượt sang một bên, 64 dặm về phía bắc lên thung lũng.
Chúng ta biết điều này bởi vì các nhà địa chất đã so sánh đá ở phía bên này của đứt gãy với đá ở phía bên kia. Thật vậy, nhận thức này là một trong những dấu hiệu báo trước cho việc phát hiện ra tấm kiến tạo. Ý tưởng về các lớp vỏ lục địa lớn cọ xát vào nhau, hình thành các

ngọn núi ở đây, rạn nứt ở đó, tạo ra núi lửa và động đất và phun ra magma để trở thành đá mới, thực sự là mới lạ một cách đáng ngạc nhiên. Tuy nhiên, đối với phần lớn sự tồn tại của hành tinh, loại hoạt động đó - địa chất chứ không phải hoạt động sinh học - là trò chơi chính trong thị trấn.

Bạn có thể đã nghe nói về đồng hồ địa chất hoặc sự tương tự năm địa chất nhưng điều đó vẫn đáng được nhắc lại ở đây. Hãy tưởng tượng chúng ta nén toàn bộ sự tồn tại của hành tinh này vào một năm dương lịch: trái đất hình thành vào lúc nửa đêm ngày 1 tháng 1 và bây giờ, thời điểm bạn đang đọc nội dung này, chính là micro giây của nửa đêm, 365 ngày sau vào đêm giao thừa. Các sinh vật đơn bào sẽ bắt đầu hình thành vào cuối tháng Hai. Một số tảng đá lâu đời nhất hiện có sẽ hình thành vào đầu tháng Ba. Gneiss Lewisian, một loạt đá mà bạn sẽ tìm thấy ở xa hơn trên bờ biển từ Lochaline, sẽ hình thành vào tháng 4, tức là cách đây khoảng 3 tỷ năm. Nhưng sự sống như chúng ta có thể nhận ra, những loài côn trùng và bò sát đầu tiên, sẽ không tiến hóa cho đến đầu tháng 12, cùng thời điểm với Great Glen Fault đang chia cắt Scotland. Thời đại khủng long sẽ bắt đầu vào ngày 13 tháng 12 và kết thúc vào ngày 26 tháng 12. Thiên thạch đó có lẽ là nguyên nhân gây ra sa mạc Libya sẽ lao xuống Biển Cát Lớn vào sáng sớm ngày 29 tháng 12, trong khi những động vật giống người đầu tiên sẽ tiến hóa vào lúc 5h18 chiều, đầu buổi tối ngày 31 tháng 12. Còn *Homo sapiens thì sao* ? Chà, cuối cùng thì chúng ta cũng đã đến dự bữa tiệc muộn, cách đây vài trăm nghìn năm, nghĩa là: vào khoảng 15h đến nửa đêm của đêm giao thừa.

Nhìn thế giới qua lăng kính này – đôi khi người ta gọi nó là thời gian sâu thẳm – là một bài tập hữu ích, đặc biệt đối với những ai cho rằng câu chuyện về những vật liệu mà chúng ta đang sử dụng bắt đầu khi chúng ta kéo chúng ra khỏi mặt đất hoặc lắp ráp chúng lại trong một nhà máy. Khi tôi băng qua Đứt gãy Great Glen vào bán đảo Morvern và bắt đầu chặng cuối của chuyến lái xe tới Lochaline, tôi cũng đang du hành ngược thời gian sâu thẳm.

Nghe có vẻ khó tin nhưng khung cảnh lộng gió của những ngọn đồi và hồ nước này ngày xưa từng là một cửa sông cạnh biển nhiệt đới. Những bãi biển cát trắng rực rỡ như thạch anh sẽ bao quanh những con sóng vỗ, nơi động vật có vỏ và giáp xác ăn các sinh vật cực nhỏ

trong vùng nước êm dịu. Trải qua hàng chục triệu năm, biển đã mài mòn các ngọn núi và tự nhiên sàng lọc cát thành những hạt ngày càng tinh khiết hơn. Sau đó, đột nhiên, 60 triệu năm trước, tầm nhìn về thiên đường này đã bị xóa sạch bởi một vụ phun trào núi lửa khổng lồ, bao phủ toàn bộ bán đảo bằng dung nham.
Có rất nhiều manh mối rải rác xung quanh nếu bạn nhìn đủ gần. Đảo Mull thực sự là tàn tích của ngọn núi lửa đó; phần lớn hòn đảo được tạo thành từ cùng loại đá bazan đã bao phủ vùng đất Morvern. Ở một số dòng suối trên bán đảo, nước đã bào mòn lớp vỏ bazan để lộ ra những sa thạch trắng đính đầy thứ mà người dân địa phương gọi là 'móng chân của quỷ' - những loài động vật có vỏ hóa thạch trông hơi giống những móng vuốt khô héo nếu bạn nhổ chúng ra khỏi đá vừa phải. Nhưng đây không phải là kho báu duy nhất bị mắc kẹt dưới dung nham sau vụ phun trào đó.
Ở đây, bên dưới lớp vỏ đá núi lửa đó là những lớp cát bạc dày và sâu. Được cấu tạo từ 99% silica và hầu như không có một chút oxit sắt, loại cát này không giống bất kỳ loại cát nào bạn từng gặp trước đây. Nếu bạn đang muốn xây lâu đài cát thì bạn đã đến nhầm chỗ rồi. Cát Lochaline rất mịn và dạng bột, nó dễ dàng rơi qua ngón tay của bạn giống như đường bột. Nhìn vào nó qua kính hiển vi và bạn có thể thấy tại sao nó lại mềm hơn nhiều so với cát thông thường: các hạt có hình tròn và hình cầu, đã bị nghiền nát sau hàng triệu năm xói mòn và nén. Tuy nhiên, nó tạo ra thủy tinh rực rỡ và cực kỳ rõ ràng.
Điều bất thường đối với việc kinh doanh cát là thay vì khai thác cát ở đây, họ lại khai thác nó, đào sâu vào bán đảo Morvern. Nhìn bề ngoài, Lochaline cũng là một nơi xa lạ đối với một mỏ cát - xa xôi đến mức cách duy nhất để lấy cát đi là bằng đường nước và cách xa hàng trăm dặm các nhà máy, xí nghiệp sẽ biến nguyên liệu thô thành nơi có thể sử dụng được. sản phẩm. Vì cát nặng và không có giá trị đặc biệt so với nhiều thứ khác mà chúng ta khai thác từ lòng đất nên các mỏ đá thường nằm ở đâu đó gần nơi cần nguyên liệu. Nhưng hiếm có loại cát nào giống như cát Lochaline.
Đi vào mỏ có nghĩa là đi qua một trong những quảng cáo bên bờ hồ - lối vào đánh dấu sự bắt đầu của lòng đất. Nhưng trước khi đến đó, tôi phải tham gia buổi lễ diễn ra trước hầu hết các chuyến thăm như vậy: mang ủng và áo khoác dễ nhìn, buộc mặt nạ phòng độc khẩn cấp

quanh eo, hướng dẫn an toàn và điền đơn. Tại Lochaline, tất cả điều này xảy ra trong một ngôi nhà nhỏ gần lối vào mỏ, nơi từng là trụ sở chính kể từ những ngày đầu thành lập. Trên tường là một bản đồ vẽ tay đã mờ từ những năm 1940 'shewing' - cách đánh vần cũ - những đoạn văn đầu tiên được khắc vào đá sa thạch. Dựa vào nó là một kế hoạch cập nhật hơn. Trong bản đồ đầu tiên có một số đường hầm xuyên qua những ngọn đồi ở Lochaline. Trong lần thứ hai, mạng lưới nhỏ đó đã nở rộ thành một sơ đồ tổ ong khổng lồ gồm những hang động ăn sâu vào đá.

“Chưa ai đếm được nhưng nó phải hơn hai trăm dặm,” Ally Nudds nói khi chở tôi đến một trong những quảng cáo. Ally, người giám sát ca làm việc ở đây, là một trong số ít người biết đường đi qua khu mỏ. Đây là những đường hầm của anh ta; thỉnh thoảng anh ta sẽ chặn một lối đi và mở một lối đi khác để thông gió cho những khu vực sâu hơn của mỏ.

Sau một hoặc hai lần rẽ và rẽ, chúng tôi hoàn toàn chìm trong bóng tối, đường hầm chỉ được chiếu sáng bởi đèn pha của chiếc xe Jeep và sự phản chiếu của chùm tia trên mặt đá trắng chói mắt. Như chúng ta Đi sâu hơn, men theo lớp cát tinh khiết sâu hơn dưới lòng đất, tôi chợt nghĩ rằng chúng tôi đang đi dọc theo một bãi biển cổ xưa đã hết hạn sử dụng – một thiên đường hóa thạch hàng trăm triệu năm tuổi. Trong mười phút, chiếc xe lảo đảo trên nền cát như thể đang lái trên tuyết, cho đến khi chúng tôi đến một ngã ba đường và Ally tắt máy. Trong một khoảnh khắc chỉ có màu đen, sự im lặng và mùi dầu diesel phát ra từ động cơ. Tôi mò mẫm tìm công tắc trên chiếc đèn pin đội đầu và trèo ra khỏi xe tải.

“Đây,” anh ấy tuyên bố, “là loại cát tốt nhất mà chúng tôi từng khai thác. Bảy mươi phần triệu,” ông nói thêm, đề cập đến hàm lượng sắt trong cát. Đối với con mắt chưa qua đào tạo, nó trông giống như mọi đường hầm khác trong mỏ. Chúng tôi đứng đó một lúc nhìn lên bức tường trắng xám, sự im lặng chỉ bị phá vỡ bởi tiếng nước nhỏ giọt đâu đó trong bóng tối. Cuối cùng, sau khi chúng tôi tìm đường ra khỏi mỏ, đi qua một khu vực hiện đang bị ngập lụt và chỉ có thể đi bằng thuyền, xuyên qua mê cung đường hầm để quay trở lại vùng mưa Scotland, tôi sẽ hiểu tại sao những người thợ thủy tinh lại ghét sắt đến vậy. . Trở lại ngôi nhà, người quản lý văn phòng Veronique

Walraven cho tôi xem hai chai, một chai làm bằng 'cát của tôi', như cô ấy gọi, và chai kia làm bằng cát thủy tinh điển hình hơn, với thêm vài phần triệu sắt. Một chai có màu xanh lục ở phần dày nhất; cái còn lại, chai cát Lochaline, gần như trong suốt hoàn toàn.
Một chiếc ly trong suốt có vẻ như là một thứ xa xỉ không cần thiết đối với tất cả mọi người, ngoại trừ những người sành rượu whisky kén chọn nhất hoặc những người hay dán kính cửa sổ, nhưng hóa ra điều này lại vô cùng quan trọng. Độ trong của thủy tinh và do đó độ tinh khiết của cát tạo ra nó tạo nên sự khác biệt lớn khi thủy tinh đó được sử dụng cho mục đích quang học. Và nếu không có kính quang học, đặc biệt là các loại thấu kính bạn cần cho ống nhòm, kính tiềm vọng và ống ngắm súng, mỏ này có thể sẽ không bao giờ mở ra được. Điều đó đưa chúng ta đến Thế chiến thứ nhất, nơi thủy tinh đóng một vai trò trong một trong những câu chuyện phi thường nhất của lịch sử quân sự hiện đại.

Nạn đói thủy tinh

Đó là vào cuối mùa hè năm 1915. Quân đội Đồng minh đang sa lầy trong chiến hào với quân Đức ở Mặt trận phía Tây. Xa hơn về phía nam ở Thổ Nhĩ Kỳ Ottoman, quân đội Anh và Anzac đã bị bao vây trong nỗ lực giành quyền kiểm soát Dardanelles.
Khi cuộc giao tranh nổ ra, một đặc vụ được bí mật phái từ Bộ Bom, đạn ở London đến Thụy Sĩ. Nhiệm vụ của anh là đảm bảo vận chuyển một trong những công nghệ quân sự cần thiết nhất cho kho vũ khí của Anh: kính dã chiến.
Trong thời đại mà bất kỳ ai cũng có thể dễ dàng đặt mua một cặp ống nhòm giá rẻ để giao hàng vào ngày hôm sau, gần như không thể tin được rằng quyền lực tối cao của quân đội lại có thể phụ thuộc vào sự sẵn có của những công cụ dường như không có gì đặc biệt như thế này. Tuy nhiên, trong phần lớn thế kỷ 20, họ đại diện cho công nghệ tiên tiến nhất. Quả thực, như chúng ta sẽ sớm thấy, ở một số khía cạnh họ vẫn làm như vậy. Vào năm 1915 họ chắc chắn đã làm được.
Hầu hết các cuộc chiến tranh trước đây đều có xu hướng cận chiến. Súng và pháo chủ yếu được nhắm bằng mắt thường vì tầm bắn của chúng nhìn chung khá ngắn. Tuy nhiên, đến đầu thế kỷ 20, vũ khí đã tiến bộ đến mức đạn pháo có thể được đẩy đi xa hàng chục dặm,

khiến máy đo khoảng cách quang học thích hợp trở nên tuyệt đối cần thiết. Những khẩu súng lớn nhất chỉ hữu ích nếu chúng có thể nhắm được. Tỷ lệ cược nghiêng về những người có đủ ống nhòm để giúp quân đội của họ quét đường chân trời từ chiến hào và sóng, những người có tay bắn tỉa giỏi nhất với súng trường mạnh nhất và ống ngắm kính thiên văn dài nhất.
Và vào năm 1914, khi Thái tử Franz Ferdinand của Áo và vợ bị ám sát, gây ra phản ứng dây chuyền điều đó sẽ dẫn đến chiến tranh, không còn nghi ngờ gì nữa, lợi thế nghiêng về ai: Đức. Trong những thập kỷ trước, Đức đã giành được quyền kiểm soát nguồn cung cấp quang học chính xác toàn cầu - ống nhòm, kính thiên văn, kính tiềm vọng và máy đo khoảng cách, cũng như nhiều loại thấu kính khoa học khác. Đây không hoàn toàn là một vấn đề học thuật hay kinh tế. Sự độc quyền hoàn toàn của Đức về ống ngắm súng trường ống lồng đến mức khi bắt đầu cuộc chiến, các tay súng bắn tỉa của nước này đã có được lợi thế đáng kể. Quân đội đồng minh thường xuyên bị khủng bố bởi các xạ thủ người Đức, những người dường như có thể thách thức các định luật vật lý bằng cách giết chóc từ rất xa.
Tên thương hiệu được khắc trên mặt bên của gần như tất cả các ống ngắm súng trường này là Zeiss và kính bên trong chúng đến từ một công ty riêng biệt, nếu có liên quan: Schott. Otto Schott là một nhà hóa học người Đức, người đã dành phần lớn cuộc đời mình để thử nghiệm các cách cải thiện thủy tinh, thêm từng nguyên tố từ bảng tuần hoàn vào hỗn hợp nóng chảy, để xem chúng sẽ tạo ra những loại hiệu ứng nào. Chính Schott là người đã phát minh ra loại thủy tinh borosilicate mà chúng ta vẫn sử dụng ngày nay trong các dụng cụ nấu nướng và lọ vận chuyển vắc xin COVID-19. Schott, Carl Zeiss và nhà khoa học Ernst Abbe, tất cả đều làm việc cùng nhau tại thị trấn Jena của Thuringian, ngày nay được nhiều người coi là những nhân vật chủ chốt trong ngành chế tạo thủy tinh chính xác.
Đến năm 1914, Anh phụ thuộc vào Đức, hay đúng hơn là Zeiss, với khoảng 60% tổng lượng kính chính xác của nước này (Pháp cung cấp 30% tiếp theo và chỉ 10% đến từ các công ty trong nước, dẫn đầu là Chance Brothers of Smethwick ở phương Tây. Trung du). Vào tháng 6 năm đó, ngay trước vụ ám sát thái tử, Hiệp hội Khoa học Anh đã viết rằng

Nước Anh đã tụt hậu rất xa trong quá trình phát triển ngành sản xuất quang học đến mức không những không thể đáp ứng các yêu cầu khoa học và công nghiệp của mình mà ở thời điểm hiện tại, nước này không thể sản xuất đủ số lượng cho dịch vụ nếu không có sự trợ giúp. của Quân đội và Hải quân về các thiết bị hỗ trợ quang học rất quan trọng trong chiến tranh hiện đại. số 8
Sau khi tuyên chiến, nguồn cung cấp của Đức bị cắt ngay lập tức. Nhu cầu về binh lính của Pháp đồng nghĩa với việc hoạt động xuất khẩu của nước này cũng bị hạn chế, khiến quân đội Anh phải đối mặt với tình trạng thiếu hụt trầm trọng. Vào tháng 9 năm 1914, một trong những ngôi sao hàng đầu của Quân đội Anh, Thống chế Roberts, đã đưa ra 'lời kêu gọi gần như tuyệt vọng' để công chúng tặng bất kỳ ống nhòm, kính xem opera và kính viễn vọng nào nằm trong nhà của họ cho quân đội đang tiến tới chiến hào. Chỉ trong vài tuần, hơn 2.000 chiếc đã được quyên góp, trong đó có 4 đôi của nhà vua và hoàng hậu. Một cử chỉ tốt đẹp, nhưng nó vẫn chưa đủ so với con số hàng chục nghìn, thậm chí có thể là hàng trăm nghìn, cần thiết cho các lực lượng vũ trang.
Khi mùa thu nhường chỗ cho mùa đông rồi đến mùa xuân, các tờ báo đăng tải những quảng cáo bơ vơ và yêu cầu mua kính dã chiến của những người lính trên đường ra mặt trận. Một số người gọi nó là 'nạn đói thủy tinh' - một ví dụ điển hình về những gì sẽ xảy ra khi một quốc gia gần như độc quyền trong một ngành công nghiệp cụ thể, được rèn từ những hạt cát. Mặc dù có rất nhiều công ty Anh có khả năng lắp ráp ống nhòm nhưng tất cả họ đều dựa vào kính từ Đức.
Điều này đưa chúng ta quay trở lại năm 1915 và điệp viên bí mật đó, được Bộ Bom, đạn phái đến Thụy Sĩ trung lập. Tại sao bí mật? Bởi vì anh ta được yêu cầu làm điều gì đó phi thường. Nhiệm vụ của anh ta, theo lời tường thuật từ lịch sử chính thức của bộ phận anh ta, là mua ống nhòm từ chính đất nước mà nước Anh đang chiến đấu:
Các cuộc điều tra sơ bộ đã đưa đến kết luận rằng quốc gia duy nhất có thể cung cấp số lượng lớn các dụng cụ quang học là Đức, và để tránh tình trạng gián đoạn trong việc cung cấp các dụng cụ thiết yếu này, một đại diện của Bộ Bom, đạn được cử đến Thụy Sĩ vào tháng 8 năm 1915 để xác minh xem liệu có thể lấy được các thiết bị từ các nguồn của Đức hay không.

Điều duy nhất đáng chú ý hơn việc người Anh yêu cầu người Đức giúp đỡ là điều xảy ra tiếp theo: Đức đồng ý.
“Thông qua các kênh của Thụy Sĩ, người ta đã xác định chắc chắn, từ thông tin nhận được từ Đức, Văn phòng Chiến tranh Đức sẽ sẵn sàng cung cấp cho Chính phủ Anh những chiếc ống nhòm sau đây,” tài khoản chính thức đọc trước khi liệt kê các nguồn cung cấp: 32.000 ống nhòm ngay lập tức, 15.000 một tháng trong tương lai – tóm lại là đủ để giải quyết mọi vấn đề ngoại trừ sự thiếu hụt của nước Anh. Và không chỉ vậy: người Đức còn cung cấp 500 ống ngắm súng trường ống lồng và thêm 5.000 đến 10.000 ống ngắm mỗi tháng. “Để có được mẫu dụng cụ,” bản ghi tiếp tục, với vẻ tự tin, “người ta đề nghị rằng Lực lượng Anh có thể kiểm tra trang bị của các sĩ quan và pháo binh Đức bị bắt.” 9
Đó là một câu chuyện đáng kinh ngạc, nhưng có đủ chi tiết chứng thực trong hồ sơ chính thức của Anh cho thấy nó cực kỳ nghiêm trọng. Tại sao Đức lại sẵn sàng cung cấp cho Anh công nghệ có thể dùng để giết người Đức? Hóa ra, câu trả lời chính là họ rất cần một thứ gì đó: cao su. Không chỉ Anh và các đồng minh - hay đúng hơn là các thuộc địa của nước này - nằm trong số những nhà sản xuất cao su lớn nhất thế giới, họ còn phong tỏa thành công hàng nhập khẩu từ Đức, khiến đất nước thiếu nguồn tài nguyên mủ cao su thiên nhiên, một thành phần thiết yếu trong lốp xe, săm và đai quạt trong động cơ. Vì vậy, người Đức yêu cầu cao su để đổi lấy ống nhòm của họ với, theo báo cáo chính thức, 'sự bồi thường sẽ được thực hiện ở Thụy Sĩ ở biên giới nước Đức'. fn1
Điều gì xảy ra tiếp theo vẫn là chủ đề của một số cuộc tranh luận. Lịch sử chính thức của Bộ cho thấy rằng bất chấp thỏa thuận bất hợp pháp này, thay vào đó, Vương quốc Anh vẫn quyết định tìm kiếm nguồn cung từ nơi khác, bao gồm cả Mỹ. Nhưng dữ liệu thương mại cho thấy Vương quốc Anh thực sự đã nhận ống nhòm của Đức trong những năm tiếp theo. Khi Guy Hartcup, nhà sử học quá cố về công nghệ quân sự, điều tra vấn đề này cách đây vài năm, ông tình cờ thấy một bản ghi nhớ trong Cục Lưu trữ Quốc gia Anh nói rằng 32.000 đôi đã được chuyển giao vào tháng 8 năm 1915. Ghi chú đó dường như sau đó đã bị xóa khỏi các hồ sơ liên quan. 10

Cao su và thủy tinh. Trong một thời gian, sự thiếu hụt những vật liệu này được coi là trầm trọng đến mức các cường quốc sẵn sàng đình chỉ các quy tắc chiến tranh thông thường. Những dịp như vậy đáng để nghiên cứu vì có một điều là chúng hiếm khi xảy ra. Trong phần lớn cuộc đời mình, chúng ta có thể giả định một cách an toàn rằng một vật phẩm nhất định, cho dù đó là một cặp ống nhòm, chất bán dẫn hay một cục kim loại cơ bản, đều có thể dễ dàng có nguồn gốc từ nơi này hay nơi khác trên thế giới. Nhưng thường thì một thảm họa, có thể là chiến tranh, đại dịch hay một con tàu không may bị kẹt ở kênh đào Suez, buộc chúng ta phải suy nghĩ kỹ.

Điều đáng chú ý là hiếm khi giá của những hàng hóa đó phản ánh được tầm quan trọng của chúng. Nhìn vào tài khoản quốc gia của bất kỳ quốc gia rộng lớn và thật đáng kinh ngạc khi xem xét lượng nguyên liệu thô được phản ánh trong GDP quốc gia. Đáng kinh ngạc, bởi vì nó rất nhỏ.

Có một logic kinh tế rõ ràng và thuyết phục cho vấn đề này: các số liệu thống kê như tổng sản phẩm quốc nội cuối cùng là thước đo xem mọi người sẽ trả bao nhiêu cho một mặt hàng nhất định và 99 trong số 100 nguyên liệu thô - dù là kim loại, khoáng sản hay thực phẩm - đều khá rẻ. . Nhưng giá cả không đồng nghĩa với giá trị, và đôi khi, trong những hoàn cảnh đặc biệt như chiến tranh – "cú sốc cung", các nhà kinh tế gọi chúng – bạn sẽ kết thúc ở tình trạng mà người Anh và người Đức đã kết thúc vào năm 1915: chuẩn bị trao đổi những hàng hóa quan trọng mà tốt hơn là giết nhau. Bạn sẽ thấy các sĩ quan hải quân từ các phía khác nhau cầm ống nhòm được sản xuất trong cùng một nhà máy, như đã xảy ra ở Biển Bắc năm 1916, khi hạm đội Anh và Đức đụng độ trong Trận Jutland. Khi bom trút xuống xung quanh con tàu của anh ta, một sĩ quan Anh nhận xét rằng thật "thú vị" khi "Hun đậu trên một trong những cột buồm xa xôi" đang quan sát hạm đội Anh "qua cặp ống nhòm Zeiss và tôi cũng đang quan sát". con tàu của anh ấy thông qua một cặp Zeiss tương tự. [11]

Thủy tinh và sự phát minh ra chiến lược công nghiệp

Điều trớ trêu là trong một vũ trụ song song, những chiếc kính viễn vọng được đánh giá cao đó lại không phải được sản xuất bởi Zeiss của Jena mà bởi Chance Brothers của Smethwick. Cho đến thế kỷ 19,

nước Anh vẫn được nhiều người coi là nhà sản xuất thủy tinh chất lượng hàng đầu thế giới, với những sản phẩm đến từ Bohemia được coi là chất lượng kém và đáng thất vọng. Rất lâu trước khi Otto Schott bắt đầu thử nghiệm các công thức nấu ăn bằng thủy tinh, mục sư và chính trị gia người Anh William Vernon Harcourt cũng đã làm điều tương tự, ném berili, cadmium, flo, lithium, magie, molypden, niken, vonfram và vanadi vào hỗn hợp tan chảy để xem điều gì thành hiện thực. Ở một giai đoạn, ông thậm chí còn bổ sung thêm uranium, tạo ra đồ thủy tinh phát sáng màu xanh kỳ lạ dưới tia cực tím. Nhiều thập kỷ trước khi Schott phát minh ra thủy tinh borosilicate nổi tiếng, Michael Faraday, được biết đến nhiều nhất ngày nay với tư cách là nhà khoa học có những khám phá về điện từ và điện phân đã giúp mở ra kỷ nguyên điện, đã tạo ra một dạng thủy tinh borosilicate chì.
Việc chuyển giao quyền lực tối cao về quang học từ Anh sang Đức - một siêu cường kinh tế nhường lại vị trí dẫn đầu về công nghệ - là một trong những khoảnh khắc thường xuyên nhấn mạnh câu chuyện về Thế giới Vật chất. Quả thực, trong khi Anh có lẽ là nước sản xuất thủy tinh hàng đầu thế giới vào thế kỷ 18, thì lớp vỏ đó đã được truyền đi rất nhiều lần trong suốt lịch sử lâu dài của ngành sản xuất thủy tinh: từ Murano ở Venice, từ Rome, từ Syria và từ Ai Cập – một chuỗi dài đổi mới đó phân định nền văn minh nhân loại.
Ngày nay chúng ta coi kính quá nhiều đến nỗi chúng ta có xu hướng quên mất nó được làm từ chất liệu gì. Đối với các thế hệ trước thì không như vậy; quả thực, vào thế kỷ 17, khi George Ravenscroft tạo ra thủy tinh pha lê chì – hay chính xác hơn là khi một trong những nhân viên người Ý của ông làm điều đó – ông đã gọi nó là thủy tinh đá lửa theo tên đá lửa thạch anh được tìm thấy khắp phần lớn vùng đông nam nước Anh. Thành phần chính thay đổi từ đá lửa sang cát silic trong những năm sau đó nhưng cái tên vẫn giữ nguyên.
Trong khi thủy tinh đá lửa bắt đầu như một bộ đồ ăn, chẳng bao lâu sau, các nhà sản xuất ống kính đã phát hiện ra một điều thú vị - một điều được minh họa rõ nhất nếu bạn đổ đầy nước vào ly và nhét ống hút vào đó. Nhìn xuống tấm kính đó, bạn có thể sẽ nhận thấy ống hút trông có vẻ cong. Tại sao? Bởi vì ánh sáng mất nhiều thời gian hơn để truyền qua nước so với truyền qua không khí hoặc chân không – chính xác là lâu hơn 1,33 lần. Con số đó, chiết suất, là một trong

những chỉ số quan trọng nhất những con số trong khoa học, vì hiểu được cách bẻ cong ánh sáng cho phép bạn bắt đầu uốn cong nó theo ý muốn của mình.
Hóa ra, kính đá lửa có chỉ số khúc xạ cao hơn kính soda-vôi thông thường (đôi khi được gọi là kính vương miện). Bằng cách kết hợp một lớp kính đá lửa với một lớp kính vương miện, bạn có thể tạo ra thấu kính trong suốt như pha lê, có thể phóng to hình ảnh mà không làm khúc xạ chúng. Nguyên lý kết hợp kính với các chiết suất khác nhau này vẫn là một trong những nguyên lý cơ bản của quang học hiện đại. Dây cáp quang có thể truyền ánh sáng thành công trên khoảng cách xa vì nó kết hợp lõi thủy tinh bên trong với lớp kính bọc bên ngoài có chiết suất khác. Thay vì thoát ra khi chạm vào mép sợi, ánh sáng bị bẻ cong vào bên trong. Bạn có thể đã từng chứng kiến hiện tượng này, như người ta gọi là 'phản xạ toàn phần'. Đó là lý do tại sao bề mặt của bể bơi hoặc bể cá đôi khi trông giống như một tấm gương khi bạn nhìn nó từ dưới nước.
Khám phá này có nghĩa là trong phần lớn thế kỷ 17 và 18, nước Anh đã trở thành trung tâm hàng đầu về sản xuất thủy tinh thương mại lẫn quang học tiên tiến. Nhìn lại lịch sử và bạn bắt gặp một mô hình kỳ lạ: trong mỗi thời đại, nguyên tắc chung là sức mạnh kinh tế đang lên cũng có xu hướng trở thành trung tâm toàn cầu về sản xuất thủy tinh. Từ người Ai Cập cổ đại đến người La Mã đến người Venice vào thế kỷ 13 và người Hà Lan vào thế kỷ 16, đến người Anh và người Pháp vào thế kỷ 18, cho đến người Đức vào năm 1914.
Câu chuyện về việc Đức đã vượt qua Anh như thế nào trong cuộc đua công nghệ này có phần nào đó nhờ vào công sức của Otto Schott, người đã thử nghiệm ở Jena để tạo ra ngành công nghiệp quang học hiện đại, nhưng nó cũng có thể bắt nguồn từ một thứ còn trần tục hơn nhiều: thuế. Bạn có thể đã nghe nói về thuế cửa sổ, được áp dụng lần đầu tiên vào năm 1696, dưới thời trị vì của William III. Chuyện này đã lâu rồi trước khi áp dụng thuế thu nhập và trong nỗ lực quyên tiền, chính phủ lý luận rằng ai đó càng khá giả thì nhà của họ càng lớn và càng có nhiều cửa sổ, vì vậy họ đánh thuế mọi người dựa trên số lượng cửa sổ trong tài sản của họ. Kết quả là nhiều chủ nhà đã đóng gạch cửa sổ trong nỗ lực giảm hóa đơn thuế; ngày nay bạn vẫn có thể thấy nhiều cửa sổ 'mù' như vậy trên khắp nước Anh.

Tuy nhiên, thuế cửa sổ không phải là thuế kính duy nhất, vì còn có một loạt thuế, ngày nay hầu như bị lãng quên, đối với chính sản xuất kính. Các loại thuế này được áp dụng từ năm 1745 đến năm 1845, được áp dụng đối với mọi thứ, từ kính cửa sổ đến kính đá lửa, nguyên liệu thô và sau đó là thành phẩm. Thủy tinh càng nặng thì thuế phải nộp càng cao, dẫn đến hậu quả là trong một thời kỳ, chỉ những người giàu nhất mới mua những ly pha lê nặng và xây dựng nhà kính. Trong khi đó ngành công nghiệp này đã bị tê liệt bởi những cáo buộc này đối với hoạt động. Trong khi một số người nghiệp dư như William Vernon Harcourt tiếp tục thử nghiệm các công thức thủy tinh mới thì hầu hết các doanh nghiệp sản xuất thủy tinh đều hợp nhất. Vào thời điểm Thuế tiêu thụ đặc biệt bằng thủy tinh bị bãi bỏ vào năm 1845, thiệt hại đã xảy ra. Chance Brothers, nhà sản xuất kính kỹ thuật hàng đầu của Anh, tập trung vào việc cải thiện chất lượng của kính tiêu chuẩn thay vì thuê các nhà khoa học để nghĩ ra công thức mới.
Ý tưởng rằng nước Anh có thể mất vị trí ưu việt trong ngành này đôi khi được nêu ra trong Quốc hội, nhưng mệnh lệnh kinh tế chủ đạo của thế kỷ 19 là mở cửa hơn là bảo vệ. Như một báo cáo của chính phủ đã đưa ra vài năm sau Thế chiến thứ nhất, 'Trong gần một thế kỷ, đất nước đã thịnh vượng theo học thuyết chủ nghĩa cá nhân của trường phái *Laisser-Faire* [*sic*]; Thương mại Tự do đã phát triển mạnh mẽ trong hơn bảy mươi năm.' [12]
Trong khi đó, ở Phổ, nhà nước hỗ trợ tài chính và đảm bảo đơn hàng cho ngành thủy tinh non trẻ, một loại hình sản xuất thủy tinh mới ra đời. Chiến lược công nghiệp thế kỷ 19 do nhà thơ Johann Wolfgang von Goethe dẫn đầu, nghe có vẻ kỳ lạ. Schott, Abbe và Zeiss đã được dành thời gian và hỗ trợ để thử nghiệm. Những khám phá của họ về các công thức thủy tinh mới với nhiều hành trạng và chiết suất khác nhau, cũng như thành công của họ trong việc sản xuất hàng loạt chúng, có nghĩa là trong khoảng vài thập kỷ, Đức đã trở nên thống trị hoàn toàn về quang học chính xác, một vị trí mà nước này nắm giữ khi chiến tranh nổ ra. 1914.
Sẽ đi quá xa khi đổ lỗi nạn đói thủy tinh ở Anh là do thuế và các chính sách kinh tế tự do kinh tế. Sự trỗi dậy của ngành sản xuất thủy tinh ở Đức không phải là một sự may mắn – còn xa mới như vậy. Quả thực, các ngành công nghiệp hóa chất và dược phẩm của Đức đang làm

điều gì đó tương tự như các ngành công nghiệp thủy tinh của họ: các doanh nghiệp đang thực hiện các ngành nghề từng được coi là thủ công và giới thiệu các kỹ thuật khoa học nghiêm ngặt. Ở Đức, vào thế kỷ 19, hoạt động nghiên cứu và phát triển đã ra đời. Thế giới Vật chất đang được coi trọng.
Tuy nhiên, điều đáng chú ý về những gì xảy ra tiếp theo là nước Anh đã nhanh chóng bắt kịp được. Sau thời kỳ suy thoái năm 1915 và hoạt động buôn bán thủy tinh-cao su bí mật đó, Bộ Bom, đạn đã đổ tiền và nhân công vào sản xuất thủy tinh. Trong vòng vài tháng, các nhà khoa học Anh đã có thể thiết kế ngược nhiều sản phẩm thủy tinh của Đức và đến cuối chiến tranh, Vương quốc Anh đã sản xuất đủ thủy tinh để cung cấp cho quân đội của mình và một số đồng minh. Bài học, nếu có, là nếu có đủ nỗ lực và hỗ trợ thì việc trẻ hóa các ngành công nghiệp của một quốc gia là hoàn toàn có thể. Nhưng mặc dù kiến thức chuyên môn có thể học được nhưng nó không thể tạo nên những nguyên liệu thô mà bạn cần để tạo ra mọi thứ.
Trong Thế chiến thứ nhất, nước Anh may mắn vẫn tiếp cận được cát Fontainebleau – nguyên liệu chính cho ngành công nghiệp quang học. Tuy nhiên, nó đã bị cắt hoàn toàn khỏi nguồn cung cấp kali của Đức, vốn đã cung cấp dòng chảy cho các nhà sản xuất thủy tinh – giống như những khối natron dành cho Người Phoenicia hàng thiên niên kỷ trước. Thiếu nguồn tài nguyên này, nước Anh buộc phải ứng biến. Theo các báo cáo chính thức, khi nói đến việc thay thế kali của Đức, Đã nhận được nhiều đề xuất đa dạng nhất, từ việc sử dụng lê gai, dương xỉ và vỏ dừa [*sic*] cho đến việc sử dụng bụi khói từ các máy hủy rác của thị trấn. Mỗi vấn đề đều được xem xét và theo dõi cẩn thận, các cuộc điều tra thực tế sẽ được tiến hành nếu cần thiết. Cuối cùng, Anh đã có thể thu thập đủ kali - một phần từ các nguồn độc đáo như bụi còn sót lại từ quá trình sản xuất thép trong lò cao và một phần nhờ vào nhập khẩu từ Nga và Ấn Độ. [13]
Chiến tranh thế giới thứ hai lại là một vấn đề khác. Lãnh thổ bị Đức Quốc xã chiếm trong cuộc xâm lược Pháp bao gồm các mỏ cát Fontainebleau. Các nhà máy quang học của Anh, vốn có năng lực như hiện nay, gần như trở nên vô dụng nếu không có đủ cát để nấu chảy thành thấu kính. Vì vậy, các quan chức đã được phái từ Glasgow băng qua Corran Narrows và Great Glen Fault, xuôi theo

bán đảo Morvern đến Lochaline, để điều tra xem liệu địa điểm ít người biết đến ở một trong những góc xa xôi nhất nước Anh này có thể giải cứu ngành công nghiệp thủy tinh hay không.
Mỏ cát thạch anh Lochaline được khai trương vào mùa hè năm 1940 và trong những năm tiếp theo nó sẽ trở thành một bánh răng quan trọng trong cỗ máy chiến tranh của Anh, sản xuất cát được vận chuyển về phía nam tới các nhà máy quang học, nơi nó được nấu chảy và chế tạo thành thấu kính cho ống nhòm, kính tiềm vọng và kính ngắm. Rất lâu trước khi có người đưa ra khái niệm về khoáng sản quan trọng, Lochaline là một địa điểm có tầm quan trọng về quân sự và quốc gia - ngay cả khi rất ít người biết đến sự tồn tại của nó. Khi bom trút xuống London, Coventry và các khu vực khác của Vương quốc Anh, bãi cát bạc ở đây được kêu gọi đóng vai trò giải cứu nước Anh khỏi Đức Quốc xã.
Tiết kiệm trong khoảng thời gian ba năm sau cuộc suy thoái năm 2008, mỏ đã hoạt động kể từ đó. Đây hầu như không phải là một hoạt động lớn: có khoảng 30 người làm việc ở đây từ ngôi nhà nhỏ ven hồ cùng các đường hầm và máy móc nơi khai thác và sàng lọc cát - mặc dù điều đó vẫn khiến nó dễ dàng trở thành nhà tuyển dụng lớn nhất ở thị trấn khoảng 200 dân này. mọi người.
Ngày nay, mỏ này được điều hành dưới hình thức liên doanh giữa một công ty của Ý, Minerali Industriali, và NSG, công ty Nhật Bản đã mua lại nhà sản xuất thủy tinh nổi tiếng Pilkington của Anh cách đây vài năm. Tôi đứng một lúc bên ngoài mỏ dưới mưa khi những dòng cát màu xám bạc - một trong những loại hạt hoàn hảo nhất trên thế giới - được chất thành đống trong một hầm chứa. Cứ khoảng một tuần lại có một con tàu đến và chở những đống này đi. Một phần cát đi vào những chai siêu trong này cho phép bạn chiêm ngưỡng màu sắc nguyên chất của mạch nha đơn cất của mình. Một số trong đó phục vụ các mục đích hấp dẫn hơn.
Một phần cát Lochaline được vận chuyển đến Na Uy, nơi nó được sử dụng để sản xuất cacbua silic, một vật liệu đang nhanh chóng trở thành một trong những thành phần quan trọng nhất trong quá trình điện khí hóa các phương tiện giao thông trên thế giới. Bộ biến tần silicon cacbua có khả năng làm cho những chiếc ô tô như Model 3 của Tesla chạy lâu hơn, sạc nhanh hơn và tiêu thụ ít điện năng hơn so

với những mẫu xe tiền nhiệm. Vật liệu ma thuật này có thể đóng một vai trò to lớn trong việc cứu hành tinh.
Nhưng phần lớn cát đào lên khỏi lòng đất ở đây được đưa về phía nam tới Pilkington, nơi nó tan chảy và nổi trên một lớp thiếc nóng chảy, trở thành những tấm mỏng, phẳng hoàn hảo. Mặc dù tiến bộ hơn đáng kể nhưng quy trình trong các nhà máy này về cơ bản không khác với những gì người Phoenicia đang làm trên bãi biển đó. Thành phần hóa học giống nhau, cũng như phản ứng trung tâm của quá trình sản xuất nó. Quả thực, phải đến những năm 1930 người ta mới nghĩ ra một phương pháp hoàn toàn khác.

Internet được làm bằng thủy tinh

Năm 1934, khi đang làm việc ở ngoại ô New York tại phòng thí nghiệm ở doanh nghiệp sản xuất thủy tinh Corning, một nhà hóa học trẻ người Mỹ tên là James Franklin Hyde đã chế tạo được thủy tinh bằng cách tổng hợp nó từ các hóa chất, phun silicon tetrachloride (một chất lỏng được hình thành bằng cách hòa tan cát silic trong clorua). hợp chất) vào ngọn lửa của mỏ hàn. Thủy tinh thu được rất đáng chú ý, không chỉ vì cách nó được tạo ra – bước chuyển đổi đầu tiên trong quá trình sản xuất thủy tinh trong hàng nghìn năm – mà còn vì thành phần hóa học của nó. Hyde đã sản xuất ra một dạng thủy tinh silica gần như nguyên vẹn, một loại thủy tinh tinh khiết - thực sự là tinh khiết hơn - so với thủy tinh sa mạc ở Libya. Những gì thiên nhiên đã tạo ra bằng một vụ thiên thạch rơi xuống Biển Cát Lớn giờ đây có thể được tạo ra trong phòng thí nghiệm.
Tất nhiên, silica nung chảy sẽ cách mạng hóa quang học, nhưng như thường xảy ra với những cải tiến kiểu này, phải mất một thời gian trước khi các nhà nghiên cứu của Corning nhận ra phải làm gì với nó. Họ đã thử nghiệm bằng cách thêm nó vào dụng cụ nấu nướng, tạo ra những chiếc nồi thậm chí còn có khả năng đàn hồi tốt hơn cả Pyrex. Khả năng chịu nhiệt độ của nó có nghĩa là silica nung chảy có thể được sử dụng trên các nón và cửa sổ mũi tên lửa trong Tàu con thoi và Trạm vũ trụ quốc tế. Nhưng khoảnh khắc eureka thực sự - khoảnh khắc cuối cùng sẽ tạo nên cuộc sống số của chúng ta - đã xảy ra tại một khu văn phòng bê tông ở ngoại vi vành đai đi lại của London.

Phòng thí nghiệm Viễn thông Tiêu chuẩn (STL) không còn tồn tại nữa. Nhưng trong một thời gian, khu phức hợp đơn giản này ngay bên ngoài Harlow ở Essex là một trong những địa điểm nghiên cứu khoa học quan trọng nhất thế giới, nhờ một phần không nhỏ vào những khám phá của Charles Kao, một kỹ sư điện gốc Thượng Hải và Đài Loan.

Kể từ khi Alexander Graham Bell phát minh ra điện thoại vào những năm 1870, hầu hết thông tin đã được truyền đi xuống dây đồng – một giải pháp tốt nhưng có một số vấn đề nghiêm trọng. Tín hiệu điện thoại có xu hướng trở nên mỏng hơn hoặc 'yếu đi' khi chúng di chuyển xa hơn. Các kỹ sư làm việc tại công ty AT&T của Bell và bộ phận nghiên cứu Bell Labs của nó đã dành phần lớn thời gian trong nhiều thập kỷ sau đó để cố gắng khắc phục vấn đề này. Họ chế tạo những dây đồng dày hơn và cứng hơn, họ lắp đặt cuộn dây và bộ khuếch đại, họ phát minh ra ống chân không (làm bằng thủy tinh thổi cẩn thận) để tăng tín hiệu trên đường đi. Những công nghệ này đủ khả năng và tin cậy để cho phép AT&T nối dây đồng trên khắp Hoa Kỳ và vào những năm 1950, xuyên Đại Tây Dương từ Nova Scotia đến Oban, ngay phía nam Lochaline (kế thừa của cáp điện báo xuyên Đại Tây Dương chậm, không đủ khả năng của thời kỳ đó). thế kỷ XIX). Nhưng dây đồng chỉ có thể truyền một lượng thông tin hạn chế ở tốc độ giới hạn. Và vào những năm 1960 tại STL, bộ phận nghiên cứu của Standard Phones and Cables Ltd, Kao đã tạo ra bước đột phá làm biến đổi truyền thông đường dài, khai sinh ra kỷ nguyên cáp quang, tức là thời đại chúng ta đang sống hiện nay.

Thật khó để phóng đại tầm quan trọng của sự đổi mới này. Tất cả các phương tiện truyền thông hiện đại ngày nay đều được thực hiện bằng cách này hay cách khác thông qua cáp quang. Khi chúng ta đi khắp thế giới vẫy các thiết bị kết nối không dây với mạng địa phương hoặc mạng điện thoại, thật dễ dàng để thuyết phục bản thân rằng chúng ta đã phi vật chất hóa thời đại thông tin. Tuy nhiên, không điều nào trong số này – cuộc gọi video, tìm kiếm trên internet, email, máy chủ đám mây, bộ hộp phát trực tuyến – có thể thực hiện được nếu không có thứ gì đó rất vật lý. Vì, ngoại trừ những khoảng cách cuối cùng – giữa bạn và bộ định tuyến hoặc giữa nhà bạn và tổng đài nội hạt – gần như

mỗi dặm mà dữ liệu trực tuyến di chuyển đều xảy ra dưới dạng các chùm ánh sáng trên các sợi thủy tinh.
Sợi quang thực chất là một sợi dây dài làm bằng thủy tinh, hay đúng hơn là hai sợi dây thủy tinh dài, sợi này nằm trong sợi kia – một lõi bên trong để truyền thông tin và một lớp kính bên ngoài để giữ cho ánh sáng phản xạ, khúc xạ, đi vào sợi thay vì thoát ra ngoài. Việc tạo ra một trong những sợi này đòi hỏi phải rèn một ống dày hai lớp, trông giống như một hộp thủy tinh khổng lồ – một dạng phôi, như đã biết – và kéo căng nó dưới nhiệt độ cao cho đến khi có đường kính gần bằng sợi tóc. Khám phá của Kao vào những năm 1960 là ánh sáng có thể truyền đi khoảng cách xa qua những sợi này miễn là thủy tinh đủ trong.
Vấn đề vào thời điểm đó là kính quang học tốt nhất được chế tạo bằng phương pháp thông thường chỉ có thể truyền ánh sáng đi được khoảng 10 mét, vì vậy Kao đã tìm kiếm một loại kính thậm chí còn rõ ràng hơn. Ông đã tìm thấy nó ở dạng thủy tinh hợp nhất siêu tinh khiết được phát triển lần đầu tiên bởi James Franklin Hyde tại Corning vào những năm 1930. Kao tính toán rằng ánh sáng có thể truyền đi hàng km xuống một tấm kính như vậy mà hầu như không bị mất dữ liệu. Và vì băng thông của các sợi nhỏ lớn hơn rất nhiều so với các sợi đồng dày hơn rất nhiều, nên ngay cả một sợi cực kỳ mỏng cũng có thể mang nhiều thông tin hơn.
Việc phát minh ra sợi quang, giống như hầu hết các bước nhảy vọt vĩ đại, là sự tổng hợp giữa năng lực trí tuệ và khoa học vật liệu. Đến mức bất cứ ai nhớ lại những đột phá này đều nhớ đến Ngài Charles Kao – người được trao giải Nobel Vật lý năm 2009, được Nữ hoàng Elizabeth II phong tước hiệp sĩ vào năm sau. Khu kinh doanh được xây dựng sau khi các phòng thí nghiệm STL ở Harlow bị phá bỏ có tên là Kaopark. Chúng ta dành rất ít thời gian để chiêm ngưỡng những đặc tính đáng kinh ngạc của thủy tinh, nếu không có nó thì không cơ sở hạ tầng thông tin nào mà chúng ta dựa vào sẽ hoạt động được. Nhưng bên dưới lòng đất, ngoài tầm mắt, băng qua các đại dương và vòng quanh thế giới, có một vòng hoa bằng những sợi thủy tinh mỏng như sợi tóc khiến thế giới hiện đại quay tròn.
Không ai quan tâm nhiều đến những điều này, giống như cách họ có xu hướng phớt lờ hệ thống dây điện bằng đồng cung cấp năng lượng

cho chúng ta, phân bón giúp chúng ta ăn uống và thép gia cố cho chúng ta. các tòa nhà. Sau đó, một lần nữa, vấn đề chính là: thứ này ở khắp mọi nơi và nó không ở đâu cả. Cách đây vài năm, một thẩm phán Tòa án Tối cao Hoa Kỳ đã cố gắng giải thích định nghĩa của ông về nội dung khiêu dâm: 'Tôi biết điều đó khi tôi nhìn thấy nó'. Trong Thế giới Vật chất, tốt hơn hết bạn nên tắt cụm từ đó đi. Trên hết, điều gì thực sự quan trọng đối với nền văn minh nhân loại? 'Bạn biết điều đó khi bạn không thể nhìn thấy nó.'

Và rất ít chất bay khá xa bên dưới radar như cát mà chúng ta sử dụng để xây dựng thế giới xung quanh. Chúng là nền tảng của cuộc sống hiện đại, nhưng hóa ra, chúng ta lại ít chú ý đến chúng đến mức thậm chí chúng ta hầu như không hiểu chúng quan trọng đến mức nào.

2

Xây dựng trên cát

Còn ai nghe những lời Thầy nói đây mà không thực hành thì bị ví như người ngu dại xây nhà trên cát: Có mưa sa, nước chảy, gió thổi, xô động nhà ấy; và nó đã sụp đổ: và sự sụp đổ của nó thật lớn lao.

Ma-thi-ơ 7:26–7

Dụ ngôn về hai người xây nhà – một người xây trên đá và người kia xây trên cát – khá khó lay chuyển. Nếu, giống như tôi, bạn lớn lên trong đức tin Cơ đốc và có xu hướng hiểu những điều này theo nghĩa đen, thì bạn lớn lên với niềm tin rằng sẽ thật điên rồ nếu xây dựng bất cứ thứ gì trên hạt cát.

Nhưng vốn dĩ không có gì sai khi xây dựng trên cát. Chúng tôi làm điều đó mọi lúc: chúng tôi xây dựng trên cát, chúng tôi xây dựng bằng cát, chúng tôi làm nhà từ những khối được làm phần lớn từ cát. Khi chúng tôi khai hoang đất, chúng tôi làm điều đó bằng cát. Thế giới xây dựng như chúng ta biết – những tòa nhà chọc trời, bãi đậu xe, đường sá, nền móng – hầu hết đều được làm bằng cát.

Dụ ngôn, một phần của Bài Giảng Trên Núi, có lẽ nói cụ thể hơn một chút về điều này. Vấn đề không phải là đến nỗi kẻ ngu ngốc đã xây nhà trên cát, nhưng lại xây nhà trên *cát không đúng loại* . Có lẽ anh ta đã chọn một địa điểm có cát sa mạc, có các cạnh tròn không dính vào nhau. Thậm chí có khả năng cao hơn là ông đã xây dựng nó trên nền bãi cát phù sa, vốn bằng phẳng và cứng vào mùa khô nhưng có thể đột ngột trở nên lỏng lẻo và không ổn định khi mưa đến và sông vỡ bờ.

Nhưng không có gì ngăn cản chúng ta xây dựng ngay cả trên những bãi cát không mấy hứa hẹn như thế này, miễn là bạn biết cách thương lượng chúng, cho dù điều đó có nghĩa là đào nền móng thích hợp hay sử dụng các kỹ thuật phù hợp để biến cát lỏng lẻo hoặc sũng nước thành thứ gì đó vững chắc hơn. Hãy xem xét tòa nhà cao nhất

thế giới, Burj Khalifa ở Dubai, được xây dựng theo đúng nghĩa đen trên đỉnh cát sa mạc đang dịch chuyển. Trong trường hợp của nó, cát thực sự làm cho nó ổn định hơn, chứ không phải kém hơn, vì phần móng bao gồm 192 cọc - cột bê tông tròn, dài - sâu tới 47 mét xuống mặt đất và sử dụng ma sát của cát và nền đá sa thạch này để neo giữ xây dựng tại chỗ.
Đi lên bờ biển từ tòa nhà chọc trời, bạn sẽ tìm thấy Palm Jumeirah, một quần thể các hòn đảo nhân tạo được tạo thành phần lớn từ hàng triệu tấn cát được nạo vét từ đáy biển của Vịnh Ba Tư trước khi được phun vào vị trí và được nén chặt thành một bề mặt phẳng, chắc chắn. Một lần nữa, không phải loại cát nào cũng có tác dụng; ngay cả công nghệ nén tốt nhất cũng không thể biến cát sa mạc thành vùng đất mới. Và kể từ khi hoàn thành, những hòn đảo nhân tạo này phải chiến đấu liên tục với thiên nhiên, với hệ thống thủy triều xói mòn chúng và từ từ cuốn trôi cát. Chính quyền địa phương đã xây dựng đê chắn sóng xung quanh các hòn đảo nhưng vẫn có bằng chứng cho thấy chúng đang chìm dần.

Chuyển cát

Nỗ lực tăng diện tích đất đai của Dubai chỉ là phần mới nhất trong một câu chuyện dài. Hà Lan đã làm nhiều điều tương tự ít nhất là từ thế kỷ 14. Nhưng gần đây hơn, cơn sốt cải tạo đất (luôn luôn là *việc cải tạo* ngay cả khi vùng đất được yêu cầu chưa bao giờ nằm trong tay con người) đã đạt đến một mức độ chưa từng có. Không nơi nào điều này được thực hiện nhiệt tình hơn ở châu Á. Tokyo đã có thêm 25.000 ha đất mới được nạo vét từ biển kể từ thế kỷ 19. Trung Quốc đang dần mở rộng các thành phố ven biển, cả mới và cũ.
Do lãnh hải của một quốc gia được xác định bởi đường bờ biển, việc bố trí cát đã trở thành một tiền tuyến mới của ngoại giao thế kỷ XXI. Những vùng lãnh hải đó càng lớn thì diện tích mà một quốc gia có thể đánh bắt, khoan và khai thác tài nguyên ngoài khơi càng lớn. Sau đó là những hậu quả quân sự. Từ năm 2006 đến 2010, Trung Quốc cải tạo trung bình 270 dặm vuông mỗi năm trên bờ biển của mình. Các hoạt động nạo vét và cải tạo đất của nước này trên khắp các đảo ở Biển Đông gần đây có quy mô đến mức một đô đốc Mỹ gọi chúng là đại diện cho 'Vạn lý trường thành bằng cát'. Quần đảo Trường Sa,

một quần đảo tranh chấp được Trung Quốc, Đài Loan, Malaysia và một số quốc gia châu Á khác tuyên bố chủ quyền, từng chỉ là những rạn san hô nơi sinh sống chủ yếu của các loài chim. Ngày nay chúng đã được mở rộng và bao phủ bởi các đường băng bê tông và các căn cứ quân sự. [1]

Khi thế giới đối mặt với biến đổi khí hậu và mực nước biển dâng cao, cuộc chạy đua mua đúng loại cát để phun và nén thành các rào chắn và phòng chống lũ lụt sẽ tăng tốc. Maldives, phần lớn có thể chìm dưới nước nếu mực nước biển dâng cao như dự đoán của các nhà khoa học trong thế kỷ tới, đang sử dụng cát và đá để xây dựng những rào chắn khổng lồ xung quanh thủ đô Malé. Singapore – nơi các nhà lãnh đạo coi việc cải tạo đất là biện pháp phòng vệ chống lại biến đổi khí hậu, mực nước biển dâng cao và tình trạng mất an ninh nguồn nước – là nước nhập khẩu cát hàng đầu thế giới. Đất nước này đang phát triển với tốc độ hơn 10 dặm vuông một thập kỷ và, vì nhiều đất hơn đồng nghĩa với nhiều dân cư hơn, nhiều công viên hơn, nhiều không gian hơn cho các trung tâm y tế, trường học, v.v., nên cơn đói cát của đất nước này chỉ ngày càng tăng lên. Và khi Singapore phát triển, các nước láng giềng đang bị thu hẹp lại theo đúng nghĩa đen. Indonesia, quốc gia cung cấp phần lớn lượng cát đó cho Singapore, gần đây đã cảnh báo rằng việc nạo vét và khai thác cát đã trở nên quá rộng rãi đến mức nước này đã mất hoàn toàn một số hòn đảo, ảnh hưởng đến biên giới trên biển của nước này.

Nhưng thật khó để có thể kiểm soát đầy đủ quy mô của loại tàu điêu khắc bằng cát này vì những con số vẫn còn rất mù mịt. Hãy xem xét: Singapore cho biết họ đã nhập khẩu khoảng 600 triệu tấn cát từ nơi khác trong khoảng thời gian từ năm 2000 đến năm 2020. Tuy nhiên, các nước xuất khẩu cát của họ sang Singapore cho biết họ chỉ gửi 280 triệu tấn. Tóm lại, có 320 triệu tấn bị thiếu mà không ai có thể giải thích được. Chắc hẳn ai đó đã khai thác nó, nhưng không ai sở hữu nó. [2]

Cuộc đua giành cát

Điều này đưa chúng ta đến một vấn đề sâu sắc hơn. Chúng ta có xu hướng coi cát như một loại vật liệu phổ biến, về cơ bản là vô hạn, điều này rất có ý nghĩa nếu bạn cho rằng tất cả các loại cát đều giống

nhau. Nhưng như chúng ta biết, không phải vậy: tại sao một quốc gia sa mạc như Dubai lại nhập khẩu cát từ Bỉ, Hà Lan và thậm chí, tin hay không, từ Vương quốc Anh? Câu trả lời ngắn gọn là một số loại cát hữu ích hơn những loại cát khác. Có rất nhiều hạt silica ở Biển Cát Lớn, nhưng ít hơn rất nhiều với độ tinh khiết như những hạt bạn sẽ tìm thấy ở Lochaline hoặc Fontainebleau. [3]

Tuy nhiên, không giống như hầu hết các vật liệu khai thác khác, có rất ít quy định, biện pháp kiểm soát hoặc số liệu thống kê giám sát cách thức chúng ta nạo vét và loại bỏ rất nhiều cát khỏi bề mặt trái đất mỗi năm. Vì vậy, giải quyết một câu hỏi đơn giản – chúng ta đã đào lên và di dời bao nhiêu phần hành tinh này trong lịch sử loài người? – hóa ra không hề đơn giản chút nào. Một vài năm trước, một số nhà địa chất đã sàng lọc dữ liệu để tìm kiếm câu trả lời. Họ ước tính rằng lượng cát, đất và đá mà con người chúng ta khai thác, nạo vét mỗi năm lớn hơn khoảng 24 lần so với lượng trầm tích được di chuyển mỗi năm bởi các quá trình xói mòn tự nhiên của Trái đất, tức là các dòng sông nghiền nát cát và đưa nó đi. xuôi về phía biển. Nói cách khác, con người là một lực lượng địa chất lớn hơn đáng kể so với bản thân thiên nhiên, và theo dữ liệu, kể từ năm 1955. Hay – một cách nhìn khác – đến năm 2020, tổng trọng lượng của các sản phẩm do con người tạo ra, từ sắt, bê tông và mọi thứ khác đều lớn hơn tổng trọng lượng của mọi sinh vật tự nhiên trên hành tinh. [4]

Những phân tích như thế này khá hữu ích vì chúng cung cấp nền tảng thống kê cho khái niệm Anthropocene - ý tưởng cho rằng loài người đã tạo ra một kỷ nguyên địa chất hoàn toàn mới và có thể phân biệt được. Và bạn càng tìm hiểu sâu hơn về những con số về sự dịch chuyển của cát và đá, chúng càng trở nên ngoạn mục và khó hiểu hơn. Tổng lượng vật chất mà chúng ta đã đào lên khỏi mặt đất trong thế kỷ qua là một con số lớn đến mức ngay cả đơn vị số học cũng hiếm khi được sử dụng: teratonne. Hay đúng hơn là 6,7 teraton (hay chính xác hơn là 6.742.000.000.000 tấn). Với trọng lượng tổng hợp của mọi vật thể do loài người tạo ra, theo một ước tính, là khoảng 1,1 teraton, đây là một cách nhìn khác: đối với mọi vật thể do con người tạo ra trên hành tinh này, mọi tòa nhà, máy bay, tàu hỏa, ô tô và điện thoại , hãy thử tưởng tượng một đống đất, cát và bụi nặng gấp sáu

lần trọng lượng của nó. Và đống vật liệu được chuyển đi ngày càng lớn hơn mỗi năm trôi qua. [5]

Cát đó đến từ đâu không phải là câu hỏi tầm thường. Hầu hết cát được vận chuyển dưới dạng hạt qua sông ra biển. Trông có vẻ trơ và khó chịu, ở mỗi giai đoạn trên đường đi, những hạt này đang đóng một vai trò quan trọng trong hệ sinh thái địa phương: đôi khi chúng giúp vận chuyển trầm tích dọc đường đi, bón phân cho các vùng đồng bằng ngập nước, đôi khi chúng hoạt động như tầng chứa nước hoặc giúp ngăn lũ lụt hoặc bảo vệ bờ biển khỏi bị xói mòn, đôi khi chúng là nơi trú ẩn cho động vật, từ rùa và chim cho đến các sinh vật vi sinh vật. Nếu bạn phải khai thác cát (và thật khó để tưởng tượng thế giới hiện đại mà không làm như vậy), thì những hệ thống trầm tích đang hoạt động này là nơi không phù hợp để khai thác. Thay vào đó, bạn nên tìm kiếm những gì được gọi là 'trầm tích hóa thạch': cát từng là một phần của một dòng sông hoặc hệ thống ven biển đang hoạt động nhưng bây giờ, hàng trăm triệu năm sau, nằm trơ.

Và đó chính xác là nơi mà hầu hết cát đến từ các quốc gia phát triển, nơi việc khai thác cát và cải tạo đất được quản lý chặt chẽ. Nhưng ở nơi khác có bằng chứng rõ ràng rằng cát đang được khai thác từ các hệ thống đang hoạt động. Những dải bờ biển dài ở Maroc và Tây Sahara đã bị dỡ bỏ để cung cấp cát, sau đó được vận chuyển đến Châu Âu và Quần đảo Canary, nơi cát được sử dụng để xây dựng và bổ sung cho các bãi biển du lịch (bạn có thể ngạc nhiên khi biết có bao nhiêu bãi biển ở Châu Âu nằm ở đó). thực tế được tạo ra từ cát nhập khẩu). Những rào cản chống bão tự nhiên được xây dựng qua hàng ngàn năm đã bị dỡ bỏ. Ở châu Á, nhu cầu cát xây dựng nhằm thúc đẩy tăng trưởng kinh tế chóng mặt trong những năm gần đây đã gây tổn hại cho hệ sinh thái địa phương. Không nơi nào điều này rõ ràng hơn ở Đồng bằng sông Cửu Long, một vùng đất màu mỡ, đầm lầy, đẫm mồ hôi, tạo thành “vựa lúa” của Việt Nam, chiếm phần lớn sản lượng lúa và cá của cả nước. Đất và phù sa ở vùng đồng bằng đang bị ảnh hưởng bởi hoạt động khai thác cát cường độ cao và các con đập ở thượng nguồn, ảnh hưởng nghiêm trọng đến dòng chảy vào lưu vực. [6]

Đôi khi cát bị khai thác trái phép; đôi khi các thợ mỏ được xác nhận chính thức vượt quá giới hạn khai thác của họ. Đi thuyền máy xuôi

dòng sông vào bất kỳ ngày nào và bên cạnh những người nông dân đang làm việc trên cánh đồng lúa của họ, thỉnh thoảng bạn sẽ thấy một đội thuyền hoặc sà lan và một đội kéo cát, nạo vét từ dưới nước, vào một chiếc xe tải đang chờ với xẻng, xô, giỏ và máy bơm thủy lực. Các nghiên cứu ngụ ý rằng nhiều cát đang bị loại bỏ hơn số liệu thống kê chính thức cho thấy. 7

Nơi từng có bờ sông, ngày nay có những giọt nước thẳng tắp nơi cát đã bị loại bỏ. Khoảng hai dặm vuông đất đang bị mất mỗi năm và sáu tỉnh ở khu vực đồng bằng đã ban bố tình trạng khẩn cấp về hành chính, trong đó dòng sông hiện đang đe dọa làm tê liệt đường sá, trường học và bệnh viện. Một nghiên cứu khác cho thấy toàn bộ vùng đồng bằng đang dần chìm xuống, thiếu trầm tích từng bổ sung cho nó. Chính điều đó đang khiến đường bờ biển mỗi ngày bị nước biển ăn mòn với tốc độ bằng 1,5 sân bóng đá. Nhưng các nghiên cứu cho rằng đây chỉ có thể là sự khởi đầu, với một cảnh báo rằng "nếu không có hành động phối hợp, có khả năng gần một nửa bề mặt đất liền của Đồng bằng sông Cửu Long sẽ thấp hơn mực nước biển vào năm 2100, với những khu vực còn lại bị ảnh hưởng bởi tình trạng xâm nhập mặn và lũ lụt thường xuyên". . số 8

Xa hơn về phía bắc, chính quyền Trung Quốc đang trong cuộc rượt đuổi mèo vờn chuột với các công ty khai thác cát không chính thức trong nhiều thập kỷ. Sông Dương Tử, có lưu vực thoát nước chiếm 1/5 diện tích đất liền và khoảng 1/3 dân số của Trung Quốc, đã bị khai thác quá mức đến nỗi chiều dài bờ sông đã sụp xuống sông, đe dọa một số cây cầu, chưa kể đến hệ sinh thái của nó. Thay vì loại bỏ hoạt động này, các biện pháp ngăn chặn khai thác khác nhau chỉ đơn giản đẩy nhiều nhà khai thác nhỏ ngược dòng tới Hồ Bà Dương, nơi có hoạt động khai thác cát quá nhiều đến mức được cho là đã làm giảm mực nước hồ. Thật vậy, một số người cho rằng hồ này có thể là mỏ cát lớn nhất thế giới. 9

Ở hạ lưu sông Dương Tử, nơi các thợ mỏ ẩn náu trong các nhánh sông yên tĩnh trên những chiếc thuyền cải trang thành người chở hàng và làm việc vào ban đêm hoặc những ngày mưa hoặc sương mù, một lệnh cấm khai thác trái phép khác bắt đầu vào năm 2021. Đầu năm đó, chính quyền thông báo bắt giữ một nhóm gồm 11 người. người đã khai thác và bán 20.000 tấn chỉ trong hai tháng trước đó. 10

Ở Ấn Độ, nơi sự kiểm soát của chính quyền trung ương và khu vực lỏng lẻo hơn, 'mafia cát' đã trở thành đại diện cho một mạng lưới tham nhũng sâu rộng, từ những kẻ đào cát từ lòng sông và bãi biển đến chuỗi cung ứng gửi cát đến các công trường xây dựng. , cho các nhà phát triển bất động sản, cảnh sát và thậm chí, theo tin đồn, một số chính trị gia. Đã có những vụ giết người và bắt cóc, đánh đập dã man và vô số vụ bắt giữ, tất cả đều nhằm mục đích kiếm cát. Dưới đây là một vài câu chuyện được thu thập trong vài tháng trong quá trình viết cuốn sách này: cảnh sát ném đá ở quận Nawada thuộc bang Bihar, Ấn Độ; 18 cảnh sát ở Bihar bị thuyên chuyển sau khi bị phát hiện đang bảo vệ mafia cát địa phương; Các nhân viên kiểm lâm ở vùng Chambal bị một băng nhóm mafia cát đào trái phép bằng máy kéo bắn. [11]

Cát là một công việc kinh doanh nghiêm túc. Theo Chương trình Môi trường Liên Hợp Quốc, nếu chúng ta muốn ngăn chặn một 'cuộc khủng hoảng cát', chúng ta nên coi nó không phải là một nguồn tài nguyên thông thường mà là một loại khoáng sản chiến lược, một thứ được tạo ra cùng lúc với kim loại như đồng hoặc thậm chí cả vật liệu pin như liti. Những hạt này có vẻ không có gì đặc biệt cho đến khi bạn lùi lại một chút và suy nghĩ về những gì chúng cho phép chúng ta làm. Không có cát thì không có môi trường xây dựng, không có tăng trưởng kinh tế. Cát là thứ sẽ giúp chúng ta kéo hàng triệu người thoát khỏi cảnh cùng cực và nghèo đói, đồng thời giúp họ sống lâu hơn. [12] Điều đó nghe có vẻ hơi quá đáng cho đến khi bạn lưu ý một trong những điểm đến chính của tất cả những hạt cát này. Cùng với việc các loại ngũ cốc biển được vận chuyển đi xa để biến thành vùng đất mới, thay đổi biên giới thế giới, cùng với việc biến cát silic thành thủy tinh và cốt liệu được nung thành nhựa đường để lát đường, cát sẽ đóng một vai trò còn kỳ diệu hơn nữa. Những hạt này, từng bị xói mòn khỏi mặt đá hàng triệu năm trước và trôi xuống sông ra biển, được tái tạo hoàn toàn thành một dạng đá mới.

Tài liệu bị đánh giá thấp nhất trong tất cả

Nó là một trong những vật liệu kỳ diệu nhất trên thế giới nhưng hầu hết đều nằm ngoài tầm mắt. Khi nó nhô đầu lên khỏi mặt đất, nó thường bị chế nhạo và xua đuổi. Nhà phê bình thiết kế và kiến trúc

người Pháp Georges Gromort đã nói thay cho phần lớn thế giới khi ông nói: ' *Le béton? Mais c'est de la boue!* ' (Bê tông? Nhưng nó chỉ là bùn mà thôi!) [13]
Tuy nhiên, đối với tất cả những gì nó được truyền tai, coi thường hoặc hiểu lầm (chắc chắn nhất *không phải là* bùn), bê tông, hỗn hợp cát, cốt liệu và xi măng, dù sao cũng khá đặc biệt. Có lẽ nơi tốt nhất để bắt đầu là đặt một câu hỏi: nếu bạn đang tìm cách cải thiện nhiều gia đình có thu nhập thấp ở những khu vực nghèo của thế giới đang phát triển, bạn sẽ cung cấp điều gì sau đây cho họ? Một bó tiền mặt, thực phẩm bổ sung hay một bao xi măng?
Tất nhiên, bạn đã biết điều này sẽ đi đến đâu, nhưng hãy để tôi giải thích: một trong những vấn đề lớn nhất đối với trẻ nhỏ ở các nước nghèo là ký sinh trùng đường ruột, có thể gây tổn hại sức khỏe và khiến chúng phải nghỉ học. Những ký sinh trùng này thường sống trong phân, chúng thường được đưa vào nhà dưới chân người khác. Nếu ngôi nhà đó là một căn lều có nền đất, ký sinh trùng có thể không bị phát hiện lâu hơn và lây sang nhiều trẻ em hơn.
Một vài năm trước, Mexico bắt đầu cung cấp xi măng cho các gia đình để lát sàn đất, dẫn đến hậu quả là nhiễm ký sinh trùng giảm 78%. số trẻ bị tiêu chảy giảm một nửa; những người bị thiếu máu giảm 4/5. Ngoài ra còn có đủ loại kết quả hạnh phúc khác – trẻ em học tốt hơn ở trường, mẹ chúng trở nên hạnh phúc hơn và bớt trầm cảm hơn. Và tất cả là nhờ một bao xi măng rẻ tiền. [14]
Những ưu điểm của vật liệu này không kết thúc ở đó. Việc thay thế đường đất bằng đường trải nhựa (tức là bê tông) đã được chứng minh là giúp tăng hơn một phần tư tiền lương của những người làm việc gần đó và cũng làm tăng tỷ lệ trẻ em đăng ký đi học. [15]
Chúng ta có xu hướng đánh giá thấp tầm quan trọng của thế giới xây dựng. Nơi trú ẩn là một trong những nhu cầu cơ bản của con người, nhưng thật dễ dàng để quên điều này khi bạn có một mái nhà trên đầu và một sàn nhà vững chắc bên dưới. Và khi nói đến thế giới xây dựng, không có vật liệu nào khác có thể tạo ra sự khác biệt to lớn nhanh chóng như xi măng.
Thay vì phải tạo hình và nung gạch trước khi tốn nhiều công sức đặt chúng bằng vữa, bạn có thể chỉ cần đổ bê tông vào khuôn. Một công việc trước đây có thể mất vài ngày hoặc thậm chí vài tuần có thể

được thực hiện trong vài giờ với một phần nhỏ lực lượng lao động. Cách đây vài thế kỷ, gần như toàn bộ công trình được xây bằng gạch hoặc gỗ; ngày nay bê tông chiếm khoảng 80% tổng số vật liệu chúng ta sử dụng trong xây dựng. Tuy nhiên, vì bê tông không hợp thời nên nó thường bị bỏ qua trong lịch sử công nghệ để ưu tiên các vật liệu khác sáng bóng hơn như thép và chất bán dẫn.

Tuy nhiên, bạn càng đi sâu vào bê tông thì nó càng gây cảm hứng kinh ngạc. Cũng giống như kính, chúng ta vẫn chưa hiểu đầy đủ điều gì đang xảy ra ở trung tâm của bê tông khi nó đông kết. Ở một số khía cạnh, những tảng đá nguyên khối buồn tẻ, thô bạo ở trung tâm thành phố của chúng ta còn sống động hơn bất cứ thứ gì khác ở thành thị. môi trường. Bê tông vẫn đang bảo dưỡng, đá vẫn phản ứng với môi trường. Ngay cả Đập Hoover, dự án khổng lồ thời kỳ Suy thoái trên sông Colorado, vẫn được cho là có thể chữa khỏi cho đến ngày nay – tăng thêm sức mạnh mỗi năm trôi qua.

Mặc dù các thuật ngữ này đôi khi được sử dụng thay thế cho nhau nhưng bê tông và xi măng không hoàn toàn giống nhau. Nói một cách đơn giản nhất là xi măng là thành phần kỳ diệu, chất keo, kết dính bê tông lại với nhau. Bản thân xi măng là một loại bột được hình thành khi bạn nung và nghiền đá vôi hoặc phấn cùng với đất sét, cát và đôi khi một số chất phụ gia khác như oxit sắt. Khi bạn thêm nước, canxi và silicon trong xi măng sẽ phản ứng với nó tạo thành một loại gel màu xám đục, bên trong có hàng triệu tua đá cực nhỏ. Những tua này, tinh thể canxi silicat hydrat, phát triển, tạo thành lưới và trải rộng các ngón tay của chúng khắp gel, khóa trong nước và tạo thành một loại cấu trúc giống như xương. Thêm một ít sỏi và cát vào hỗn hợp ban đầu và thay vì chỉ liên kết với nhau, những sợi dây này cũng sẽ tự dính xung quanh đá và cát, tạo ra bê tông. Đá lỏng. Một tảng đá bạn có thể đổ. [16]

Có một nghệ thuật trong việc rót và hoàn thiện. Tôi nhớ rất rõ cảnh một người thợ thủ công đang hoàn thiện phần bê tông sẽ trở thành bức tường của một đường hầm đường sắt ngầm cách đây vài năm. Anh cẩn thận, gần như đầy yêu thương, dùng bay xoa lên nó, làm phẳng một bề mặt mà có lẽ mắt người sẽ không bao giờ nhìn thấy được nữa. Nó giống như xem một nhà điêu khắc đang làm việc.

Một số người cho rằng dù có tất cả những lợi ích về mặt khoa học, bê tông vẫn thiếu ý nghĩa về *vị trí* . Suy cho cùng, những môi trường đô thị huy hoàng nhất là những sản phẩm không chỉ có giá trị kiến trúc mà còn là những vật liệu bao quanh những khu định cư đó. Đá vôi mật ong của tứ giác Oxford, đá nâu của Brooklyn, đá granit của Aberdeen: những tòa nhà này được làm không phải bằng những khối màu be vô danh mà bằng chính những viên đá được tìm thấy ở các mỏ đá gần đó. Chúng được đẽo gọt từ môi trường của chúng.
Tuy nhiên, bê tông cũng vậy. Vì cuối cùng nó chỉ là những hạt cát và đá được tái tạo, được dán lại thành một khối đá mới với sự trợ giúp của vôi đó, nên nó cũng được làm từ các loại ngũ cốc địa phương. Đặt tay lên một khối bê tông ở Manchester và bạn có thể chạm vào sỏi và đá từ Peak District. Bê tông ở New York thường bắt đầu cuộc đời của nó dưới dạng cát từ Vịnh Jamaica ở Long Island. Bê tông của London thậm chí còn có một câu chuyện huyền bí hơn, vì phần lớn cát và cốt liệu được sử dụng để làm ra nó được cạo từ một bãi cát nông ở Biển Bắc có tên là Dogger Bank. Trở lại Kỷ băng hà cuối cùng khi mực nước biển thấp hơn, đây là cây cầu đất liền nối liền Vương quốc Anh và Châu Âu. Vùng đất ngập nước này - Doggerland, như đôi khi được gọi - cũng đã cung cấp phần lớn cát được sử dụng để xây dựng bờ biển cho Hà Lan và để tạo ra Bến Canary của London. Lần tới khi bạn nhìn thấy một khối bê tông ở thủ đô nước Anh và muốn coi nó là một khối quái vật theo chủ nghĩa hiện đại, hãy suy ngẫm một chút rằng nó có thể được làm từ cát từ thế giới chết đuối bí ẩn này, ở giữa Biển Bắc.
Trong thế giới của bê tông, sự trần tục thường nằm bên cạnh những tảng đá huyền bí và tuyệt vời, những tảng đá dường như chết thực ra vẫn còn sống và cái cổ xưa được nhào nặn thành một thứ gì đó giống như tương lai. Các xà lan nạo vét cát từ Doggerland thường xuyên phát hiện ra những chiếc ngà voi ma mút làm tắc nghẽn máy móc của họ. Có những chiếc răng của tê giác bằng len và những chiếc rìu cầm tay từ thời đồ đá cũ trong các viện bảo tàng của chúng ta đã được phát hiện trong quá trình tìm kiếm cát xây dựng. Việc chúng ta biết rất nhiều về thế giới thời tiền sử này phần lớn là nhờ vào sự thèm ăn vô độ của chúng ta đối với bê tông cũng như cát và đá mà chúng ta dùng để tạo ra nó.

Một tảng đá của thời đại

Về mặt vật liệu, bê tông, tùy thuộc vào cách bạn nhìn nhận, có thể cực kỳ cũ hoặc mới đến bất ngờ. Con người đã nấu vôi và sử dụng nó trong các công trình của mình từ hàng ngàn năm nay. Có bằng chứng về việc sử dụng xi măng ở sàn và cột trong tàn tích thời kỳ đồ đá mới được tìm thấy ở Thổ Nhĩ Kỳ có niên đại hơn 10.000 năm. Người Bedouin ở miền nam Syria và miền bắc Jordan đã tạo ra những công trình kiến trúc giống như bê tông vào khoảng năm 6500 TRƯỚC CÔNG NGUYÊN . Nổi tiếng nhất là người La Mã đã sử dụng một dạng bê tông trong nhiều tòa nhà của họ. Bê tông tạo nên nền móng của Đấu trường La Mã ở Rome và ngoạn mục nhất là mái vòm khổng lồ của Pantheon, vẫn là mái vòm bê tông không cốt thép lớn nhất thế giới.

Công thức chế tạo bê tông ban đầu đã bị thất lạc hàng trăm năm sau khi Đế chế La Mã sụp đổ, và sự quan tâm đến nó chỉ được khơi dậy vào thế kỷ 15, khi *On Architecture* , một bản thảo của kiến trúc sư La Mã Vitruvius, được phát hiện. Cuốn sách của Vitruvius đã được dịch sang tiếng Pháp và sau đó là tiếng Anh, khơi dậy một cuộc tìm kiếm khoa học vĩ đại nhằm khám phá lại bí mật của bê tông. Trong suốt thế kỷ 18 và 19, các nhà phát minh và nhà công nghiệp chạy đua để tạo ra những công thức pha chế mới có thể sao chép hoặc thậm chí vượt trội hơn công thức La Mã. Thật vậy, ngay cả ngày nay các nhà khoa học vẫn đang cố gắng thiết kế ngược công thức pha chế La Mã ban đầu đó, và các nhà nghiên cứu tại MIT đã tuyên bố sẽ có những bước đột phá mới gần đây nhất là vào năm 2023.17

Nhưng công thức sản xuất xi măng mà chúng ta thường sử dụng ngày nay đã được cấp bằng sáng chế vào năm 1824 bởi một người tên là Joseph Aspdin. Ông gọi nó là xi măng Portland, vì màu của nó giống với đá Portland được khai thác ở Dorset. Tuy nhiên, trên thực tế, có tất cả các loại công thức cạnh tranh diễn ra cùng một lúc và không ai chắc chắn liệu Aspdin, một nhân vật hơi mờ ám, có thực sự giành chiến thắng trong cuộc đua hay thực sự đã ăn trộm bản thiết kế của mình từ người khác. 18

Tuy nhiên, phát minh ra thứ gì đó là một chuyện; biến nó thành thành công lại là chuyện khác. Xi măng cuối cùng cũng là một công thức, và cũng giống như việc sai tỷ lệ nguyên liệu có thể gây ra thảm họa cho

bánh muffin hoặc soufflé, chất này cũng vậy. Một số hỗn hợp xi măng ban đầu rất bướng bỉnh, không có hai mẻ nào hoàn toàn giống nhau, và cũng như công thức cho các loại thủy tinh, một lần nữa người Đức phải hoàn thiện công thức, áp đặt kỷ luật khoa học về việc cân, trộn và hoàn thiện xi măng. . Vào cuối thế kỷ 19, xi măng của Đức đã vượt trội hơn nhiều so với xi măng của Anh.

Nhưng có thể cho rằng nhân vật quan trọng nhất trong lịch sử bê tông là một người được nhớ đến với nhiều phát minh nhưng không phải cái này: Thomas Edison. Edison – người mà chúng ta sẽ gặp lại ở phần sau của cuốn sách – thường xuất hiện như một chú thích hài hước khi kể về bê tông vì ông đã nghĩ ra ý tưởng thú vị khi xây dựng toàn bộ ngôi nhà bằng bê tông, bao gồm cả đồ nội thất bằng bê tông, giường bê tông và máy quay đĩa bằng bê tông. Tuy nhiên, đóng góp của ông còn có ý nghĩa hơn nhiều so với những gì được hiểu rộng rãi ngày nay, vì chính Edison là người đã hoàn thiện việc sản xuất bê tông hàng loạt.

Để biết lý do tại sao, bạn nên đến thăm một nhà máy xi măng hiện đại, trong trường hợp của tôi là nhà máy nằm ngay bên ngoài Rugby, ở vùng West Midlands của Anh. Ở đây đã có một nhà máy xi măng từ năm 1865. Trở lại thời Victoria, khi nhà máy sản xuất xi măng giúp xây dựng nước Anh công nghiệp, các nhà máy ở đây được cung cấp đá từ các mỏ đá vôi lân cận. Lượng đá vôi đó hiện đã cạn kiệt khá nhiều và ngày nay đá phấn chảy xuống một đường ống dài 57 dặm từ một mỏ đá ở Bedfordshire.

Trung tâm của nhà máy – quả thực là trung tâm của ngành kinh doanh xi măng – là lò nung. Nhưng đây không phải là lò gạch hình chai giống như những lò gốm vẫn được bảo tồn ở Stoke-on-Trent, quê hương của ngành gốm sứ nước Anh. Khi lần đầu tiên nhìn quanh khu vực này, tôi đã hoàn toàn bỏ sót nó, vì lò quay không phải là một ống khói mà là một ống kim loại khổng lồ đi từ nhà chứa máy bay này sang nhà chứa máy bay khác. Xem nó quay đầu là một trải nghiệm thôi miên bất ngờ. Không có ngọn lửa nào được nhìn thấy ở bất cứ đâu, không có khói hay tiếng ồn ngoại trừ tiếng ồn ào của máy móc và thỉnh thoảng có luồng gió thổi để giữ cho nguyên liệu thô chuyển động, nhưng bạn có thể nhìn thấy làn khói nóng phía trên nó và khi

trời mưa, nước sẽ quay bốc hơi ngay lập tức khi chạm vào bề mặt lò nung.
Lò nung phải quay liên tục 24 giờ một ngày, vì nếu nó ngừng hoạt động trong thời gian dài, sức nóng khủng khiếp bên trong sẽ bắt đầu làm tan chảy cấu trúc, khiến nó bị võng và sau đó hỏng. Người quản lý nhà máy cho biết đây là nỗi sợ hãi lớn nhất của ông, nỗi sợ hãi lớn nhất của bất kỳ người quản lý nhà máy xi măng nào. Thế là lò nung tiếp tục lăn, nguyên liệu tiếp tục chảy xuống, chảy qua cho đến khi biến thành clinker – một loại cục đen, sau đó được nghiền thành xi măng, chất keo gắn kết Thế giới Vật chất với nhau.
Bước đột phá của Edison là xây dựng được lò nung dài nhất thế giới, tất cả đều dài 150 feet, không ngắn hơn lò quay ở Rugby là mấy. Ông đã áp dụng những cải tiến của người Đức đối với công thức, thêm một số bước của riêng mình và được cấp bằng sáng chế cho hệ thống. Nó sẽ chứng minh một trong những phát minh sinh lợi nhất của ông và dựa trên tác động của nó đối với thế giới, bạn có thể chứng minh rõ ràng rằng đó cũng là một trong những phát minh quan trọng nhất của ông. Tuy nhiên, đây là bê tông - bê tông nhàm chán, lỗi thời - tại thời điểm viết bài, nó thậm chí không xuất hiện trên trang Wikipedia của Edison. [19]
Những gì Edison mang đến cho ngành xi măng là một thứ hết sức quan trọng: quy mô. Bằng cách sử dụng lò quay khổng lồ của mình, các nhà máy có thể sản xuất ra một nghìn thùng xi măng mỗi ngày - quá đủ để trang trải chi phí nhiên liệu và đá cần thiết để sản xuất xi măng. Khả năng tạo ra số lượng lớn một chất nhất định có thể không thu hút được trí tưởng tượng, nhưng đó là một trong những chủ đề lặp đi lặp lại mà người ta gặp phải khi tham quan Thế giới Vật chất. Từ bê tông đến đồng, từ sắt đến lithium, khả năng của chúng ta không chỉ là phát minh ra tương lai mà là sản xuất và phổ biến hàng loạt những tài liệu này để nâng cao cuộc sống và giúp hàng triệu người thoát khỏi đói nghèo. Nói cách khác, lý do xi măng đã thay đổi thế giới không chỉ vì nó có những đặc tính kỳ diệu mà vì nó rẻ và có mặt ở khắp mọi nơi.

Mặt tối của bê tông

Nói rằng bê tông có ở khắp mọi nơi không phải là cường điệu. Mặc dù thực tế là chúng ta chỉ mới bắt đầu sản xuất hàng loạt hỗn hợp cát, cốt liệu và xi măng này chỉ hơn một thế kỷ trước, nhưng hiện nay trên hành tinh này có hơn 80 tấn bê tông cho mỗi người sống - tổng cộng khoảng 650 gigaton. Để so sánh con số hơi vô nghĩa đó, nó lớn hơn đáng kể so với trọng lượng tổng hợp của mọi sinh vật sống trên hành tinh: mọi con bò, mọi cây cối, mọi con người, thực vật, động vật, vi khuẩn và sinh vật đơn bào. Mỗi năm chúng tôi sản xuất đủ bê tông trên khắp thế giới để bao phủ toàn bộ vùng đất nước Anh. [20]
Để hiểu điều này có ý nghĩa gì trong thực tế, hãy xem xét Thiên Tân, một siêu đô thị với 15 triệu dân trải dài từ bờ biển đến gần Bắc Kinh. Nơi này từng nổi tiếng với muối được sản xuất trong các ao ven biển và được buôn bán rộng rãi, nhưng ngày nay nó nổi tiếng vì đã bao phủ khu vực đô thị của mình bằng một lượng bê tông gần như không thể đo đếm được. Một phần bê tông bao phủ mặt đất, biến nơi từng là đầm lầy và cánh đồng thành đường sá và bãi đậu xe, nhưng phần lớn bê tông được sử dụng để xây dựng hết tòa nhà chọc trời này đến tòa nhà chọc trời khác.
Trở lại năm 2014, Thiên Tân được mệnh danh là 'thủ đô nhà cao tầng của thế giới'. Chỉ riêng trong năm đó, 6% trong số tất cả các tòa nhà chọc trời mới được hoàn thành, với tổng chiều dài khổng lồ 1,25 km (4.100 feet), đều ở đây tại thành phố hạng hai này của Trung Quốc, và xi măng Trung Quốc sản xuất đang tăng trưởng với tốc độ chóng mặt, tăng gấp đôi cứ sau mười năm. Nếu bạn nhớ lại những biểu đồ cho thấy sự lây lan của COVID-19, bạn có thể sẽ quen với hình dạng: một đường cong hàm mũ rõ ràng, ngoại trừ lần này thứ đang lây lan không phải là virus mà là những đường gân kết tinh của xi măng xung quanh các hạt cát và các cục xi măng. tổng hợp. Dựa trên dữ liệu tính đến năm 2013, một học giả viết, toàn bộ hành tinh sẽ được bao phủ bằng bê tông trong vòng 50 năm nữa. [21]
Tòa nhà cao nhất ở Thiên Tân có tên là Goldin Finance 117, nhưng được biết đến nhiều hơn với cái tên 'Gậy đi bộ', vì thực tế là nó được thiết kế để có một loại núm ở trên - một khu phức hợp hình kim cương ba tầng chứa đài quan sát cao nhất thế giới, quán bar-nhà hàng cao nhất và bể bơi cao nhất. Khi nó đang được xây dựng, các bài báo đã viết về kỹ thuật tinh xảo cần thiết để tạo ra một tòa nhà cao và mỏng

như thế này ở một khu vực cực kỳ dễ xảy ra động đất, bí mật nằm ở khung cấu trúc phức tạp gồm 'cột lớn' bằng bê tông cốt thép, ' những thanh giằng lớn bằng thép và quan trọng nhất là một lõi bê tông dày chạy suốt cấu trúc. Đây là một trong những công trình kết cấu thép và bê tông tiên tiến nhất trên hành tinh. Nhưng điều thú vị nhất về tòa tháp này là nó chưa được hoàn thiện. Nó là một 'máy quét ma', nhiều năm sau ngày khai trương dự kiến.

Việc xây dựng đã bị tạm dừng vào năm 2010, một lần nữa vào năm 2015 và một lần nữa vào năm 2018. Trong khoảng thời gian đó, cơn sốt xây dựng các tòa nhà chọc trời đã giảm bớt. Sự bùng nổ xây dựng của Thiên Tân đã chuyển sang phá sản; tốc độ tăng trưởng kinh tế của khu vực, từng mạnh nhất ở Trung Quốc, hiện nay là một trong những nơi yếu nhất. Ngay cả các khối văn phòng và căn hộ đã hoàn thiện trên toàn thành phố Manhattan cũng chưa được lấp đầy hoàn toàn. Năm 2020, chính phủ Trung Quốc ban hành nghị định hạn chế số lượng và chiều cao của các tòa nhà chọc trời được xây dựng trên khắp đất nước. Vào năm 2021, nó bắt đầu một chương trình phá hủy, với nhiều ghostscraper bị san bằng xuống đất. Gậy Đi Bộ chỉ đơn thuần là tòa tháp cao nhất trong số những tòa tháp còn dang dở này, những câu chuyện cảnh báo rải rác trên đường chân trời của thành phố.

Mặc dù đất nước hiện nay có thể rải rác những thị trấn ma và thậm chí cả những tòa nhà ma, và trong khi sản lượng bê tông hàng năm không còn tăng theo cấp số nhân thì quy mô tuyệt đối của nó vẫn khổng lồ đến khó tin. Trong thời gian bạn đọc trang này, lượng bê tông trị giá hơn 120.000 xe cút kít sẽ được đổ ở Trung Quốc. Trong ba năm từ 2018 đến 2020, Trung Quốc đã đổ nhiều bê tông hơn Mỹ trong suốt thời gian tồn tại của mình, kể từ năm 1865, khi nước này mở nhà máy đầu tiên sản xuất xi măng Portland – loại xi măng được Joseph Aspdin cấp bằng sáng chế – thông qua việc xây dựng Đập Hoover, hệ thống đường cao tốc Hoa Kỳ, Manhattan và mọi thứ khác cho đến ngày nay. [22]

Những điểm hấp dẫn lớn của bê tông – độ bền, tính dễ thi công và giá rẻ – cũng là lời nguyền lớn của nó. Nó ở khắp mọi nơi: không chỉ trong cơ sở hạ tầng và nhà ở thiết yếu, không chỉ trong những tòa nhà cao nhất và những cây cầu dài nhất thế giới, không chỉ trong

những tòa nhà mang tính biểu tượng của Frank Lloyd Wright hay Oscar Niemeyer hay Nhà hát Opera Sydney hay những khối đá nguyên khối thô sơ của những năm 1960, mà còn mọi nơi khác cũng vậy. Nó được sử dụng quá mức và tràn ngập trong các bãi đỗ xe tồi tàn và các tòa nhà cao tầng, trong các cầu vượt xấu xí, khó nhận dạng, trong các nhà máy và văn phòng trên khắp thế giới. Và đôi khi nó cũng bị lạm dụng.

Đối với một điều đáng tiếc khác của bê tông là tuy khá dễ dàng để làm đúng công thức nhưng lại rất dễ mắc sai lầm. Khi một trận động đất xảy ra ở Haiti vào năm 2010, mức độ tàn phá - một phần tư triệu tòa nhà bị phá hủy, hàng chục nghìn người chết - một phần là do xây dựng kém chất lượng. Pantheon có thể đã tồn tại hơn 2.000 năm nhưng chất lượng của một số nhà bê tông mới xây ở Trung Quốc kém đến mức tuổi thọ trung bình của nó chỉ khoảng 20 năm. Theo Liên bang Cơ quan quản lý đường cao tốc, gần 1/10 cây cầu ở Mỹ thiếu kết cấu, tỷ lệ ở Rhode Island và Tây Virginia là hơn 1/5. Ở Anh, con số này có thể còn cao hơn, với gần một nửa số cầu trên đường cao tốc hoặc đường chữ A có bằng chứng về khiếm khuyết. [23]

Đây một phần là hệ quả của một trong những đổi mới vĩ đại khác trong lịch sử bê tông, nơi nó được đổ cùng với các thanh sắt hoặc thép. Bê tông cốt thép hay còn gọi là 'cốt thép', cho phép xây dựng những tòa nhà và cây cầu táo bạo hơn nữa, nhưng khi công thức sai, nó còn dẫn đến nhiều thảm họa hơn. Đôi khi, thép bị ăn mòn và gây ra những khuyết tật nghiêm trọng. Khi một khu chung cư sụp đổ ở Surfside, ngay phía bắc Miami, vào năm 2021, các nhà khảo sát pháp y cho biết bê tông nứt và các thanh cốt thép bị ăn mòn có thể là thủ phạm. Điều tương tự cũng xảy ra khi cầu Morandi bị sập ở thành phố Genoa của Ý vào năm 2018 và khi cầu vượt Hammersmith ở London bị đóng cửa để sửa chữa khẩn cấp. Dư âm do việc xây dựng bê tông kém chỉ mới bắt đầu.

Bê tông và biến đổi khí hậu

Tuy nhiên, những vấn đề này vẫn chưa là gì so với những tác động môi trường. Đối với lời nguyền khác của bê tông là nó là một trong những nguồn thải carbon lớn nhất trên hành tinh. Bất chấp sự chú ý dành cho các nguồn phát thải khí nhà kính khác như hàng không hay

nạn phá rừng, việc sản xuất xi măng tạo ra nhiều CO_2 hơn cả hai lĩnh vực đó cộng lại. Sản xuất xi măng chiếm tới 7-8% tổng lượng khí thải carbon.

Tại thời điểm viết bài, lượng khí thải toàn cầu đó được chia theo tỷ lệ khoảng 60:40 giữa phản ứng hóa học xảy ra trong phấn hoặc đá vôi khi nó đốt cháy carbon trong quá trình trở thành xi măng và năng lượng cần thiết để làm nóng lò nung. Cái sau tương đối dễ giải quyết bằng cách sử dụng nhiên liệu thay thế thay vì nhiên liệu hóa thạch để làm nóng lò. Nhà máy xi măng ở Rugby đã trao đổi phần lớn than của mình bằng một thứ gọi là Climafuel, về cơ bản là một dạng chất thải đã qua xử lý. Các nền kinh tế phát triển, bao gồm cả Anh và Mỹ, đã cố gắng giảm hơn 50% lượng khí thải carbon xi măng của mình, một phần nhờ vào hình thức thay thế này và một phần bằng cách thêm các sản phẩm khác vào bột ra khỏi lò nung.

Nhưng phản ứng hóa học là một vấn đề khó giải quyết hơn nhiều. Con người đã đun nóng canxi cacbonat để sản xuất canxi oxit hoặc vôi sống, phản ứng quan trọng trong sản xuất xi măng, trong hàng ngàn năm; thực sự, quá trình này là quá trình phát thải carbon quy mô lớn đầu tiên của loài người, hàng thiên niên kỷ trước kỷ nguyên nhiên liệu hóa thạch. Và chúng ta vẫn chưa tìm ra cách dễ dàng để loại bỏ carbon mà không tạo ra carbon dioxide.

Có một số giải pháp: bạn có thể pha loãng clinker với các loại bột khác mà không làm giảm độ bền của xi măng cuối cùng. Bạn có thể thêm các chất khác như tro bay và đá vôi. Những kỹ thuật này hiện đã được áp dụng rộng rãi và đã giúp giảm lượng khí thải carbon, nhưng không thể loại bỏ chúng hoàn toàn. Vì vậy, ngành xi măng đang đặt hy vọng vào thứ gọi là thu hồi và lưu trữ carbon (CCS). Bạn sẽ không thể đi xa trong Thế giới Vật chất mà không nghe nói về CCS, một công nghệ có thể lọc CO_2 ra khỏi ống khói và biến nó thành một chất mà sau đó có thể được lưu trữ ở nơi khác, rất có thể là dưới lòng đất.

Vấn đề với CCS là mặc dù nó hoạt động trên lý thuyết nhưng nó đắt đến mức khó có thể cộng gộp các khoản tiền - đặc biệt là trong lĩnh vực có khối lượng lớn, tỷ suất lợi nhuận thấp như xi măng.

Vấn đề quy mô tương tự làm lu mờ một số giải pháp triệt để hơn cho vấn đề carbon của bê tông. Có nhiều cách khác để sản xuất xi măng, hoàn toàn bỏ qua phản ứng hóa học đó, do đó không tạo ra khí thải

carbon, nhưng hứa hẹn nhất là Quá trình pha chế bắt đầu bằng chất thải từ lò cao, từ đó tạo ra rất nhiều carbon. Có những ví dụ đáng khích lệ về những loại xi măng như vậy, hầu hết được tìm thấy ở Ukraine và các khu vực khác ở Đông Âu, nơi tình trạng thiếu xi măng thông thường vào những năm 1950 đã buộc các nhà khoa học Liên Xô phải ứng biến. Nhưng không ai biết chắc chắn về lâu dài những loại xi măng thay thế này có khả năng phục hồi như thế nào.
Brant Walkley, người nghiên cứu về xi măng hoạt tính kiềm tại Đại học Sheffield, nói với tôi: “Nếu được thiết kế và pha chế đúng cách, loại xi măng này đủ tốt để có hiệu suất đáp ứng hoặc vượt quá xi măng Portland truyền thống”. 'Những vật liệu mới này đã được phát triển gần đây. Chúng tôi chỉ có 30 đến 40 năm dữ liệu. Nhưng so sánh với dữ liệu thực nghiệm 200 năm về việc sử dụng xi măng Portland thì đó là một thách thức rất lớn.'
Vì vậy, đột nhiên, các tòa nhà thời Xô Viết được làm bằng loại xi măng này đang được các nhà nghiên cứu kiểm tra để xem bê tông của chúng có thể tồn tại được bao lâu. Những khối nhà cao tầng nguyên khối ở Lipetsk ở Nga, những tòa tháp bê tông ở Phần Lan – những tòa nhà buồn tẻ này hiện đang được giới khoa học quan tâm. Khi lực lượng Nga pháo kích vào cảng Mariupol của Ukraine vào năm 2022, trong số các tòa nhà bị cháy có một số tòa nhà sớm nhất được làm từ khối xi măng hoạt tính kiềm. Giữa sự mất mát về nhân mạng và sự khốn khổ của con người, một thứ khác cũng đang bị phá hủy: một trong những manh mối tốt nhất mà chúng ta có về cách sản xuất hàng loạt vật liệu ma thuật này mà không gây ra thiệt hại như vậy cho hành tinh.
Đôi khi những manh mối như vậy bị vô tình xâm phạm. Có một cầu tàu cũ ở Skinningrove, phía đông bắc nước Anh, được xây dựng bằng vật liệu tương tự trong một thí nghiệm đã có từ lâu trước những tòa nhà của Liên Xô này. Ngoại trừ việc cách đây vài năm cầu cảng đã được khôi phục và phần lớn bê tông cũ quý giá đó đã được phủ lên bằng xi măng Portland thông thường.
Ở một số quốc gia, vấn đề phát thải carbon càng trở nên phức tạp hơn do thiếu nguyên liệu cần thiết để sản xuất xi măng. Dù dồi dào nhưng nhiều quốc gia ngày càng trở nên thận trọng trong việc ký giấy phép mới để khai thác và khai thác đá vôi, nếu không có giấy phép đó

thì chúng ta sẽ không có chất keo làm cốt lõi của xi măng. Vào năm 2021, Thụy Điển phải đối mặt với tình trạng thiếu bê tông đột ngột, trong khi công việc của nhiều dự án bị đe dọa bởi quyết định của Tòa án Đất đai và Môi trường Tối cao từ chối cấp giấy phép khai thác đá vôi mới ở Gotland cho nhà sản xuất xi măng lớn nhất đất nước, Xi măng.

Đá vôi cũng không phải là thành phần dường như dồi dào duy nhất nhưng lại có thể trở thành bất cứ thứ gì khác. Sản xuất bê tông cũng đang rất khát nước, phụ thuộc vào nguồn cung cấp nước tốt và liên tục cho phản ứng hóa học đó. Sự khao khát của chúng ta đối với nó lớn đến mức chỉ riêng việc sử dụng bê tông đã chiếm khoảng 1/10 lượng nước sử dụng trong công nghiệp trên thế giới. Điều đó hoàn toàn có thể chấp nhận được ở những nơi có nguồn cung cấp nước đáng tin cậy, nhưng hiện nay hãy xem xét rằng phần lớn bê tông tươi trên thế giới hiện đang được đổ ở các quốc gia phải đối mặt với hạn hán và mất an ninh nguồn nước.

Tuy nhiên, vẫn có một số công nghệ nguyên mẫu có thể hữu ích và các loại bê tông mới có thể cách mạng hóa hoạt động kinh doanh. Có những loại bê tông làm từ cây gai dầu hứa hẹn bền hơn và thân thiện với môi trường hơn so với các loại bê tông truyền thống. Các nhà nghiên cứu tại Trung tâm Đổi mới Kỹ thuật Graphene ở Manchester cho biết họ đã sản xuất được một biến thể xi măng Portland mới có tên là 'Concretene', loại xi măng này bền hơn và xanh hơn so với loại xi măng truyền thống. Ngày nay, bạn có thể mua loại bê tông có khả năng tự phục hồi, được tẩm một loại vi khuẩn đặc biệt có tác dụng bài tiết khoáng chất canxit nếu vết nứt hình thành khi có nước. Ngoài ra còn có bê tông tự làm sạch. Và có nhiều nghiên cứu hơn bao giờ hết về dạng đá nhân tạo này.

Có rất nhiều công ty khởi nghiệp thú vị nhằm mục đích sản xuất hàng loạt bê tông âm carbon, điều này nghe có vẻ khó hiểu cho đến khi bạn nhận ra rằng ngay cả xi măng Portland cũng hấp thụ chậm carbon dioxide từ không khí khi đóng rắn - một kiểu đảo ngược phản ứng hóa học trong lò nung trong quá trình tạo ra nó. Vấn đề là xi măng truyền thống chỉ tái hấp thụ khoảng 17% lượng khí thải carbon từ quá trình sản xuất. Một trong những đối thủ thú vị hơn trong lĩnh vực này, một công ty Mỹ có tên Solidia, đã phát triển một loại xi măng hứa hẹn hấp

thụ tới 240kg carbon dioxide cho mỗi 1.000kg xi măng. Nhưng có hai cái bẫy. Đầu tiên là xi măng của nó tuy nhiên chịu trách nhiệm cho một số lượng khí thải carbon trong quá trình sản xuất - mặc dù ít hơn đáng kể so với Portland. Vấn đề thứ hai – và có lẽ thách thức hơn – là xi măng Solidia phụ thuộc nhiều vào CO_2 đến mức bạn cần xử lý nó trong buồng được làm giàu bằng carbon. Do phần lớn bê tông trên thế giới chỉ được đổ vào khuôn và lỗ ở các công trường xây dựng nên đây là một thách thức nghiêm trọng. Tuy nhiên, có lẽ bước đột phá sẽ đến từ nơi khác. Điều đáng chú ý là, dựa trên lượng bê tông trên thế giới được đổ ở đó, hơn 50% bằng sáng chế mới về bê tông mới đã được các công ty và tổ chức học thuật Trung Quốc cấp phép.
[24]
Vì vậy, có hy vọng. Cũng giống như cách các nhà khoa học, thợ xây dựng và những người có sở thích đua nhau khám phá lại công thức chế tạo bê tông La Mã vào thế kỷ 18 và 19, một cuộc đua mới đang diễn ra để tái tạo lại loại bê tông không thải ra khí carbon. Và rất có thể Joseph Aspdin của ngày mai sẽ không được tìm thấy ở Anh mà ở Trung Quốc. Tuy nhiên, ngay cả khi lượng khí thải đó đã được xử lý, bê tông vẫn sẽ tiếp tục là sản phẩm của Thế giới Vật chất. Tương tự như việc ô tô điện, tua-bin gió hoặc tấm pin mặt trời xanh nhất có dấu chân môi trường riêng, xi măng xanh nhất cũng vậy. Nó cần nước. Nó cần đá vôi. Và hơn hết, nó cần cát – loại cát phù hợp. Điều đó có nghĩa là phải đào thêm từ lòng đất, trong đó lần lượt đặt ra những rủi ro mới cho hệ sinh thái. Thế tiến thoái lưỡng nan không thể tránh khỏi của Thế giới Vật chất cũng vậy.
Tuy nhiên, nghịch lý của cát là nó không chỉ đơn thuần là chất nền của thủy tinh – sản phẩm được sản xuất đầu tiên trên thế giới – hay là kết cấu của thế giới xây dựng. Nó không chỉ đơn thuần được sử dụng làm nền móng của các tòa nhà hay vật chất để các quốc gia mở rộng lãnh thổ của mình. Câu chuyện về cát không chỉ có quy mô đáng kinh ngạc mà còn là câu chuyện thu nhỏ đáng kinh ngạc. Vì chính nguyên tử tạo nên xương sống của bê tông chính là nguyên tử mà chúng ta đã khắc sâu và hình thành nên thời đại máy tính.
Nghịch lý của cát là ngày nay chúng ta tạo ra một trong những sáng tạo quý giá nhất của loài người từ một trong những nguyên tố dồi dào nhất của thiên nhiên. Nhưng làm như vậy đòi hỏi một loạt các biến đổi

thậm chí còn đáng kinh ngạc hơn cả kính hoặc bê tông. Nó cũng liên quan đến một trong những cuộc hành trình kỳ diệu nhất trên thế giới.

3
Cuộc hành trình dài nhất

Có rất nhiều cuộc hành trình phi thường trong thế giới tự nhiên. Cuộc di cư lâu dài và bí ẩn của lươn châu Âu tới biển Sargasso; hành trình từ cực này sang cực khác của nhạn biển Bắc Cực, loài có thể đi được một triệu rưỡi dặm trong suốt cuộc đời của nó; tiếng cá hồi vua ào ạt hàng trăm dặm ngược dòng, lên thác, hòa vào dòng sông cuồn cuộn. Những cuộc hành trình xuyên qua Thế giới Vật chất cũng không kém phần đáng kinh ngạc, đặc biệt khi nhìn qua chiều thời gian. Hãy xem xét hạt cát nhỏ bé, một hạt thạch anh nhỏ xíu. Trải qua hàng triệu năm – có khi hàng tỷ năm – nó đã chứng kiến sự trôi qua của thời gian sâu thẳm. Nó đã là đá rồi lại là hạt và rồi lại là đá. Nó đã bị nén thành đá, bị ép dưới lòng đất hàng trăm triệu năm trước khi được giải phóng do sự xói mòn của sông hoặc gió. Nó đã bị cuốn xoáy về phía hạ lưu vào các cửa sông và bãi biển, bị thủy triều cuốn đi và quay lại, bị nén lại và nén lại thành đá. Bị các dòng sông băng vùi lấp, bị cuốn qua các kênh và thác nước, hạt này đã nằm im trước khi được nhặt lên để chu kỳ bắt đầu lại.

Người ta cho rằng khoảng một nửa số hạt cát thạch anh đã trải qua sáu chu kỳ như thế này, từ đá này sang đá khác. Đá có thể bị mòn theo thời gian nhưng cát hạt còn sót lại trên hành trình tiếp theo của nó. Đây có lẽ là cuộc hành trình phi thường thứ hai trong Thế giới Vật chất.

Tại sao chỉ là thứ hai? Bởi vì, tuy đáng chú ý nhưng cuộc hành trình này vẫn mờ nhạt so với một cuộc phiêu lưu sử thi khác. Cuộc hành trình này bắt đầu bằng một mảnh đá được kéo lên khỏi mặt đất; nó sẽ nằm trong túi của bạn và được biến thành một trong những thiết bị công nghệ tiên tiến nhất hiện nay. Trên đường đi, nó bao gồm hai, có thể ba hoặc nhiều chuyến đi vòng quanh hành tinh. Chuyến đi này không chỉ trải dài qua các châu lục và thời gian. Nó đưa chúng ta đến những tầm cao xa nhất của hóa học, vật lý và công nghệ nano, liên quan đến các quá trình xa xôi, dường như không thể tin được đến mức chúng nghe giống như khoa học viễn tưởng. Nhưng đừng để bị

lừa; điều này đang diễn ra hàng ngày trong thế giới thực với quy mô khổng lồ, bởi vì đây, cuộc phiêu lưu dài nhất trong tất cả, là chuỗi cung ứng biến silicon thành chip silicon.
Việc những con chip này làm cho thế giới hiện đại vận hành đã được khẳng định khá rõ ràng. Mọi người đều biết họ đại diện cho bộ não của máy tính và điện thoại thông minh của chúng ta; nhưng ít người nhận ra mức độ phổ biến của chúng. Họ ở *khắp mọi nơi* . Bộ xử lý chính trong điện thoại của bạn chỉ là một trong hàng chục con chip khác nhau, mỗi con chip điều khiển các chức năng riêng biệt. Một chiếc ô tô hiện đại có thể có hàng trăm con chip: dành cho hệ thống giải trí, định vị, điều khiển động cơ, cửa sổ, v.v. Ngay cả trong các thiết bị không có từ "thông minh" trong tên, các liên kết cơ học từ lâu đã nhường chỗ cho mạng lưới chất bán dẫn. Chúng không chỉ là bộ não hay thậm chí là hệ thần kinh của thế giới mà còn là các gân, tĩnh mạch và cơ quan thụ cảm của thế giới. Gần như mọi hoạt động kinh tế, gần như mỗi đô la trong GDP toàn cầu, bằng cách này hay cách khác đều phụ thuộc vào các công tắc cực nhỏ của chất bán dẫn.
Nhìn lướt qua một trong những tấm bán dẫn của mạch silicon nguyên chất và bạn có thể gặp khó khăn trong việc dung hòa vật thể kim loại sáng bóng này với silicon mà chúng ta quen thuộc hơn: thành phần chính trong cát, đá hoặc bê tông. Tuy nhiên, điều kỳ diệu của silicon là nó không chỉ làm có những đặc tính độc đáo cho phép nó trở thành thủy tinh; nó không chỉ đủ vững chắc để nâng đỡ các tòa nhà ở dạng bê tông; nó cũng có các thuộc tính về điện khiến nó khác biệt với hầu hết các thành phần khác trong bảng tuần hoàn, vì nó là chất bán dẫn. Chất bán dẫn là những vật liệu dị thường mà trong nhiều thập kỷ đã khiến các nhà khoa học bối rối. Chúng không dẫn điện như đồng, nhưng cũng không cách điện dòng điện như thủy tinh. Không ai có thể nghĩ ra phải làm gì với chúng, nhưng cuối cùng họ phát hiện ra rằng chúng hoạt động rất xuất sắc như một loại công tắc. Công tắc đầu tiên, hay bóng bán dẫn, như tên gọi của nó, được chế tạo vài ngày trước Giáng sinh năm 1947 bởi Walter Brattain và John Bardeen, hai nhà vật lý làm việc dưới quyền của William Shockley tại Bell Labs ở Mỹ. Khi bạn nhìn thấy nó ngày nay (có một bản sao ở Bảo tàng Smithsonian ở Washington, DC), nó trông có vẻ hơi vụng về, giống như một thí nghiệm hàn bị trục trặc. Nó treo lủng lẳng trên một khối

Perspex: một mớ dây rối rắm được cắm vào một thứ trông giống như một miếng nhựa hình nêm, tất cả đều nằm trên một tấm kim loại đen trông có vẻ bẩn thỉu – trong trường hợp này là germanium.
Nhưng công tắc trạng thái rắn đầu tiên này đại diện cho một cuộc cách mạng. Bởi vì, bằng cách kết hợp đủ các công tắc này, mỗi công tắc là một biểu hiện vật lý nhỏ bé của mã nhị phân, 0 hoặc 1, bạn có thể tạo ra một máy tính trên một miếng silicon nhỏ, được cắt ra từ một tấm wafer hình tròn (do đó là 'chip'). Những bước nhảy vọt về đổi mới này, từ chính công tắc đến 'mạch tích hợp', mạch đầu tiên được Robert Noyce khắc vào silicon tại Fairchild Semiconductor vào năm 1959, đại diện cho nền tảng vật lý của thời đại điện toán.
Từ đó, vật lý, quan trọng ở đây. Đôi khi sự đổi mới là thành quả của một làn sóng não đơn giản. Như nhà sử học Anton Howes đã chỉ ra, không có lý do cố hữu nào khiến tàu con thoi - phát minh năm 1733 của John Kay đã cách mạng hóa ngành dệt len - lại không thể được sản xuất hàng nghìn năm trước đó. Nhưng thường phải mất hàng chục hoặc hàng thế kỷ tiến bộ vật chất trước khi các ý tưởng có thể biểu hiện thành những cỗ máy hoạt động được. Đó là trường hợp của những bản phác thảo về một chiếc trực thăng của Leonardo da Vinci, nó không thể trở thành hiện thực vật lý cho đến khi vật liệu bắt kịp, và đó là trường hợp của máy tính, được Ada Lovelace và Charles Babbage lên ý tưởng hơn một thế kỷ trước phát minh ra bóng bán dẫn. Đã có những máy tính với ống chân không bằng thủy tinh đóng vai trò là công tắc từ những năm 1940, nhưng công tắc trạng thái rắn từ lâu đã là mục tiêu. Hiệu quả hơn nhiều, đáng tin cậy hơn nhiều, nhỏ hơn nhiều, không có bộ phận chuyển động, ngoại trừ các electron hoạt động âm thầm qua các công tắc – bóng bán dẫn là tiến bộ vật chất đã khai sinh ra thời đại hiện đại. Trong một số trường hợp, điện thoại thông minh và thiết bị mới nhất cũng như ô tô và tủ lạnh mới nhất đều phụ thuộc hoàn toàn vào những lát silicon nhỏ, mỏng này, được pha tạp (một dạng truyền hóa chất) với nhiều vật liệu khác và được khắc bằng một bộ của các bóng bán dẫn cực nhỏ. [1]
Thiết bị đầu tiên từ năm 1947 có kích thước bằng bàn tay của một đứa trẻ nhỏ, nhưng bộ phận thực sự quan trọng, bản thân bóng bán dẫn, có lẽ chỉ khoảng một centimet. Bây giờ hãy xem điều gì đã xảy ra trong 75 năm tiếp theo. Vào thời của Intel 4004, chip máy tính hiện đại

đầu tiên, vào năm 1971, chỉ có hơn 2.000 bóng bán dẫn được nhồi nhét vào cùng một khu vực, mỗi bóng bán dẫn có kích thước bằng một tế bào hồng cầu. Đến đầu những năm 2020, bộ xử lý điện thoại thông minh có thể lắp khoảng 12 tỷ bóng bán dẫn vào một diện tích *nhỏ* hơn một cm vuông một chút.

Cuộc đua tới đáy của hệ thống số liệu này, được chính thức hóa một cách nổi tiếng nhất bởi Gordon Moore, người đồng sáng lập Intel, người đã lưu ý vào những năm 1960 rằng số lượng thành phần bên trong các mạch tích hợp này đã tăng gấp đôi với tốc độ không đổi, là một trong những điều kỳ diệu của thế giới hiện đại. tuổi tác và nó đại diện cho một vòng tròn đạo đức. Các bóng bán dẫn càng nhỏ thì chúng càng hoạt động tốt: chúng có thể được bật và tắt lại (hãy nhớ rằng mỗi bóng bán dẫn cuối cùng chỉ là một công tắc điện) thậm chí còn nhanh hơn và tốn ít điện năng hơn.

Chip máy tính có thể được sử dụng cho mọi mục đích: đơn giản nhất, chúng có thể hoạt động như một công tắc, bật hoặc tắt đèn pha trong ô tô. Xung quanh bạn có nhiều loại chip 'silic năng lượng' hơn bạn có thể nhận ra, vì chúng có trong mọi sản phẩm điện tử hiện đại, từ máy sấy tóc hay máy hút bụi đến cáp nguồn cho điện thoại của bạn. Có chất bán dẫn ở khắp mọi nơi: trong điện thoại thông minh của bạn có nhiều loại khác nhau, một số đóng vai trò là cảm biến trong máy ảnh, một số khác dùng để lưu trữ ảnh của gia đình bạn. Tuy nhiên, thú vị nhất là những thứ hoạt động như bộ não của các thiết bị của chúng ta, nơi bạn càng có nhiều bóng bán dẫn, bạn càng có thể thực hiện nhiều phép tính và máy tính càng mạnh. Những con chip mới nhất như vậy có thể nhét khoảng 15 triệu bóng bán dẫn vào một chấm có kích thước bằng một dấu chấm trên trang này. Các bóng bán dẫn trong điện thoại thông minh ngày nay không chỉ nhỏ hơn một tế bào hồng cầu (nhỏ hơn khoảng một nghìn lần); chúng nhỏ hơn virus COVID-19. Trên thực tế, bạn có thể nhét bốn trong số chúng vào bên trong một con virus Corona, mỗi bóng bán dẫn có kích thước tương đương với một trong những protein tăng đột biến của virus, những đường gân giống như chiếc gậy tỏa ra từ trung tâm của nó.

Thật hấp dẫn khi mô tả những đặc điểm này như kính hiển vi, nhưng có nguy cơ mang tính mô phạm, các bóng bán dẫn ngày nay thậm chí còn nhỏ hơn bước sóng của ánh sáng khả kiến và do đó hoàn toàn

không thể phân biệt được bằng mắt thường ngay cả với kính hiển vi thông thường mạnh nhất. Chúng được đo không phải bằng micromet mà bằng nanomet. Theo Intel, thực tế hiện nay chúng ta chỉ còn một vài thế hệ chip (kích thước mới có xu hướng được phát triển vài năm một lần) kể từ 'kỷ nguyên Angstrom', nơi các bóng bán dẫn sẽ được đo bằng angstrom, tức là $0{,}1$ nanomet, hay $0{,}00000001$cm. Để tham khảo, một nguyên tử silicon chỉ đo được hơn 5 angstrom.
Có lẽ lý do khiến rất ít người ngạc nhiên về điều này - vì nó thực sự đáng kinh ngạc - là vì những sản phẩm này vô hình đối với chúng ta, được đóng gói sâu bên trong các thiết bị hàng ngày. Có lẽ nó bởi vì, không giống như những thành tựu kỹ thuật mang tính biểu tượng thời xưa, như chiếc máy bay phản lực Concorde những năm 1970, loại vé đắt đến mức chỉ những người giàu nhất mới có thể trải nghiệm chuyến bay siêu thanh, điều kỳ diệu này là thứ dành cho hầu hết mọi người, ngay cả ở các nước đang phát triển. Có lẽ lý do khiến Thung lũng Silicon không biết đến sự tiến triển của Thế giới Vật chất là vì ngày nay không có con chip silicon nào được sản xuất ở Thung lũng Silicon. Nhà máy sản xuất chất bán dẫn lớn cuối cùng ở đó đã đóng cửa cách đây một thập kỷ rưỡi và trong khi vẫn còn một số công ty trong thung lũng tập trung vào thiết kế chất bán dẫn, ngày nay chúng bị áp đảo bởi thứ đôi khi được gọi là 'công nghệ mềm': ứng dụng, nền tảng và dịch vụ.
Vì vậy, nếu bạn muốn theo dõi cuộc hành trình phi thường nhất trên thế giới, bạn phải nhìn hoàn toàn vào một nơi khác. Hãy để chúng tôi tưởng tượng bạn đủ may mắn khi chọn được chiếc iPhone mới nhất (chúng tôi đang sử dụng iPhone làm ví dụ ở đây, nhưng về mặt thực tế, hành trình mà chúng tôi đang bắt đầu cũng giống như hầu hết các thiết bị Android mới – thực sự là chúng chất bán dẫn thường được sản xuất trong cùng một nhà máy với các đối thủ cạnh tranh của họ). Nhìn vào bao bì của điện thoại thông minh. Nó nói rằng nó được thiết kế ở California và lắp ráp ở Trung Quốc, nhưng đây là một sự đơn giản hóa quá mức, vì chiếc máy tính thu nhỏ này là một tấm thảm công nghệ đến từ khắp nơi trên thế giới. Màn hình, lớp kính bao phủ, pin, camera, gia tốc kế, modem và bộ thu phát, chip lưu trữ và quản lý năng lượng; mỗi chiếc đều đến từ một nhà máy khác nhau trước khi được lắp ráp tại Trung Quốc và sau đó chuyển đến bạn.

Phần lớn hoạt động này không diễn ra ở Trung Quốc hay California. Thật vậy, điều đáng chú ý ở giai đoạn này là hầu như tất cả các thành phần vật lý trong điện thoại không phải do chính Apple sản xuất, Apple thực sự không phải là một nhà sản xuất mà là một nhà đóng gói lại xuất sắc công nghệ do người khác tạo ra. Ngay cả những con chip mang tên Apple – A16 Bionic là chip iPhone mới nhất tại thời điểm viết bài – trên thực tế đều được sản xuất bởi một công ty khác hoàn toàn, Công ty Sản xuất Chất bán dẫn Đài Loan hay được biết đến nhiều hơn là TSMC. Đến lượt công ty đó chỉ có thể sản xuất chip với sự trợ giúp của máy móc do một công ty khác, thậm chí còn ít tên tuổi hơn, ASML sản xuất. Và trung tâm của máy ASML là các bộ phận quan trọng do các công ty khác sản xuất, một số trong số đó quen thuộc (thấu kính được sản xuất bởi Zeiss, với kính từ Schott) và một số bộ phận ít quen thuộc hơn (tia laser được sản xuất bởi một công ty khác của Đức, Trumpf) .

Tất cả những điều đó chỉ bao gồm một phần của hành trình – những bước cuối cùng mà nguyên tử silicon của chúng tôi thực hiện trước khi được đưa vào điện thoại thông minh của bạn. Nhưng cuộc hành trình của chúng ta phải bắt đầu không phải ở nhà máy lắp ráp hay xưởng đúc silicon, nơi những bóng bán dẫn nhỏ bé đó được khắc trên một tấm bán dẫn silicon, mà ngay từ thời điểm silicon chứa trong con chip máy tính đó lần đầu tiên được lấy ra khỏi mặt đất. Nó bắt đầu không phải trong một nhà máy sản xuất vô trùng đến mức gần như không tìm thấy một hạt bụi nào, mà giữa bụi bẩn, khói và lửa.

Sự ra đời của chip silicon

Chúng tôi đang đi trên một con đường đá bụi bặm trong một khu rừng cách Santiago de Compostela khoảng 15 dặm về phía nam. Phần này của Galicia được biết đến nhiều nhất với cuộc hành hương thu hút hơn một phần tư triệu người từ khắp nơi trên thế giới mỗi năm đến viếng mộ Thánh James Tông đồ trong nhà thờ lớn của Santiago. Những ngọn đồi xanh tươi và tươi tốt, rải rác những tu viện thời Trung cổ và những ngôi làng bằng đá xinh đẹp. Vào sáng sớm, mây ở đây thường ẩn hiện thấp trong thung lũng, với những đỉnh đồi bồng bềnh phía trên, tưởng chừng như lơ lửng trên bầu trời. Điểm đặc biệt nhất của những ngọn đồi đó là Pico Sacro, một ngọn đồi nổi lên mà bạn có

thể nhìn thấy từ xa hàng dặm, một kim tự tháp nhô ra trên những cánh đồng màu mỡ bên dưới.
Người dân địa phương kể một vài câu chuyện về ngọn đồi. Một là việc hai môn đệ khiêng thi hài Thánh James về Santiago đã kêu gọi Nữ hoàng Lupa, người cai trị huyền thoại quỷ quyệt của vùng này, đã nhờ một chiếc xe đẩy để giúp đỡ họ. Cô gửi họ đến Pico Sacro vì biết có một con rồng ở đó và hy vọng nó sẽ ăn thịt họ. Khi con rồng xuất hiện, các môn đệ làm dấu thánh giá và đánh bại nó ngay lập tức. Một câu chuyện khác kể rằng kế hoạch ban đầu là chôn thi thể của St James tại đây trên đỉnh núi cho đến khi con rồng được phát hiện, buộc họ phải thay đổi kế hoạch đột ngột.
Lời giải thích địa chất về việc ngọn đồi này hình thành như thế nào chỉ là tầm thường hơn một chút. Khoảng 350 triệu năm trước, đây là nơi hai siêu lục địa Laurasia và Gondwana va chạm, đẩy đất liền lên và tạo ra một khối thạch anh nhô lên cao hàng trăm mét trên bầu trời. Đi bộ lên đồi và bạn có thể nhìn thấy đá thạch anh trắng bên cạnh đá granit. Nhìn xuống thung lũng và ở đó, dọc theo tuyến đường sắt cao tốc, bạn sẽ thấy một thứ khác: một vết cắt dài và sâu trên những cánh đồng xanh và rừng cây trên sườn đồi, lấp lánh rực rỡ trông gần giống như một cánh đồng tuyết. Lái xe xuống con đường bụi bặm xuyên qua khu rừng và cuối cùng bạn bắt gặp một tấm biển có ghi 'Serrabal'. Bạn nghe thấy tiếng xe tải và tiếng đá kêu rất lâu trước khi bước vào khuôn viên. Nhưng một khi vào bên trong, bạn sẽ nhận ra khoảng trắng xóa mù mịt đó thực sự là gì: một mỏ đá khổng lồ. Serrabal là một mỏ thạch anh. Mạch đá nâng Pico Sacro và các ngọn đồi liền kề của nó lên trời là một trong những mỏ thạch anh tinh khiết nhất được tìm thấy ở bất cứ đâu trên thế giới, một loại đá trắng đến mức được săn lùng khắp nơi.
Thạch anh được kéo lên khỏi mặt đất ở đây đôi khi được sử dụng để làm bề mặt làm việc trong bếp. Nó được nghiền thành sỏi để làm vườn cảnh và cát trắng tinh cho các hố golf. Nhưng lý do thực sự chúng tôi đến đây là vì những khối thạch anh lớn hơn đến từ sườn đồi này. Những khối đá màu trắng đầy bụi này là những nguyên liệu thô mà cuối cùng - có thể là hàng tháng hoặc nhiều năm sau - sẽ trở thành thế hệ tiếp theo của chip silicon. Đây chính là nơi chúng ta đang tìm kiếm, nơi bắt đầu cuộc hành trình của chúng ta.

Công ty sở hữu mỏ là Ferroglobe, một doanh nghiệp Tây Ban Nha, nhà sản xuất kim loại silicon lớn nhất thế giới bên ngoài Trung Quốc. Sự khác biệt cuối cùng này cực kỳ quan trọng, vì ngày nay phần lớn nguyên liệu thô cho cuộc cách mạng công nghệ đều được khai thác và tinh chế ở Trung Quốc. Ferroglobe, công ty cũng có mỏ thạch anh ở Mỹ, Canada và Nam Phi, là một trong những trường hợp ngoại lệ hiếm hoi.

Những loại đá thạch anh như những loại bạn tìm thấy ở đây không phổ biến nhưng cũng không phải là cực kỳ hiếm. Có các mạch thạch anh ở Na Uy, Nga, Trung Quốc, Thổ Nhĩ Kỳ và Ai Cập. Điều này nghe có vẻ đáng ngạc nhiên, tảng đá nhô lên khỏi mặt đất ở Serrabal, nguyên chất như tuyết, lại có hàm lượng silic thấp hơn một chút so với cát ở Lochaline, Fontainebleau và nhiều mỏ cát khác. Nhưng hàm lượng silic không phải là tất cả; nếu bạn muốn tạo ra kim loại silicon, điều quan trọng hơn nhiều là hình dạng. Trên thực tế, thứ chúng ta đang tìm kiếm ở đây không hẳn là cát – ít nhất là theo thang Udden–Wentworth sẽ có – mà là một loại sỏi lớn, với những mảnh có kích thước bằng một quả bóng cricket.

Sau khi chúng được thổi lên khỏi mặt đất, làm sạch và đổ vào xe tải, các khối này được lái khoảng một giờ về phía bắc tới một khu công nghiệp ngay bên ngoài cảng A Coruña. Đây là nhà máy Sabón, một tập hợp các nhà kho và nhà kho bằng tôn màu xanh lam khổng lồ. Bên kia cửa vào là một ống khói khổng lồ của nhà máy điện chạy bằng khí đốt. Việc nhà máy chế biến Ferroglobe nằm cạnh một nhà máy điện không phải là ngẫu nhiên; bạn cần rất nhiều năng lượng để biến thạch anh thành kim loại silicon.

Những tảng đá từ Serrabal được đổ xuống sàn bên ngoài nhà kho, một đống đá trắng trên nền bê tông xám. Sau một thời gian, chúng được trộn với than cốc (một dạng than nướng) và dăm gỗ rồi cho vào lò nung, đun nóng ở trên. $1.800°$C. Điều gì xảy ra trong lò nung đó, nơi dòng điện chạy vào hỗn hợp thạch anh và than đá, vẫn còn là một điều bí ẩn.

Håvard Moe, một trong những giám đốc của Elkem, một công ty Na Uy, một trong những công ty lớn nhất châu Âu, cho biết: “Ngay cả sau hơn một trăm năm sản xuất, vẫn có những điều mọi người không hiểu về những gì đang xảy ra trong phản ứng này”. nhà sản xuất silicon.

'Nó quá phức tạp. Có rất nhiều phản ứng hóa học; tất cả đều diễn ra dưới một điện trường rất mạnh, điều này cũng ảnh hưởng đến phản ứng. Việc tạo ra một mô hình toán học về điều này khá khó khăn."
Tuy nhiên, kết quả cuối cùng là silicon nóng chảy từ những viên đá thạch anh đó sẽ tách ra khỏi oxy và chìm xuống đáy lò, nơi nó được giải phóng qua một vòi. Cứ 6 tấn nguyên liệu thô được đưa vào lò nấu chảy – thạch anh, than đá và dăm gỗ – thì có khoảng một tấn kim loại silicon được tạo ra. Nhân tiện, cơ chế hoạt động của lò này là nguyên nhân giải thích tại sao cát dạng hạt không được sử dụng làm nguyên liệu thô cho chip silicon. Mặc dù không có gì sai về thành phần hóa học của nó, nhưng đơn giản là các hạt cát có kích thước sai.
Reiner Haus, một nhà khoa học người Đức, một trong số ít người trên thế giới hiểu được sự phức tạp của chuỗi cung ứng này, cho biết: "Đây là những lò nung khổng lồ và có dòng khí carbon dioxide đối lưu sủi bọt qua chúng". 'Nếu bạn sử dụng cát, nó sẽ bị thổi vào bộ lọc và không tan chảy. Vì vậy bạn cần những khối thạch anh lớn, cỡ nắm tay."
Nếu ở giai đoạn này, bạn bắt đầu tự hỏi liệu điều này nghe có vẻ hơi công nghiệp, giống như sản xuất thép hoặc nhôm, thì bạn có lý. Những lò nung này đang gầm rú, bốc khói, những vạc kim loại và than nóng chảy đỏ rực. Bạn không thể đến gần mà không mặc bộ đồ chịu nhiệt, giống loại mà đôi khi bạn thấy các nhà nghiên cứu núi lửa mặc gần miệng núi lửa đang phun trào.
Trên thực tế, thuật ngữ được sử dụng để mô tả quá trình xử lý thạch anh gợi lên núi lửa. Quá trình lấy silicon từ đá thạch anh được gọi là nấu chảy. Tâm của lò được gọi là miệng núi lửa. Nhìn những tảng đá này bị nung chảy thành dạng kim loại giống như chứng kiến cuộc cách mạng công nghiệp với tất cả vinh quang và sự tàn bạo của nó. Như một nhà phân tích ngành đã nói với tôi, nó giống như thời Trung Cổ. Có kẻ đang chất than. Nó giống như mỏ Moria trong *Chúa tể của những chiếc nhẫn* .'
Hậu quả của tất cả khói và nhiệt này cũng không hề tầm thường. Cần khoảng 45 megawatt điện để cung cấp năng lượng cho một trong những lò nung này – đủ để cung cấp năng lượng cho một thị trấn nhỏ. Moe nói, thực sự không thể biến thạch anh thành silicon ở quy mô lớn mà không thải ra carbon dioxide, điều đó có nghĩa là ngay cả khi điện

cung cấp cho lò được tạo ra từ thủy điện, những nhà máy luyện silicon này vẫn sẽ góp phần vào lượng khí thải carbon toàn cầu. Nhưng ít người quan tâm nhiều đến lượng khí thải carbon tạo ra trong quá trình tạo ra chip silicon. Và dù sao đi nữa, chúng ta vẫn chỉ mới ở giai đoạn đầu của cuộc hành trình này.
Sau khi kim loại silicon được sản xuất bởi các lò nung ở Sabón được đổ ra khỏi lò và đông cứng lại, nó được nghiền thành một loại kim loại dạng hạt. Ở giai đoạn này, silicon có độ tinh khiết khoảng 98 đến 99 phần trăm, nghe có vẻ khá tốt đối với hầu hết chúng ta, nhưng còn lâu mới đạt được độ tinh khiết mà bạn cần cho một con chip silicon hoặc một tấm pin mặt trời.

Tinh khiết hơn tinh khiết

Ở giai đoạn tiếp theo trong hành trình của chúng tôi, silicon cấp luyện kim được chuyển từ Ferroglobe sang một công ty khác mà hầu hết mọi người chưa từng nghe đến, nơi nó sẽ được biến thành một phiên bản silicon thậm chí còn tinh khiết hơn được gọi là polysilicon. Công ty được đề cập là Wacker, một doanh nghiệp Đức chuyên sản xuất nhiều polysilicon hơn bất kỳ ai khác ngoài Trung Quốc. Nhà máy chính của nó nằm ở Burghausen, cách Munich một giờ rưỡi về phía đông, ngay biên giới Áo. Thị trấn này tự hào có lâu đài dài nhất thế giới, một pháo đài đẹp đẽ nằm dọc theo sườn núi nhìn ra khúc quanh của Sông Salzach. Burghausen luôn có hai thứ: nhỏ và giàu, vì đây là một trong những trung tâm chính trên tuyến đường muối cổ xưa giữa Áo và Đức. Sau khi được chở xuống Salzach ('sông muối') trên sà lan, muối được dỡ xuống đây, bị đánh thuế và sau đó được gửi đi. Nghề buôn bán muối cũ có thể đã không còn nữa, nhưng Burghausen vẫn là một trong những thị trấn giàu có hơn ở Đức, bởi vì, giống như rất nhiều cộng đồng buôn bán muối trước đây, nơi đây hiện là trung tâm của ngành công nghiệp hóa chất.
Trên thực tế, điều đó có phần nói nhẹ đi, vì nhà máy hóa chất ở Burghausen quá rộng lớn nên nó chiếm diện tích tương đương với thị trấn nằm cạnh đó. Có một nhà máy điện, một nhà máy lọc dầu, có nhiều ống khói đến mức bạn không thể đếm được và hết khu này đến khu khác chứa các hầm chứa và nhà kho chứa hóa chất. Thậm chí còn có một sân vận động bóng đá cho câu lạc bộ của nhà máy (SV

Wacker Burghausen), đội chơi ở Liên đoàn Bavaria. Và đây – nhà máy hóa chất chứ không phải sân bóng – là điểm dừng chân tiếp theo của kim loại silicon từ Tây Ban Nha.
Những gì xảy ra tiếp theo được gọi là quy trình của Siemens và nó liên quan đến việc phá vỡ kim loại silicon nguyên chất đó thành các mảnh nguyên tố và tái tạo lại chúng một lần nữa. Kim loại được nghiền thành bột, trộn với hydro clorua tinh khiết, chưng cất rồi đun nóng trong bình chuông đến 1.150°C. Cuối cùng, bạn sẽ có những thanh dài giống như các bộ phận làm nóng trong một chiếc ấm đun nước cũ, ngoại trừ vật liệu ở đây không phải là cặn vôi phủ lông mà là silicon siêu tinh khiết.
Xé nhỏ các nguyên tử và tái tạo lại chúng, về cơ bản là những gì xảy ra ở đây, là một hoạt động tiêu tốn nhiều năng lượng khác. Theo nhà khoa học Vaclav Smil, chi phí năng lượng của nước siêu tinh khiết silicon như thế này hiệu quả hơn 3.000 lần so với xi măng và 1.000 lần biến sắt thành thép. Đúng là số lượng ở đây có thể nhỏ hơn, nhưng đây là một quá trình đòi hỏi khắt khe, tốn kém và thường xuyên bị bẩn. Tuy nhiên, sản phẩm cuối cùng là silicon có độ tinh khiết đáng kinh ngạc – tinh khiết hơn hầu hết mọi thứ khác trên hành tinh – hiện nay có thể được gọi là polysilicon. Tùy thuộc vào mức độ chưng cất kỹ lưỡng của dung dịch, bạn sẽ có được nhiều loại khác nhau, mỗi loại được đặt tên dựa trên số lượng chín trong số độ tinh khiết. [2]
Có loại polysilicon cấp năng lượng mặt trời dành cho tế bào đa tinh thể, với tối đa 8 số 9 (99,999999% silicon nguyên chất). Có loại polysilicon đơn tinh thể cấp năng lượng mặt trời, có tới 9 số 9 (99,9999999%). Thật vậy, phần lớn polysilicon được dùng để chế tạo các tấm pin mặt trời và phần lớn trong số đó được sản xuất tại Trung Quốc. Tuy nhiên, điều đáng chú ý là Trung Quốc vẫn chưa thành thạo trong việc sản xuất thành *phần kháng cự* của thế giới silicon: polysilicon cấp bán dẫn. Điều này có thể có tới mười số chín (độ tinh khiết 99,99999999%), trong đó đối với mỗi nguyên tử không tinh khiết về cơ bản có 10 tỷ nguyên tử silicon nguyên chất.
Nhưng ngay cả sau khi bị nổ tung khỏi mặt đá, tan chảy trong lò lửa đang gầm rú, bị đập vào quên lãng, nghiền nát và hòa tan thành dung dịch, chưng cất ở nhiệt độ đặc biệt và vỡ thành từng mảnh, silicon

của chúng ta vẫn chưa hoàn toàn sẵn sàng để trở thành một con chip silicon. Chúng ta mới đi được nửa chặng đường của cuộc hành trình.

Chất tinh khiết nhất trên thế giới

Ở giai đoạn này, bạn có thể được tha thứ khi hỏi: tại sao lại ồn ào về một vài dấu thập phân? Có thực sự đáng nỗ lực không? Có ai thực sự chú ý nếu chúng tôi bỏ qua một bước không? Câu trả lời ngắn gọn: có, hoàn toàn có. Một nguyên tử đơn độc trong một ma trận silicon tinh khiết đủ để làm gián đoạn dòng điện tử trong bóng bán dẫn. Nếu một trong những vũ khí bí mật của xi măng là nó có một công thức dễ tha thứ một cách đáng ngạc nhiên, nơi bạn thường có thể thực hiện được một chút sai lệch so với các hướng dẫn nghiêm ngặt, thì trường hợp ở đây lại hoàn toàn ngược lại. Và độ tinh khiết không phải là điều quan trọng duy nhất: cấu trúc cũng vậy. Cấu trúc nguyên tử trong silicon của bạn càng hoàn hảo thì các electron càng có thể di chuyển xung quanh dễ dàng và tự do hơn. Càng nhiều khuyết tật - còn gọi là ranh giới hạt - thì khả năng dòng chảy đó bị gián đoạn và chất bán dẫn bị hỏng càng lớn. Hãy hình dung những quả trứng được gói gọn gàng trong hộp, thay vì nằm lung tung trong chuồng.

Đây là một trong những lời nhắc nhở thường xuyên về mức độ vật chất của Thế giới Vật chất thực sự quan trọng như thế nào. Hầu hết những nỗ lực ban đầu nhằm tạo ra bóng bán dẫn đều bị cản trở không phải do thiếu năng lực trí tuệ hay thiếu trí tưởng tượng mà do thiếu vật liệu thực sự đáng tin cậy. Bóng bán dẫn đầu tiên do Brattain và Bardeen tại Bell Labs chế tạo vào năm 1947 không phải được làm từ silicon mà là germanium. Tuy nhiên, germanium không phù hợp để sử dụng làm bóng bán dẫn. Nó không hoạt động tốt ở nhiệt độ cao, một điều cực kỳ bất tiện đối với chất bán dẫn, vì bạn sẽ biết nếu bạn làm việc chăm chỉ trong khi đặt máy tính xách tay lên đầu gối, máy sẽ rất nóng. Silicon, với điểm nóng chảy cao, là một vật liệu hấp dẫn hơn nhiều, ít nhất là trên lý thuyết. Nhưng điều này đã xảy ra trước quá trình của Siemens, vì vậy, thành thật mà nói, những chất bán dẫn đầu tiên đó không tinh khiết và do đó hơi rác rưởi. [3] [fn1]

Điều đó đưa chúng ta trở lại với silicon của chúng ta, vốn bắt đầu tồn tại ở một mỏ đá ở Tây Ban Nha nhưng hiện đã được cho nổ tung và hoàn nguyên thành polysilicon siêu tinh khiết. Nhiệm vụ tiếp theo (và

chặng tiếp theo của hành trình) liên quan đến việc sắp xếp lại các nguyên tử tinh khiết nhưng khó hiểu của nó thành một ma trận hoàn hảo. Điều đó có nghĩa là bay polysilicon sang phía bên kia hành tinh, tới một nhà máy ở bờ biển phía tây bắc Hoa Kỳ, ngay bên ngoài Portland, Oregon. Chúng tôi ở ngay bên kia con sông Columbia hùng vĩ, trong một khu phức hợp gồm những tòa nhà màu xám nằm giữa vùng ngoại ô trải dài. Cái tên bên ngoài là một trong những công ty ít người biết đến nhưng lại là những người khổng lồ của Thế giới Vật chất: Shin-Etsu.

Công ty Nhật Bản này, trong số những thứ khác, là một trong những nhà sản xuất tấm silicon hàng đầu thế giới. Thật vậy, có thể nói rằng ở đây, bên bờ Sông Columbia, bạn sẽ tìm thấy tâm điểm của ngành công nghiệp silicon của Hoa Kỳ thế kỷ XXI. Việc chúng ta đang ở bên con sông này, chảy từ Dãy núi Rocky về phía Thái Bình Dương, cung cấp năng lượng cho 14 đập thủy điện dọc đường đi, không phải ngẫu nhiên. Để biến polysilicon thành tấm bán dẫn – các cấu trúc tinh thể, tinh khiết, sau đó có thể được gửi đến các xưởng đúc bán dẫn – giống như hầu hết các mắt xích khác trong chuỗi cung ứng đặc biệt này, là một quá trình tiêu tốn nhiều năng lượng khác.

Không khí ở đây trong lành nhưng silicon đã từ biệt thế giới bên ngoài với tất cả các vi khuẩn và bụi bẩn không thể nhận ra. Bây giờ nó tinh khiết đến mức cần phải được xử lý hết sức cẩn thận; kể từ đây, nó sẽ được giữ trong điều kiện vô trùng, trong các nhà máy cực kỳ sạch sẽ và được niêm phong bảo vệ, cho đến thời điểm nó đến trước cửa nhà bạn.

Các kỹ sư tại Shin-Etsu là những người thực hành giỏi nhất thế giới về kỹ thuật được gọi là kỹ thuật Czochralski, hay CZ như họ thích gọi. Neil Weaver của SEH, chi nhánh Shin-Etsu tại Hoa Kỳ, nói: “Mọi người ở đây chỉ gọi nó là CZ”. 'Thật ra tôi chỉ cần tra cứu cách đánh vần nó thôi.'

Có rất nhiều kỹ thuật sản xuất kỳ lạ và tuyệt vời trong Thế giới Vật chất nhưng quy trình Czochralski là một trong những kỹ thuật hấp dẫn nhất. Polysilicon được nghiêng thành một nồi nấu kim loại thạch anh (nồi nấu kim loại phải cực kỳ tinh khiết, nếu không nó có thể đưa tạp chất trở lại silicon) và đun nóng đến nhiệt độ chỉ dưới 1.500°C. Một hạt tinh thể, một thanh silicon có kích thước bằng cây bút chì, được

nhúng vào dung dịch tan chảy và sau đó từ từ được kéo lên trên, xoay nhẹ. Dần dần, một thỏi rắn hoàn hảo, một thỏi, bắt đầu hình thành từ sự tan chảy. fn2

Có lẽ phép so sánh tốt nhất là ai đó đang kéo kẹo bông vào một cây gậy, ngoại trừ việc điều này hoàn toàn trái ngược với một khu hội chợ đầy trẻ em đang la hét; quá trình Czochralski xảy ra bên trong một căn phòng chỉ chứa đầy khí argon. Boule từ từ quay và được nâng lên dần dần, cho đến khi cuối cùng phía trên nồi nấu kim loại có một hình trụ kim loại tối màu, dài, sáng bóng, trông rất đặc biệt được treo bằng một sợi chỉ dày vài mm. Nhưng chỉ khi bạn sử dụng nhiễu xạ tia X để kiểm tra quả ngư lôi này, silicon này xúc xích, bạn có thấy điều phi thường nhất không: các nguyên tử được sắp xếp thành một tinh thể khá hoàn hảo.

Bó hoa silicon này cao khoảng 2 hoặc 3 mét vào thời điểm nó được hoàn thành, nhưng chẳng bao lâu sau, một chiếc cưa dây silicon cacbua sẽ cắt nó thành những lát mỏng đến khó tin, mỗi lát dày chưa đến một milimet. Những vòng tròn này, mỗi vòng tròn có chu vi bằng một chiếc bánh pizza nhỏ, được đánh bóng và làm sạch bằng hóa chất cho đến khi chúng phẳng hoàn toàn, và bạn đã có nó: thứ còn sót lại trên mặt đất như một khối thạch anh giờ đây là một tấm wafer silicon. Như bạn có thể tưởng tượng, đây là một sự đơn giản hóa quá mức. Trên thực tế, silicon sẽ mất nhiều tháng trong phòng thí nghiệm của Shin-Etsu, được chuyển từ máy này sang máy khác, được kéo, cắt lát, làm mịn, làm sạch và thử nghiệm. Nhưng bạn hiểu ý rồi đấy. Trong gần 70 năm qua, những quá trình này vừa là nghệ thuật vừa là khoa học. Vào những ngày đầu ở Thung lũng Silicon, khi hầu hết các nhà sản xuất chip đều tự sản xuất tấm silicon, các tinh thể chủ yếu được kéo bằng tay, với những người vận hành máy (hầu hết đều là phụ nữ) quan sát các nồi nấu kim loại nóng chảy qua kính đen trong nỗ lực đánh giá xem liệu họ đang nâng và xoay các tinh thể với tốc độ phù hợp. Những người kéo pha lê lành nghề nhất nhanh chóng đạt được danh tiếng. Những nghệ nhân này đã trở thành những nhân viên được đánh giá cao, bị các công ty công nghệ mới nổi tranh giành khi họ tìm cách cải thiện chất lượng tấm bán dẫn của mình. 4

Tất nhiên, đó là chuyện đã lâu rồi. Ngày nay, không có công ty nào có tên xuất hiện trên chip silicon liên quan nhiều đến việc sản xuất silicon

mà thay vào đó là Shin-Etsu hoặc một số công ty khác từ Đức, Singapore hoặc Hàn Quốc. Quá trình này diễn ra trong những căn phòng vô trùng, nơi rất ít người - đặc biệt là những người bên ngoài các công ty này - được tiếp nhận.

Khi tôi hỏi Neil liệu tôi có thể nhìn thoáng qua căn phòng nơi họ thực hiện quy trình Czochralski hay không, anh ấy chỉ cười. 'Nó sẽ không xảy ra đâu. Chúng tôi thực sự hoang tưởng về việc những bí mật này bị lộ ra ngoài. Có tất cả những bí mật thương mại này và chúng tôi thực sự muốn bảo vệ chúng".

Có lẽ điều này được mong đợi: rất nhiều thứ diễn ra bên trong đều là tài sản trí tuệ có giá trị vô cùng lớn. Tất cả mọi thứ từ tốc độ quay và nâng khối silicon đang phát triển cũng như cách quản lý nhiệt độ của nồi nấu sủi bọt cho đến các phương pháp được sử dụng để tránh bất kỳ khiếm khuyết nào hóa ra đều là bí mật thương mại, và một số công ty - thậm chí một số quốc gia - sẽ cố gắng hết sức để khám phá chúng.

Không cần nhiều trí tưởng tượng cũng có thể nhận ra Neil quan tâm đến quốc gia nào nhất. Trong vài thập kỷ qua, Trung Quốc đã thống trị phần lớn hoạt động kinh doanh silicon. Khoảng 90% sản lượng silicon ngày nay không phải dành cho chip máy tính mà dành cho các tấm pin mặt trời, và gần như tất cả hoạt động đó diễn ra không phải ở bờ biển phía đông nước Mỹ mà ở Trung Quốc. Điều đó có một vài ý nghĩa quan trọng. Đầu tiên, trong khi phần lớn silicon ở châu Âu được sản xuất bằng các nguồn năng lượng thay thế, đặc biệt là thủy điện, thì ngành công nghiệp silicon của Trung Quốc lại phụ thuộc nhiều hơn vào than để cung cấp lượng năng lượng khổng lồ cần thiết để biến thạch anh thành polysilicon. Sản xuất silicon là một công việc kinh doanh bẩn thỉu hơn bạn nghĩ, đặc biệt là ở Trung Quốc. Thứ hai, có lo ngại rằng một số nhà sản xuất silicon của Trung Quốc, đặc biệt là những nhà sản xuất ở Khu tự trị Duy Ngô Nhĩ Tân Cương, có điều kiện làm việc vô nhân đạo.

Thật vậy, khi cuốn sách này đang được viết, Hoa Kỳ đã áp đặt lệnh cấm nhập khẩu silicon từ Hoshine, một trong những nhà sản xuất lớn nhất của Trung Quốc và thế giới. Nhà Trắng cáo buộc công ty đã đe dọa và đe dọa công nhân của mình. Các nhà sản xuất Trung Quốc và chính Bắc Kinh lần lượt cáo buộc Mỹ áp đặt các biện pháp trừng phạt

này trong nỗ lực bảo vệ nền kinh tế của chính họ và kìm hãm nền kinh tế của Trung Quốc.
Nhưng vấn đề là: trong khi Trung Quốc kiểm soát phần lớn chuỗi cung ứng silicon kim loại và polysilicon năng lượng mặt trời toàn cầu, họ vẫn chưa nắm bắt được các kỹ thuật sản xuất cần thiết để tạo ra các tấm bán dẫn cho các chip silicon tiên tiến nhất. Cũng giống như việc họ vẫn chưa nắm vững các quy trình mà Wacker sử dụng để tạo ra polysilicon có ít hơn một trong một tỷ nguyên tử tạp chất, họ vẫn chưa cải tiến quy trình Czochralski đủ để tạo ra các tấm wafer hoàn hảo như những tấm được lấy ra từ nồi nấu kim loại ở Shin-Etsu. Đó là lý do tại sao bạn hoặc tôi sẽ không bao giờ được phép vào thánh địa sản xuất này: vì sợ gián điệp công nghiệp - rằng những phương pháp và bí mật này có thể bị đánh cắp và sao chép trong một nhà máy ở Tân Cương.
Có một điều khác ngăn cản Trung Quốc thống trị phần cuối của thị trường này, và nước này một lần nữa quay trở lại với cát - một loại cát rất đặc biệt. Đối với những nồi nấu kim loại trong đó Shin-Etsu làm tan chảy silicon siêu tinh khiết trước khi kéo nó vào khối hoàn hảo đó và cắt nó thành các tấm wafer đều được chế tạo – mỗi chiếc trong số chúng – từ một loại thạch anh rất đặc biệt, một loại mà bạn chỉ có thể có được ở một nơi duy nhất trên thế giới.
Việc một địa điểm duy nhất có thể kiểm soát nguồn cung toàn cầu của một nguyên liệu quan trọng là điều hiếm có, hầu như chưa từng nghe thấy. Tuy nhiên, nếu bạn muốn có được thạch anh có độ tinh khiết cao – loại bạn cần để chế tạo những chiếc nồi nấu kim loại mà không có nó thì bạn không thể tạo ra tấm silicon – nó phải đến từ Spruce Pine, một thị trấn nhỏ trên vách đá Blue Ridge ở Bắc Carolina. Trong một thời gian dài, mỏ này – và nói rộng ra là toàn bộ nguồn cung cấp thạch anh có độ tinh khiết cao trên toàn cầu – được vận hành bởi một công ty duy nhất, một doanh nghiệp bí mật của Bỉ tên là Sibelco.
Bạn không cần phải đi đâu xa khắp Spruce Pine để nghe tin đồn về việc Sibelco sẽ nỗ lực hết sức để bảo vệ quyền riêng tư của mình. Rất ít người được nhận vào mỏ, càng ít người đến các cơ sở nơi thạch anh được xử lý và nghiền thành sản phẩm có độ tinh khiết cao để tạo ra những chiếc nồi nấu kim loại đó.

Theo một người từng làm ăn với Sibelco, việc đi đến trụ sở chính của họ 'giống như vào Fort Knox'. Xung quanh khu phức hợp có hàng rào cao 25 foot, được bao quanh bằng dây thép gai, có camera an ninh và lực lượng tuần tra an ninh thường xuyên.
Một người trong cuộc khác cho biết: “Khi các nhà thầu từ các công ty khác được đưa đến để sửa chữa [tại nhà máy], họ thực sự bị bịt mắt và dẫn vào nhà máy để đến chỗ chiếc máy mà họ cần sửa”. 'Nó giống như một cái gì đó của Willy Wonka.'
Tại sao lại có hành vi che đậy và dao găm này? Tại sao bí mật? Theo Reiner Haus, nhà phân tích silicon: 'Nếu bạn có độc quyền, tại sao bạn lại muốn nói chuyện với bất kỳ ai? Không cần phải tiếp thị sản phẩm của bạn. Không cần phải nói chuyện với ai cả.”
Ngày nay có hai mỏ ở Spruce Pine. Bên cạnh Sibelco còn có một hoạt động khác nhỏ hơn: Quartz Corp, chuyên vận chuyển những viên đá mà họ khai thác được đến Na Uy để chế biến. Những tảng đá trông không có gì nổi bật nếu nhìn từ bên ngoài – giống đá granit hơn là thạch anh trắng sáng của Serrabal – được rửa sạch, nghiền nát, nghiền nhỏ, tách từ tính và rửa sạch bằng hóa chất. Cuối cùng, chúng trở thành một loại cát đặc biệt – đủ tinh khiết để chứa silicon nóng chảy khi nó được kéo lên thành tấm bán dẫn silicon. Có năm hoặc mười công ty đang lùng sục các hồ sơ địa chất của các quốc gia khác trên thế giới để tìm ra các vỉa thạch anh thay thế có thể phù hợp với chất lượng của những loại đá này. Trong nhiều thập kỷ, Trung Quốc đã cố gắng sản xuất thạch anh có tiêu chuẩn tương tự nhưng không có kết quả. Hóa ra là trong khi khá khó để tìm thấy nguồn thạch anh tinh khiết như những tảng đá trắng như tuyết ở Serrabal, thì gần như không thể tìm thấy thạch anh tinh khiết như của Spruce Pine.
Trong Thế giới Vật chất, rất ít trường hợp chúng ta hoàn toàn phụ thuộc vào một nơi duy nhất. Có một số nhà sản xuất vi mô ở Ấn Độ và Siberia, nhưng không có gì sánh được với tính nhất quán và chất lượng của hai mỏ ở Spruce Pine, điều này làm tăng một số câu hỏi đáng lo ngại. Điều gì sẽ xảy ra nếu có chuyện gì xảy ra với những mỏ đó? Điều gì sẽ xảy ra nếu con đường duy nhất nối họ với phần còn lại của thế giới bị phá hủy trong một trận lở đất? Câu trả lời ngắn gọn: nó sẽ không đẹp.

“Có điều gì đó thật đáng sợ,” một cựu chiến binh trong ngành nói. ‘Nếu bạn bay qua hai mỏ ở Spruce Pine với một chiếc máy quét bụi chứa một loại bột rất đặc biệt, bạn có thể chấm dứt hoạt động sản xuất chất bán dẫn và tấm pin mặt trời của thế giới trong vòng sáu tháng.’ Không có thạch anh có độ tinh khiết cao có nghĩa là không có nồi nấu kim loại Czochralski, có nghĩa là không có tấm silicon đơn tinh thể, có nghĩa là, sự kết thúc của việc sản xuất chip máy tính như chúng ta đã biết. Chúng tôi sẽ thích nghi; tìm một quy trình mới hoặc một chất thay thế. Nhưng đó sẽ là một vài năm khủng khiếp. Có lẽ đây là lý do tại sao những người làm việc trong lĩnh vực thạch anh có độ tinh khiết cao lại rất lo lắng. Có lẽ đó là lý do tại sao người truyền lại bài tập suy nghĩ đáng sợ đó khăng khăng rằng tôi không in loại bột có thể tàn phá quá trình xử lý các mỏ ở Bắc Carolina, nơi âm thầm phục vụ vai trò nhỏ bé nhưng then chốt này trong hoạt động của thế giới hiện đại.

Nghiền qua bánh xốp

Silicon của chúng tôi, bắt đầu cuộc đời của nó (hoặc ít nhất là chương này trong cuộc đời của nó) bên sườn núi Galicia và đã trải qua nhiều lần biến đổi - từ rắn sang lỏng sang rắn sang hơi sang rắn sang lỏng sang rắn - giờ đây đã tìm lại được chính mình bên trong một chiếc hộp kín ở phía bên kia thế giới. Chúng tôi đang ở ngoại ô Đài Nam, thủ đô cũ của Đài Loan. Đi về phía bắc từ trung tâm thành phố, các khối văn phòng và nhà ở sẽ sớm nhường chỗ cho những cánh đồng mía và bắp cải. Không khí đặc quánh và trong một khoảnh khắc, bạn có cảm giác gần như đang đi đến một nơi xa xôi nào đó. Nhưng không: đối với bất kỳ ai làm việc trong lĩnh vực điện toán thì đây chính là trung tâm của vũ trụ.

Nổi lên từ những cánh đồng phía trước bạn là một cột cổng và cách nào đó phía sau nó là một khu phức hợp các tòa nhà sáng bóng, màu bạc. Tên đầy đủ của địa điểm này là Công viên Khoa học và Công nghệ Nam Đài Loan, nhưng nó được biết đến nhiều hơn như là trung tâm sản xuất chính của một công ty có tên được in màu đỏ trên các tòa nhà: TSMC. Đây là Fab 18 – nhà máy tiên tiến nhất thế giới.

Việc tòa nhà ở đây là minh chứng cho một người tên là Morris Chang, người đã thành lập Công ty Sản xuất Chất bán dẫn Đài Loan vào năm

1987. Sau khi chuyển đến Hoa Kỳ từ Trung Quốc vào năm 1949, Chang đã leo lên các nấc thang của ngành công nghiệp silicon của Mỹ, cuối cùng trở thành người đứng đầu của bộ phận bán dẫn tại Texas Instruments. Nhưng khi bị coi thường trong vai trò giám đốc điều hành, đột nhiên, ở tuổi 51, ông thấy mình đang đi vào ngõ cụt trong sự nghiệp. Sau đó, thủ tướng Đài Loan gọi điện và hỏi liệu ông có thể giúp thành lập ngành công nghiệp bán dẫn ở nước mình hay không.

Do điện toán khi đó hoàn toàn bị các công ty Mỹ thống trị nên đề xuất này có phần táo bạo. Đài Loan có ít kinh nghiệm về loại hình kỹ thuật này; nó cũng không có nhiều nền tảng kỹ năng. Nhưng trong những năm tiếp theo, cũng giống như cách nhà nước Phổ giúp đỡ ngành thủy tinh của Jena, chính phủ Đài Loan đã hỗ trợ đều đặn cho TSMC. Điều thực sự khiến nó trở nên khác biệt so với các đối thủ lâu đời như Texas Instruments hay Intel là mô hình kinh doanh của nó: trong khi các công ty đó tự thiết kế và sản xuất chip, TSMC sẽ sản xuất chip cho người khác – đó sẽ là một 'lò đúc'.

Nếu bạn đang tìm kiếm một công ty đại diện cho Thế giới Vật chất, bạn khó có thể làm tốt hơn TSMC. Đây là một doanh nghiệp có mục đích duy nhất là sản xuất bộ vi xử lý mà Apple hay Tesla mơ ước, hoặc các công ty sản xuất chip 'fabless' như Nvidia và Qualcomm ('fab' là viết tắt của nhà máy chế tạo). Ít người biết đến nó đến mức ít người ngoài lĩnh vực máy tính nghe nói đến nó, tuy nhiên nó đã vượt qua các ranh giới của vật lý, trong quá trình trở thành một trong những công ty có giá trị nhất và quan trọng nhất trên thế giới. Nhưng sự thống trị này không hề rẻ. Trong khoảng thời gian ba năm kể từ năm 2021, TSMC đã lập ngân sách để đầu tư 135 tỷ USD, nhiều hơn mức mà nhiều nước phát triển sẽ chi trong khoảng thời gian đó và tương đương với 10 tàu sân bay lớp Gerald R. Ford của Hoa Kỳ.

Làm thế quái nào mà một công ty, chủ yếu có trụ sở tại một vài địa điểm trong một quốc gia, lại chi tiêu những khoản tiền như vậy trong một khoảng thời gian ngắn như vậy? Câu trả lời đang ở trước mắt bạn trên những cánh đồng đầy mồ hôi ở miền nam Đài Loan, vì Fab 18 rất rất đắt đỏ. Trên thực tế, Fab 18 không phải là một tòa nhà đơn lẻ mà là một khu phức hợp gồm sáu đơn vị liên kết với nhau, một số trong đó vẫn đang được xây dựng tại thời điểm viết bài. Chi phí dự

kiến là 17 tỷ USD, khiến nhà máy này đắt hơn một chút so với Đường hầm eo biển (đã điều chỉnh theo lạm phát). Khả năng là một nhà máy khác sẽ vượt qua Fab 18 về mặt chi phí trong vài năm tới và rất có thể đó sẽ là một nhà máy bán dẫn khác, có thể là một nhà máy TSMC khác. Đó là logic của định luật Moore, trong đó cứ hai năm một lần các bóng bán dẫn phải nhỏ hơn và các nhà máy trở nên đắt đỏ hơn. fn3
Bản thân các tòa nhà đều có kích thước bằng một bãi đậu xe nhiều tầng, nhưng nếu bạn bóc lớp vỏ ngoài màu bạc đó ra, bạn sẽ phát hiện ra rằng phần lớn không gian bên trong lớp vỏ được dành không phải cho không gian làm việc, văn phòng hoặc vì mục đích đó. vấn đề, ô tô mà đến hệ thống lọc và điều hòa không khí khổng lồ, được thiết kế để giữ cho phần quan trọng nhất của tòa nhà hoàn toàn sạch sẽ. Một tòa nhà văn phòng có thể có không khí được lưu thông và lọc năm hoặc sáu lần một giờ; một phòng sạch cấp 1, tức là như thế này, có không khí thay đổi 600 lần mỗi giờ. Phòng sạch tại Fab 18, khi bạn kết hợp tất cả các thiết bị khác nhau, sẽ có diện tích tương đương với 25 sân bóng đá, là một trong những nơi sạch sẽ nhất trên trái đất – miễn là bạn bỏ qua các dung môi độc hại sắp được phun lên các tấm bán dẫn. Điều đó đưa chúng ta đến những gì bạn sẽ tìm thấy bên dưới phòng sạch: một tầng hoàn toàn khác được gọi là nhà xưởng phụ, nơi các hỗn hợp hóa chất dùng để rửa và xử lý các tấm bán dẫn liên tục khuấy và di chuyển lên các máy chờ phía trên. Một nhà máy bán dẫn không có hóa chất về cơ bản là vô dụng: không có chúng thì sẽ không có bóng bán dẫn.
Bên dưới nhà máy phụ là một trong những bộ giảm chấn phức tạp nhất trên hành tinh, có nghĩa là dinh thự gần như hoàn toàn bị ngắt kết nối với *terra Firma* , do đây là một trong những khu vực có hoạt động địa chấn mạnh hơn trên thế giới nên không có gì xấu. Bất kỳ chuyển động nào, dù khó nhận biết, đều có thể làm xáo trộn hoạt động của máy móc ở đây, đó là lý do tại sao bạn không có xu hướng tìm thấy những nhà máy ở rất gần sân bay hoặc đường cao tốc. Những chiếc máy đó thoải mái là thứ đắt nhất trong nhà máy. Có cả một dãy, hầu hết đều là những khối màu trắng, khép kín có kích thước bằng một chiếc xe buýt nhỏ. Một số trong số họ cấy hóa chất vào các tấm bán dẫn - doping, như tên gọi của nó - một số khác đặt các lớp vật liệu nano và một số sử dụng tia laser để khắc mạch lên silicon.

Trở lại những năm 1950, việc lắp ráp chất bán dẫn liên quan đến dòng phụ nữ làm việc tại bàn, sử dụng nhíp để điều khiển dây bóng bán dẫn vào đúng vị trí. Trong các nhà máy ngày nay, bạn có thể thấy một hoặc hai người mặc bộ đồ trắng để không đưa tạp chất vào phòng sạch, nhưng hầu hết mọi thứ ở đây đều do robot thực hiện. Những nhà máy này được tự động hóa đến mức chúng được gọi là nhà máy 'tắt đèn' - nơi chúng có thể hoạt động gần như hoàn toàn mà không cần công nhân. Đó là một tầm nhìn siêu thực, có phần lạc hậu: một thế giới không có con người. Tuy nhiên, từ góc nhìn của tấm bán dẫn silicon, con người với móng tay cáu bẩn, làn da bong tróc và hơi thở nhiễm độc là những vật trung gian truyền tạp chất. Tất cả những gì bạn cần ở một trong những nhà máy này là để một nguyên tử lạc vào máy móc và các bóng bán dẫn trị giá hàng nghìn đô la sẽ bị phá hủy ngay lập tức. Nếu mọi việc diễn ra theo đúng kế hoạch, tấm wafer silicon của chúng tôi sẽ không bị bàn tay con người chạm vào cho đến khi bề mặt của nó được niêm phong và sẵn sàng gửi đi. [5]
Tuy nhiên, khoảnh khắc đó sẽ không đến trong một thời gian nữa, vì một tấm wafer như của chúng tôi có thể mất ba hoặc bốn tháng quay vòng quanh một nhà máy như thế này, được vận chuyển từ máy này sang máy khác trong một hộp vô trùng gọi là FOUP (mặt trước- mở pod phổ quát). Có thể cho rằng máy quan trọng nhất trong số này thực hiện cái được gọi là quang khắc. Trong vài thập kỷ, các bóng bán dẫn đã được khắc lên các tấm silicon không phải bằng tay hay bằng máy móc mà bằng ánh sáng. Nguyên lý hoạt động hơi giống một máy chiếu phim, ngoại trừ việc đảo ngược lại. Trong khi máy chiếu chụp một hình ảnh nhỏ và sử dụng thấu kính để phóng nó lên màn hình cỡ rạp chiếu phim, thì kỹ thuật quang khắc bắt đầu bằng một bản thiết kế lớn của một con chip silicon, với tất cả các bóng bán dẫn và tính năng của nó, đồng thời sử dụng thấu kính để chiếu hình ảnh đó vào tâm trí- kích thước nhỏ đến khó tin. Khi hình chiếu siêu nhỏ có kích thước bằng con chip máy tính đó chiếu vào silicon, với sự trợ giúp của một số ánh sáng laser và hóa chất được phủ lên bề mặt, nó sẽ loại bỏ các kênh và rãnh nhỏ, khắc mạch điện lên tấm bán dẫn một cách hiệu quả.
Điều này nghe có vẻ giống như một sự tương tự thuận tiện, nhưng vào những năm 1950 tại Fairchild Semiconductor, Gordon Moore và

đồng nghiệp Robert Noyce đã mua lại các ống kính máy ảnh phim 16mm cũ để chế tạo một số con chip đầu tiên của họ. Các nhà thiết kế chip thời kỳ đầu ở Thung lũng Silicon đã vẽ các thiết kế ban đầu của họ, từng bóng bán dẫn, trên một miếng phim có kích thước bằng bảng đen, và sau đó cho phép các ống kính thực hiện điều kỳ diệu của chúng. Ngày nay, những thiết kế đó phức tạp đến mức nếu bạn thực hiện bài tập tương tự với một trong những con chip máy tính của Intel, bạn sẽ cần một tấm bảng đen có chiều cao bằng tòa nhà cao nhất thế giới, Burj Khalifa, và rộng hơn một km. Những cái gọi là mặt nạ quang học này – loại mặt nạ hiện đại tương đương với những tấm phim có kích thước bằng bảng đen mà các nhà thiết kế chip dùng để vẽ – được làm từ silica nung chảy, bản thân nó cũng được làm từ cát. Cát trên cát trên cát. [6]

Làm thế quái nào mà người ta có thể chiếu loại chi tiết đó xuống một con chip có kích thước vài cm? Với một trong những cỗ máy đắt nhất thế giới. TWINSCAN NXE:3600D – được sản xuất bởi ASML, một doanh nghiệp Hà Lan từng là một phần của Philips – có giá hàng trăm triệu đô la. Điều đó nghe có vẻ quá đáng, vì rốt cuộc nó chỉ là ánh sáng phản chiếu xung quanh một chiếc hộp, nhưng đây không phải là ánh sáng bình thường và cũng không phải chiếc hộp bình thường. Rốt cuộc, hãy nhớ lại rằng các bóng bán dẫn mà TSMC muốn chế tạo quá nhỏ đến mức chúng gần như không thể nhìn thấy được, do đó, tia laser có bước sóng thông thường và một loạt thấu kính sẽ không còn hoạt động được nữa. Để có được độ phân giải tốt nhất, bạn cần ánh sáng có bước sóng nhỏ nhất, trong trường hợp này có nghĩa là ánh sáng cực tím (EUV).

Làm việc với ánh sáng EUV khó khăn đến mức, giống như cách mà một số người đã giả định vào những năm 1950 rằng chúng ta sẽ không bao giờ thành thạo việc sản xuất các tấm silicon hoàn hảo, cho đến gần đây, một số người cho rằng chúng ta sẽ không bao giờ có máy móc có khả năng thực hiện những gì của ASML. -đơn vị có kích thước nào. Thử thách đầu tiên và rõ ràng nhất là việc tự tạo ra ánh sáng, thứ không thể đơn giản được tạo ra bởi một đơn vị laser. Thay vào đó, chúng ta cần bước vào một loại vũ trụ song song, nghe giống thứ gì đó trong tiểu thuyết của Arthur C. Clarke hơn là một dây chuyền sản xuất trong thế giới thực.

Trong buồng chân không bên trong chiếc máy này, thiếc được nấu chảy cho đến khi trở thành chất lỏng. Thiếc nóng chảy đó sau đó được thả xuống buồng theo dòng liên tục. Ở điểm giữa của dòng thác, mỗi giọt nhỏ này được bắn hai lần bằng xung laser do công ty Trumpf của Đức cung cấp, đủ mạnh để cắt xuyên qua kim loại. Những vụ nổ này làm nóng thiếc lên đến một triệu độ, biến nó thành một loại plasma đồng thời tạo ra một chùm ánh sáng EUV. Sự va chạm chính xác của các phân tử này xảy ra 50.000 lần mỗi giây, nhanh đến mức dòng giọt thiếc và vụ nổ laze hoàn toàn không thể nhận thấy được. Tất cả những điều này nhằm tạo ra một luồng ánh sáng EUV mà nhiệm vụ thực sự vẫn chưa đến, chỉ khi đó nó mới bật ra về phía tấm bán dẫn đang chờ của chúng ta.

Thực ra, gọi nó là ánh sáng thì hơi gây nhầm lẫn vì nó giống một loại bức xạ hơn, hơi giống tia X. Và giống như tia X, ánh sáng EUV có thói quen bị hấp thụ bởi hầu hết các vật liệu rắn, kể cả hầu hết các thấu kính. Đây là nơi cát xuất hiện một lần nữa, vì để chiếu ánh sáng EUV này xuống tấm bán dẫn, ASML đã ký hợp đồng với Zeiss để sản xuất một bộ gương đặc biệt gọi là gương phản xạ Bragg, được làm từ các lớp silicon và molypden.

Những chiếc gương này được tạo ra như thế nào vẫn là một bí mật thương mại được bảo vệ chặt chẽ, nhưng theo Zeiss, chúng được nghiền nát từ những khối nặng 50 kg và robot được sử dụng để đánh bóng và chỉnh sửa lớp bên ngoài bằng chùm ion. Chỉ cần nói rằng, theo một kỹ sư ASML, chúng "có lẽ là những cấu trúc nhân tạo trơn tru nhất trong vũ trụ". Nếu bạn thổi bay một trong số chúng lên đến kích thước của Hoa Kỳ, cú va chạm lớn nhất sẽ cao chưa đến nửa milimét. Sau khi bật ra khỏi cầu thang chứa những tấm gương này, ánh sáng EUV với toàn bộ ánh sáng 13,5 nanomet của nó chiếu vào tấm bán dẫn và khắc thiết kế phức tạp đó lên trên nó. Có nhiều điều hơn là khoa học viễn tưởng về tất cả những điều này - những tấm silicon hoàn hảo đến kinh ngạc được điều khiển bởi những mảnh thủy tinh phẳng đến khó tin - nhưng chẳng có gì viển vông cả. Và ở đây, trung tâm của chuỗi cung ứng silicon chính là công ty đã sản xuất thủy tinh trong ống nhòm mà chính phủ Anh đã bí mật đổi lấy cao su trong Thế chiến thứ nhất.

-

Cuộc chiến chip

Tính đến thời điểm hiện tại, ASML là công ty duy nhất trên thế giới có khả năng sản xuất những chiếc máy này và TSMC cùng với Samsung là công ty duy nhất có khả năng đưa công nghệ đó vào sản xuất hàng loạt. Intel, công ty thống trị ngành từ lâu, thường bị coi là tụt hậu ít nhất một thế hệ và mặc dù đã tham gia nghiên cứu về EUV từ những ngày đầu tiên nhưng họ đang gặp khó khăn trong việc sử dụng những máy đó để sản xuất hàng loạt chip. Và sau đó là Trung Quốc, nơi nhà sản xuất chip hàng đầu, SMIC, bị một loạt hạn chế của Hoa Kỳ cấm mua bất kỳ máy nào.

Mặc dù về mặt lý thuyết, lệnh cấm xuất khẩu có thể sẽ cản trở nỗ lực của Trung Quốc nhằm bắt kịp các ngành công nghiệp của Đài Loan và Hàn Quốc, nhưng theo một số nhân vật cấp cao trong ngành, khoảng cách đã ngày càng mở rộng thay vì thu hẹp trong một thời gian. Một thập kỷ trước, công nghệ của SMIC chậm hơn TSMC bốn năm. Ngày nay, SMIC được cho là đi sau TSMC 10 hoặc 12 năm, bất chấp hàng loạt tiền của chính phủ đổ vào lĩnh vực này. Giống như cách họ tranh nhau xây cây cầu lớn nhất hay tuyến đường sắt cao tốc nhất mấy năm nay trước đây, ngày nay các tỉnh của Trung Quốc đều đang xây dựng các nhà máy mới. Tuy nhiên, vấn đề là họ đang gặp khó khăn trong việc tìm kiếm chuyên gia để điều hành chúng.

Một giám đốc điều hành cấp cao của một trong những công ty bán dẫn hàng đầu thế giới nói: 'Nếu ngày mai tôi nghỉ việc, tôi sẽ đi thẳng đến Trung Quốc và thuyết phục bất kỳ tỉnh nào cấp cho tôi 10 tỷ USD để xây dựng một nhà máy. Tôi có biết cách xây dựng một fab không? Không đời nào. Nhưng điều đó không ngăn cản được những kẻ lừa đảo bán dẫn còn lại ở đó.

'Họ đang xây dựng những căn phòng sạch sẽ hiện đại nhưng không ai biết cách sử dụng chúng. Hầu hết các nhà máy mới này chỉ là những tòa nhà lớn chứa đầy những chiếc hộp chưa mở. Họ không biết mình đang làm gì'.

Một giả thuyết cho rằng một phần lý do khiến Đài Loan thành công trong khi Trung Quốc thất bại là vì họ đã gặp may khi chọn đúng thời điểm; Trở lại những năm 1960 và 1970, khi nhiều sinh viên tốt nghiệp của họ được gửi đến trường đại học ở Mỹ, cuối cùng họ đã theo học

ngành kỹ thuật và làm việc tại các công ty như Intel và Texas Instruments. Họ đã mang kiến thức kỹ thuật đó về Đài Loan.
Nhưng vào thời điểm Trung Quốc mở cửa và bắt đầu gửi sinh viên sang Mỹ vào những năm 1990 và 2000, ngành công nghệ Mỹ đã thay đổi. Các công ty dẫn đầu là các công ty phần mềm như Microsoft, Amazon và Google. Thế hệ sinh viên Trung Quốc đó đã trở về nước và thay vì thành lập ngành công nghiệp phần cứng, họ đã sử dụng những gì đã học được ở Mỹ để thành lập các công ty dịch vụ internet. Thay vì xây dựng những gã khổng lồ mới của Thế giới Vật chất, thế hệ doanh nhân Trung Quốc này đã xây dựng gã khổng lồ bán lẻ Alibaba, TenCent (sở hữu WeChat) và ByteDance (sở hữu TikTok). Trong lĩnh vực sản xuất thép, xi măng, sản xuất, phân phối và thậm chí cả mạng xã hội, Trung Quốc đã cố gắng bắt kịp và thậm chí vượt qua phần còn lại. Nhưng điều quan trọng là không phải trong lĩnh vực bán dẫn, vì trong khi nó đã bắt đầu thống trị trong lĩnh vực sản xuất chip silicon ít phức tạp hơn, giá trị thấp hơn, thì các nhà sản xuất Trung Quốc vẫn theo đuổi những thiết kế tiên tiến đó, bất kể họ có bỏ ra bao nhiêu tiền và công sức. Điều ngăn cách Đài Loan và Trung Quốc không chỉ đơn thuần là một eo biển mà còn là một vịnh công nghệ, điều này càng làm gia tăng căng thẳng ở khu vực này trên thế giới. Như Morris Chang đã nói vào năm 2019, 'Khi thế giới không còn hòa bình nữa, TSMC đang đạt được tầm quan trọng sống còn về mặt địa chiến lược.' [7]
Và quy mô của sự phụ thuộc này lớn hơn bạn có thể tưởng tượng. Ngày nay, Trung Quốc chi nhiều tiền hơn cho việc nhập khẩu chip máy tính so với việc nhập khẩu dầu. Thật vậy, theo Chris Miller, tác giả cuốn lịch sử chip silicon, chi phí nhập khẩu chất bán dẫn của Trung Quốc tính đến năm 2017 lớn hơn tổng doanh thu từ xuất khẩu dầu của Ả Rập Xê Út hoặc toàn bộ hoạt động thương mại máy bay toàn cầu . Ông nói: “Không có sản phẩm nào đóng vai trò trung tâm trong thương mại quốc tế hơn chất bán dẫn”. số 8
Trở lại Fab 18, tấm wafer của chúng tôi đã rời khỏi máy EUV nhưng hành trình của nó vẫn chưa kết thúc, vì sau lần vượt qua đầu tiên này, nó được rửa sạch và sấy khô, một lớp hóa chất khác được lắng đọng và sau đó quá trình lặp lại từ đầu. Từng lớp chi tiết được thêm vào, đôi khi bằng EUV, đôi khi bằng các tia laser khác. Đôi khi chi tiết được

lắng đọng, từng nguyên tử một, trong những cỗ máy cỡ xe buýt khác do các công ty như Vật liệu Ứng dụng từ California chế tạo. Nhiều tuần trôi qua, rồi nhiều tháng, silicon của chúng tôi vẫn tăng tốc hàng dặm trong xưởng đúc, được chuyển từ máy này sang máy khác. Quá trình tạo ra công nghệ nhanh nhất thế giới lại chậm và tốn nhiều công sức một cách đáng kinh ngạc; theo một phép tính, có hơn 10.000 bước khác nhau trong những tháng này. Tuy nhiên, vào thời điểm công việc tại nhà máy kết thúc, nhiều tháng sau khi nó bắt đầu, có thể có tới hàng trăm lớp bóng bán dẫn khác nhau trên tấm bán dẫn silicon của chúng tôi. mỗi thứ đều mỏng đến mức, đối với mắt người, toàn bộ thứ trông to hơn một chút so với khi nó bước vào.

Ngày nay có rất nhiều tranh luận về việc liệu những cải tiến liên tục về thu nhỏ này cuối cùng có chấm dứt hay không, khiến định luật Moore bị phá sản. Một số người thắc mắc liệu chúng ta có sớm đạt đến giới hạn nguyên tử của silicon hay không và phải tìm kiếm một vật liệu thay thế. Một số người nói về 'chất bán dẫn phức hợp' như gali arsenide. Những người khác cho rằng tương lai có thể nằm ở vật liệu trong bóng bán dẫn nguyên thủy đầu tiên đó: germanium. Một lần nữa, các nhà khoa học đã nói những điều như vậy trong nhiều thập kỷ, và trong nhiều thập kỷ silicon đã trở thành trò chơi chính trong thị trấn. Mặc dù nó không phải là trò chơi duy nhất.

Khi các bóng bán dẫn tăng lên, số lượng hóa chất được tích tụ trong hành trình trung bình của con chip xuyên qua một nhà máy cũng tăng theo. Ngày nay, con chip trung bình của bạn có thể được tạo thành từ 60 phần tử, so với khoảng 15 phần tử vào những năm 1990 và có lẽ là 11 phần tử vào những năm 1980. Điện thoại thông minh thông thường, với màn hình và pin, có thể chứa tới 70, khiến nó trở thành một trong những biểu hiện hóa học tiên tiến nhất trong lịch sử. Nhưng hiện tại, chúng ta luôn quay trở lại với silicon. Ngay cả các bộ xử lý lượng tử, thế hệ máy tính tiếp theo hoạt động không ở thế giới nhị phân như hầu hết các bóng bán dẫn mà ở đâu đó ở giữa, vẫn phụ thuộc vào các tấm silicon. Những cỗ máy đặc biệt này, phải được làm lạnh siêu tốc xuống ngay trên độ không tuyệt đối (-273°C), có thể có mạch điện bằng nhôm và niobi, nhưng tất cả vẫn nằm trên silicon. [9]

Với công nghệ hiện có, vẫn còn một vài thế hệ - có thể là một thập kỷ hoặc lâu hơn - khả năng thu nhỏ có giá trị. Vậy thì sao? Một lựa chọn

là làm những gì các thành phố làm khi hết đất và xây dựng. Để biết điều này có thể đạt được bằng cách nào, hãy xem xét cái nhìn thoáng qua về các con chip trong tương lai do IBM cung cấp, hãng này từng dùng để sản xuất máy tính nhưng ngày nay thực hiện rất nhiều công việc đó. nghiên cứu chất bán dẫn mà các công ty như Intel sau đó áp dụng. Họ đã chế tạo các chip nguyên mẫu có chiều dài cổng bóng bán dẫn là 12 nanomet, mặc dù do quy ước đặt tên hơi phi logic do các nhà sản xuất chip đưa ra nên điều này sẽ coi chúng là chip 2 nanomet. Kết quả cuối cùng là nó có thể lắp 50 tỷ bóng bán dẫn vào một không gian có kích thước gần bằng móng tay.
Khi bạn nhìn những bóng bán dẫn này dưới kính hiển vi điện tử (và đó là cách duy nhất để nhìn thấy chúng), chúng trông hơi giống một chiếc bánh mì kẹp phô mai ba lớp không có bánh bao – ba lát silicon xếp chồng lên nhau, với một lớp phủ hóa học bên trong. giữa mỗi lát. Tất nhiên, đây không phải là những chiếc bánh mì kẹp thịt thông thường: mỗi lát bánh dày bằng hai sợi DNA. Ưu điểm của việc xếp chồng các bóng bán dẫn theo cách này là bạn có thể tiếp tục xếp chúng ngày càng cao hơn, tạo ra một con chip máy tính dày đặc hơn bao giờ hết, nhanh hơn và hiệu quả hơn nhiều so với những con chip tương đương ngày nay.
Lớp này nối lớp khác, vật liệu này tiếp vật liệu khác, cuộc hành trình tiếp tục diễn ra, cũng như hành trình của tấm wafer silicon của chúng tôi, hiện đã được khắc tất cả các bóng bán dẫn và sẵn sàng để cắt và thái thành một hoặc hai trăm con chip, mỗi con chip được đặt vào một lớp bảo vệ. cái khiên. Quá trình chuyển đổi từ khối thạch anh thành bộ xử lý máy tính hiện đã hoàn tất. Tuy nhiên, cuộc hành trình của nó vẫn chưa kết thúc. Hiện tại, con chip này đã được chuyển hoàn toàn đến một nhà máy khác, nhà máy này ở Malaysia, nơi nó được kiểm tra thêm. Bề mặt silicon dễ vỡ được phủ một lớp bảo vệ và thêm dây dẫn để có thể gắn vào bảng mạch. Tuyệt tác có kích thước bằng móng tay này cuối cùng đã ít nhiều hoàn thiện, sẵn sàng trở thành một phần của điện thoại thông minh. Từ Malaysia sau đó nó được chuyển đến nhà máy lắp ráp ở Trung Quốc. Trong những nhà máy khổng lồ có quy mô chỉ bằng một thị trấn này, hầu hết đều được điều hành bởi một công ty có tên là Hon Hai Technology Group, hay còn được gọi là

Foxconn, chúng được gắn vào các bảng logic cùng với hàng chục con chip trở lên khác từ các công ty như Qualcomm và Texas Instruments. Rất ít người, ngay cả trong chính ngành, hiểu được độ dài và độ phức tạp của hành trình này, số lượng quy trình liên quan, số lượng công ty tham gia. Các phương tiện truyền thông thường xuyên viết về Apple, đôi khi về Foxconn. Thỉnh thoảng các cơ quan chuyên môn viết về TSMC và thậm chí có thể là ASML. Họ trích dẫn vai trò trung tâm của Đài Loan và Hà Lan trong chuỗi cung ứng chất bán dẫn. Nhưng đây chỉ là phần nổi của tảng băng trôi, vì có hàng trăm công ty khác nếu không có họ thì những phần nổi bật hơn này của chuỗi cung ứng sẽ không thể hoạt động. Thế còn Linton Crystal, hãng sản xuất lò nung cho quy trình Czochralski và máy cưa kim cương để cắt các bó hoa thì sao? Còn JSR, một trong những công ty hàng đầu thế giới về công nghệ quang điện thì sao? Còn Tập đoàn EV và IMS Nanofabrication, công ty thống trị sản xuất mặt nạ và liên kết wafer, đồng thời đều có trụ sở tại Áo thì sao? Thế còn tất cả các công ty khác cung cấp máy móc quan trọng cho các nhà máy, trông giống như một danh sách những cái tên và từ viết tắt bí ẩn: Veeco, Tokyo Electron, Lam Research, ASM Pacific, Application Materials và Edwards… thì sao? Loại bỏ một hoặc hai trong số các công ty này và: không còn máy tính hoặc điện thoại thông minh nữa.

Điều này đáng để suy ngẫm, vì hai siêu cường hàng đầu thế giới đều nói chuyện ngày càng nhiều về nỗ lực 'tái lập' chuỗi cung ứng đó. Joe Biden muốn đưa ngành sản xuất chất bán dẫn trở lại Mỹ, đưa ra luật vào năm 2022 để khuyến khích đầu tư nhiều hơn vào lĩnh vực kinh doanh. Tập Cận Bình có chính sách 'Made in China 2025', hứa hẹn sẽ tăng cường sự thống trị và khả năng tự cung cấp của Trung Quốc trong việc sản xuất mọi thứ từ máy móc phức tạp đến chất bán dẫn. Tuy nhiên, thật khó, thậm chí khó tin khi tưởng tượng việc nén lại hành trình mà chúng ta vừa trải qua vào một quốc gia duy nhất mà không dựa vào các công ty hoặc hàng nhập khẩu từ các nơi khác trên thế giới.

Ngay cả khi Trung Quốc xâm chiếm Đài Loan và ngay cả khi các nhà máy của TSMC sống sót sau cuộc tấn công (một số người cho rằng công ty đã tích hợp chất nổ vào nền móng, để cho nổ khi xâm lược giống như quân đội phá hủy các cây cầu trước khi rút lui), điều đó sẽ

không giải quyết được vấn đề của họ. Fab 18 có thể là nơi sản xuất những con chip tiên tiến nhất thế giới, nhưng chúng hầu hết được thiết kế ở nơi khác, chủ yếu là ở Mỹ, với tài sản trí tuệ bắt nguồn từ một công ty có trụ sở tại Cambridge, Anh: ARM. Nhà máy của TSMC sẽ không thể hoạt động nếu không có máy công cụ từ Hà Lan và Nhật Bản, hoặc hóa chất từ Đức và các mảnh ghép từ nhiều quốc gia khác. Chỉ có một số ít công ty có khả năng tạo ra các tấm silicon hoàn hảo và không có công ty nào có trụ sở chính ở Mỹ hoặc Trung Quốc. Và chỉ có một địa điểm duy nhất trên thế giới có khả năng tạo ra cát thạch anh cho nồi nấu kim loại, nơi các tấm wafer được kết tinh. Khi các chính trị gia nói một cách lười biếng về việc tái xuất khẩu, điều đó thường bộc lộ sự thiếu hiểu biết sâu sắc về những gì đang xảy ra ngoài kia trong Thế giới Vật chất.

Thật hấp dẫn khi kết luận rằng cuộc hành trình mà chúng ta vừa trải qua là duy nhất - một ví dụ cực đoan về sự phức tạp của nền kinh tế trong thế kỷ XXI - nó chẳng là gì cả. Với mức độ phổ biến của chất bán dẫn, hóa ra là hầu hết các thiết bị và công cụ trong cuộc sống của bạn, chưa kể đến các tấm pin mặt trời trang trí cho nhiều tòa nhà và cánh đồng của chúng ta, đều đã trải qua một quá trình tương tự trước khi đến tay bạn. Dù có gian khổ và kỳ diệu nhưng cuộc hành trình dài nhất không hề bất thường chút nào. Đây chỉ là cách thế giới của chúng ta phù hợp với nhau.

Và càng tìm hiểu sâu thì càng thấy rõ rằng mỗi chuỗi cung ứng này được đan xen với nhau. Chúng ta đang ở trong một trang web, không phải một chuỗi. Sẽ không có chip silicon nếu không có những lò đốt chạy bằng than đang ầm ầm biến thạch anh thành silicon luyện kim. Sẽ không có polysilicon nếu không có hydro clorua mà chúng tôi sử dụng để hòa tan nó và bắt đầu quy trình của Siemens. Sẽ không có chất bán dẫn nếu không có hóa chất và khí được bơm vào phòng sạch từ tầng phụ bên dưới nó. Và, cầu nguyện, nhiều hóa chất đó đến từ đâu? Câu trả lời có thể chỉ nằm trên bàn bếp của bạn.

Phần hai

MUỐI

4
Tuyến đường muối

BOULBY, ANH

Steve Sherlock đã nhìn thấy ma.

“Ở đằng kia,” anh ta chỉ vào cánh đồng bên cạnh, “là địa điểm thời kỳ đồ sắt.” Anh ta xoay người và khoa tay múa chân vào một bụi cỏ gần đó. ‘Với con mắt đức tin của mình, tôi có thể thấy thảm thực vật ở đây có phần khác biệt… có những tòa nhà La Mã; họ đang làm đồ gốm, đồ trang sức làm từ phản lực. Đó là một hiện tượng địa chất, bạn biết đấy: cây đố khỉ hóa thạch…”

Cả hai chúng tôi đều nhìn chằm chằm vào cùng một cánh đồng nhưng chỉ một người trong chúng tôi nhìn thấy bất cứ thứ gì khác ngoài đám cỏ loang lổ, một vài vết đất trơ trụi và thỉnh thoảng có một nốt ruồi. Lúc đó đang là mùa thu hoạch và một người nông dân lái máy kéo chạy ngang qua, kéo theo một chiếc xe moóc. Steve không để ý gì và sải bước về phía trước, hay nói đúng hơn là quay ngược thời gian.

Chúng tôi cách nơi vách đá giáp biển vài trăm thước, nơi được coi là điểm cao nhất trên bờ biển phía đông nước Anh. Cảnh quan ở đây được đánh dấu bằng những vết lõm kỳ lạ: vết sẹo của các mỏ sắt và phèn cũ. Trái đất này đã được biến thành thép để xây dựng Cầu Tyne và Cầu Cảng Sydney. Nhưng Steve quan tâm nhiều hơn đến những gì đang ở ngay dưới chân anh.

Ông đã đến đây hơn bốn thập kỷ, kể từ năm 1979, khi ông rời trường đại học và quyết tâm theo đuổi cuộc đời khảo cổ học. Giờ đây, anh ấy đi khắp đất nước thay mặt cho Highways England và hướng con mắt đức tin của mình đến vùng đất nơi những con đường mới sắp được xây dựng. Trên tuyến nâng cấp A14 giữa Cambridge và Huntingdon, ông đã tìm thấy những chiếc ngà voi ma mút, những đồng xu quý hiếm từ thời hoàng đế La Mã Laelianus và bằng chứng sớm nhất về việc sản xuất bia ở Anh. Gần đây hơn, anh ấy đang tìm kiếm các địa điểm thuộc Thời đại La Mã và Đồ sắt dọc theo đường A428 khi nó

được cải tạo giữa Black Cat và Caxton Gibbet. Nhưng anh ấy không thể tách mình ra khỏi những lĩnh vực này.
Có thể tha thứ cho anh ta vì đây là một trong những địa điểm hấp dẫn nhất trong khảo cổ học Anh. Street House, như những cánh đồng này đã được biết đến, lần đầu tiên gây chú ý vào năm 2006 khi Steve và nhóm của ông phát hiện ra một nghĩa địa Anglo-Saxon: hàng chồng thi thể bao quanh hài cốt của một phụ nữ trẻ được biết đến với cái tên 'Anglo- Công chúa Saxon'. Việc cô ấy có thực sự là công chúa hay không vẫn còn là vấn đề tranh luận, nhưng rõ ràng cô ấy có địa vị cao, vì cô ấy được chôn trên một chiếc giường được trang trí công phu bằng gỗ tần bì và sắt, cùng với ba mặt dây chuyền vàng.
Một trong những mặt dây chuyền này, một viên đá quý được chạm khắc hình vỏ sò và được bao quanh bởi ngọc hồng lựu và vàng, là một trong những phát hiện huy hoàng nhất trong thời kỳ này, sánh ngang với một số đồ tạo tác nổi tiếng được phát hiện tại địa điểm Sutton Hoo ở Suffolk. Nói chung, kho báu trị giá hơn một trăm nghìn bảng Anh, 'đó là lý do tại sao', Sherlock nói, 'tôi có thể đào mọi nơi tôi muốn quanh đây, bởi vì mọi người đều nói: “Steve sẽ làm cho tôi giàu có.”'
Nhưng kho báu Anglo-Saxon chỉ là khởi đầu của nó, bởi vì Steve càng đào sâu, anh càng tìm thấy nhiều hơn và anh càng du hành ngược thời gian xa hơn. Bên dưới nghĩa địa Anglo-Saxon (630–70 SAU CÔNG NGUYÊN) là các tòa nhà La Mã (70–140 SAU CÔNG NGUYÊN) và bên dưới chúng là khu định cư thời đồ sắt (200–1 TRƯỚC CÔNG NGUYÊN) và sâu hơn nữa là một địa điểm thời kỳ đồ đá mới (3800–3700 TCN). Và Steve càng du hành ngược thời gian thì những khám phá càng đáng chú ý. Mỗi phát hiện trong mỗi thời kỳ này đều có một điểm chung: muối. Họ đã làm muối ở đây từ thời La Mã và thời kỳ đồ sắt, và hóa ra là cả thời kỳ đồ đá mới. Tại sao muối? Tại sao ở đây?

Câu trả lời ngắn gọn là lịch sử và hiện tại của chúng ta đã bị muối thấm vào. Nói một cách đơn giản nhất, có một mệnh lệnh sinh học cho việc này. Mỗi năm cơ thể con người cần vài kg muối ăn, natri clorua để duy trì hoạt động. Trong số những thứ khác, muối giúp bộ máy thần kinh, cơ và gân của chúng ta hoạt động, cho phép dòng điện chạy qua. Và giống như hầu hết các máy điện, bộ máy vật lý của

chúng ta sẽ ngừng hoạt động khi không đủ năng lượng và sẽ rơi vào tình trạng quá tải nếu có quá nhiều. Cho đến khi phát minh ra tủ lạnh hiện đại, muối là phương pháp bảo quản thực phẩm chính. Nó có tính chất sát trùng, tiêu diệt vi khuẩn; khi chúng ta muối thịt, theo đúng nghĩa đen, chúng ta đang chữa khỏi tác hại mà nó có thể gây ra cho chúng ta. Muối của trái đất là chất liệu của sự sống.
Tuy nhiên, cũng như với cát, chúng ta dành ít thời gian để suy ngẫm về sự phụ thuộc của mình vào chất liệu khiêm tốn này. Trên thực tế, sự tự mãn của chúng ta về muối thậm chí còn ăn sâu hơn. Trong khi ít người hiểu được tầm quan trọng liên tục của kính đối với nền kinh tế hiện đại, không ai đặt câu hỏi về tầm quan trọng của chip silicon. Mặt khác, muối luôn được coi là tầm thường. Nhưng nói muối là chất liệu của cuộc sống ngày nay vẫn đúng cũng như thời La Mã. Không chỉ đơn thuần là chúng ta cần nó trong thức ăn của mình; muối là nền tảng của phần lớn lĩnh vực vệ sinh và dược phẩm. Hãy nghĩ về một số thứ bạn tìm thấy bên dưới bồn rửa nhà bếp. Baking soda để nấu ăn, thuốc tẩy để tẩy rửa – thậm chí cả những đường ống mà nước thải chảy xuống. Tất cả những sản phẩm cuối cùng này đều bắt đầu bằng muối. Hạt ngũ cốc nhỏ bé này vẫn là nền tảng cho nhiều điều của ngành hóa chất. Điều này nghe có vẻ khó tin nhưng nhiều loại khí và axit chảy qua các đường ống từ nhà máy phụ đến phòng sạch trong xưởng đúc silicon tiên tiến đáng kinh ngạc ở Đài Loan bắt đầu cuộc sống của chúng dưới dạng những hạt muối được khai thác từ dưới lòng đất hoặc bốc hơi khỏi mặt đất. biển.
Có một lý do khác khiến bạn không nên đánh giá thấp chất này. Nếu bạn muốn hiểu chủ nghĩa tư bản và quyền lực, nơi tốt nhất để bắt đầu là muối. Việc những trang sau tràn ngập chính trị, áp bức và chiến tranh không phải ngẫu nhiên. Thực tế là muối rất cần thiết cho sự sống còn của con người (và các loại muối ít người biết đến khác rất cần thiết cho nguồn sống của chúng ta) có nghĩa là nó đã là một công cụ quyền lực kể từ những ngày đầu tiên. Lý do khiến muối giành được vị trí là một trong sáu thành viên chính của Thế giới Vật chất không chỉ vì những đặc tính phi thường của nó - mà sau này sẽ nói thêm - mà vì những gì nó cho phép chúng ta làm. Nếu điều đó nghe có vẻ xa vời thì hãy dành chút thời gian xem xét những gì Steve đã

khám phá được trên cánh đồng của anh ấy trên đỉnh vách đá ở Boulby.

Liên kết bị thiếu

Trong lần khai quật mới nhất, Steve đã tìm thấy một số chiếc bát bằng đất sét và những dụng cụ bằng đá nung có niên đại hơn nhiều so với những phát hiện trước đó của anh; Việc xác định niên đại bằng carbon phóng xạ cho thấy chúng đã gần 6.000 năm tuổi. Chúng trông giống như thứ gì đó bạn có thể nhét vào dưới ấm đun nước khi đun trên lửa. Điều đó gợi ý một lò nướng. Ông tìm thấy dấu vết của clo, dấu hiệu nhận biết về quá trình làm muối. Cho đến nay vẫn rất thú vị: mặc dù có một số bằng chứng về việc làm muối thời kỳ đồ đá mới ở trung tâm châu Âu, nhưng không có gì dọc theo những tuyến đường đó được phát hiện ở vùng cực bắc này. Sau đó, kết quả quét của ông cho thấy có chất béo: chất béo tích tụ, điều này cho thấy mọi người đã làm việc với sữa. Khi đi loanh quanh trên cánh đồng, cổ hơi khom lại sau nhiều năm cúi xuống hố khai quật, ông nhận ra rằng đây là dấu hiệu sớm nhất của sự phát triển. làm pho mát ở Anh (bạn cần rất nhiều muối để làm pho mát cứng như cheddar).

Nhưng chỉ khi anh đào sâu hơn thì phát hiện cuối cùng mới xảy ra. Bên cạnh chiếc lò đầu tiên đó, anh còn tìm thấy chiếc lò thứ hai và thứ ba; cả một loạt lò nướng. Dần dần anh nhận ra rằng đây không phải là một cuộc dàn xếp thông thường. Nơi này không phù hợp với hình ảnh tiêu chuẩn về một cộng đồng nhỏ, không chính thức của những người nông dân tự cung tự cấp. Đây là một nhà máy, một dây chuyền sản xuất. Gần như tình cờ, Steve đã phát hiện ra một trong những bằng chứng sớm nhất về nguồn gốc của sản xuất và thương mại.

Suy cho cùng thì đây là thời kỳ cuối thời kỳ đồ đá mà chúng ta đang nói đến, thời kỳ mà người dân ở Anh vẫn chưa khai thác được công nghệ luyện kim và chỉ mới bắt đầu chuyển từ săn bắt hái lượm sang đời sống nông nghiệp. Nhà máy sản xuất muối - muối - ở đây đã hoạt động, sản xuất muối, pho mát và có thể cả các sản phẩm khác, một nghìn năm trước khi những tảng đá đứng của Stonehenge được dựng lên.

Hãy suy ngẫm điều đó một chút: một thiên niên kỷ trước khi một trong những di tích cổ nổi tiếng nhất thế giới được xây dựng, người dân ở

đây đã sản xuất hàng loạt sản phẩm và buôn bán chúng. Khu định cư này là một loại mối liên kết còn thiếu giữa cuộc cách mạng nông nghiệp và mọi thứ diễn ra sau đó. Những người làm việc ở đây - những người được cho là đến từ lục địa châu Âu, có thể từ Pháp - đã mang theo kiến thức về cách biến tài nguyên thiên nhiên thành sản phẩm, trước khi bán hoặc trao đổi nó về sau. Hãy nheo mắt lại một chút, bạn có thể thấy nguồn gốc của cái mà ngày nay một số người có thể gọi là sở hữu trí tuệ, chuyển giao công nghệ và chủ nghĩa tư bản. Đã có nhiều sự chuyển đổi vĩ đại trong lịch sử, một số trong đó chúng tôi sẽ trình bày trong các chương tiếp theo, nhưng ở thời điểm này, tổ tiên xa xưa của chúng ta đã tập hợp bạn bè và gia đình của họ cùng nhau làm việc để tạo ra thứ gì đó không phải của riêng họ. tiêu dùng mà là trao đổi hoặc bán cho người khác, được coi là một bước ngoặt quan trọng. Việc muối là sản phẩm được đề cập nghe có vẻ kỳ lạ đối với độc giả hiện đại, những người có lẽ coi sản phẩm chủ yếu này là đương nhiên, rẻ tiền và phổ biến như nó vốn có. Nhưng không phải lúc nào cũng như vậy; Cho đến gần đây, việc làm muối thực sự là một công việc rất vất vả.

Nếu bạn đã từng đến thăm một người làm muối thủ công, bạn sẽ hiểu ý tôi. Trên các đảo Ibiza và Mallorca ở Địa Trung Hải, họ đã làm món này từ thời Phoenician. Chúng dẫn thủy triều qua các kênh và cửa cống đến các ao hồ nơi nó được sưởi ấm dưới ánh mặt trời, để lại dung dịch nước muối đậm đặc hơn bao giờ hết mà cuối cùng, các tinh thể muối có thể bị loại bỏ. Những tinh thể này – *fleur de sel* như người ta gọi ở Pháp, *flor de sal* ở Tây Ban Nha – là loại muối được đánh giá cao nhất, một loại muối tinh tế, dễ bong tróc mà các đầu bếp ngày nay thích rắc lên món burrata và mozzarella của họ. fn1

Lý do *hoa bách hợp* đắt đến vậy cũng giống như lý do muối từ lâu đã là một trong những chất quý nhất: làm theo cách này tốn thời gian và năng lượng - trong trường hợp này cả năng lượng mặt trời để làm bay hơi nước và năng lượng của con người để cào muối. Những người sống ở khu định cư thời kỳ đồ đá mới mà Steve phát hiện ra sẽ tuân theo một quy trình tương tự - nhưng nếu không có khí hậu Địa Trung Hải, họ sẽ làm nước biển bốc hơi trong các bình gốm trong lò thay vì để chúng trong các bể cạn dưới ánh nắng mặt trời. Họ sẽ thêm ngày càng nhiều nước mặn và đun đi đun lại cho đến khi cuối cùng,

họ có thể đập vỡ những thùng chứa đó để lộ ra một chiếc bánh muối trắng quý giá.
“Đó là một quy trình công nghiệp,” Steve nói. “Có ai đó đang đi xuống bãi biển ở Skinningrove, lấy nước biển, làm nó bay hơi, mang nước muối lên đồi; có người kiếm củi cho bếp lò; ai đó đang chăn nuôi đàn bò sữa… Đây là những cộng đồng tiên phong.'
Các nhà sử học từ lâu đã đưa ra giả thuyết rằng lý do phần lớn nền văn minh nhân loại bắt đầu trên bờ biển là do dễ dàng tiếp cận với muối. Tại cánh đồng trên đỉnh vách đá ở Boulby này, Steve đã phát hiện ra một trong những bằng chứng chắc chắn đầu tiên. Điều gì đã xảy ra với muối, thịt muối và pho mát được làm từ hàng ngàn năm trước trên vách đá này? Dự đoán tốt nhất của chúng tôi là chúng đã được giao dịch, rất có thể là với những người từ xa đến mua sản phẩm này.
Ngày nay, những cánh đồng này giáp với North York Moors, một khung cảnh màu nâu tím với cây thạch nam, quả việt quất và cỏ than bùn, nhưng khi nhà máy muối đầu tiên này đi vào hoạt động, những cánh đồng hoang và phần lớn đất nước bên cạnh đó vẫn được bao phủ bởi rừng sồi và rừng cây phỉ dày đặc. Tuy nhiên, khi những người nông dân đầu tiên định cư và bắt đầu chăn nuôi gia súc và cừu, những khu rừng đó bị chặt phá để nhường chỗ cho các cánh đồng và trang trại. Mỗi nơi được kết nối bởi một mạng lưới các con đường và con đường mà mọi người sẽ đi để buôn bán thực phẩm, đồ có giá trị và tất nhiên là cả muối.

Kiếm muối của họ

Bạn có thể băng qua hầu hết nước Anh trên những tuyến đường muối cũ. Từ Droitwich đến Warwick, từ Buxton đến Sheffield, có những con đường mòn đã trải dài hàng nghìn năm, nơi người ta vận chuyển muối từ nơi sản xuất đến nơi tiêu thụ. Thực tế, nhiều thứ mà người Anh gọi là đường La Mã ban đầu là những con đường muối cổ xưa mà người La Mã chỉ đơn giản lát lại khi họ chinh phục đất nước. Châu Âu thời trung cổ có nhiều con đường như vậy: từ Venice đến Trieste, Trieste đến Vienna, Augsburg đến Salzburg (nghĩa đen: thị trấn muối) và có lẽ nổi tiếng nhất là giữa các suối nước mặn ở Lüneburg và cảng Lübeck trên sông. bờ biển phía bắc nước Đức. Từ

Lübeck muối được vận chuyển đến vùng Baltic, tới Na Uy và thậm chí đến Quần đảo Shetland, nơi muối được sử dụng để muối cá tuyết. Ngay cả ở Mỹ, nhiều con đường hiện đại được xây dựng trên những con đường từng bị đàn bò rừng và các loài động vật khác tấn công khi chúng đi bộ từ suối nước mặn này sang suối nước mặn khác. Các thị trấn thường mọc lên gần những nơi như vậy. Syracuse ở ngoại ô New York nhanh chóng trở thành một trong những thành phố quan trọng nhất ở Mỹ sau khi những người định cư phát hiện ra suối nước muối ở Onondaga gần đó.

Trên khắp thế giới, tất cả chúng ta vẫn đang đi trên những con đường muối - hoặc lái chúng. Đường cao tốc SS4 cắt ngang nước Ý từ Rome đến Porto d'Ascoli trên thực tế được xây dựng trên đỉnh Via Salaria của La Mã cổ đại - con đường muối. Việc con đường kết thúc tại Adriatic không phải ngẫu nhiên: trong hàng nghìn năm, đây là một trong những trung tâm sản xuất muối lớn. Ít nhất là từ thời trung cổ, muối từ Venice đã được vận chuyển đến Modena và Parma cũng như các vùng khác bên bờ sông Po, nơi nó được sử dụng để sản xuất giăm bông và pho mát. Một miếng phô mai Parmigiano Reggiano có hương vị như vậy vì nó được ngâm trong dung dịch nước muối mặn trong 20 ngày trước khi để trưởng thành trong một năm, trong thời gian đó muối dần dần lan vào lõi của nó. Thịt giăm bông Parma, prosciutto, xúc xích Ý: tất cả đều là những sản phẩm không chỉ từ thịt mà còn từ muối, có nguồn gốc điển hình nhất từ Genoa và Venice.

Câu chuyện về Venice gắn bó chặt chẽ với muối có vẻ phản trực giác: chẳng phải nó nổi tiếng với những hoạt động kinh doanh kỳ lạ hơn, chẳng hạn như việc buôn bán gia vị với châu Á? Vâng, đúng vậy, nhưng trước đó và cả sau đó nữa, Venice là một nền kinh tế muối. Ngay từ năm 523 SAU CÔNG NGUYÊN , khi người Ostrogoth cai trị nơi từng là Đế chế La Mã phương Tây, người quản lý Cassiodorus của họ đã viết cho người Venice rằng:

Tất cả sức lực của bạn đều được dành cho ruộng muối của bạn; trong đó thực sự ẩn chứa sự thịnh vượng của bạn và khả năng mua những thứ mà bạn không có. Vì dù có những người ít cần đến vàng, nhưng không ai sống mà không thèm muối. [1]

Trong những thế kỷ đầu tiên, người Venice kiểm soát phần lớn hoạt động sản xuất muối trên biển Adriatic, liên tục gây chiến với các đối

thủ cạnh tranh gần đó và chinh phục các xưởng muối của họ. Nhưng dần dần thành phố nhận ra rằng họ có thể làm tốt hơn nhiều không chỉ bằng cách sản xuất muối mà còn bằng cách kiểm soát hoạt động thương mại của mình. Muối từ khắp Địa Trung Hải - từ Algeria, Sardinia, Ibiza và Mallorca, Síp và Crete - được vận chuyển đến Venice, sau đó được bán cho các thị trường trên khắp nước Ý và xa hơn nữa. Các nhà buôn muối giàu đến mức họ có thể chi trả cho những chuyến đi mạo hiểm hơn nữa đến Ấn Độ và Viễn Đông, nơi họ sớm thống trị việc buôn bán gia vị. Camera Salis của Venice, văn phòng muối, đã trở thành trung tâm của hệ thống tài chính, chiếm hơn một phần bảy số ducat mà toàn bang Venice kiếm được. fn2

Có lẽ bạn đang bắt đầu nhìn thấy mô hình ở đây. Trên vách đá ở Boulby, muối là sản phẩm truyền cảm hứng cho một cộng đồng thử nghiệm sản xuất hàng loạt. Tại đầm phá Venice, chúng ta có muối, nguồn cung cấp nền tảng cho nền kinh tế thương mại. Chất này cho phép nông dân và ngư dân bán sản phẩm của họ không chỉ trong vài ngày hành trình mà còn vượt xa các đại dương, mang lại cho thực phẩm tươi sống không chỉ hương vị độc đáo mà còn quan trọng hơn: thời gian. Đột nhiên con cá bắt được ngày hôm qua không còn phải bán vào ngày mai. Thịt có thể được bảo quản và để trên kệ trong một năm hoặc hơn. Sữa có thể biến thành pho mát và có thể để được nhiều năm.

Ngày nay chúng ta biết không thiếu muối. Nếu bạn loại bỏ tất cả natri clorua khỏi đại dương và rải đều trên đất liền, bạn sẽ phủ kín thế giới trong một lớp vỏ muối dày hơn 500 feet. Đó là trước khi người ta xem xét trữ lượng dưới lòng đất, cũng rất dồi dào. Thật vậy, điều đó đã xảy ra khi ở Boulby, cách cánh đồng của Steve hàng trăm mét, có một phiến muối tinh khiết khổng lồ. Nhưng chúng tôi chỉ mới phát hiện ra điều đó gần đây; người thời đồ đá mới không có việc gì khác ngoài việc kéo nước biển lên xuống vách đá này.

Việc họ làm như vậy sẽ cho bạn biết điều gì đó về giá trị. Họ đã chế tạo những lò nướng này và tạo ra một trong những dây chuyền sản xuất đầu tiên được biết đến trên thế giới vì có thị trường cho nó.

Đối với phần lớn thế giới cổ đại, muối là biểu tượng của sự giàu có. Ở Châu Phi, nó được giao dịch với các thương gia để đổi lấy vàng. Nó được sử dụng như một dạng tiền tệ để thanh toán hàng hóa và đôi khi

cho nô lệ. Nhân tiện, đây không chỉ là lịch sử cổ đại. Trong Chiến tranh thế giới thứ hai, khi Nigeria phải đối mặt với tình trạng thiếu hụt và mối đe dọa nạn đói, muối được sử dụng làm tiền tệ ở nhiều ngôi làng ở phía bắc, trong đó muối của Anh có tỷ giá hối đoái cao nhất. [2] Người La Mã là một trong những nền văn hóa đầu tiên cung cấp khẩu phần muối chính thức cho binh lính của họ - mỗi người nhận được một khoản trợ cấp, đó là nguồn gốc của từ 'lương', mặc dù nó có thể được coi là một hình thức bảo hiểm y tế hơn là tiền mặt, vì họ cũng được trả bằng tiền. Khi chúng ta nói về việc ai đó 'kiếm muối' hoặc 'đáng giá muối', chúng ta đang theo truyền thống La Mã cổ xưa. Và truyền thống cung cấp muối cho binh lính vẫn tồn tại cho đến gần đây. Dù ở dạng thô hay ở dạng cá muối hoặc thịt bò muối, muối đã trở thành một thành phần chính trong các gói khẩu phần ở Anh và hơn thế nữa trong nhiều thế kỷ. Một trong những điều đầu tiên một quốc gia phải làm trước khi tham chiến là dự trữ muối.
Trong chiến tranh, muối được sử dụng làm vũ khí. Trong Chiến tranh giành độc lập của Mỹ, người Anh đã phong tỏa các cảng của Mỹ và nhắm mục tiêu vào các xưởng muối trên bờ biển Đại Tây Dương. Trong Nội chiến Hoa Kỳ, quân đội Liên minh đã chặn các chuyến hàng thực phẩm và muối vào miền nam; nó tìm kiếm các xưởng muối và phá hủy chúng, phá vỡ các máy bơm nước muối để ngay cả khi chúng được chiếm lại thì chúng cũng trở nên vô dụng. Ngay cả khi nó chiến đấu với quân miền Nam, nó cũng khiến họ chết đói.

Muối và năng lượng

Hiểu lịch sử của muối và bạn không chỉ hiểu được nguồn gốc của buôn bán và buôn bán; bạn hiểu nguồn gốc của quyền lực và sự chuyên chế. Chừng nào còn có những người cai trị, họ đã tìm cách cai trị bằng muối, kiểm soát, điều tiết và đánh thuế để củng cố quyền lực của mình, và không có quốc gia nào điều này thể hiện rõ ràng hơn ở Trung Quốc.
Đã có 13 triều đại lớn ở Trung Quốc - một số kéo dài hàng trăm năm. Đã có những tín ngưỡng chính trị khác nhau từ chế độ phong kiến đến chủ nghĩa cộng sản, nhưng xuyên suốt Trong lịch sử cực kỳ lâu dài của đất nước này đã có một sợi dây thể chế, một sợi dây bất biến: độc quyền muối. Nguyên tắc các thống đốc nên kiểm soát và đánh

thuế việc buôn bán muối có thể bắt nguồn từ thế kỷ thứ bảy trước Công nguyên , trước triều đại nhà Hán; trước khi xây dựng Vạn Lý Trường Thành của Trung Quốc, trước Đế chế La Mã hay vấn đề đó là Alexander Đại đế hay Plato hay Aristotle. Một nghìn rưỡi năm trước khi Machiavelli viết *Il Principe* , Trung Quốc có *Guanzi* – được cho là tác phẩm vĩ đại đầu tiên về chính trị thực tế – và Guanzi *một* phần có liên quan đến muối.

“Nếu bạn công bố thuế bầu cử đối với tất cả người lớn và trẻ em, mọi người chắc chắn sẽ phàn nàn và phản đối nó,” tài liệu này được cho là của Quản Trọng, người từng là tể tướng của Tề Hoàn Công, một trong những quốc gia phong kiến thời kỳ đầu. Trung Quốc. 'Tuy nhiên,' nó tiếp tục, 'nếu bạn thực hiện chính sách thuế muối, lợi nhuận gấp trăm lần sẽ thuộc về bạn, người cai trị, trong khi người dân sẽ không thể thoát khỏi nó. Đây chính là ý nghĩa của việc quản lý tài chính.” [3]

Nói cách khác, để diễn giải Frank Herbert: người kiểm soát muối sẽ kiểm soát vũ trụ. Và các hoàng đế đầu tiên của Trung Quốc đã chú ý đến lời khuyên này, huy động công nhân làm muối, ra lệnh cho mọi thứ, từ kích thước của chảo bay hơi đến mức sản lượng hàng ngày, kiểm soát việc phân phối khắp đế quốc và việc bán hàng cho người tiêu dùng. Và vì nhà nước kiểm soát mọi thứ nên họ có thể bán thành phẩm cho người tiêu dùng với mức giá vượt xa chi phí sản xuất, tích lũy doanh thu đáng kể trong quá trình thực hiện. Vào thế kỷ thứ ba sau Công nguyên , muối thường xuyên chiếm gần 90% nguồn thu của nhà nước. [4]

Không chỉ muối - rất quý, rất quan trọng đối với dinh dưỡng và chăm sóc sức khỏe của con người - còn quan trọng về mặt tài chính; nó cũng nêu ra đủ loại vấn đề chính trị sâu sắc hơn. Bao nhiêu quyền lực là quá nhiều quyền lực? Vai trò của nhà nước kết thúc ở đâu và công dân bắt đầu? Liệu tự do cá nhân có ảnh hưởng đến an ninh quốc gia? Trong trường hợp nào chính quyền trung ương nên hạn chế doanh nghiệp tư nhân?

Những câu hỏi như vậy vốn có vẻ hiện đại, nhưng chúng lại là chủ đề của một cuộc tranh luận được tổ chức trong triều đình vào năm 81 trước Công nguyên và được ghi lại trong một trong những tác phẩm đầu tiên nổi tiếng nhất về quản trị, *Yán Tiě Lùn* , *Bài giảng về Muối và Sắt* .

Một bên của cuộc tranh luận là những người theo chủ nghĩa hiện đại, những người lập luận rằng độc quyền sản xuất muối và sắt là những bánh răng quan trọng trong bộ máy tài trợ cho quân đội và bảo vệ nhà nước. Bên kia là những nhà cải cách, đệ tử của triết gia Khổng Tử, những người muốn chấm dứt những sự khắt khe tập trung này và đặt câu hỏi tại sao phải 'nhà nước cạnh tranh với nhân dân'. Ngay cả ngày nay, 2.000 năm sau, vẫn không ai có thể hoàn toàn đồng ý rằng ai thực sự đã thắng trong cuộc tranh luận; tình trạng độc quyền về muối tồn tại trong vài thập kỷ, sau đó bị bãi bỏ, rồi nhanh chóng được khôi phục. [5]

Khi các nhà lý luận suy ngẫm về bản chất của Trung Quốc hiện đại, họ thường xem xét Đảng Cộng sản và các xúc tu của nó; họ xem xét di sản của Mao Trạch Đông và đôi khi cả những cơ cấu chính trị có trước thế kỷ XX. Tuy nhiên, họ có thể làm tốt hơn khi cân nhắc việc quản lý muối. Vì một phần việc kiểm soát chất này đã đòi hỏi phải xây dựng một bộ máy quan liêu tập trung khổng lồ và sự phụ thuộc của doanh nghiệp tư nhân, không chỉ trong thế kỷ qua mà trong suốt hai thiên niên kỷ. Ngoại trừ một vài lần tạm dừng ngắn ngủi, sự độc quyền vẫn tồn tại cho đến thế kỷ XXI.

Gần đây nhất là vào năm 2013, 'cảnh sát muối' của Trung Quốc - một lực lượng gồm 25.000 người có huy hiệu vàng đặc biệt có hình tinh thể muối - đã trấn áp các thương nhân tư nhân đang cố gắng bán muối trực tuyến. Điều này có vẻ ít liên quan đến kiểm soát nhà nước hoặc doanh thu hơn là liên quan đến sức khỏe cộng đồng: Trung Quốc đã gặp phải hàng loạt tai nạn ô nhiễm thực phẩm và đang phải chiến đấu với tình trạng thiếu iốt. trong số phần lớn dân số nông thôn trong nhiều năm. Khi đó, biểu hiện mới nhất của tình trạng độc quyền muối là đưa muối i-ốt, loại muối có chứa một lượng nhỏ i-ốt, đến càng nhiều người dân càng tốt. Đến năm 2000, tỷ lệ này đã đạt tới 90% và đến năm 2010, Bộ Y tế tuyên bố đã loại bỏ tình trạng thiếu iốt ở tất cả các vùng của Trung Quốc, ngoại trừ các tỉnh xa xôi nhất. Năm 2016, chính phủ đã chấm dứt kiểm soát giá muối, một động thái được mô tả là chấm dứt tình trạng độc quyền 2.000 năm tuổi, mặc dù thị trường vẫn do tập đoàn công nghiệp muối quốc gia khổng lồ thuộc sở hữu nhà nước Trung Quốc thống trị, nhiều người cho rằng điều này vẫn còn độc quyền về tất cả trừ tên.

Tất nhiên, độc quyền không phải là phương tiện duy nhất mà chính phủ có thể huy động tiền; phổ biến hơn vẫn là thuế, và kể từ những ngày đầu áp dụng thuế, những loại thuế như vậy đã được áp dụng đối với muối. Các nền văn minh từ Trung Quốc, Anh đến Đế chế Ottoman đều tính thuế đối với việc bán muối, nhưng không nơi nào khét tiếng như ở Pháp. Gabelle , như thuế muối của Pháp được biết đến, rất tốn kém, nó tùy tiện - với một số vùng trên đất nước phải đối mặt với các khoản thuế đáng kinh ngạc còn những vùng khác thì không - và nó bị mọi người ghét bỏ . Ở một khía cạnh nào đó, nó là nguyên mẫu của hệ thống thuế mà chúng ta biết ngày nay, tương tự như thuế năng lượng đang gây áp lực lên các hộ gia đình khi họ cố gắng sưởi ấm và cung cấp năng lượng cho ngôi nhà của mình. Chẳng có gì đáng ngạc nhiên khi Cách mạng Pháp diễn ra, loại thuế đánh vào cuộc sống hàng ngày này lại là trọng tâm của nó. [6]
Trong những năm trước cách mạng, thuế suất ngày càng tăng cao, đẩy một số hộ gia đình vào tình trạng đói và suy dinh dưỡng. Ngay cả những người tìm cách giảm lượng muối tiêu thụ cũng không thể tránh khỏi gabelle , vì mỗi người cũng có nghĩa vụ phải mua 7 kg muối mỗi năm, cái gọi là *sel du devoir* , khiến khoản thuế này không thể trốn tránh được. Buôn lậu tràn lan và hình phạt cho việc trốn tránh tương ứng tàn bạo: đàn ông, phụ nữ và trẻ em bị đưa vào tù hoặc tàu thuyền. Một số bị tra tấn, một số bị sỉ nhục theo nghi lễ, một số thậm chí bị bẻ gãy trên bánh xe - hình thức hành quyết khủng khiếp nhất trong tất cả các hình thức hành quyết. Qua nhiều thế kỷ, sự oán giận ngày càng dâng cao và doanh thu *từ gabelle cũng tăng theo* . Vào thời vua Louis XIV, nó là trụ cột của nền tài chính công Pháp. [7]
Bộ trưởng tài chính của Louis, Jean-Baptiste Colbert đã từng nhận xét nổi tiếng rằng 'Nghệ thuật đánh thuế bao gồm việc nhổ con ngỗng sao cho thu được nhiều lông nhất với ít tiếng rít nhất có thể'. Nhưng những cải cách của Colbert đối với *gabelle* chỉ làm tăng thêm tiếng rít: ông đã hệ thống hóa thứ thuế đáng ghét này, biến một bộ quy tắc không chính thức gây phẫn nộ thành một thứ gì đó cứng nhắc hơn. Số người bị trừng phạt vì trốn tránh ngày càng cao. Thuế muối không phải là nguyên nhân duy nhất của cuộc cách mạng, nhưng nó đã trở thành biểu tượng cho mọi điều sai trái của *chế độ cũ* ở Pháp - một điểm yếu chính trị làm dấy lên các cuộc nổi dậy trên khắp đất nước.

Năm 1790, sau khi những người cách mạng lật đổ chế độ quân chủ, *gabelle* nhanh chóng bị bãi bỏ và tất cả những người bị buộc tội buôn lậu hoặc trốn tránh đều được trả tự do. Nó được Napoléon lặng lẽ giới thiệu lại vào năm 1806.

Có hợp lý không khi cuộc cách mạng có thể được thúc đẩy bởi một loại thuế khác đánh trên một sản phẩm khác? Có lẽ. Một lần nữa, rõ ràng có điều gì đó đặc biệt về muối, vì trải nghiệm của Pháp hầu như không phải là duy nhất. Trong cuốn sách xuất bản năm 1875 có tên *Das Salz* , nhà thực vật học người Đức, Matthias Jakob Schleiden, đã viết rằng có mối quan hệ rõ ràng giữa thuế muối và chế độ chuyên quyền. Những chế độ tìm cách kiếm tiền từ chất thiết yếu, quý giá này có xu hướng trở thành những nơi mà sự bất bình đẳng lan tràn và người dân bị ngược đãi. Trong những năm tiếp theo, luận điểm của Schleiden có lẽ là ví dụ thích hợp nhất: Ấn Độ.

Lịch sử làm muối ở Ấn Độ không lâu đời như ở Trung Quốc, nhưng nó vẫn có lịch sử cổ xưa. Trong hàng nghìn năm, người Ấn Độ đã làm bốc hơi nước biển dọc theo bờ biển. đã làm trên Adriatic hoặc trên Quần đảo Balearic ở Địa Trung Hải. Nhưng sau khi chiếm đóng đất nước, người Anh đã đến để thay đổi điều đó. Các thuộc địa và vùng lãnh thổ không chỉ được coi là những nơi có nguồn tài nguyên thiên nhiên phong phú để khai thác, mà có lẽ còn hơn thế nữa, là thị trường bị giam cầm cho hàng hóa nội địa. Vì vậy, người Anh đã cấm bán muối địa phương ở Bengal và bắt buộc muối của Anh phải được bán ở đó. Có thể dự đoán được, nạn buôn lậu trở nên tràn lan, do đó người Anh chỉ đơn giản là nắm quyền kiểm soát sản xuất địa phương, thực hiện độc quyền nhà nước và biến việc sản xuất hoặc buôn bán muối trở thành bất hợp pháp.

Việc kiểm soát những hạn chế này tỏ ra có phần thách thức. Trong khi người Trung Quốc sử dụng một tiểu đoàn cảnh sát muối và chính quyền Pháp có đội quân đáng ghét của riêng họ, Gabelous, thì người Anh lại tìm kiếm một giải pháp có phần giống Anh hơn: một hàng rào. Họ lắp đặt các trạm kiểm soát hải quan quanh bang Bengal và sau đó trồng một hàng rào đặc biệt trồng lê gai, cây mận Ấn Độ và cây keo gai nhọn dọc khắp biên giới, khoảng 2.400 dặm từ chân đồi của dãy Himalaya đến các xưởng muối ở Odisha. Hàng rào vĩ đại của Ấn Độ, như đã được biết đến, được tuần tra ngày đêm trong nỗ lực thực thi

tình trạng độc quyền về muối - một nhiệm vụ của Sisyphean vì những kẻ buôn lậu liên tục tìm kiếm điểm yếu. Theo tác giả Roy Moxham, đó là 'một lời nhắc nhở liên tục về những gì người Ấn Độ coi là bất công - thuế của Anh. Tuy nhiên, nó vẫn tiếp tục được củng cố." số 8
Chỉ khi người Anh nắm quyền kiểm soát toàn bộ hoạt động sản xuất muối của Ấn Độ thì hàng rào mới được phép mục nát (ngày nay rất ít hoặc không còn dấu vết nào của nó) nhưng sự phẫn nộ đối với việc kiểm soát muối của thuộc địa vẫn tiếp tục lan rộng. Với việc sản xuất tại địa phương của Ấn Độ bị cản trở, nước này buộc phải dựa vào muối của Anh, vốn tràn vào và, trong một hành vi tống tiền tài chính khác, đã bị đánh thuế trên đường đi. Người Anh bằng cách nào đó đã kết hợp những khía cạnh tồi tệ nhất của sự độc quyền của Trung Quốc và thuế *gabelle* trong chính sách muối của họ.
Tất cả những điều này giúp giải thích tại sao, khi Mahatma Gandhi 60 tuổi chọn phản đối sự chiếm đóng của thực dân Anh vào năm 1930, ông đã làm như vậy bằng cách sử dụng muối, và những loại thuế này của Anh đã khiến dân làng nghèo mất trung bình ba ngày thu nhập. '[Hệ thống] của Anh dường như được thiết kế để tiêu diệt chính mạng sống của [nông dân Ấn Độ]', ông viết trong một bức thư lịch sự đầy hiếu học gửi cho Lãnh chúa Irwin, phó vương của Ấn Độ.
Ngay cả muối mà anh ta phải sử dụng để sống cũng bị đánh thuế đến mức khiến gánh nặng đè nặng lên anh ta, dù chỉ vì sự vô tư nhẫn tâm khi xảy ra việc đó. Thuế tỏ ra còn nặng nề hơn đối với người nghèo khi người ta nhớ rằng muối là thứ duy nhất anh ta phải ăn nhiều hơn người giàu cả về mặt cá nhân và tập thể… Tôi coi loại thuế này là bất công nhất theo quan điểm của người nghèo . 9
Phó vương hơi bối rối trước việc lựa chọn vấn đề, một số đồng nghiệp của Gandhi cũng vậy. Một số người đã đề xuất tẩy chay thuế đất của Anh, điều này dường như là một vấn đề nặng nề hơn nhiều. Nhưng muối có một biểu tượng đặc biệt: đây là một loại lương thực thiết yếu, được hầu hết mọi người sử dụng hàng ngày (thật thú vị là không phải chính Gandhi, người đã từ bỏ muối vài năm trước đó) và vẫn có tầm quan trọng sống còn đối với nguồn thu thuế của Anh.
Sau khi thông báo cho phó vương về kế hoạch của mình, Gandhi bắt đầu cuộc hành quân dài 240 dặm đến bờ biển, thu hút rất đông đệ tử, những người ủng hộ và báo chí khi ông đi bộ. Sau 24 ngày, anh đến

ngôi làng ven biển Dandi ở bờ biển phía tây, múc một ít nước biển, vẩy lên người và sau đó, khi máy quay phim kêu vo vo, nhặt một số hạt muối đã bay hơi trên bãi biển. Khi làm như vậy, anh ta đã vi phạm một trong những điều luật đáng phẫn nộ nhất đất nước.
'Với điều này, tôi đang làm lung lay nền tảng của Đế quốc Anh,' anh ấy khai báo. 'Tôi muốn thế giới thông cảm trong trận chiến giữa Quyền chống lại Quyền lực này.'
'Salt satyagraha' của Gandhi là một trong những điểm then chốt trên con đường giành độc lập của Ấn Độ, gây ra phản ứng dây chuyền bất tuân dân sự trên khắp đất nước. Gandhi sau đó bị bắt nhưng lúc đó đã quá muộn. Sarojini Naidu, người được Gandhi bổ nhiệm lãnh đạo chiến dịch khi ông vắng mặt, đã dẫn đầu một cuộc tuần hành đến xưởng muối Dharasana, một trong những nhà máy sản xuất quan trọng nhất ở tỉnh Gujarat. Hết làn sóng biểu tình bất bạo động này đến làn sóng khác đều bị cảnh sát đánh đập dã man. Hàng trăm người bị thương và hai người chết. Sự kiện tàn bạo đã thu hút sự phản đối của quốc tế.
Người ta có thể vẽ ra một ranh giới liên tục giữa thời điểm đó, với việc Gandhi thu thập các tinh thể muối trên bãi biển Dandi, và sự độc lập vào năm 1949. Đối với những người không quen biết, ý tưởng rằng muối – những hạt muối đơn giản – cung cấp hạt giống cho sự độc lập của Ấn Độ có vẻ không thể thực hiện được. . Nhưng muối có ý nghĩa quan trọng hơn nhiều so với những gì hầu hết mọi người nghĩ: nó là nền tảng cho thương mại kinh tế; công cụ quyền lực; biểu tượng phản kháng Tuy nhiên, đó là tất cả lịch sử. Nhưng có lẽ điều đáng chú ý nhất về muối là ở chỗ, một cách lặng lẽ, vô hình, nó vẫn là một phần xương sống của thế giới hiện đại.

5
muối của trái đất

Warmingham, Anh

Trung tâm ngành muối của Anh là một cánh đồng nằm sâu trong vùng nông thôn Cheshire.

Có một đàn cừu đang nhai cỏ và phía chân trời là một trang trại cổ kính. Tuy nhiên, nếu nhìn gần hơn một chút, bạn có thể nhận ra một thứ khác: một con đường lái xe rải sỏi dẫn đến một bãi đất trống với một số đường ống nhô ra khỏi mặt đất vài mét. Nó có thể dễ dàng bị nhầm lẫn với một thiết bị nông nghiệp nhưng trên thực tế, những đường ống này là manh mối về những gì đang xảy ra dưới chân chúng ta.

Cách vài trăm mét dưới đồng cỏ đầy cỏ này, hàng triệu tấn muối đang được khai thác từ những hang động khổng lồ dưới lòng đất - một số nhỏ, số khác rộng lớn như thánh đường. Ở dưới đó, các bức tường, trần nhà và sàn nhà có màu nâu hồng mờ tuyệt đẹp. Nếu bạn chiếu đèn vào chúng, chúng sẽ tỏa sáng ấm áp như da thịt; ngoại trừ việc bạn không thể làm bất cứ điều gì tương tự, vì chưa có con người nào đặt chân vào những hang động bên dưới cánh đồng này. Điều đó khiến người ta phải suy ngẫm một câu đố: loại mỏ nào không có thợ mỏ?

Trước khi đi đến câu trả lời, hãy nhớ lại rằng nói chung có ba cách để làm muối. Bạn có thể làm bay hơi nó từ biển, một quá trình vất vả mà người thời kỳ đồ đá mới ở Boulby đã thực hiện trên quy mô hàng ngàn năm trước. Bạn có thể đào muối đá lên khỏi mặt đất, điều này có lẽ đã xảy ra ở mỏ hoạt động lâu đời nhất trên thế giới: mỏ muối Khewra ở Pakistan, được cho là có từ thời Alexander Đại đế. Có thể bạn đã từng gặp muối Khewra trước đây; ngày nay nó được biết đến nhiều hơn với cái tên muối hồng Himalaya, mặc dù mỏ thực sự cách chân đồi Himalaya khoảng 200 dặm, khiến đây trở thành một chiêu tiếp thị táo bạo, hơi giống việc đóng chai sông Thames ở London và bán dưới dạng nước suối Yorkshire Dales.

Còn có những mỏ muối nổi tiếng khác: mỏ Hallein ở phía tây bắc nước Áo lâu đời đến mức người ta từng phát hiện ra hài cốt của một thợ mỏ Celtic cổ đại, bị mắc kẹt hàng nghìn năm trước, ở đó. Ngày nay, nó không còn bị khai thác để lấy muối mỏ nữa và bạn có thể đi tàu hỏa leo núi xuống vực sâu, sau đó trôi qua hồ nước ngầm ở một trong những hang muối. Tại mỏ muối Wieliczka ở Krakow, Ba Lan, bạn có thể nhìn thấy những bức tượng và thậm chí toàn bộ nhà thờ được chạm khắc từ muối.

Cách thứ ba và cuối cùng để sản xuất muối là chiết xuất nó từ lòng đất dưới dạng nước muối – một dung dịch muối có hơn 30% muối, trái ngược với 3% nước biển. Điều này được gọi là 'khai thác giải pháp' và theo một nghĩa nào đó, nó không quá khác biệt so với việc đào vật lý: bạn vẫn đang khai thác trên cùng một đường nối, chỉ những người khai thác giải pháp mới sử dụng vòi nước điều áp từ xa thay vì máy khoan và thuốc nổ.

Khai thác dung dịch, nghe có vẻ siêu thực, là một trong những cách chính chúng ta lấy muối ngày nay, ít nhất là ở những nơi trên thế giới không có đủ nhiệt và ánh sáng mặt trời để làm bay hơi nước biển. Phần lớn muối của Mỹ đến từ lòng đất ở bang Kansas, Louisiana, Texas và New York. Morton, một trong những nhà sản xuất nổi tiếng nhất, sản xuất muối ở Rittman, Ohio và Silver Springs, New York, nhưng là mỏ giải pháp, về cơ bản chúng vô hình. Tất cả những gì có thể thấy ở mặt đất là một vài đường ống, bơm nước và không khí điều áp xuống, và bơm nước muối mặn lên.

Khi đứng giữa cánh đồng ở Cheshire, cắm rễ vào nền đất dường như rắn chắc, tôi cố gắng hình dung một chút điều gì đang diễn ra ở độ sâu vài trăm mét dưới lòng đất. Đó là một hoạt động ma quái, chóng mặt, nếu chỉ vì quy mô của những cái hố này khiến người ăn xin tin tưởng.

Joe Evans của British Salt cho biết: “Đôi khi tôi nói với mọi người rằng bạn có thể nhét Tháp Blackpool vào bên trong một trong những hốc muối này”. Chúng tôi đang đứng bên lỗ khoan số 19, lắng nghe tiếng chim hót và, ít nhất là trong trường hợp của tôi, đột nhiên cảm thấy hơi loạng choạng khi nghĩ đến cái hố vô hình này dưới chân mình, không chỉ sâu mà còn rộng đến kinh ngạc. Joe chỉ vào hàng rào ở phía xa để cho biết hang động có thể kéo dài bao xa. Từ 'có lẽ' đang

phát huy khá nhiều tác dụng ở đây, vì trong khi các nhà khai thác mỏ sử dụng sóng siêu âm, siêu âm và các thiết bị từ xa khác để kiểm tra kích thước, không ai hoàn toàn chắc chắn điều gì đang diễn ra ở dưới đó.
'Bạn chọn những gì bạn nghĩ là lĩnh vực tốt nhưng trên thực tế, bạn không thể biết chắc chắn điều gì sẽ xảy ra. Bạn đang cố gắng tạo ra một loại hình giọt nước dưới mặt đất. Nhưng đôi khi bạn chạm vào đá cẩm thạch và hình dạng không đối xứng. Đôi khi đá có thể rơi ra và làm gãy các ống kim loại."
Nói cách khác, toàn bộ quá trình vừa mang tính nghệ thuật vừa là một khoa học. Chúng tôi bước tới chỗ đường ống và Joe vặn một cái vòi nhỏ. Thứ trông giống như bọt nước chảy ra từ một vòi nhỏ.
"Đó là nước muối," anh nói và nếm thử. 'Độ mặn khoảng 32%.' Tôi vẩy một ít lên ngón tay và đưa lên miệng. Nó mặn đến kinh ngạc, lập tức khiến môi tôi khô khốc.
Sau khi được bơm lên khỏi lòng đất ở đây, nước muối được dẫn đến nhà máy của British Salt cách đó vài dặm. Middlewich. Chúng tôi đi theo các đường ống đến các bể lọc khổng lồ, nơi nước muối chảy xung quanh và các muối magie và sunfat khác được loại bỏ. Nước từ nước muối được bay hơi trong các bình nóng khổng lồ, khiến muối có độ đặc tương tự như cát ướt. Sau khi chạy qua một lò nướng khác, thứ nổi lên là những tinh thể muối tinh khiết lấp lánh. Tôi lướt tay qua các hạt khi chúng nổi lên, ngạc nhiên trong giây lát vì độ nóng của chúng khi chạm vào.
Joe nói: "Cái này cực kỳ tốt". 'Nó đi vào Wotsits.'
Hóa ra không thể nào sống một ngày ở đất nước này mà không tiêu thụ muối Cheshire, dù trực tiếp hay gián tiếp. Đồ ăn nhẹ như Wotsits chỉ là khởi đầu của nó. Có loại được nén thành viên, dùng làm mềm nước; có những loại ngũ cốc thô hơn được bán dưới dạng muối rửa chén. Thứ mà bạn có thể quen thuộc nhất trong ngành được biết đến với cái tên PDV – muối chân không khô nguyên chất – nhưng mọi người khác gọi nó là muối ăn. Nếu bạn đã từng rắc muối từ một siêu thị ở Anh hoặc một thương hiệu hàng đầu lên thực phẩm của mình, rất có thể nó đã bắt đầu ở một trong những lĩnh vực này trước khi nó được đóng gói và dán nhãn hiệu.

Lịch sử của muối Cheshire

Lớp muối bên dưới trang trại ở đây có niên đại vài trăm triệu năm từ kỷ Triassic, khi một phần của quận bị bao phủ bởi biển nội địa, sau đó bị cắt đứt khi đất dâng lên về phía bắc. Nước biển bốc hơi, để lại một hồ muối lớn, dần dần bị bao phủ bởi đá cẩm thạch. Thời gian trôi qua - rất nhiều - và cái hồ đó ngày nay chỉ là một phiến muối khổng lồ.
Trong hầu hết lịch sử nước Anh, những người sống ở đây không hề biết đến phiến đá muối - halit như được biết đến về mặt kỹ thuật - nhưng họ không cần nhiều lắm: có những suối nước muối nơi nước mặn chảy ra tự nhiên từ lòng đất. Celtic và sau đó là La Mã các khu định cư được xây dựng xung quanh những con suối này ở Middlewich và Northwich, Nantwich và Leftwich. Theo thời gian, hậu tố -wich trong tên của một thị trấn có nghĩa là làm nghề muối.
Vào thế kỷ 17, những nguồn suối nước muối tự nhiên đó đã bị thay thế bởi những nguồn thay thế nhân tạo: những mũi khoan và đường ống thô sơ, hình thành nên các mỏ dung dịch ngày nay. Một lần nữa, nước Anh lại đến bữa tiệc tương đối muộn; Các nhà sản xuất muối Trung Quốc đã sử dụng những kỹ thuật như vậy trong nhiều thiên niên kỷ, sử dụng máy khoan đập để khai thác nước muối.
Nhưng những gì xảy ra sau đó là một trong những câu chuyện bùng nổ-vỡ phá phi thường nhất trong lịch sử. Các khu rừng địa phương bị chặt bỏ để lấy gỗ làm nhiên liệu cho các chảo trong đó dung dịch muối đã bốc hơi. Máy bơm hơi nước được giới thiệu để tối đa hóa việc chiết xuất nước muối. Các mỏ được đào để lấy muối thô. Trong khoảng một thế kỷ, nước Anh đã từ chỗ phải phụ thuộc vào nhập khẩu từ Pháp và Đức trở thành một trong những nước xuất khẩu muối lớn nhất thế giới. Các kênh đào được xây dựng để nối các xưởng muối ở Cheshire với sông Mersey, từ đó nối nó với cảng Liverpool.
Theo thời gian, Liverpool, cùng với Bristol, sẽ trở thành một trong những cảng quan trọng trong hoạt động buôn bán nô lệ, hoạt động buôn bán tam giác đáng xấu hổ đó đã đưa hàng hóa đến Châu Phi, nô lệ đến Châu Mỹ và thuốc lá và đường về Anh. Nhưng nó cũng phụ thuộc vào một hoạt động thương mại tam giác khác: giữa Cheshire, Liverpool và các mỏ than Lancashire cung cấp nhiên liệu cho các lò

nung ở xưởng muối. Những con tàu rời Liverpool đầy muối để tới Ireland, tới Rotterdam và vùng Baltic, rồi trở về với sắt, gỗ, cây gai dầu và lanh. Họ vận chuyển muối theo tấn tới Phổ, tới Hà Lan, tới Canada và Nga. Thế giới ngày càng nghiện muối Cheshire hay nó thường được gắn nhãn hiệu là 'Muối Liverpool'. [1]

Chính loại muối này mà người Anh đã cố gắng cung cấp cho người Ấn Độ cho đến satyagraha của Gandhi, loại muối này mà nước Anh đã sẽ bán cho các thuộc địa và lãnh địa của mình cho đến khi họ tuyên bố độc lập và tạo ra ngành muối của riêng mình. Thương hiệu Anh chiếm ưu thế đến nỗi trong một thời gian không ai chấp nhận bất kỳ loại muối nào khác. Khi muối được phát hiện tại Hồ Onondaga ở Syracuse, New York, các nhà sản xuất địa phương đã sớm đổi tên khu định cư nơi nó được sản xuất (một ngôi làng có tên là 'Little Ireland') Liverpool để họ có thể bán sản phẩm của Mỹ này với tên gọi Muối Liverpool.

Trong một thời gian, muối được coi là một trong những biểu tượng địa vị vĩ đại của nước Anh. Vào mùa hè năm 1844, Sa hoàng Nicholas I của Nga đến Anh trong chuyến thăm cấp nhà nước, sau các buổi chiêu đãi tại Lâu đài Windsor và Cung điện Buckingham, ông được đưa đến mỏ muối Old Marston ở Cheshire, nơi ông và đoàn tùy tùng được hạ xuống 150 mét. bí mật. Tại đây, trong hầm mộ hình vòm bằng muối, có những cột và tường mờ màu nâu hồng được thắp sáng bởi 4.000 ngọn nến, Hiệp hội Hoàng gia đã tổ chức một bữa tiệc xa hoa chiêu đãi hoàng đế Nga. Toàn bộ khái niệm này nghe có vẻ hơi kỳ quặc đối với những người hiện đại, nhưng một lần nữa, nó không quá khác biệt so với việc các quan chức nước ngoài đến thăm các nhà máy bán dẫn của Đài Loan để tận mắt chứng kiến chuỗi cung ứng mà đất nước họ phụ thuộc vào. Năng lượng muối chỉ là một trong nhiều đòn bẩy kinh tế được Anh sử dụng để phát huy sự thống trị đế quốc của mình. [2]

Khi ngành công nghiệp này bùng nổ, không khí ở vùng đất vốn thanh bình cho đến nay của nước Anh này trở nên dày đặc khói độc từ các xưởng muối. Để tăng thêm khía cạnh ma quái, những cái hố lớn bắt đầu mở ra trên mặt đất. Những con đường và tòa nhà xung quanh các thị trấn -wich đột nhiên bị nuốt chửng bởi những hố sụt khổng lồ, nhanh chóng chứa đầy nước mặn.

Nguyên nhân hóa ra là cùng với các công ty hoạt động trên thị trường mở, hàng trăm thợ mỏ chợ đen không chính thức đã bị lôi kéo vào khu vực, nơi họ bí mật bơm nước muối ra khỏi lòng đất. Cũng giống như cách 'thợ mỏ thủ công' ở Cộng hòa Dân chủ Congo ngày nay lẻn vào các hố và đào coban, ở Cheshire thế kỷ 19, hàng trăm, có lẽ hàng nghìn người đã tự khoan lỗ riêng của mình để bơm nước muối.
Hóa ra, việc bơm nước muối 'hoang dã' hay 'khốn nạn' này đã làm xói mòn các khoảng trống trong phiến đá muối nằm dưới quận, dẫn đến các vùng sụt lún. Tệ hơn nữa, các hang động ở một số mỏ muối ban đầu có quá ít cột trụ để giữ mái nhà, khiến các vụ sập tiếp tục xảy ra. Người dân địa phương đã thể hiện khả năng phục hồi đáng kể khi đối mặt với những tình tiết này. Vào năm 1850, khi một quán rượu tên là Townshend Arms, được người dân địa phương gọi là 'The Witch and Devil', bắt đầu chìm xuống lòng đất, chủ nhà chỉ cần di chuyển quán bar lên một tầng cầu thang. Quán rượu cuối cùng đã biến mất dưới lòng đất vào năm 1915. [3]
Trong nỗ lực xây dựng những tòa nhà có thể chịu được sự biến mất đột ngột của nền móng, những ngôi nhà mới đã được xây dựng bằng khung gỗ, giống như thời Trung cổ. Chúng được trang bị các điểm kích để có thể nâng lên hoặc di chuyển hoàn toàn đến một vị trí khác nếu mặt đất bên dưới chúng bị sập. Những cây cầu mới sử dụng phao nổi vì đất được coi là nền móng kém tin cậy hơn nước.
Sự bùng nổ muối ở Cheshire nhanh chóng đi đến hồi kết bi thảm. Điều luôn xảy ra khi nguồn cung của một mặt hàng tăng theo cấp số nhân, giá muối sau đó sẽ giảm theo cấp số nhân. Năm 1888, trong một nỗ lực tuyệt vọng nhằm ngăn chặn tình trạng trượt dốc, các nhà sản xuất muối ở Cheshire đã hợp tác với nhau và thành lập Salt Union, một tập đoàn có thể thỏa thuận về giá cả và mức sản xuất. Tạp chí *Economist* đã ca ngợi:
Tất nhiên, chúng tôi không phủ nhận quyền kết hợp của các chủ sở hữu muối nếu họ thấy phù hợp. Theo ý kiến của chúng tôi, họ đang sử dụng sai phương thuốc. Giải pháp tự nhiên cho sự cạnh tranh gay gắt thường xảy ra trong buôn bán muối là loại bỏ dần những nhà sản xuất yếu nhất. Chúng tôi chắc chắn rằng bất kỳ biện pháp khắc phục nào khác đều được định trước cho sự thất bại cuối cùng. Tuy nhiên, nếu Syndicate tin khác, hãy để họ thử thử nghiệm. [4]

Cuộc thử nghiệm đã không thành công. Trong những năm sau đó sản lượng muối giảm mạnh; ngành công nghiệp sụp đổ, các nhà máy được hợp nhất và sau đó đóng cửa. Hầu hết các mỏ đá muối cũ đã bị lũ lụt cuốn trôi. Những ống khói tỏa ra khói đen đã biến mất và những nhà kho lộ thiên duy nhất còn lại là một phần của bảo tàng địa phương. Các mỏ giải pháp như mỏ Muối của Anh, khoét các hang động một cách cẩn thận để không tạo ra những hố sụt giống như những giếng nước muối 'khốn nạn' đã làm trong các thế kỷ trước, kín đáo đến mức bạn phải chật vật mới phát hiện ra chúng.

Muối ở trung tâm của thế giới hiện đại

Khi bạn đi qua bối cảnh hậu công nghiệp này, bạn có thể có ấn tượng rằng ngành công nghiệp này đã biến mất hoàn toàn. Nhưng đừng để bị lừa. Vì hóa ra Cheshire ngày nay sản xuất nhiều muối hơn - nhiều hơn - so với thời kỳ đỉnh cao tương đối vào cuối thế kỷ 19: khoảng từ 2 triệu đến 4 triệu tấn mỗi năm. Sự khác biệt duy nhất là ngày nay không ai làm ầm ĩ về nó, và ngày nay bạn không thể nhìn thấy nhiều bằng chứng về nó trên bề mặt, ngoại trừ một chút bê tông và đường ống.

Tất cả số muối đó đi đâu? Hóa ra thứ bạn rắc lên khoai tây chiên chỉ là bước khởi đầu, vì điều khiến natri clorua trở thành một phần quan trọng của Thế giới Vật chất và củng cố vị trí của nó cùng với năm vật liệu còn lại trong cuốn sách này là muối ngày nay là nền tảng cho mọi thứ. hóa chất và dược phẩm ngành công nghiệp. Trong khi một phần nước muối được bơm ra từ dưới lòng đất ở Cheshire được biến thành muối ăn, phần lớn được dẫn đến các nhà máy nơi nó được biến thành những sản phẩm giúp chúng ta tồn tại theo đúng nghĩa đen.

Điều này đưa chúng ta đến quá trình chloralkali. Đừng lo lắng nếu bạn chưa từng nghe đến nó; ngay cả những người thực hiện quy trình chloralkali cũng không nói nhiều về nó. Hầu hết những người làm việc trong lĩnh vực hóa chất, giống như nhiều người trong Thế giới Vật chất, đều rất kín tiếng. Như một trong số họ đã nói: 'điều đầu tiên bạn học được trong lĩnh vực kinh doanh này là đừng bao *giờ* nói chuyện với báo chí. Nếu bạn nói chuyện với báo chí thì đó thường là vì một trường hợp khẩn cấp hoặc một thảm họa." Một hậu quả là hầu như

không ai từng nghe nói đến quy trình chloralkali, điều này thật đáng tiếc vì đây là một trong những thành tựu công nghiệp quan trọng nhất của thời đại hiện đại.
Đây là cách nó hoạt động. Nước muối được bơm ra khỏi các cánh đồng ở Cheshire và dẫn đến một nhà máy ở Runcorn, nơi từng là một phần của Imperial Chemical Industries (ICI) nhưng ngày nay thuộc sở hữu của một công ty khác, Inovyn, một phần của Ineos. Ở đó, bên bờ kênh Manchester Ship, nước muối được dẫn vào một căn phòng chứa hàng trăm tế bào điện phân, nơi dòng điện mạnh chạy qua nó. Quy mô sức mạnh bạn cần cho một hoạt động như thế này thật đáng kinh ngạc. Phòng đơn gồm các tế bào điện phân này tiêu thụ nhiều điện hơn cả thành phố Liverpool. Nó cũng tạo ra một từ trường khổng lồ đến mức bất kỳ ai có máy điều hòa nhịp tim đều không được phép đến gần tòa nhà.
Tuy nhiên điều buồn cười về năng lượng điện từ là cơ thể con người không thể cảm nhận được nó. Tôi đứng đó giữa căn phòng giam bụi bặm ở Runcorn, tiếp xúc với từ trường mạnh nhất ở bất kỳ đâu trên đất nước, nhưng tôi cảm thấy… chẳng có gì. Ngay bên cạnh tôi, phía sau màn hình Perspex mỏng manh, dòng điện này đang xé toạc nước muối, từng nguyên tử một. Có một tiếng vo ve nhỏ và âm thanh của chất lỏng chảy ra từ một điện cực có một hỗn hợp màu vàng chứa khí clo và một ít nước muối; trong số đó có khí hydro và natri hydroxit, hay còn gọi là xút. Những chất này, nghe có vẻ buồn tẻ, là một trong những chất hóa học quan trọng nhất trong thế giới hiện đại.
Caustic soda là một trong những chất không ai dành nhiều thời gian để suy ngẫm, nhưng nếu không có nó thì nền văn minh sẽ ngừng hoạt động. Nó được sử dụng trong vô số quy trình công nghiệp, bao gồm cả sản xuất giấy và nhôm, nhưng có lẽ quan trọng nhất, nó là thứ chúng ta sử dụng để sản xuất xà phòng và chất tẩy rửa.
Mặt khác, clo là một trong những hóa chất vừa cứu mạng vừa đe dọa tính mạng ở mức độ tương đương nhau. Khí clo là một trong những loại vũ khí hóa học tồi tệ nhất được loài người phát hiện, được quân đội Đức triển khai khét tiếng nhất tại Ypres vào năm 1915, nhưng được sử dụng gần đây nhất là vào năm 2014 ở Syria. Nó là một thành phần quan trọng trong quá trình sản xuất polyvinyl clorua (PVC), một loại nhựa khó chịu mà loài người đã sản xuất khá nhiều trong hơn

một thế kỷ qua. Quả thực, có giả thuyết cho rằng một phần lý do khiến chúng tôi tạo ra nhiều thứ như vậy là vì đó là một cách hữu ích để hấp thụ lượng clo dư thừa được tạo ra bởi quá trình chloralkali (xút ăn da là sản phẩm hữu ích hơn một chút). Mặt khác, clo giúp làm sạch nước chúng ta uống. Nó cũng đại diện cho nền tảng hóa học cho toàn bộ nhóm thuốc - bao gồm thuốc an thần như Librium, thuốc chống trầm cảm như Valium, thuốc kháng sinh như vancomycin, dùng để tiêu diệt vi khuẩn Staphylococcus *và* thuốc chống sốt rét như chloroquine. Nhờ những sản phẩm này, thành quả của quá trình chloralkali, chúng ta có thể mong đợi có được nước uống sạch và điều kiện sống sạch sẽ. Người ta vẫn dễ dàng quên đi cuộc cách mạng đó diễn ra như thế nào vào cuối thế kỷ 19 và đầu thế kỷ 20, xà phòng và chất tẩy rửa từ những sản phẩm thủ công đắt tiền trở thành những sản phẩm được sản xuất hàng loạt. Sự sẵn có của xà phòng và các thiết bị vệ sinh giá rẻ được cho là đã giúp tăng tuổi thọ hơn bất kỳ sự đổi mới nào khác trong vài thế kỷ qua. Và cốt lõi của cuộc cách mạng này chính là muối. Nó vẫn là nền tảng cho đến ngày nay. Khi được hỏi điều gì tạo nên cơ sở hạ tầng quan trọng ở nước họ, hầu hết mọi người có thể đề cập đến các nhà máy điện hạt nhân và căn cứ quân sự. Rất ít người chọn những phòng giam như thế này, nhưng chúng được cho là cũng quan trọng không kém. Cơ sở ở Runcorn cung cấp khoảng 98% lượng clo cho nước Anh, sau đó được sử dụng để lọc nước máy. Khi chúng tôi nhìn chằm chằm vào bể chứa clo được trộn với xút để tạo ra hypochlorite – hợp chất đi vào hệ thống lọc nước và thuốc tẩy – một công nhân thì thầm: 'Nếu nơi này bất ngờ sập thì trong vòng bảy ngày đất nước này sẽ phải hạn chế uống nước. Nước.' Tuy nhiên, thậm chí rất ít người biết đến sự tồn tại của nút bị lãng quên này của Thế giới Vật chất. Và điều đó rất phù hợp với họ ở đây.

Nhân tiện, quá trình chloralkali chỉ là bước khởi đầu. Hãy xem xét câu chuyện về tro soda, loại hóa chất được sử dụng làm chất trợ chảy trong sản xuất thủy tinh kể từ buổi bình minh của nền văn minh. Chất kiềm đặc biệt này có thể giúp giảm nhiệt độ nóng chảy của cát silic khi thêm vào lò nung. Khi trộn với dầu và chất béo, nó có thể tạo ra xà phòng và nó cũng là công cụ sản xuất giấy. Bạn sẽ hiếm khi có một ngày nào trong đời mà không chạm vào thứ gì đó tồn tại nhờ tro soda.

Tuy nhiên, cho đến cuộc cách mạng công nghiệp, nó vẫn là một loại vật liệu quý hiếm, khó xác định và tinh chế. Bạn có thể cố gắng lấy một ít natron hoặc bạn có thể đốt một ít tảo bẹ, rong biển hoặc một số loại rong biển khác, nhưng những gì thu được từ những bài tập như vậy hiếm khi rất tinh khiết. Hơn nữa, các quá trình này rất kém hiệu quả và nỗ lực hết mình khi thế giới bắt đầu công nghiệp hóa, nó nhanh chóng thiếu tro soda. Đến thế kỷ 18, mọi người đều biết rằng *về mặt lý thuyết*, bạn có thể làm nó từ muối, nhưng bằng cách nào? Năm 1783, vua Louis XVI của Pháp đã trao giải thưởng tiền mặt cho ai có thể đưa ra câu trả lời.

Người cuối cùng đã giải được câu đố này là một bác sĩ người Pháp tên là Nicolas Leblanc, người đã nghĩ ra một ca phẫu thuật gồm hai giai đoạn bao gồm cho muối phản ứng với axit sulfuric, nấu nó với than và đá vôi, sau đó ngâm tro đen thu được. Mặc dù đã xây dựng một nhà máy để thực hiện quá trình này vào năm 1791 nhưng Leblanc chưa bao giờ nhận được giải thưởng vì phát hiện của ông trùng hợp với Cách mạng Pháp và nhà vua đang bỏ trốn. Điều tồi tệ hơn đã đến với Leblanc: nhà máy của ông đã bị những người cách mạng tịch thu, những người này đã nhanh chóng bán nó đi và công khai phương pháp của ông. Leblanc tự sát vào năm 1806.

Tuy nhiên, theo một cách nào đó, đây là nơi bắt đầu của ngành công nghiệp hóa chất hiện đại, trong những nhà máy Leblanc với những ống khói khổng lồ, ngấu nghiến một lượng lớn muối và than và thải ra khói đen độc hại lên bầu trời. Chúng không phải là những thứ đẹp đẽ, nhưng chắc chắn chúng đã thay đổi thế giới ở một số khía cạnh. Cuối cùng chất kiềm này có thể được sản xuất với số lượng lớn cần thiết để đáp ứng nhu cầu của thế giới công nghiệp hóa. Với tro soda nguyên chất, cuối cùng chúng tôi có thể sản xuất thủy tinh với độ chính xác mà các nhà khoa học như Otto Schott yêu cầu. Việc phát hiện ra quy trình Solvay, một phương pháp có câu chuyện về nguồn gốc ở Bỉ kém thú vị và ít bi thảm hơn so với quy trình của Leblanc, đã cung cấp một phương pháp sạch hơn để biến muối (trong trường hợp này là nước muối) thành kiềm. Ngày nay, chúng ta vẫn dựa vào quy trình Solvay để biến muối thành tro soda, sau đó được sử dụng rộng rãi trong thế giới công nghiệp.

Tại thị trấn Northwich của Cheshire, không xa nơi nước muối chảy ra từ lòng đất, bạn sẽ tìm thấy một phần khác của cộng đồng muối hải ngoại này, một địa điểm ICI cũ do Tata Chemicals điều hành ngày nay, cũng sở hữu British Salt. Việc loại muối Cheshire từng mang lại cho Gandhi nguyên nhân tạo nên satyagraha mang tính biểu tượng của ông hiện đang được sản xuất bởi một công ty Ấn Độ là một trong những điều trớ trêu ít được đánh giá cao bên ngoài Thế giới Vật chất. Northwich ngày nay là một địa điểm yên tĩnh kỳ lạ. Nhà máy rộng lớn vẫn hoạt động ồn ào, bơm tro soda và natri bicarbonate từ những cỗ máy sắt khổng lồ, một số trong đó đã có từ những năm 1930. Một phần bicarb được dùng làm bột nở nhưng ngày nay nó còn có một ứng dụng y tế quan trọng khác, đó là nền tảng hóa học cho quá trình lọc thận. Không phải ai ở đây cũng chú ý nhiều đến nhà máy này. Thay vào đó, khách du lịch đổ xô đến nhà bên cạnh để xem Anderton Boat Lift nổi tiếng, một thang máy lộng lẫy dài 50 feet kiểu Victoria và cố gắng hết sức để đóng khung khu công nghiệp xấu xí làm nền cho các bức ảnh của họ. River Weaver, nơi các thương nhân từng vận chuyển muối để xuất khẩu, giờ đây chủ yếu được di chuyển bằng thuyền hẹp trên các chuyến du ngoạn trên biển mà ít ai biết rằng họ đang đi ngang qua một địa điểm nơi muối vẫn đang được biến thành chất giúp cứu sống.

Muối và sức khỏe: chúng đồng nghĩa với người La Mã, người đã đặt tên cho nữ thần sức khỏe của họ là Salus, và nó vẫn còn tồn tại cho đến ngày nay. Việc các ngành công nghiệp công nghệ sinh học và hóa học rất hiện đại có thể vẫn phụ thuộc vào cùng loại chất mà những người định cư thời đồ đá mới đã sản xuất hàng ngàn năm trước trên các vách đá ở Boulby có vẻ hơi kỳ quái, nhưng ngày nay nó vẫn tồn tại trong địa lý công nghiệp của chúng ta. Nhìn vào bản đồ các công ty dược phẩm và hóa chất trên thế giới, bạn sẽ thấy rằng chúng ta vẫn đang đi theo những con đường muối cổ xưa. Ở Anh, những công ty hóa chất và dược phẩm này vẫn nằm cạnh muối: một số nằm trên tấm halit ở Cheshire, một số khác ở Teesside, nơi chúng ta từng khai thác muối. Không phải tự nhiên mà gã khổng lồ hóa chất Dow của Mỹ có trụ sở chính ở Michigan, phía trên những khối đá muối sâu nằm bên dưới Detroit. Khi các xe tải đến và đi chở hóa chất

và dược phẩm, về cơ bản họ đang tìm lại những tuyến đường muối cổ xưa giống như tổ tiên của chúng ta.
Cuộc cách mạng hóa chất có lẽ là khía cạnh bị bỏ qua nhiều nhất của cuộc cách mạng công nghiệp, tuy nhiên sự phát triển của các sản phẩm hóa chất được cho là đã thay đổi nhiều cuộc sống hơn, chẳng hạn như việc sản xuất hàng loạt thép. Nó chắc chắn đã cứu được nhiều mạng sống hơn, lọc sạch nguồn nước và làm sạch nhà cửa của chúng ta, cứu chúng ta khỏi vi khuẩn và vi trùng từ rất lâu trước khi chúng ta hiểu được bản chất của các mối đe dọa của chúng. Tuy nhiên, trong khi tôn vinh những người tiên phong trong lĩnh vực sản xuất thép và năng lượng hơi nước, chúng ta hầu như đã quên mất những gã khổng lồ đầu tiên của ngành hóa học công nghiệp, như Leblanc hay Ernest Solvay. Mặc dù có rất nhiều viện bảo tàng tôn vinh việc sản xuất và khai thác sắt, nhưng chúng ta đã quét sạch hầu hết di sản hóa học của mình.
Ví dụ, Glasgow từng là nhà sản xuất hóa chất lớn nhất thế giới, cung cấp một lượng lớn muối và than cho các nhà máy Leblanc khổng lồ trải rộng khắp nhiều mẫu đất của thành phố. Nó có hai ống khói cao nhất thế giới tại Port Dundas và St Rollox. Ngày nay, không chỉ những ống khói không còn đứng vững mà mọi ký ức về thời kỳ này đều bị xóa khỏi cảnh quan đô thị. Tất cả những gì còn sót lại ở nơi từng là những ống khói đó là lối đi bê tông, cầu vượt đường cao tốc và những khối nhà cao tầng bị cấm. Ngay cả tấm bảng từng đánh dấu vị trí trên một đường hầm đầy bụi bẩn, nơi từng là công trình hóa chất cũng đã biến mất.
Có lẽ việc xóa bỏ lịch sử này sẽ dễ dàng hơn bởi bên cạnh những thành tựu của ngành hóa chất còn có một câu chuyện bẩn thỉu, đáng xấu hổ hơn. Lý do cho những ống khói cao ở Glasgow là để bơm khói lưu huỳnh độc hại từ quá trình Leblanc vào tầng bình lưu. Các tế bào chloralkali đầu tiên sử dụng thủy ngân và tạo ra chất thải độc hại, đôi khi được đổ vào các hồ và sông địa phương, nơi nó đầu độc động vật hoang dã.
Trên khắp thế giới, có rất ít địa điểm khai thác muối có thể đừng mang những vết sẹo như vậy. Trong nhiều thập kỷ, các công ty hóa chất đã đổ chất thải thủy ngân xuống hồ Onondaga gần Syracuse, New York, làm ô nhiễm nhiều vùng nước. Ở Cheshire, cảnh quan không chỉ đầy

rẫy những hố sụt cũ ngập nước, được người dân địa phương gọi là 'tia chớp', mà các công ty hóa chất địa phương còn sử dụng nhiều hố này làm bãi chứa, đổ tro soda, vôi và các chất thải độc hại khác vào đó. Thật khó để chiêm ngưỡng những điều kỳ diệu của clo mà không nhận ra sự khủng khiếp của nó, chẳng hạn như việc sử dụng nó làm vũ khí hóa học. Ở đây, cũng như ở nhiều nơi khác của Thế giới Vật chất, có những mặt tối của tiến bộ công nghệ.
Nhưng giữa những vết sẹo cũng có những khoảnh khắc hồi phục đầy trêu ngươi. Cuối cùng, sau nhiều năm nỗ lực, năm 2019 hồ Onondaga đã được tuyên bố là sạch sẽ. Các công trình hóa chất ngày nay ít gây ô nhiễm hơn nhiều so với tổ tiên của chúng. Điện phân thủy ngân hiện đã bị cấm ở hầu hết các nền kinh tế phát triển và trong tương lai chúng ta thậm chí có thể sử dụng hydro mà nó tạo ra – từ lâu được coi là chất thải từ quá trình chloralkali – làm nhiên liệu xanh.
Ngày nay, không còn ngột ngạt vì khói bụi như thời hoàng kim thời Victoria, bầu trời phía trên Cheshire rất trong lành nếu không muốn nói là trong xanh. Cảnh quan nơi đây có nhiều cây cối rậm rạp và đời sống hoang dã phong phú hơn so với nhiều thập kỷ trước. Và những tia sáng từng bị bao phủ bởi chất thải hóa học đã biến thành những cảnh quan hoang sơ, kỳ lạ. Từ vùng đất xanh xao, ô uế đó, những bụi cây kỳ lạ bắt đầu xuất hiện; các khoáng chất xa lạ đã biến đổi hoàn toàn môi trường sống.
Những bãi chứa hóa chất cũ này đã trở thành địa điểm độc đáo được khoa học quan tâm. Xung quanh Neumann's Flash có những loài thực vật ven biển mọc trong vùng nước mặn giữa các loài chim hoang dã và chim lội nước. Rung rinh xung quanh Ashton's Flash là loài bướm đội trưởng bẩn thỉu quý hiếm và loài bướm đêm sáu vành đai. Thiên nhiên đã lãng phí rất ít thời gian để đòi lại cảnh quan mà chúng ta từng cố gắng hủy hoại.

Đi sâu vào muối

Người gần nhất có thể nhìn thấy bên trong một trong những mỏ dung dịch này, những khoảng trống khổng lồ dưới bề mặt trái đất, là đến thăm một mỏ muối thực tế. Mỏ Winsford, ngay gần British Salt ở Middlewich, là mỏ cuối cùng như vậy ở Cheshire. Được khai trương vào năm 1844 - cùng năm Sa hoàng Nicholas I đến thăm khu vực này

- hiện nay nó là mỏ hoạt động lâu nhất ở Anh. Ngày nay, nó thuộc sở hữu của một công ty mẹ của Mỹ, Compass Minerals, và không mở cửa cho công chúng tham quan. Nhưng sau một hồi thuyết phục, giám đốc thương mại, Chris Heywood, đã đồng ý cho tôi tham gia. Chúng tôi lái xe xuống những đường hầm rộng lớn như một con đường đôi, trần nhà cao như một nhà thờ. Cảm giác giống như đi qua đường hầm Mont Blanc, giá mà đường hầm Mont Blanc là một phòng tập thể dục trống trải, thoáng mát, không ánh sáng. Có một mùi quen thuộc từ mỏ ở Lochaline: khói diesel đọng lại trong không gian kín. Nhưng còn có một thứ khác: những hạt muối mịn lơ lửng trong không khí bám vào da và làm khô môi và miệng tôi. Cảm giác đó không hoàn toàn khó chịu: một chút vị đắng trong miệng và một cảm giác cay nhẹ ở mắt. Trong các spa chăm sóc sức khỏe ngày nay, đôi khi bạn có phòng muối, nhằm mục đích mô phỏng tác dụng làm sạch. “Ngoại trừ,” Chris nói, “có lẽ họ sử dụng một thìa cà phê muối trong không khí. Không có gì giống như ở nơi này.'

Xa hơn nữa, chúng tôi đã đi vào ma trận đường hầm. Trên bản đồ Winsford không quá khác biệt so với mỏ cát ở Lochaline. Cả hai đều sử dụng phương pháp được gọi là phương pháp 'phòng và cột': những cột cát hoặc muối được đặt tại chỗ để giữ trần của mỗi 'căn phòng'. Ngoại trừ việc ở đây quy mô rất lớn và trong khi các đường hầm dưới Lochaline có cảm giác có phần hữu cơ, như thể một con chuột chũi khổng lồ đã chui vào đá, thì các bức tường và mái nhà ở Winsford lại vuông góc một cách đáng kinh ngạc, giống như trong máy tính. trò *chơiMinecraft* . Khi chúng tôi lái xe, tôi phát hiện ra những con hẻm nơi những chiếc xe tải và máy móc trông cổ kính đang đậu, phủ đầy bụi muối.

Chris nói: “Đó là nơi chúng tôi vứt bỏ tất cả các thiết bị cũ. 'Một khi nó rơi xuống, nó sẽ không bao giờ thoát ra được. Bao gồm cả chúng tôi nếu tôi không tìm được đường ra. Bây giờ,” anh ấy nói thêm khi dừng xe, “để tôi chỉ cho bạn mái nhà.”

Chúng tôi bước ra ngoài và anh ấy chĩa đèn pin lên trần nhà. Thoạt nhìn, bề mặt không có gì đáng chú ý – hoàn toàn bằng phẳng, chỉ có những đường gờ nhỏ bị máy móc cắt đi – nhưng sau đó dưới ánh đèn pin, nó lộ ra một hoa văn đẹp đẽ như đá cẩm thạch, màu nâu

hồng với những đường gân trắng chạy xuyên qua. Đột nhiên tôi nhận ra mình đã từng thấy điều này trước đây.
Khi đến thăm Quần đảo Balearic của Địa Trung Hải để xem cách họ tạo ra muối biển, dẫn thủy triều vào các ao nội địa để mặt trời làm bốc hơi, tôi đã nhận thấy ở rìa nước muối có các hình lục giác hình thành ở vùng nước nông: muối trắng - những hồ nước đầy nước màu hồng. Bây giờ ở dưới lòng đất, khi nhìn lên trần nhà, tôi có thể thấy hiện tượng tương tự ở dạng hóa thạch: các mạch muối hình lục giác bao quanh muối đá màu hồng ở giữa - hình ảnh phản chiếu của những gì tôi nhìn thấy trên bề mặt, được chụp trong đá. Ở đây, như thể được chiếu lên trần nhà, là dấu vết của các hồ hình thành cách đây 200 triệu năm khi nước mặn tích tụ khắp khu vực ngày nay là Cheshire. Nó sâu sắc đến không ngờ, đẹp đẽ đến không ngờ.
Chris đánh thức tôi khỏi cơn mơ mộng: 'Nào, xuống vực thẳm.'
Một vài năm trước, Compass nhận ra rằng nếu muốn có thêm muối thì họ phải đào sâu hơn nữa, nên hiện tại họ đang khai thác ở độ sâu 400 mét. Chúng tôi lái xe sâu hơn vào bóng tối cho đến khi chạm tới đáy, rẽ vào một góc cua và thấy mình đang ở đầu mỏ. Ở đây, một giàn khai thác khổng lồ liên tục, một con quái vật màu cam to lớn với những chiếc răng cacbua vonfram, đang gặm nhấm muối với độ chính xác cao đến mức nó để lại bề mặt hình khối vuông vắn. Thật phù hợp, vì có cảm giác như chúng tôi đang ở trong một phiên chơi *Minecraft* , người đàn ông đằng sau giàn khoan đang điều khiển con quái vật nặng 200 tấn bằng thứ mà Chris gọi là 'bộ điều khiển PlayStation được tôn vinh'. Anh ta dùng ngón tay cái đẩy cần điều khiển và nó lao về phía trước vào mặt đá, phun những khối muối vào băng chuyền, khiến nó văng ngược về phía trục mỏ.
Chris nhặt một cục muối rơi trên sàn và đưa cho tôi. Nó có màu hồng ở tâm và màu nâu ở rìa. Tôi chiếu ngọn đuốc của mình qua muối và nó lấp lánh như một viên đá quý chưa được đánh bóng.
“Nó giống như muối hồng Himalaya,” tôi kêu lên.
Chris cười lớn. “Giống muối Cheshire màu nâu hơn,” anh nói.
Phần lớn muối Cheshire màu nâu được nghiền thành các hạt nhỏ và được vận chuyển khắp đất nước, nơi nó sẽ được sử dụng để rải đường trong những tháng tiếp theo. Việc mài đường có vẻ không phải là hoạt động phức tạp nhất nhưng nó phức tạp hơn nhiều so với

những gì bạn tưởng. Có nhiều loại muối có kích thước khác nhau (10 mm và 6 mm) dành cho các loại đường khác nhau và tỷ lệ rải muối được mài mịn tùy thuộc vào điều kiện thời tiết và sự hiện diện của tuyết.
Chris nói: “Thứ giữ cho đường đi được an toàn không phải là muối mà là nước muối. Vì vậy, bạn cần muối để hòa tan và sau đó bạn sẽ có được tác dụng làm tan băng ngay lập tức. Nếu bạn đang đi trên đường có mật độ giao thông đông đúc [các hạt] sẽ vỡ ra nhanh hơn và bạn phải ra ngoài bôi lại chúng.'
Ở Anh, nơi nhiều năm có thể trôi qua giữa các trận bão tuyết nghiêm trọng trên toàn quốc, rất ít người quan tâm nhiều đến muối đường cho đến khi xảy ra cơn sốt hàng thập kỷ một lần khi chúng ta có nguy cơ hết muối. Bất kỳ sự thiếu hụt nào đều có thể khiến đất nước nhanh chóng rơi vào tình trạng hoảng loạn toàn quốc. Lần cuối cùng điều đó xảy ra, chỉ hơn một thập kỷ trước, chính phủ đã ban hành hướng dẫn khẩn cấp về việc phân phối muối đường và ra lệnh cho các mỏ như Winsford gửi nó đến các vùng cụ thể của đất nước. Nước này đã nhập khẩu nửa triệu tấn muối từ nước ngoài đề phòng trường hợp thiếu hụt trong tương lai. Đây là 'phương sách cuối cùng' của Anh.
Lúc đầu tôi nghĩ Chris tỏ ra ngơ ngác khi dùng cụm từ này, nhưng anh ấy hoàn toàn chân thành. Trong mười năm, muối dường như đã chất thành đống trên các bến cảng của Anh để chờ trận bão tuyết mùa đông tiếp theo.
Khi bắt đầu quay trở lại hầm mỏ, chúng tôi đi qua những hành lang cũ và những căn phòng giờ được dành riêng cho kho chứa chuyên dụng. Ngày nay, có những tác phẩm nghệ thuật vô giá được cất giữ trong những căn phòng khai thác này, cùng với những hồ sơ cổ xưa của chính phủ đã vượt xa kho lưu trữ của họ. Một nơi khác trong số các khu vực này là nơi lưu trữ chất thải độc hại một cách an toàn. Một dự án đang được tiến hành nhằm khắc phần lớn kiến thức quan trọng nhất của thế giới lên các tấm đá và gửi chúng vào mỏ muối Hallein ở Áo, cùng với hài cốt của những người thợ mỏ Celtic cổ đại.
Chính những hang muối tương tự này là nơi phần lớn khí đốt khẩn cấp của châu Âu đã được bơm sau khi Nga xâm chiếm Ukraine vào năm 2022, để lưu trữ ở đó như một loại ngân hàng năng lượng giúp lục địa này vượt qua mùa đông mà không cần khí đốt từ Siberia. Bộ

Năng lượng Hoa Kỳ có Kho Dự trữ Dầu khí Chiến lược, nơi lưu giữ dầu thô trong các kho muối cũ dưới lòng đất ở Texas và Louisiana. Và những nơi như vậy đã sẵn sàng cho một tương lai mới, nơi chúng có thể được sử dụng để lưu trữ carbon dioxide thu được từ môi trường và cô lập dưới lòng đất để giảm lượng khí nhà kính trong khí quyển. Đây là những nơi chúng ta sẽ lưu giữ nhiên liệu xanh như hydro, được tạo ra từ năng lượng mặt trời và gió. Cũng giống như ngành công nghiệp hóa chất của thế giới, thường được xây dựng trên đỉnh halit theo đúng nghĩa đen, ngành công nghiệp năng lượng xanh của ngày mai sẽ tập trung xung quanh các mỏ muối. Chúng tôi tin tưởng vào muối.
Mặc dù nhiệt độ bên ngoài vẫn chưa xuống dưới mức đóng băng nhưng đã có nhiều cuộc gọi đến để mua thêm muối mỏ. Màu nâu Muối Cheshire đang được vận chuyển bằng xe tải khắp đất nước đến các kho chứa ở địa phương, sẵn sàng cho ngày băng giá tiếp theo, khi nó sẽ được rải trên đường. Những gì từng là một đại dương cổ đại đã được tái sử dụng thành các hạt có thể hòa tan và trôi xuống cống rãnh của chúng ta, để tiếp tục hành trình địa chất tiếp theo của chúng. Và khi họ làm vậy, ở phía bên kia thế giới, một loại muối rất khác đang được khai thác từ lòng đất. Những loại muối này sẽ không được biến thành dược phẩm hoặc cát để làm đường mà hoàn toàn trở thành một loại hóa chất khác. Đó là loại muối từng được đánh giá cao đến mức gây ra một trong những cuộc chiến tranh có hậu quả nặng nề nhất trong lịch sử.

6
Thuốc chữa cháy

ANTOFAGASTA, CHILE

Đứng trong bóng tối của những ngọn đồi cằn cỗi ở Atacama, bị nhìn ra bởi những căn lều đầy màu sắc của thị trấn tồi tàn, được bao quanh bởi những tòa nhà chọc trời và trung tâm mua sắm, nhà ga xe lửa cũ ở Antofagasta khó có thể trông lạc lõng hơn. Tập hợp các tòa nhà lớn theo phong cách thuộc địa của Anh này, được sơn màu xanh lá cây đẹp mắt và được nối ở giữa bằng cầu thang gỗ hùng vĩ, là một trong những thú vui bất ngờ của thành phố cảng trên bờ biển Thái Bình Dương của Nam Mỹ này.

Có một chuyến tàu cũ với các toa xe Pullman đậu dọc theo sân ga và cứ cách vài thước bạn lại tìm thấy một di tích khác từ quá khứ của đường sắt: một bộ cân bằng gang, một xe đẩy hành lý bằng gỗ cũ có tên viết tắt của công ty, một bản đồ tuyến đường tàu đã mờ . Đứng ở sân ga này, người ta dễ dàng quên rằng mình đang ở cách xa nước Anh thời Victoria hàng ngàn dặm và hàng chục năm. Tuy nhiên, nếu nán lại lâu, bạn có thể giật mình khi nghe tiếng còi của một đầu máy diesel hiện đại đi qua bãi trên đường ra cảng.

Đây, trụ sở chính của FCAB – Ferrocarril de Antofagasta a Bolivia – gần như là một phần của tuyến đường sắt đang hoạt động. Ngày nay đường sắt không chở hành khách và không ai trả nhiều tiền chú ý khi đoàn tàu đi qua thị trấn. Nhưng tuyến tàu này gần như chắc chắn đã đóng một vai trò nào đó - dù nhỏ - trong cuộc sống của bạn. Cứ sau vài giờ lại có một đầu máy xe lửa chở nguyên liệu thô – chủ yếu là đồng – từ trên núi xuống để vận chuyển đi khắp hành tinh.

Đây từng là tuyến đường sắt cao nhất thế giới, leo hàng nghìn mét từ mực nước biển qua những phong cảnh sa mạc cằn cỗi, băng qua những hồ muối lạnh giá rải rác với những chú hồng hạc cho đến tận dãy Andes. Nó đại diện cho một kỳ công phi thường về kỹ thuật trong những ngày đầu vận động. Ngày nay có những tuyến đường sắt chạy cao hơn, nhưng có bao nhiêu người có thể khẳng định mình đã gây ra

chiến tranh? Có bao nhiêu tuyến đường sắt có thể nói rằng họ đã thay đổi bản đồ thế giới một cách vĩnh viễn? [1]
Bạn thấy đấy, FCAB thực sự rất đặc biệt. Nhưng trước khi bắt đầu, hãy bắt đầu với lý do tại sao nó được xây dựng ngay từ đầu: để vận chuyển một loại hàng hóa cụ thể từ sa mạc đến cảng. Hàng hóa đó là muối tiêu, một loại muối có khả năng nổ theo cả hai nghĩa. Rắc lên cây sẽ làm cây mọc dày và nhanh. Tuy nhiên, điều quan trọng hơn nữa là, với tư cách là thành phần cơ bản của thuốc súng, muối tiêu còn là chìa khóa để giành chiến thắng trong các cuộc chiến tranh.

Một loại muối rất đặc biệt

Người Trung Quốc là những người đầu tiên phát hiện ra chất này, họ đã cạo một loại muối trắng thơm mà ngày nay chúng ta gọi là kali nitrat ra khỏi đá và gạch rồi đốt cháy, gây ra kết quả tàn khốc. Họ gọi muối *huo yao* - 'thuốc chữa cháy' - nhưng ở phương Tây nó được gọi là saltpetre - tiếng Latin có nghĩa là 'muối của đá' - vì nó thường được tìm thấy trên những bức tường đá dưới lòng đất trong các hầm và hầm mộ cũ. Trộn muối này với một phần nhỏ lưu huỳnh và bụi than và bạn sẽ có thuốc súng.
Nhưng vấn đề với diêm tiêu là trong hầu hết lịch sử, nó rất khó tìm thấy. Trong hàng trăm năm, nguồn chính là chất hữu cơ hôi hám, đáng chú ý nhất là thịt thối và nước tiểu. Trong một thời gian, các nhà lãnh đạo quân sự thời đó quan tâm nhiều đến những đống phân và những cơ sở tư nhân cũ kỹ, bị bỏ hoang. Những người đàn ông được cử đi khắp các vương quốc thời trung cổ để săn lùng những mảnh đất thối rữa. Sau khi đã xác định và nếm thử chất lượng của một miếng đất, họ sẽ đào lên vùng đất hôi hám, đun sôi, lọc và làm bay hơi để tạo ra những mảnh diêm tiêu quý giá.
Nếu bạn làm một công việc mà bạn không mấy hứng thú, bạn luôn có thể tự an ủi rằng bạn không phải là một trong những người nhặt phân – những người thợ săn như họ gọi ở Anh – những người phải vật lộn không chỉ với một cuộc sống kinh tởm mà còn với gần sự không được ưa chuộng phổ biến. Không ai thích những người thợ mỏ, những người có giấy phép đào bất kỳ mảnh đất đầy hứa hẹn nào mà họ có thể tìm thấy, ngay cả khi có ai đó đang kinh doanh trên mảnh đất đó vào đúng thời điểm đó. Nhưng họ chỉ làm theo mệnh lệnh của

nhà vua; thực sự, vào năm 1626, Vua Charles I đã ra lệnh cho thần dân của mình giữ lại tất cả nước tiểu của họ - và nước tiểu của ngựa, bò và các động vật khác - để hiến tặng cho vương miện. Cho dù từ 'đồn điền diêm' nơi những hỗn hợp này trưởng thành hay chính thành phẩm, vấy bẩn trên các cánh đồng, vùng nông thôn vĩnh viễn bị bao phủ trong mùi hôi thối dày đặc.

Tuy nhiên, ngay cả ở những đồn điền này, muối tiêu sẽ phát triển thành những tinh thể nhỏ màu trắng với tốc độ của một con ốc sên, chỉ tạo ra một phần nhỏ muối cho mỗi pound phân bón vào đồn điền. Khi các mỏ lớn được phát hiện trong bùn ở sông Hằng ở Ấn Độ, nó đã dẫn đến sự chiếm đóng của đất nước này. Trong vòng vài thập kỷ, diêm tiêu đã trở thành một trong những mặt hàng quan trọng nhất được Công ty Đông Ấn Anh buôn bán.

Sau đó, vào giữa thế kỷ 19, tin đồn đến Mỹ và châu Âu về một nhóm đảo ngay ngoài khơi bờ biển Peru hứa hẹn sẽ thay đổi mọi thứ. Quần đảo Chincha có màu xám tập hợp các tảng đá nơi sinh sống chủ yếu của đàn chim ưng, chim cốc và chim cánh cụt. Trải qua hàng nghìn năm, phân của loài chim này đã tích tụ thành một lớp vỏ bồng bềnh sâu hơn 100 feet. Hóa ra đây là một trong những loại phân bón tự nhiên tốt nhất mà thế giới từng biết đến: sự kết hợp phong phú của các hợp chất phốt phát và nitơ.

Mặc dù về mặt kỹ thuật, đây là một hợp chất khác với diêm tiêu được tìm thấy trong các hầm rượu ở Trung Quốc và sông Hằng, nhưng điểm chung của nó là nitơ. Nitơ là chìa khóa cho sự tăng trưởng. Nó giúp thực vật tạo ra chất diệp lục, cho phép chúng quang hợp. Cùng với carbon, hydro và oxy, nó là nguyên tố quan trọng trong axit amin, từ đó tạo ra tất cả các protein. Nói cách khác, nó là khối xây dựng của các khối xây dựng tế bào.

Tuy nhiên, trong khi không khí chúng ta hít thở có khoảng 78% nitơ, việc biến khí đó thành một dạng nitơ mà chúng ta thực sự có thể *sử dụng* không phải là vấn đề dễ dàng. Giải thích hóa học cho điều này là nitơ trong khí quyển tồn tại ở dạng hai nguyên tử hợp nhất với nhau thành một liên kết cực kỳ chặt chẽ; phá vỡ các nguyên tử này và tạo thành chúng thành các hợp chất nitơ khác mà chúng ta có thể sử dụng – “cố định”, như người ta thường gọi – liên quan đến lượng nhiệt và năng lượng khổng lồ. Nhân tiện, điều này cũng giúp giải thích

tại sao nitơ cố định là trung tâm của hầu hết các chất nổ: giống như cần rất nhiều năng lượng để phá vỡ nitơ khí quyển đó ra, bạn sẽ tạo ra rất nhiều năng lượng khi ghép chúng lại với nhau.
Trong phần lớn sự tồn tại của chúng ta, cách duy nhất để cố định nitơ từ khí quyển là hy vọng có một tia sét đánh hoặc đợi hàng tháng để vi khuẩn ở một số loài thực vật thực hiện việc đó. Saltpetre là một con đường tắt có giá trị, cũng như phân chuồng và phân hữu cơ, cả hai đều giàu nitơ, mặc dù ít giàu nitơ hơn phân chim hóa thạch ở Quần đảo Chincha. Trong nhiều năm, người Inca đã thu thập loại đất hôi hám này – họ gọi nó là *huanu – và nghiền nó thành bụi rồi rắc lên cánh đồng của họ.* Công nhận phép lạ họ đã tạo ra quần đảo thánh Chinchas, nơi giết một con chim là một tội nặng. Khi những người chinh phục Tây Ban Nha đến và tàn phá vùng đất ngày nay là Peru, họ ít chú ý đến phân chim như cách người ta biết đến, mặc dù nó được người Inca coi là quý như vàng.
Nhưng khi người Anh và người Mỹ biết đến Chinchas, điều đó đã thúc đẩy một cuộc đổ xô đột ngột vào việc khai thác vật liệu ma thuật này trước khi nó biến mất hoàn toàn. Chính phủ Peru đã quốc hữu hóa quần đảo và cấp giấy phép thu hoạch và vận chuyển phân chim. Những đàn thuyền hội tụ trên các hòn đảo, với những người lao động bị buộc phải đào và xúc đất độc hại trong điều kiện tàn khốc. Tiền chảy vào và trong một thời gian, có vẻ như Peru đã được định sẵn để trở thành quốc gia giàu nhất thế giới. Sau đó, đột ngột như khi nó bắt đầu, cơn sốt vàng này kết thúc. Vào cuối những năm 1850, chỉ vài thập kỷ sau khi những con tàu đầu tiên đến, những người thợ mỏ bắt đầu khai thác đá thô; người Chincha đã kiệt sức.
Tàn khốc như thế này, người Peru đã có một vũ khí bí mật trên đất liền. Sa mạc Atacama, nơi họ kiểm soát vùng phía bắc, được bao phủ bởi lớp vỏ muối độc đáo mà người dân địa phương gọi là caliche. Caliche có nguồn gốc từ từ Quechua có nghĩa là muối, *cachi* , và câu chuyện nguồn gốc ở đây giống một cách kỳ lạ với câu chuyện về những người Phoenicia trên bãi biển khám phá cách làm thủy tinh. Trở lại thế kỷ 14, rất lâu trước khi người châu Âu đến, một nhóm người dân địa phương đã đi từ chân đồi Andes tới Thái Bình Dương. Trên đường đi qua Atacama, họ dừng lại qua đêm và dựng trại. Nhưng khi đốt lửa, họ rất ngạc nhiên khi thấy một số tảng đá trên mặt

đất phát ra tia lửa và bốc cháy. Sợ quỷ dữ, họ bỏ chạy. Nhưng theo thời gian, tin tức lan truyền về những 'viên đá của quỷ' này. Người ta sớm nhận ra rằng chúng không chỉ có khả năng nổ mà khi ném xuống đất chúng còn khiến vùng đất đó trở nên đặc biệt màu mỡ.
Lời giải thích xuất phát từ hàm lượng hóa học của những viên đá: cùng với rất nhiều natri clorua – muối ăn – là tất cả các loại muối lạ khác: nitrat, iodat, sunfat và clorua. Làm thế nào nó được tìm thấy ở đây gần như duy nhất trên trái đất vẫn còn là một điều bí ẩn. Một giả thuyết cho rằng caliche là sản phẩm của làn sương mù kỳ lạ thường hình thành trên sa mạc vào ban đêm và buổi sáng - camanchaca *như* người dân địa phương gọi nó. Một điều nữa là những muối này bị cuốn trôi từ dãy Andes, một điều khác là chúng từng được lắng đọng bởi một vùng biển cổ xưa. 2
Loại caliche này hơi khác một chút so với loại muối truyền thống – đó là natri nitrat chứ không phải kali nitrat – nhưng vào thế kỷ 19, không lâu sau sự bùng nổ và phá sản của Chinchas, các nhà hóa học đã tìm ra cách biến nó thành loại dễ nổ hơn của Trung Quốc. Từ đó nó có thể được biến thành axit nitric, nitroglycerine và thuốc nổ, những chất nổ mạnh sẽ đưa Alfred Nobel trở thành một trong những người giàu nhất thế giới. Và vì vậy trong những thập kỷ sau sự sụp đổ của hoạt động buôn bán phân chim Chinchas, nitrat Nam Mỹ đã trở thành một trong những nguyên liệu thô quan trọng nhất trên thế giới. fn1

Cuộc chiến muối tiêu

Điều đó đưa chúng ta trở lại với Antofagasta, hay cụ thể hơn là Công ty Đường sắt và Nitrat Antofagasta, tên tiếng Anh của nhà điều hành tàu đầu tiên. Đường sắt chỉ là một trong nhiều doanh nghiệp được thành lập vào những năm 1870 với tiền tài trợ của Anh để tạo điều kiện thuận lợi cho việc khai thác, tinh chế và vận chuyển caliche. Nhu cầu về chất nổ ngày càng tăng khi các quốc gia châu Âu lao vào xung đột này đến xung đột khác - từ Chiến tranh Krym đến Chiến tranh Anh-Phổ đến Chiến tranh Boer. Đồng thời, hàng triệu người châu Âu đã chuyển từ nông thôn lên thành phố, gia tăng áp lực buộc nông dân phải thu hoạch nhiều cây trồng hơn từ đất của họ. Thực phẩm và súng ống: hai lực lượng này đã thúc đẩy cơn sốt nitrat.

Vào thời điểm thành lập công ty, Antofagasta là một phần của Bolivia - thực sự, là một trong những cảng quan trọng nhất của nước này - và phần lớn trữ lượng caliche nằm ở lãnh thổ Peru và Bolivia. Tuy nhiên, chính những người nhập cư Chile táo bạo đã khám phá ra hầu hết các caliche, thực hiện hầu hết việc khai thác và tạo dựng các mối liên kết hết sức quan trọng với các nhà tài trợ người Anh và người Đức, những người đã cung cấp vốn cho hoạt động kinh doanh của họ. Nếu bạn đi dạo trên đường phố Antofagasta vào giữa những năm 1870, bạn sẽ thấy mình hầu như bị bao quanh bởi những người nhập cư Chile. Người Bolivia và Peru ít chú ý đến Atacama cho đến khi tiền bắt đầu chảy vào.

Năm 1874, người Bolivia đã ký một hiệp ước cam kết không đánh thuế khai thác khoáng sản nhưng khi quy mô lợi nhuận trở nên rõ ràng hơn, căng thẳng bùng lên. Bốn năm sau, chúng bùng nổ khi Bolivia áp dụng mức thuế hồi tố là 10 xu cho mỗi *tạ* (khoảng 100 pound) nitrat xuất khẩu từ khu vực này. Người quản lý đường sắt, một người Cornish nóng nảy với bộ ria mép kiểu thịt cừu tên là George Hicks, đã thẳng thừng từ chối trả số tiền đó. Cuối cùng, chính quyền Bolivia đã ra lệnh tịch thu tài sản của công ty và bắt giữ Hicks, sau đó anh ta tìm nơi ẩn náu trên một tàu chiến Chile đóng ngoài khơi. Vài tuần sau, quân Chile đổ bộ vào Antofagasta và nhanh chóng chiếm cảng. Biên giới ở phần này của thế giới luôn là vấn đề gây tranh cãi nhưng giờ đây thỉnh thoảng lại có những tranh cãi về bản đồ và các quyền đã bị ảnh hưởng bởi sự hiện diện của một trong những nguồn tài nguyên quý giá nhất thế giới, và do đó bắt đầu 5 năm chiến tranh giữa một bên là Chile và một bên là Peru và Bolivia.

Cuộc chiến chủ yếu diễn ra trên biển. Sau khi Bolivia nhanh chóng bị đánh bại, các tàu của Peru và Chile đã dành nhiều năm bắn phá lẫn nhau bằng đạn đại bác - do đó nó thường được đặt tên: Chiến tranh Thái Bình Dương, mặc dù tùy thuộc vào người bạn đang nói chuyện, nó có nhiều tên gọi khác nhau là Chiến tranh Mười xu hoặc cuộc chiến tranh diêm tiêu. Có lẽ trong trận chiến nổi tiếng nhất, một sĩ quan trẻ người Chile, Arturo Prat, đã một tay dẫn đầu một cuộc tấn công dũng cảm vào con tàu đáng sợ nhất của Peru, *Huáscar* . Anh ta bị bắn hạ ngay sau khi lên tàu *Huáscar* và nhờ đó đã trở thành một

anh hùng dân tộc, được tưởng nhớ bằng tên đường phố khắp cả nước. [3]

Nhưng trong khi người Peru thắng trận chiến đó, họ và người Bolivia đã thua trong cuộc chiến – và không chỉ một chút. Cuộc chiến Saltpetre kết thúc với chiến thắng ngoạn mục dành cho Chile. Vào tháng 1 năm 1881 lực lượng Chile chiếm Lima; đến năm 1884, họ đã ký hiệp định đình chiến với Bolivia và Peru và chiếm một vùng lãnh thổ rộng lớn ở phía bắc, bao gồm Antofagasta, toàn bộ bờ biển của Bolivia và một phần lớn vùng caliche của Peru. Thật khó để nghĩ đến nhiều cuộc chiến tranh khác có kết quả gây hậu quả nặng nề hơn thế này. Chile đã giành được quyền kiểm soát một số tài nguyên khoáng sản quan trọng nhất trên thế giới - không chỉ nitrat ở Atacama mà còn là nơi có trữ lượng đồng và lithium lớn nhất thế giới. Cuộc xung đột này đã biến đất nước này thành một siêu cường tài nguyên, tước đi bờ biển của Bolivia trong quá trình này.

Trong những năm tiếp theo, nitrat của Chile đã giúp cung cấp lương thực và vũ khí cho thế giới. Chính chất nitrat của Chile trong chất nổ của quân Đồng minh đã trút xuống chiến hào trong Thế chiến thứ nhất. Doanh thu của họ đã giúp tài trợ cho việc xây dựng thêm nhiều đường bộ và đường sắt, mạng lưới điện và hệ thống ống nước, đồng thời giúp Chile xây dựng một nền quân sự tiên tiến và đạt được trình độ quân sự của thế kỷ 20 được nhiều nước châu Âu ưa chuộng. Nhờ loại muối trắng này, Chile trở thành quốc gia giàu có nhất châu Mỹ Latinh.

Ngày nay, sự bùng nổ về nitrat phần lớn bị lãng quên, nhưng thật khó để phóng đại tầm quan trọng của nó trong những năm đầu của thế kỷ XX. Trong một thời gian, nitrat được coi là thú vị giống như các vật liệu pin kỳ lạ ngày nay: điều quan trọng tiếp theo. Trong số những người bị quyến rũ bởi lời hứa về caliche có Daniel Guggenheim, nhà lãnh đạo quyền lực của triều đại giàu có ở Mỹ. Mặc dù Guggenheims ngày nay được biết đến nhiều nhất nhờ bộ sưu tập nghệ thuật và hoạt động từ thiện, nhưng vào thời điểm đó, họ kiểm soát tập đoàn khai thác mỏ hàng đầu thế giới, thống trị sản xuất đồng và một loạt kim loại khác trên toàn cầu. Nhưng Daniel quá say mê theo đuổi nitrat đến nỗi đã bán Chuquicamata, một trong những mỏ đồng hàng đầu của công ty (xem chương 11), để đầu tư vào caliche của Chile. Nitrat, ông nói

với con trai mình là Harry, 'sẽ khiến chúng ta giàu có hơn cả những giấc mơ hám lợi!' Harry không chắc lắm. Tuy nhiên, nhà Guggenheims vẫn chuyển từ đồng sang nitrat, đầu tư hàng triệu USD vào các mỏ và nhà máy lọc dầu Anh-Chile ở Atacama.
Ngày nay bạn vẫn có thể nhìn thấy tàn tích của nhà máy lọc dầu hàng đầu của họ ở thị trấn María Elena. Đó là một tiền đồn kỳ lạ, đặc biệt là cách xa bất cứ nơi nào với quy hoạch đường phố được thiết kế trông hơi giống Union Jack - một lời nhắc nhở khác về mối liên hệ của người Anh. Nhà máy lọc dầu đã bị bỏ hoang vào năm 2010 nhưng tàn tích rỉ sét to lớn của nó vẫn đứng sừng sững trên thị trấn giống như một nhà máy thép cũ nát. [4]
Quy mô của nhà máy là minh chứng cho thấy cần bao nhiêu công sức để biến loại đá mặn này thành nitrat, mang lại rất nhiều tiền trên khắp thế giới. Đầu tiên, những viên đá phải được nghiền nát và sau đó được nghiền đi nghiền lại cho đến khi chúng trở thành những hạt nhỏ. Sau đó, chúng được đổ vào những chiếc thùng khổng lồ, nơi chúng được đun nóng trong nước nóng trong vài ngày. Sau đó chiếc xe tăng được làm trống và dung dịch được làm nguội ở nhiệt độ tủ lạnh. Quá trình lọc và tinh chế gian khổ này sẽ loại bỏ các tạp chất - muối thông thường, muối magie và các chất không mong muốn khác - chất đống bên cạnh nhà máy lọc dầu. Sau khi hết nitrat, chúng được gửi bằng đường sắt đến bờ biển Thái Bình Dương.
Nhưng bằng chứng thực sự cho cơn sốt nitrat có thể được nhìn thấy bên ngoài thị trấn. Đây là đống đất nối tiếp nhau thành những hàng dài ngút tầm mắt. Đây là phần còn lại của lớp đất quá tải, lớp trên cùng của trái đất, đã được san ủi để lộ ra những chiếc caliche gần một thế kỷ trước. Tìm kiếm María Elena trên bản đồ vệ tinh và khi phóng to, bạn sẽ thấy những đường gò dài song song này trải dài hàng dặm trên Atacama, giống như những phiên bản cực nhỏ của cồn cát seif nằm dọc Biển Cát Lớn. Ngoại trừ những điều này không phải tự nhiên: chúng là những vết sẹo của thời đại loài người dựa vào loại muối này để nuôi sống thế giới.
Nhưng ký ức về những gì đã xảy ra ở Quần đảo Chincha khó có thể lay chuyển được, cũng như các phép toán về cung cấp thực phẩm. Khi thế kỷ 20 bắt đầu, các nhà khoa học đã cảnh báo rằng ngay cả nguồn cung nitrat của Chile cũng không đủ để nuôi sống thế giới mãi

mãi, đặc biệt khi dân số tăng lên. Ngài William Crookes, một nhà hóa học giàu có, cảnh báo rằng trừ khi con người tìm ra cách khác để thu được nitrat – lý tưởng nhất là cố định chúng từ không khí – thế giới sẽ phải đối mặt với nạn đói vào năm 1930. Vấn đề là nếu làm như vậy – mô phỏng tia sét – sẽ liên quan đến nỗ lực nhiệt động lực học như vậy mà không ai biết cách quản lý nó.

Biến không khí thành thực phẩm

Trong trường hợp này, thách thức được giải quyết không phải bởi người Anh, người Mỹ hay người Chile mà là người Đức. Nhìn lại thì điều này không có gì đáng ngạc nhiên; Đức là nước nhập khẩu Chile lớn nhất thế giới nitrat. Nó hoàn toàn phụ thuộc vào thuốc chữa cháy để nuôi dưỡng đất và sản xuất chất nổ. Vì vậy, khi Thế chiến thứ nhất bắt đầu, không có quốc gia nào khác bị ảnh hưởng nhiều hơn. Thật vậy, người ta nói rằng cuộc giao tranh hải quân đầu tiên giữa các tàu Đức và Anh không xảy ra ở vùng biển châu Âu mà ở ngoài khơi bờ biển Thái Bình Dương của Chile, khi các quốc gia cố gắng giành quyền kiểm soát các tuyến đường vận chuyển nitrat. Sau một loạt trận chiến, Đức bị cắt khỏi caliche của Chile trong thời gian còn lại của cuộc chiến. Với việc đất nước đột nhiên dễ bị tổn thương vì nạn đói và không có nguồn thuốc nổ, thất bại quân sự thảm khốc, chính phủ đang tuyệt vọng tìm kiếm sự giúp đỡ.

Họ tìm thấy nó dưới hình dạng Fritz Haber, một nhà hóa học người Do Thái đầy tham vọng nhưng gặp nhiều rắc rối, người đã dành nhiều năm cố gắng giải quyết thách thức lâu dài này. Lúc đầu, anh ấy lấy cảm hứng từ cách thiên nhiên tạo ra và cố gắng mô phỏng tia sét, nhưng cuối cùng anh ấy đã sử dụng sự kết hợp giữa nhiệt và áp suất để thuyết phục nitơ từ không khí liên kết với khí hydro. Năm 1909, ông đã chứng minh cách thực hiện điều đó và trong những năm tiếp theo, ông làm việc với kỹ sư hóa học Carl Bosch để biến cuộc trình diễn trong phòng thí nghiệm thành một quy trình công nghiệp. Đến năm 1913, BASF, công ty mà Bosch làm việc và cuối cùng lãnh đạo, đã bắt đầu sản xuất amoniac – hợp chất nitơ/hydro mà sau đó có thể chuyển đổi thành phân bón và dùng để chế tạo chất nổ – tại nhà máy của họ ở Oppau. [5]

Quy trình Haber–Bosch, như nó đã được biết đến, là một trong những khám phá khoa học và công nghiệp quan trọng nhất trong lịch sử. Trong thế kỷ tiếp theo, nó đã giúp chúng ta nuôi sống hàng tỷ người. Một trong những chiến thắng vĩ đại nhất của loài người trong thế kỷ XX là xóa bỏ nạn đói và nạn đói như một vấn đề phổ biến. Tỷ lệ người suy dinh dưỡng trên toàn thế giới đã giảm từ khoảng 65% năm 1950 xuống dưới 10% vào năm 2010 - phần lớn là do năng suất cây trồng tăng lên. bằng phân bón rẻ và phổ biến. Ngày nay chúng được sử dụng rộng rãi đến mức người ta ước tính rằng khoảng một nửa lượng nitơ trong cơ thể chúng ta được cố định từ không khí thông qua quy trình Haber–Bosch. Nếu không có những hóa chất này, chúng ta sẽ phải chuyển hầu hết mỗi dặm vuông đất trên hành tinh sang sản xuất nông nghiệp, phủ lên nó bằng phân từ một chuồng động vật khổng lồ không kém, và thậm chí khi đó chúng ta vẫn chỉ có thể hỗ trợ khoảng một nửa dân số thế giới. Nhưng trong những năm đầu tiên, mục đích chính của nitrat được sử dụng là tạo ra chất nổ cho quân đội Đức. [6] Thật vậy, bạn có thể lập luận rằng nếu không có Haber–Bosch thì Đại chiến đã kết thúc sớm hơn nhiều. Đúng như vậy, Pháp, Anh và các đồng minh của họ đã bắn phá Đức và các đồng minh của nước này bằng chất nổ làm từ nitrat của Chile trong khi lần lượt bị bắn phá bằng chất nổ làm từ nitrat tổng hợp. Loại chiến tranh mới này - gồm chiến hào, xe tăng, pháo binh và tiền tuyến hầu như không thay đổi trong nhiều tháng - một phần là sản phẩm của khoa học, công nghiệp và vũ khí sinh ra từ loại muối dễ nổ này. Danh tiếng của Fritz Haber càng bị hoen ố vì công việc phát triển khí clo, đích thân giám sát việc sử dụng nó trong Trận Ypres lần thứ hai, nơi nó khiến hàng nghìn binh sĩ thiệt mạng một cách khủng khiếp.

Quy trình Haber–Bosch đã giáng một đòn chí mạng vào ngành công nghiệp nitrat của Chile. Canh bạc của Daniel Guggenheim đã phản tác dụng một cách khủng khiếp. Giờ đây người ta có thể thu được nitrat từ không khí chứ không phải từ mặt đất, không có giới hạn vật lý nào về số lượng người ta có thể sản xuất. Ngày nay hầu hết các tiền đồn nitrat cũ đã đóng cửa. Thị trấn này đến thị trấn khác từng là nơi ở của các thợ mỏ, giám sát viên, kỹ sư và công nhân giờ đã bị bỏ hoang. Khi lái xe qua Sa mạc Atacama, bạn thường xuyên đi ngang qua một trong những địa điểm này. Chúng trông hơi giống bối cảnh

trong một bộ phim Miền Tây hoang dã: những con đường bụi bặm, lộng gió dưới ánh mặt trời chói chang. Những mái nhà hầu hết đã bị người dân địa phương dỡ bỏ, đánh cắp để lấy phế liệu, nhưng phần vỏ trấu của các tòa nhà vẫn còn. Ở Pedro de Valdivia, nơi nhà máy nitrat đóng cửa vào năm 1996, quảng trường thị trấn vẫn còn những chiếc ghế dài và xích đu đầy màu sắc nơi trẻ em từng chơi nhưng nhà cửa trống rỗng, sàn nhà giờ phủ đầy cát thổi từ sa mạc vào. Những cư dân cũ đã vẽ nguệch ngoạc lên những ngôi nhà để đánh dấu rằng họ đã từng sống ở đó: 'Gia đình Luksic Villalobos sống ở đây: Lolo, Irma, Nona, Julio, Alberto'. Âm thanh duy nhất là tiếng gió thổi từ đồng bằng và tấm biển ọp ẹp của bưu điện cũ.

Tất cả những điều đó có thể khiến bạn có ấn tượng rằng ngành công nghiệp caliche đã chết và bị chôn vùi, nhưng thực tế nó lại xảy ra: không hoàn toàn như vậy. Vì ở Chile vẫn còn một số ít công ty sản xuất muối tiêu từ những loại đá sa mạc này. Đứng đầu trong số đó là SQM, một công ty hóa chất có lịch sử bắt nguồn từ sự sụp đổ của ngành công nghiệp nitrat ban đầu. Khi hết mỏ này đến mỏ khác sụp đổ vào những năm 1960 trong bối cảnh cạnh tranh khốc liệt từ các đối thủ cạnh tranh nitrat tổng hợp, chính phủ Chile cuối cùng đã vào cuộc và quốc hữu hóa hai công ty caliche cuối cùng còn sót lại. Lời giải thích vừa mang tính địa chính trị vừa mang tính kinh tế: các cường quốc ở Santiago lo ngại rằng nếu Atacama bị bỏ hoang thì đến thời điểm người Bolivia và người Peru có thể đòi lại lãnh thổ mà họ đã mất trong Chiến tranh Thái Bình Dương. Chính phủ Allende cuối cùng đã quốc hữu hóa lĩnh vực caliche - cũng như ngành công nghiệp đồng - vào năm 1971. Vài năm sau, dưới thời độc tài của Augusto Pinochet, SQM được tư nhân hóa bởi một nhóm do Julio Ponce Lerou lãnh đạo. Điều này nghe có vẻ không có gì đặc biệt cho đến khi bạn biết rằng Ponce Lerou không ai khác chính là con rể của Pinochet. Những hoàn cảnh u ám của quá trình tư nhân hóa vẫn còn là vấn đề gây tranh cãi ở Chile ngày nay, bởi vì SQM – Sociedad Química y Minera de Chile hay như người dân địa phương gọi là Soquimich – kể từ đó đã trở thành một tổ chức rất công ty quan trọng và Ponce Lerou đã trở thành một trong những người giàu nhất đất nước.

Ngày nay, nitrat không phải là thứ duy nhất được sản xuất từ caliche. Đồng thời, SQM cũng chiết xuất iốt, một chất bổ sung quan trọng cho

sức khỏe mà nếu không có nó, chúng ta dễ bị chậm phát triển và mắc nhiều bệnh tật. Nguyên tố này được coi là quan trọng đến mức hầu hết các quốc gia đã thông qua luật thêm nó vào muối ăn. Hoá ra Chile lại là nước sản xuất loại thuốc cứu mạng sống này lớn nhất thế giới. Mặt khác, ngày nay nitơ chủ yếu đến từ quy trình Haber–Bosch, thay vì từ đất ở Chile. Ngày nay, hạn chế thực sự duy nhất về lượng phân bón mà chúng ta muốn là lượng năng lượng mà chúng ta sẵn sàng chi ra để đổi lấy. Một hậu quả không lường trước được của nguồn cung cấp nitơ dồi dào được cố định từ khí quyển thay vì chỉ từ đá ở sa mạc Chile là trong phần lớn nửa thế kỷ qua, phân bón nitơ đã được sử dụng gần như không giới hạn.
Khoảng một nửa lượng nitơ rải rác và phun trên đồng ruộng của chúng ta không đi vào cây trồng mà vào không khí và nước của chúng ta. Nó đã hòa tan vào trái đất và từ đó thành sông suối, nơi nó cung cấp nhiên liệu cho những đợt tảo nở hoa khổng lồ làm ngạt thở các sinh vật thủy sinh khác. Một thế kỷ sau phát hiện của Fritz Haber, thế giới đã nhận thức rõ về mặt trái của việc có nguồn cung nitrat gần như vô tận. Đất của nông dân ngày càng bị khai thác quá mức và bị thoái hóa, bị mất đi vô số khoáng chất khác mà họ cần. Các nhà khoa học thực phẩm cảnh báo nhiều quốc gia sắp hết thu hoạch. Giải pháp cho cuộc khủng hoảng dinh dưỡng trên thế giới dường như đang làm nảy sinh cuộc khủng hoảng đất đai. Sau đó, cách đây vài năm, những người thợ mỏ làm việc ở bờ biển phía bắc nước Anh đã phát hiện ra một thứ có thể hữu ích: một vật liệu ma thuật chưa từng gặp với số lượng như vậy trước đây. Bạn đoán xem, chất đặc biệt này chính là một loại muối khác.

Lời kết: Nhiều muối

BOULBY, ANH

Câu chuyện mặn mà của chúng tôi kết thúc ở nơi nó bắt đầu: Boulby ở Bắc Yorkshire, ngay dưới địa điểm mà Steve Sherlock đã đào suốt 30 năm để tìm kiếm dấu vết của nền văn minh và tìm thấy dấu vết của muối. Vài tháng sau khi chúng tôi tụ tập trên đỉnh vách đá, tôi thấy mình ở sâu bên dưới lớp đất này, bên dưới lớp đá phiến sét, đá sắt và sa thạch, đá bùn, bột kết, anhydrite và dolomite, bên dưới các tầng đá thuộc kỷ Jura, Keuper và Permian, nhìn chằm chằm vào lớp trên lớp muối.

Muối ở đây là sản phẩm của một vùng biển cổ xưa khác, thậm chí còn lâu đời hơn cả vùng biển nằm bên dưới Cheshire khoảng 220 triệu năm trước. Vì đây là Biển Zechstein, một vùng nước rộng, nông, cổ xưa bao phủ phần này của thế giới, từ phía bắc nước Anh, băng qua Biển Bắc xuống vùng đồng bằng của Đức và Ba Lan. Ngoại trừ việc nghĩ về nó theo khía cạnh địa lý hiện đại có phần sai lệch, vì hồi đó Boulby ở Bắc Yorkshire có thể chỉ ở phía bắc xích đạo. Những gì ngày nay là đỉnh vách đá lộng gió, đầy cỏ sẽ là sa mạc - giống như Atacama hoặc có lẽ là Biển cát lớn của sa mạc Sahara.

Đây là khoảng từ 270 đến 250 triệu năm trước và siêu lục địa Pangea đang bắt đầu tan vỡ. Khi các mảng kiến tạo dịch chuyển, cảnh quan sa mạc bị nước biển tràn ngập, không phải một hoặc hai lần mà là năm lần. Và mỗi khi nước rút đi, chúng để lại đằng sau lớp vỏ muối bay hơi. Nếu điều này hơi khó hình dung, hãy xem xét rằng điều gì đó tương tự có thể đang xảy ra với Biển Địa Trung Hải ngày nay. Nhân tiện, đây là một trong những câu chuyện yêu thích của tôi về thế giới địa chất đôi khi khô khan, chủ yếu là vì nó xảy ra không phải trong thời gian sâu, chậm chạp mà một phần trong thời gian thực.

người Homo sapiens xuất hiện – Địa Trung Hải đã bị cắt đứt khỏi Đại Tây Dương và trải qua hàng trăm nghìn năm, nó gần như cạn kiệt hoàn toàn, tiến tới giống như một phiên bản khổng lồ của Biển Chết ngày nay. Eo biển Gibraltar cuối cùng đã mở cửa trở lại và trong một cảnh tượng đặc biệt nhất, Đại Tây Dương bất ngờ tràn trở lại trong một làn sóng thủy triều hoành tráng.

Mặc dù thật khó để tưởng tượng việc chứng kiến điều như vậy ngày nay, nhưng ít nhất bạn có thể cảm nhận, hay đúng hơn là nếm thử, di sản, vì nước ở Địa Trung Hải vẫn mặn bất thường, với khoảng 38 phần nghìn muối so với mức trung bình 35ppt ở các nước khác. các đại dương khác. Khi Á-Âu tiếp tục va chạm với Châu Phi, các nhà địa chất dự đoán rằng trong hàng triệu năm tới eo biển này sẽ đóng lại lần nữa, lần này là vĩnh viễn. Địa Trung Hải cuối cùng sẽ khô cạn và biến mất hoàn toàn, để lại một lớp muối bị chôn vùi phía sau, giống như Biển Zechstein. [1]
Muối, như chúng ta đã thấy, hiếm khi tự xuất hiện. Hiếm khi bạn tìm thấy natri clorua mà không có một hoặc các hợp chất đồng hành khác và nước ở Zechstein chứa nhiều muối. Ngày nay, hãy đào sâu hơn xuống lòng đất và bên dưới cầu vồng đá muối – halit bẩn, tinh thể trắng, đá trong mờ màu cam – bạn sẽ gặp các loại muối khác: carnallite màu hồng sữa; kieserite, dùng để làm muối Epsom; bischofite – magie muối clorua đôi khi biến thành gel dùng để điều trị bệnh viêm khớp và sốt thấp khớp – và nổi bật so với phần còn lại là một lớp tinh thể màu đỏ đậm lấp lánh. Đây là sylvit, kali clorua – nguồn cung cấp kali chủ yếu cho phân bón.
Vì hóa ra diêm tiêu không phải là loại đá duy nhất chúng ta sử dụng để trồng trọt lương thực. Mặc dù nitơ là loại phân bón quan trọng nhất nhưng cũng có hai loại phân bón khác: phốt pho và kali. Cả ba loại này – NPK thường được gọi theo ký hiệu hóa học của chúng – tạo thành bộ ba phân bón thần thánh, được rắc và phun lên các cánh đồng trên khắp thế giới với khối lượng hàng triệu tấn để giúp trồng các loại cây trồng nuôi sống 8 tỷ miệng người trên thế giới.
Phốt pho chủ yếu đến từ việc khai thác đá phốt phát, hầu hết được tìm thấy ở Florida và Idaho ở Mỹ, cũng như Trung Quốc và Maroc, những quốc gia sau này chiếm gần 3/4 tổng trữ lượng của thế giới. Phần lớn đá phốt phát của Maroc được tìm thấy ở vùng lãnh thổ tranh chấp Tây Sahara, nơi nó cung cấp một trong những mặt hàng xuất khẩu quan trọng nhất của khu vực, cùng với cát được sử dụng để bổ sung cho các bãi biển của Quần đảo Canary.
Mặt khác, kali có tên là kali và kali có tên từ kỹ thuật được sử dụng để tạo ra nó trước khi phát hiện ra trữ lượng dưới lòng đất, chẳng hạn như trữ lượng dưới vách đá ở Boulby. Nông dân sẽ cạo tro từ gỗ

cháy, lọc vào nồi rồi làm bay hơi tro nồi này để tạo ra chất mặn trắng. Ở Cao nguyên và Quần đảo Scotland, họ lấy kali từ tảo bẹ bị đốt cháy. Đó là một công việc khó khăn, tương tự như công việc bạn cần làm để lấy lại tro soda trước khi phát minh ra quy trình Solvay.
Cho đến những năm 1930, khi các nhà địa chất bắt đầu khoan các lỗ khoan quanh khu vực này để tìm dầu, không ai nhận ra rằng nước Anh ngồi trên một trong những mạch muối kali tinh khiết nhất ở bất cứ đâu trên thế giới. Đức kiểm soát hầu hết hoạt động sản xuất ở châu Âu, đào sylvite từ tầng nông hơn của lưu vực Zechstein. Nước Anh, theo như mọi người có thể nói, không có những thứ đó và vì vậy đã dành phần lớn thời kỳ đế quốc đi khắp thế giới để tìm kiếm kali từ Ấn Độ, Canada và thậm chí cả Biển Chết ở Palestine. Nó cần phải ứng biến các giải pháp thay thế, rơi vào tình trạng tảo bẹ và bụi lò cao khi bị cắt khỏi nguồn cung cấp của Đức trong Thế chiến thứ nhất. Đột nhiên, ngay khi Biển Bắc đang hứa hẹn sự độc lập về dầu mỏ của Anh, mỏ Cleveland Potash được mở tại Boulby và chỉ sau một đêm, Vương quốc Anh đã từ một nước nhập khẩu kali trở thành một trong những nước lớn trên thế giới.
Việc kinh doanh kali là một lĩnh vực mơ hồ và không rõ ràng. Giống như có một tập đoàn dầu mỏ, OPEC, cũng có một tập đoàn kali, với các nhà sản xuất nhằm mục đích, giống như các nhà sản xuất muối ở Cheshire thời Victoria, nhằm kiểm soát sản xuất và giá cả để giữ cho mình luôn trong tình trạng khó khăn. Khi Nga xâm chiếm Ukraine vào năm 2022, một hậu quả là sự thiếu hụt phân bón đột ngột trên toàn cầu, vì Nga và đồng minh Belarus cung cấp khoảng 1/4 lượng kali của thế giới. Ở đó, cũng như ở đây, sylvit được tìm thấy trong muối của các vùng biển bị chôn vùi: lưu vực Pripyat ở Belarus và lưu vực Solikamsk ở Nga.
Trong nhiều thập kỷ, các thợ mỏ ở Cleveland Potash đã khai thác được hàng triệu tấn sylvit. Để tìm thêm đá, họ đã đào sâu hơn, theo các mạch sylvit tỏa ra từ trục nâng chính của nó: hàng dặm dưới cây thạch nam màu tím của vùng North York Moors; dặm dưới làn sóng kim loại của Biển Bắc. Nhưng năm tháng trôi qua, dần dần các mạch muối màu đỏ tươi ngày càng khan hiếm. Cuối cùng, các nhà khai thác mỏ đã đi đến một kết luận ảm đạm mà họ phải đưa ra về hầu hết các mỏ: kali của nó thực sự đã cạn kiệt.

Không phải là ở dưới đó không còn thứ gì nữa. Trước hết, có muối mỏ, một tầng đất khổng lồ mà họ đã đào hầm trên đường tới sylvit; muối này dẫn chúng đến muối khác. Nhưng mặc dù halit giúp tăng cường nguồn cung từ mỏ Winsford ở phía bên kia đất nước, nhưng chỉ riêng điều đó thôi sẽ không thể tài trợ cho một mỏ sâu và rộng như thế này.

Sau đó, ai đó nảy ra ý tưởng: đào sâu hơn nữa vào Biển Zechstein thì sao? Họ đã lấy ra những lõi đá cũ từ những cuộc khảo sát đầu tiên vào những năm 1930. Bên dưới các lớp sylvite là một lớp thứ chưa từng được phát hiện với số lượng lớn như vậy trước đây: polyhalite, một tinh thể đá cứng gồm lưu huỳnh, magie và canxi có tên theo nghĩa đen là 'nhiều muối'. Họ có thể khai thác được thứ đó không?

Vì vậy, khi tìm kiếm lý do để duy trì hoạt động của mỏ, nhóm nghiên cứu tại Boulby đã cân nhắc các thành phần trong polyhalite: lưu huỳnh, magie và canxi. Đây đều là những thành phần quan trọng của đất lành, vậy liệu việc đưa những thứ này vào lòng đất có mang lại giá trị gì không? Sau nhiều năm thử nghiệm các vật liệu này – nung và xử lý nó, cố gắng loại bỏ canxi và biến nó thành tấm thạch cao – họ đã phát hiện ra một điều đơn giản hơn nhiều: khi bạn nghiền nát các khối polyhalite và rải chúng trên trái đất như phân bón, chúng sẽ hoạt động rất hiệu quả. . Ngũ cốc, đậu, rau đồng và cỏ – tất cả đều phát triển nhanh hơn và giữ lại nhiều khoáng chất hơn sau khi thu hoạch. Họ thậm chí còn lọc ít phân bón hơn và sử dụng nitơ hiệu quả hơn, nghĩa là nông dân có thể bón phân cho cánh đồng của họ với ít đầu vào hơn và ít chất thải hơn, đồng thời đất sẽ ít bị hư hại hơn trong quá trình này. Và bởi vì polyhalite chỉ đơn giản được đào lên khỏi mặt đất, nghiền nát rồi bán thay vì được xử lý nhân tạo như hầu hết các loại phân bón, nên nó có thể được chứng nhận là hữu cơ. Tương tự như vậy, trong khi việc sản xuất các loại phân bón khác - đặc biệt là nitơ - tiêu tốn rất nhiều năng lượng, thì polyhalite sẽ có lượng khí thải carbon rất nhỏ khi so sánh.

Tuy nhiên, vấn đề là chưa có ai từng thử làm điều này trước đây. Không có thị trường tồn tại trước đó cho polyhalite. Hầu hết những nguyên liệu được khai thác từ lòng đất – cho dù đó là kali, than hay đồng – đều là hàng hóa toàn cầu. Công việc của người thợ mỏ kết thúc khi khoáng sản được tinh chế và đưa vào thị trường toàn cầu.

Nhưng trong khi polyhalite không hẳn là mới lạ (nó thường được tìm thấy ở nơi khác nhưng thường với số lượng rất nhỏ - ví dụ, sau natri clorua, nó là thành phần chính trong muối hồng Himalaya), chưa có ai từng khai thác nó theo đúng nghĩa của nó. Và vì chưa có ai từng làm điều này trước đây nên không ai hiểu rõ những thách thức kỹ thuật liên quan. Có một điều, polyhalite rất cứng. “Nó giống như việc cố gắng khai thác bê tông vậy,” một kỹ sư ở Boulby nói. Mũi khoan gắn vào máy của họ bị mòn nhanh hơn nhiều so với kali. Máy móc sẽ kiệt sức khi đập vào đá. Nói cách khác, điều này sẽ không đơn giản.
Hơn nữa, vì polyhalite nằm ở đáy Biển Zechstein nên việc khai thác còn sâu hơn nữa. Vì mỏ này vào thời điểm viết bài là mỏ sâu nhất ở châu Âu (một mỏ đồng sâu hơn một chút ở Phần Lan đã đóng cửa vào năm 2021), điều này đang nói lên điều gì đó.
Điểm sâu nhất ở đây là gần 1,5 km (1 dặm) dưới lòng đất, không là gì so với mỏ vàng Mponeng ở Nam Phi, nơi sâu nhất thế giới với độ sâu 4 km. Ở độ sâu đó, nhiệt độ đá là 66°C. Tại Boulby, nhiệt độ đá chỉ là 39°C, mặc dù đó chỉ là điểm khởi đầu. Những thứ khác – chủ yếu là máy móc, nhưng cũng có cả con người – vẫn đẩy nhiệt độ lên cao hơn. Không giống như Mponeng, nơi đá vụn được bơm dưới lòng đất để làm mát nhiệt độ môi trường, ở đây không có gì khác ngoài quạt để giữ cho không khí chuyển động.
Kết quả cuối cùng là mỏ này rất nóng; rất nóng. Bảng câu hỏi y tế mà tôi đã điền trước khi đi xuống lòng đất hỏi những câu hỏi thông thường về bệnh tiểu đường, đau thắt ngực và chứng sợ bị nhốt, nhưng bên dưới chúng là một câu hỏi khác: 'bạn có khó đổ mồ hôi trong không khí không? nhiệt độ cao?' Tôi tự tin đánh dấu 'không'. Chắc chắn rồi, khi chúng tôi đến được mặt đá, tôi đã ướt đẫm mồ hôi và những người khác cũng vậy.
Trên bề mặt, nhiệt độ gần bằng 0 và dự báo bão mùa đông sẽ đến vào ngày hôm sau, nhưng ở dưới đây nhiệt độ lên tới hơn 40°C và tất cả các thợ mỏ đều mặc quần short và áo phông màu cam. Một trong những chàng trai đưa cho chúng tôi một ít thuốc lá hít: 'Nó sẽ giúp đầu óc cậu tỉnh táo hơn.' Ở dưới này họ làm việc theo ca 11,5 giờ. Khi chúng tôi đến đầu mỏ, tôi phát hiện một chiếc máy đang đào. Con này khác một chút so với con đang chạy đi dưới Cheshire, giống một con khủng long ngồi xổm đang cúi mình trước con mồi hơn. Người điều

khiển đã sử dụng bộ điều khiển của mình để kéo nó trở lại khỏi mặt đá. Nó kêu lạo xạo về phía sau và chúng tôi đứng dưới bộ hàm khổng lồ của nó.
“Tôi gọi đây là kết thúc giận dữ,” một trong những người thợ mỏ nói, khoa tay múa chân trước những chiếc trống răng đang quay. 'Chúng quay với tốc độ 600 feet mỗi phút. Xương va thịt? Nó sẽ biến chúng thành thịt băm. Thành thật mà nói, nếu bạn cản đường khi nó đang chạy thì nó thậm chí sẽ không biết bạn đã ở đó.'
Tôi đã được trao một trong những mũi khoan. Nó nặng và rất nóng, trong giây lát tôi đã đoán rằng đây là sức nóng do ma sát, như thể nó vừa được tác động lên mặt đá, nhưng sau đó tôi chợt nhận ra rằng, không, nó nóng vì nhiệt độ xung quanh cũng vậy. . Tuy nhiên, một trong những thợ mỏ cho biết, đây thực sự là một khu vực tương đối mát mẻ của mỏ. Những nơi khác - đặc biệt là đầu phía nam đã được đào lên cho đến vài năm trước - thậm chí còn nóng hơn, theo một số tài liệu vào những năm 50.
“Thật khủng khiếp – miền nam,” một người trong số họ nói. 'Bạn bước ra phía trước và có những người hâm mộ dồn ép vào bạn và trong giây lát bạn cảm thấy lạnh. Sau đó 30 giây bạn sôi lên và bạn nhận ra họ vừa đẩy không khí ra khỏi cơ thể bạn.”
Có lẽ bạn chưa nhận ra rằng vẫn còn có những người làm việc ngầm ở đất nước này trong những điều kiện như thế này. Tôi đã không làm vậy. Tôi đã nghe kể về tính chất nguy hiểm của việc khai thác mỏ ở những nơi như Trung Quốc, về những nơi như mỏ Mponeng, theo câu chuyện kể rằng, phải tốn rất nhiều công sức để ra vào đến mức một số thợ mỏ bất hợp pháp cuối cùng phải sống ở dưới đó. sâu, làn da của họ chuyển sang màu xám và ma quái. Điều kiện ở đây gần như xa xỉ so với các mỏ khác, hay các mỏ than và quặng sắt cũ quanh đây, nơi đàn ông thường bị chôn sống hoặc bị giết trong các vụ nổ, nơi công nhân chết trẻ - phổi của họ lốm đốm bụi mỏ . Ngay cả như vậy; chúng ta vẫn ở đây, nghiền nát những tảng đá giống nhau để lấy khoáng chất làm nhiên liệu và nuôi sống chúng ta.
Các đường hầm của mỏ Boulby trông chẳng khác gì những hang động rộng rãi, mát mẻ ở Cheshire. Trần nhà thấp hơn, thấp hơn nhiều và chúng đang dần sụp xuống, ép xuống dưới sức nặng của hàng ngàn tấn đất đá phía trên. Có những thanh thép trên mái nhà, nhưng

thật đáng lo ngại, thứ thực sự giữ nó ở đúng vị trí là những thanh gỗ, xếp chồng lên nhau như trò chơi Jenga giữa thép và muối.
'Muối giống như nhựa. Theo thời gian nó sẽ chảy. Hy vọng là trong một thời gian dài." Steve Shaw, người hướng dẫn của tôi trong ngày, đã phát hiện ra tôi đang lo lắng nhìn những thanh xà gỗ chắn giữa chúng tôi và sự lãng quên và đang cố gắng trấn an tôi. Nhưng quan niệm cho rằng theo thời gian những đường hầm này sẽ bị nén vào hư vô như nhựa, khi muối nhấn chìm thang máy, ô tô và tất cả máy móc bị bỏ lại, sẽ tiêu hóa một chút khi bạn bị mắc kẹt dưới lòng đất hơn một nghìn mét.
Steve ở độ tuổi sáu mươi và đã làm việc ở đây từ những năm 1970, khi mỏ này thuộc sở hữu của ICI, cùng với rất nhiều loại vải công nghiệp-hóa chất khác của Anh. Anh ta có vẻ mặt nhăn nhó và bộ râu trắng khiến anh ta trông giống một ngư dân hơn là một thợ mỏ, điều này hóa ra lại khá phù hợp với cha và ông nội anh ta trước đây từng đánh bắt cá. bờ biển ở đây để săn cua và tôm hùm. Steve đã dành phần lớn sự nghiệp của mình ở ngoài khơi, nhưng trong trường hợp của anh, ở sâu dưới đáy biển, vì các đường hầm của mỏ này trải dài như những đường tua từ trục thang máy ở Boulby, theo các mạch muối kéo dài hàng dặm bên dưới Biển Bắc.
Hành trình đến mỏ khai thác của tôi đã bắt đầu vài giờ trước đó bằng chuyến đi cáp treo kéo dài 7 phút 7 mét một giây đáng kinh ngạc. Đến cuối trục, chúng tôi leo lên một chiếc xe tải cũ và đi một lúc tưởng chừng như chẳng đi đến đâu. Động cơ kêu khò khè, không thể ngừng quay. Nó, giống như mọi thứ khác ở dưới đây, bị đóng thành bánh hoàn toàn và bám đầy bụi muối - một loại sương mù màu xám hơn, bẩn hơn nhưng không kém phần thơm ngon bám vào không khí ở Winsford.
Bên cạnh chúng tôi và những người thợ mỏ trên thang máy là một nhóm lớn sinh viên trông còn lạc lõng hơn cả tôi. Họ đang đến thăm một trong những trung tâm khoa học đặc biệt nhất trên thế giới. Vì ở đó, trong một số đường hầm khai thác cũ của Boulby là một loạt phòng thí nghiệm nơi các nhà khoa học từ khắp nơi trên thế giới đến làm việc trên những thí nghiệm chỉ có thể được thực hiện trong môi trường này. Ví dụ: nếu sự sống có thể tồn tại trong lớp muối sâu bên trong hành tinh này, liệu chúng ta có thể tìm thấy thứ tương tự ở sâu

dưới bề mặt Sao Hỏa không? Trong muối, chúng ta có thể tìm thấy manh mối đầu tiên về sự sống ngoài hành tinh. Một phòng thí nghiệm khác đang thực hiện các thí nghiệm phát hiện vật chất tối – những thí nghiệm sẽ bị gián đoạn bởi bức xạ và tia vũ trụ ở cấp độ bề mặt.
“Vật chất tối,” Steve nói, đôi mắt anh nhìn xa xăm. ‘Bây giờ đó là chuyện khác… Tuy nhiên, họ vẫn chưa tìm thấy nó.’
Chúng tôi đã đi theo các đường hầm hướng về phía khu vực đang hoạt động của mỏ, càng đi sâu hơn và càng nóng hơn. Những đường ống thấp treo trên trần nhà dọc theo đường dây điện thoại, dây cáp điện và cảm biến địa chấn được thiết kế để phát hiện ngay cả những chuyển động nhỏ nhất trên trái đất, đủ nhạy để cảm nhận được một trận động đất ở phía bên kia của thế giới. Chúng tôi đã đi qua bờ biển, xuyên qua một hành lang không có gì đặc biệt đầy bụi muối tro, băng qua những chiếc quạt kêu ầm ĩ và qua những chốt gió được thiết kế để giữ cho oxy lưu thông qua mỏ. Tất cả chỉ là bóng tối, thường xuyên bị phá vỡ bởi ánh sáng xanh âm u đánh dấu nơi trú ẩn an toàn - những căn phòng kín gió, nơi chúng tôi sẽ phải ẩn náu nếu có sự cố xảy ra: sập hang hoặc rò rỉ gas.
Khi chúng tôi đến đầu mỏ, tôi được cảnh báo rằng đằng sau bất kỳ mặt đá nào trong số này đều có thể ẩn giấu một túi khí – phần còn lại của chất hữu cơ bị mắc kẹt và nén dưới lòng đất hàng trăm triệu năm trước. Thỉnh thoảng, những túi khí này có thể thổi mà không báo trước, phát nổ với lực mạnh đến mức chúng trút hàng trăm tấn đá và thiết bị nặng vào bất kỳ ai đứng gần đó. Cách đây vài năm, một thợ mỏ làm việc ở đây đã thiệt mạng trong một tai nạn như vậy.
Steve nhấc một tảng đá màu xám lên khỏi mặt đất và đưa cho tôi. Polyhalit. Lúc đầu, nó khá ấn tượng vì phiến đá cổ này trông giống như bất kỳ tảng đá nào khác. Sau đó Steve chiếu ngọn đuốc của mình qua nó. Đột nhiên nước da của nó thay đổi hoàn toàn và nó trở nên trong trẻo một cách tinh tế. Người ta thường gọi loại đá trong mờ này là quặng, nhưng điều đó không hoàn toàn chính xác vì quặng cần được xử lý. Khi bạn khai thác vàng, hơn 99,99% đá sẽ bị lãng phí; với polyhalite, mỗi tấn đá sẽ trở thành một tấn sản phẩm. Khoáng chất duy nhất có thể so sánh được là muối.
Chúng tôi bắt đầu cuộc hành trình dài trở về từ mặt đá và khi chiếc xe tải leo lên từ tầng polyhalite đến vùng đá muối, sức nóng dần giảm đi.

Khi chúng tôi tới thang máy, mồ hôi đã khô. Khi chúng tôi lên tới bề mặt, nhiệt độ đã gần như đóng băng. Đó là một ngày đầu tháng 12, cơn bão mùa đông Barra đang tàn phá miền bắc nước Anh và đột nhiên người ta cảm thấy gần như không thể tưởng tượng được rằng ngay lúc này lại có những thợ mỏ đang đổ mồ hôi sâu dưới Biển Bắc. ở nhiệt độ nóng hơn sa mạc để khai thác một tảng đá mà hầu hết mọi người chưa từng nghe đến trước đây.
Theo thời gian, có lẽ điều đó sẽ thay đổi. Kể từ khi mỏ chuyển từ potash sang polyhalite, đá khai thác được nghiền thành ngũ cốc và bán trên khắp thế giới. Boulby polyhalite được rắc trên mặt đất ở Trung Quốc, Brazil, Mỹ và khắp châu Âu. Ngày nay, những tảng đá này được dùng làm phân bón cho các sân tennis tại Wimbledon. Khoáng sản ít người biết đến này đang trở thành một trong những điều mới thú vị nhất trong nông nghiệp và có một điều gì đó giống như một cơn sốt vàng đối với thứ này. Anglo-American, công ty khai thác từng hợp tác với ICI để khai thác kali ở đây, gần đây đã mua Sirius, một công ty có quyền khai thác phần lớn polyhalite ở những nơi khác gần Boulby, và có một kế hoạch táo bạo để thực hiện điều đó.
Vì đây là giữa công viên quốc gia và vì việc xây dựng mỏ cũng có nghĩa là xây dựng các cơ sở chế biến rộng lớn cũng như hậu cần để đưa thành phẩm đến cảng gần đó, nên Anh-Mỹ đang đào một đường hầm dài 23 dặm từ trục mỏ của nó gần Whitby đến các bến cảng ở Teesside, dọc theo đó các khối đá khai thác sẽ được vận chuyển trước khi được xử lý và vận chuyển đi nơi khác. Khi hoàn thành, đây sẽ là đường hầm hoạt động dài nhất ở Vương quốc Anh (chỉ có Đường hầm eo biển dài hơn). Những điều so sánh nhất vẫn tiếp tục: mỏ dự kiến sẽ có tuổi thọ 100 năm; sau khi hoàn thành, nó sẽ còn sâu hơn cả Boulby và Zechstein polyhalite sẽ trở thành một trong những mặt hàng xuất khẩu khoáng sản lớn nhất của đất nước này.
Tại địa điểm nơi Anh-Mỹ đang đánh chìm các trục thang máy khổng lồ của mình, đáng ngạc nhiên là có rất ít thứ được nhìn thấy trên bề mặt. Tuy nhiên, đó mới là vấn đề: mỏ Woodsmith, như tên gọi của nó, được cho là một trong những mỏ kín đáo, thân thiện với môi trường nhất trong lịch sử. Maurice Rankin, một Ulsterman, người đã làm việc cho dự án từ những ngày đầu, đã đưa tôi đi xa nhất có thể, điều mà hiện tại thì chưa. tất cả cho đến nay. Chúng tôi đứng trong trục chính

cách mặt đất khoảng trăm mét và nhìn lên những đám mây bay qua trên đầu. Sau đó, chúng tôi lái xe băng qua cánh đồng thạch nam, đi theo con đường mà đường hầm sẽ đi ra biển. Và khi làm như vậy, chúng tôi, và cả đường hầm, chỉ đơn giản là củng cố những truyền thống lâu đời đã có từ xa xưa của loài người - truy tìm và đi qua những tuyến đường cổ xưa mà người dân ở đây từng đi theo để vận chuyển than, đá sắt và muối.

Maurice và tôi đến bến tàu ở Teesside và đứng gần miệng đường hầm đang bị nhàm chán dẫn xuống mỏ mới ở Whitby. Địa điểm Wilton nơi Anh-Mỹ sẽ xử lý và vận chuyển polyhalite của họ từng là một trong những nhà máy hóa chất chính của ICI. Đây từng là trung tâm của ngành công nghiệp hóa chất của Anh trong một thời gian. Nước muối được bơm từ lòng đất đến các nhà máy để chế biến thành muối hoặc bơm vào chuỗi cung ứng hóa chất. Bên kia sông Tees ở Billingham là nhà máy Haber-Bosch, nơi ICI sản xuất amoniac dùng làm chất nổ trong chiến tranh và làm phân bón trong thời bình, một địa điểm ngoạn mục vào thời đó đến nỗi nó đã giúp truyền cảm hứng cho tầm nhìn của Aldous Huxley về viễn cảnh đen tối trong thời bình. *Thế giới mới dũng cảm* . Dọc theo bờ biển là nhà máy thép Redcar cũ, đã đóng cửa chỉ vài năm trước và hiện đang được tái phát triển thành một trong những trung tâm thu giữ carbon của Anh. Có những công ty khác hy vọng xây dựng ở đây. Một người có ý định khai thác kim loại đất hiếm ở Tanzania và vận chuyển quặng tới đây để chế biến. Một kế hoạch khác là xây dựng một nhà máy lọc lithium. Tại sao ở đây? Bởi vì khu vực này có ngành công nghiệp hóa chất lâu đời. Di sản của muối vẫn còn tồn tại.

Một trong những đặc điểm nổi bật của Thế giới Vật chất là sự thiếu vắng con người rõ rệt, cho dù đó là trong một nhà máy lọc dầu hay trong các nhà máy tắt đèn ở Đài Loan, nơi họ biến các tấm silicon thành chip. Hầu hết các công nhân ở đây đều ở đâu đó trong buồng điều khiển và nhìn chằm chằm vào màn hình, kết quả là họ nằm dưới mặt đất. Ở mức độ này, thực sự khá khó để biết địa điểm nào vẫn còn hoạt động và địa điểm nào đã có lịch sử cổ xưa. Chúng tôi lái xe ngang qua những bể chứa khí đốt cũ và những mảnh đất bỏ hoang không thể xây dựng được vì sợ làm ảnh hưởng đến chất thải độc hại được chôn ở đó. Nếu giấc mơ của Anh-Mỹ thành hiện thực, đến một

lúc nào đó những bến tàu này sẽ tràn ngập những con tàu xuất khẩu polyhalite; Nước Anh sẽ bắt đầu nuôi sống thế giới.
“Thật buồn cười,” Maurice nói. 'Đây là một khu công nghiệp, nhưng tôi đã nhìn thấy những con nai ở đây và đủ loại động vật hoang dã mỗi lần tôi đến thăm.' Như để chứng minh quan điểm của mình, một con thỏ lớn lao qua đường. Chúng tôi ra khỏi xe và tôi chụp ảnh nó đang nằm phơi nắng trên bãi cỏ trước một đống than và một đường ống lấy xăng từ Biển Bắc. Bên kia đường là một con kênh dẫn nước từ nơi từng là nhà máy hóa chất cũ chảy vào Sông Tees.
Maurice nói: “Người ta nói đây từng là con sông ô nhiễm nhất nước Anh”. Nước cuồn cuộn chảy ra từ các ống xả lớn. Nó trong và sạch, nhưng không khó để tưởng tượng đây là một dòng nước thải sủi bọt đổ ra biển.
Vào khoảng thời gian chúng tôi đến thăm, một thảm kịch môi trường mới đang diễn ra. Dọc theo bờ biển chạy 30 dặm về phía nam đã xảy ra hiện tượng sinh vật biển 'chết hàng loạt'. Có những cảnh tượng tận thế trên các bãi biển Whitby và Boulby, nơi trải thảm với hàng trăm nghìn con cua và tôm hùm chết và sắp chết. Các báo cáo ban đầu từ các nhà khoa học của chính phủ cho rằng rất có thể đó là kết quả của việc tảo nở hoa làm nghẹt thở môi trường sống biển, nhưng các nhà môi trường đã chỉ ra một điều khác. Trước khi xây dựng một cảng tự do để chuẩn bị cho tất cả các chuyến hàng lithium và polyhalite sắp tới, phần lớn lòng sông đã được nạo vét. Một số nhà khoa học cho biết các chất ô nhiễm như pyridine, vốn từng phun ra từ các đường ống này từ các nhà máy ở Teesside, đã được giải phóng khỏi trầm tích để chảy ra ngoài theo thủy triều.
Trong nỗ lực nhằm vực dậy nền kinh tế công nghiệp của khu vực, liệu chính quyền địa phương có đánh thức lại những con quỷ độc hại từng khiến nơi đây trở thành một trong những môi trường u ám nhất nước Anh? Hay đó chỉ là một sự trùng hợp đáng tiếc, cuộc tranh cãi chỉ là một trong những phản ứng tức thời đối với các dự án xây dựng lớn?
Maurice và tôi nán lại trên bờ nhìn dòng nước cuồn cuộn chảy ra biển. Sau đó, đột nhiên, một con hải cẩu nhô đầu lên khỏi mặt nước và nhìn thẳng vào mặt cả hai chúng tôi. Nó biến mất trước khi tôi kịp chụp ảnh.

Càng đi sâu vào Thế giới Vật chất, tiếng vang càng lớn. Khi bạn đọc điều này, các tế bào của cây chloralkali ở đâu đó không xa bạn sẽ kêu vo vo, biến nước mặn thành một hỗn hợp hóa chất. Đây là xút, nếu không có nó sẽ không có giấy - vì chúng ta sử dụng hóa chất ăn mòn để nghiền gỗ thành sợi. Đây là hydro clorua, nếu không có nó thì sẽ không có tấm pin mặt trời hoặc chip silicon (hãy nhớ vai trò của nó trong quy trình của Siemens). Đây là clo để làm sạch nước của chúng ta… Nếu phần lớn điều tạo nên con người chúng ta là quyết tâm biến chất này thành chất khác, thì muối là một trong những công cụ quan trọng nhất của chúng ta. Đâu đó gần nhà máy điện phân đó là một nhà máy khác biến nước muối thành tro soda, dùng làm chất trợ biến cát thành thủy tinh. Ở một nơi khác, một nghệ nhân đang ướp phô mai trong dung dịch nước muối để làm cho phô mai cứng và mặn. Và một đầu bếp đang rắc bột bay hơi từ nước biển lên thức ăn, giống như cách người ta đã làm trên đỉnh vách đá ở Boulby hàng nghìn năm trước.

Có một cụm từ đôi khi bạn nghe thấy: nếu nó không phát triển, nó sẽ bị khai thác. Tuy nhiên, muối là chất chúng ta khai thác để giúp chúng ta phát triển – để cung cấp phân bón cho cây trồng và là nguyên liệu tạo nên thuốc của chúng ta. Ngày nay có rất nhiều hóa chất khác. Quả thực, như chúng ta sẽ sớm thấy, hóa học hiện nay bị chi phối bởi những gì chúng ta chưng cất và tinh chế từ dầu và khí đốt. Dù vậy, vẫn có lý do để chúng tôi vẫn đi trên con đường muối cũ. Có lý do tại sao rất nhiều nhà máy hóa chất và dược phẩm của chúng ta vẫn nằm trên các tấm halit. Có lý do khiến các tài liệu cổ như Kinh *về muối và sắt của Trung Quốc* được coi là đúng. Trong phần lớn lịch sử, những người kiểm soát những chất này đã kiểm soát thế giới.

Một phần ba

SẮT

7

Bạn không có một đất nước

MARIUPOL, Vương quốc Anh

Vào ngày 24 tháng 2 năm 2022, Enver Tskitishvili, tổng giám đốc của Nhà máy Gang thép Azovstal ở Mariupol, đã đưa ra mệnh lệnh mà ông hy vọng sẽ không bao giờ đưa ra.

Đầu ngày hôm đó, pháo binh Nga đã bắt đầu bắn phá thành phố, pháo kích vào các đường phố và tòa nhà để bắt đầu một trong những cuộc bao vây tuyệt vọng nhất của cuộc chiến. Những ngày tiếp theo sẽ mang đến những cuộc tấn công tiếp theo: một cuộc đổ bộ lên bờ biển lân cận, một cuộc tấn công của xe tăng và quân đội từ phía đông. Trong những tuần tới, hàng chục nghìn người sẽ thiệt mạng và bị thương, toàn bộ khối nhà của thành phố sẽ bị san bằng và các công trình Azovstal sẽ trở thành tâm điểm của cuộc kháng chiến của Ukraine. Nhưng trước tất cả những điều đó, Tskitishvili có một nhiệm vụ cấp bách và khó chịu mà anh phải thực hiện. [1]

Một người đàn ông trung niên có giọng nói nhẹ nhàng gốc Georgia - đôi mắt đeo kính gọng dày, mái tóc màu xám cắt sát - Tskitishvili đã dần dần thăng tiến trong các cấp bậc, quản lý các nhà máy lớn hơn bao giờ hết cho đến khi đạt được ít nhất một trong ngành thép. trong những vị trí quan trọng nhất của tất cả. Azovstal có một danh tiếng huyền thoại, danh tiếng một phần bắt nguồn từ những gì xảy ra trong Thế chiến thứ hai.

Việc Ukraine là một trong những nước sản xuất sắt thép phát triển nhanh nhất thế giới đã không thoát khỏi sự chú ý của Adolf Hitler. Năm 1941, ông xâm chiếm đất nước này, để mắt đến sự dồi dào về vật chất của đất nước: trữ lượng sắt và than dồi dào ở phía đông cũng như các mỏ mangan dày đặc ở Nikopol, rất quan trọng để sản xuất các hợp kim thép bền nhất.

Nhưng sau khi quân Đức tiến vào lãnh thổ Ukraina, họ nhận ra rằng cuộc xâm lược thực ra chỉ là một phần đơn giản. Khi những người lính xung kích đến gần Mariupol, họ phát hiện ra người dân địa phương đang trong quá trình tháo dỡ Azovstal nhằm khiến nó trở nên

vô dụng. Khi Đức Quốc xã cố gắng đưa nó hoạt động trở lại, các công nhân luyện thép đã bắt đầu một chiến dịch phá hoại bí mật, đốt lửa và gây ra các vụ nổ 'vô tình', làm hư hỏng lò cao và cản trở nỗ lực sản xuất kim loại của kẻ thù.
Sự chiếm đóng là một thử thách đến nỗi ngay trước khi Wehrmacht rút lui vào năm 1943, họ đã phá hủy nhà máy Azovstal vì cho rằng không ai có thể khôi phục lại được. Dựa trên những bức ảnh sau hậu quả, họ đã thực hiện một công việc khá kỹ lưỡng, giảm bớt bộ silo và nhà kho bê tông đáng tự hào một thời xuống chỉ còn là một bộ xương. Tuy nhiên, bằng cách nào đó, trong vòng một năm, các lò nung đã hoạt động trở lại; đến năm 1945, nhà máy đã đạt đến sản lượng trước chiến tranh. Azovstal là nơi như thế; người dân Mariupol là những loại người như vậy.
Trong những thập kỷ tiếp theo, qua thời kỳ Xô Viết và hơn thế nữa, thị trấn này và hai nhà máy thép của nó - công trình Ilych ở phía bắc, Azovstal ở phía nam - đã trở thành một trong những nguồn cung cấp nguyên liệu vô cùng quan trọng này trên thế giới.
Không phải mọi thứ trên thế giới đều được làm bằng thép, nhưng gần như mọi thứ trên thế giới đều được làm bằng máy móc làm bằng thép. Cư dân các nước giàu ít dành thời gian để suy nghĩ về những điều như vậy; thực sự, vì sản xuất thép bẩn và tốn nhiều năng lượng nên các nước giàu ngày nay có thói quen đóng cửa các nhà máy thép, giảm sản xuất trong nước và nhập khẩu thành phẩm từ các quốc gia nơi lượng khí thải carbon không gây tranh cãi nhiều. Họ lý luận rằng thép – khi nhìn vào những bức ảnh về lò cao, nơi các công nhân mặc quần áo cách nhiệt đổ ra kim loại lỏng, nóng – chắc chắn đã là quá khứ.
Tuy nhiên, hãy suy nghĩ về việc chúng ta sử dụng sắt và thép (một hợp kim của sắt và cacbon) và bạn sẽ nhanh chóng thấy ý tưởng đó vô lý đến mức nào. Đây là những kim loại cuối cùng - thực sự, chúng tạo thành gần như tất cả các kim loại trên thế giới của chúng ta. Và hãy suy nghĩ một chút xem kim loại thực sự *là gì* . Trong khi bê tông và đá giòn và dễ bị nứt và vỡ thì cấu trúc nguyên tử của kim loại lại có độ dẻo dai kết hợp với tính dẻo. Chúng có thể được đúc và rèn thành các hình dạng và quan trọng nhất là thành *các công cụ* .

Nếu điều định nghĩa con người là khả năng cộng tác và sử dụng các công cụ thì sắt thép là một phần tạo nên con người chúng ta. Và nếu cát là vải cho phần lớn thế giới và muối là thành phần kỳ diệu giúp chúng ta biến đổi thế giới, thì sắt là thứ cho phép chúng ta làm được nhiều việc, cho dù đó là đi đến nhiều nơi, *xây* dựng, tạo ra sản phẩm hay những vấn đề tương tự. , giết nhau. Sắt thép là sợi chỉ chung. Sắt không phải là kim loại đầu tiên chúng ta học nấu chảy (như bạn sẽ thấy trong phần sau) nhưng ngày nay nó là kim loại nguyên mẫu, chiếm khoảng 95% tổng số kim loại chúng ta sản xuất và sử dụng. Thật vậy, nó rất cơ bản đối với cuộc sống của chúng ta và nó cũng là thước đo tốt về mức sống như GDP. [2]

Nếu bạn sống ở một nền kinh tế phát triển như Mỹ, Nhật Bản, Anh hoặc hầu hết châu Âu, bạn có khoảng 15 tấn thép trong đời. Thép này thường khuất tầm nhìn, được bọc trong bê tông hoặc giấu bên dưới lớp nhựa. Tỷ số này thay đổi một chút giữa các quốc gia, tùy thuộc vào mức độ đô thị hóa (các khu dân cư dày đặc hơn có xu hướng có nhiều thép hơn trên mỗi foot vuông) hoặc phụ thuộc vào thủy điện thay vì nhiệt điện (có rất nhiều thép trong bê tông cốt thép của đập). Nhưng đối với hầu hết các nền kinh tế phát triển, con số này là gần 15 tấn mỗi người - trong ô tô, nhà cửa, bệnh viện và trường học mà bạn tin tưởng, trong kẹp giấy trong văn phòng của bạn và trong vũ khí của quân đội nước bạn. [3]

Sắt là xương của xã hội chúng ta. Chúng tôi xây dựng những cây cầu và tòa nhà từ nó, chúng tôi sử dụng nó để gia cố bê tông, chúng tôi biến nó thành ô tô và xây dựng trung tâm dữ liệu từ nó. Chúng ta đã sử dụng nó để tạo ra các công cụ và thiết bị thời trang từ hàng nghìn năm trước và chúng ta sử dụng nó để tạo ra các công cụ và thiết bị thời trang ngày nay, cho dù đó là đường ray mà tàu cao tốc sẽ chạy hay khung của những cỗ máy tiên tiến khắc hoa văn lên đó. Chip silicon. Không có kim loại nào khác hữu ích đến vậy, với sự kết hợp hoàn toàn giống nhau giữa sức mạnh, độ bền và tính sẵn có.

Chúng ta sẽ quay lại hai đặc điểm đầu tiên trong số những đặc điểm đó ngay sau đây nhưng hiện tại, đáng để suy ngẫm về đặc điểm cuối cùng, vì có lẽ bạn đã nhận thấy rằng trong Thế giới Vật chất, chỉ cần một vật chất thôi là chưa đủ. xuất sắc về những gì nó làm được nếu

chúng ta không thể sản xuất và phổ biến nó. Những vật liệu này quan trọng vì chúng chạm vào cuộc sống của chúng ta hàng ngày.
Và sắt thực sự có ở khắp mọi nơi. Nó chảy qua cơ thể chúng ta trong các tế bào hồng cầu. Nó là nguyên tố chính trong lõi hành tinh và là kim loại phổ biến thứ hai trong lớp vỏ trái đất (ở mức 5%, sau nhôm là 8%). Chỉ cần nhìn vào bảng xếp hạng các chất chúng ta đào, cho nổ và bơm ra khỏi bề mặt hành tinh mỗi năm. Cát sỏi: 43 tỷ tấn; dầu khí: 8,1 tỷ tấn; than: 7,7 tỷ tấn; quặng sắt: 3,1 tỷ tấn. Và giống như hầu hết các vật liệu đó, sự thèm muốn của chúng ta đối với kim loại này không có dấu hiệu giảm bớt: sau khi sụt giảm vào năm 2020 trong thời kỳ đại dịch, sản lượng quặng sắt toàn cầu đã đạt mức cao kỷ lục vào năm 2021.4

Sắt và thép

Phần lớn trong số đó được biến thành thép, mặc dù có tên như vậy nhưng chỉ đơn giản là một trong nhiều loại sắt. Manh mối ở đây là hàm lượng carbon. Ở một đầu của quang phổ là gang hoặc gang (được đặt tên như vậy bởi vì khi nó được tạo ra lần đầu tiên, nó sẽ đặt trong một loạt các kênh và khuôn giống như một lứa lợn con đang được mẹ chúng cho bú). Đây là một kim loại giòn có khoảng 3-4% cacbon. Ở đầu kia là sắt rèn, đủ mềm để đập bằng búa và rất tinh khiết, với lượng carbon cực nhỏ. Ở giữa là thép, thường có ít hơn 2% carbon (và thông thường, trong trường hợp của hầu hết các loại thép nhẹ, chẳng hạn như những loại thép từng được sản xuất từ các nhà máy ở Azovstal, ít hơn một chút; dưới 1%) .
Nhờ những điều kỳ diệu của khoa học vật liệu, giờ đây chúng ta đã hiểu rõ tại sao sự chênh lệch tưởng như nhỏ về hàm lượng carbon lại tạo ra sự khác biệt lớn đến vậy: trong thép, các nguyên tử carbon đó nằm gọn gàng giữa các nguyên tử sắt tạo ra một mạng lưới chắc chắn, không thể di chuyển. Quá nhiều cacbon và cấu trúc mạng tinh thể không hoàn hảo nên kim loại dễ bị vỡ (gang). Quá ít, các nguyên tử sắt có thể trượt lên nhau mà không có nhiều lực cản (sắt rèn). Ngược lại, bạn muốn bàn ủi của mình gần như nguyên chất nhưng không hoàn toàn nguyên chất.
Nhưng vì không ai hiểu được điều này cho đến tận gần đây, nên lịch sử nghề rèn sắt chủ yếu là câu chuyện thử và sai, của các nghệ nhân

truyền lại kỹ thuật qua nhiều thế hệ và đôi khi thêm vào những bước phát triển thần bí của riêng họ. Một người thợ sắt giỏi, có khả năng đập một khối gang không mấy hứa hẹn thành một thanh kiếm thép chắc chắn (đập vỡ kim loại, ngày nay chúng ta biết, là một cách để loại bỏ một phần carbon), đã trở thành một trong những công dân được đánh giá cao nhất của bất kỳ vương quốc nào. Quả thực, những người như vậy thường là người tạo nên sự khác biệt giữa chiến thắng và thất bại trong chiến tranh. Người Hittite cổ đại của Syria nổi tiếng về đồ kim loại, cũng như các thợ rèn kiếm Samurai ở Kyoto và các nhà chế tạo vũ khí ở Damascus, những người có thanh kiếm có thớ thép mịn đến mức thậm chí ngày nay vẫn chưa có ai tìm ra cách tái tạo nó. fn1

Chỉ đến giữa thế kỷ 19, chúng ta mới nghĩ ra cách sản xuất thép hàng loạt, khi Ngài Henry Bessemer thiết kế cái gọi là máy chuyển đổi, dùng không khí để thổi sắt nóng chảy bằng không khí để loại bỏ vừa đủ lượng carbon khỏi hỗn hợp. Hai địa danh giúp kể câu chuyện này là Tháp Eiffel ở Paris và Cầu Forth ở Scotland. Cả hai đều được xây dựng vào những năm 1880, hoàn thành vào năm 1889 và đều lập kỷ lục mới (công trình kiến trúc cao nhất thế giới; nhịp cầu đúc hẫng đơn dài nhất thế giới). Có những điểm tương đồng bề ngoài khác: cả hai đều cần khung kim loại của mình được sơn đi sơn lại liên tục để chống ăn mòn.

Nhưng trong khi Cầu Forth sử dụng thép thì Tháp Eiffel được làm bằng sắt rèn. Thép Bessemer đã được sản xuất trong vài thập kỷ nhưng Gustave Eiffel đơn giản là không tin tưởng vào nó. Và kết quả cuối cùng là Tháp Eiffel đã sử dụng nhiều sắt hơn trong các nhịp ngắn hơn mức cần thiết đối với thép - và cao như nó là, nó có khả năng vẫn cao hơn. Thật vậy, bạn có thể nhét vừa sáu Tháp Eiffel trong cấu trúc chính của Cầu Forth. fn2

Trong những năm tiếp theo, sắt nguyên chất sẽ nhường chỗ cho thép: đường ray thép có tuổi thọ cao hơn đường ray sắt, dụng cụ bằng thép chắc chắn hơn sắt, các thanh thép cho phép các kỹ sư thu hẹp những khoảng trống rộng hơn.

Đây có thể chỉ là những cải tiến nhỏ nhưng chúng nhanh chóng trở thành một cuộc cách mạng. Một cách để hiểu rõ điều này là xem xét công cụ khiêm tốn nhất: cái cày. Phần lớn câu chuyện về nền văn

minh gắn liền với câu chuyện về thực phẩm. Khả năng phát triển dân số, làm việc và phát triển cũng như dành thời gian cho bản thân khỏi công việc cực nhọc và lao động chân tay phụ thuộc vào khả năng tự nuôi sống bản thân mà không cần phải tự làm công việc đồng áng đó. Chúng ta càng sản xuất được nhiều lương thực trên mỗi giờ lao động thì càng ít người phải làm việc trên đồng ruộng và càng có nhiều người có thể rời đi và theo đuổi các công việc khác. Nói cách khác, phần lớn những gì bạn có thể gọi là cuộc sống hiện đại phụ thuộc vào những cải tiến ngày càng tăng trong nông nghiệp qua nhiều năm. Một số trong đó là do kỹ thuật trồng trọt tốt hơn. Một phần là do sự sẵn có của phân bón, như chúng ta đã thấy ở phần trước. Nhưng nó cũng quay trở lại với một thứ khác: những công cụ ngày càng tốt hơn.

Và trong số những công cụ đó, ít công cụ nào quan trọng bằng cái cày. Một chiếc máy cày tốt giúp chuẩn bị mặt bằng cho việc gieo hạt, phá bỏ lớp đất mặt, nhổ cỏ dại và tạo ra một luống đầy hứa hẹn cho hạt giống – đặc biệt là khi có thêm tấm ván khuôn, làm đảo lộn đất sau khi được cắt. Trong phần lớn lịch sử, nông dân sẽ cày bằng gậy gỗ. Cuối cùng, họ đã thêm các đầu kim loại vào gỗ và đến đầu thế kỷ 19, những thanh gỗ đó đã nhường chỗ cho những chiếc máy cày bằng gang có tích hợp ván khuôn. Đây là một sự thay đổi mang tính chuyển đổi: vì sắt cứng hơn gỗ rất nhiều nên thời gian để một người cày xới một ha đất giảm từ 20 giờ xuống còn 15 giờ.

Nhưng máy cày thép đã tiến thêm một bước nữa. Họ có thể vượt qua nền đất cứng, đầy đá, nơi mà các đối tác bằng gang của họ không thành công. Chúng cần ít bảo trì hơn nhiều - thực tế, chiếc máy cày thép được sản xuất hàng loạt đầu tiên do John Deere, người đã đặt tên cho doanh nghiệp kinh doanh thiết bị nông nghiệp phổ biến, sản xuất, được tiếp thị là máy tự mài. Bí quyết ở đây là phủ một tấm thép cứng xung quanh một lõi mềm hơn để tạo ra một công cụ có thể hấp thụ chấn động khi nó gặp phải đá, thay vì bị gãy như gang đôi khi vẫn làm. Kết quả đạt được ngay lập tức: đột nhiên khoảng thời gian cần thiết để cày xới một ha đất giảm xuống chỉ còn ba giờ.

Tất nhiên, có những cải tiến khác diễn ra cùng thời điểm: bừa răng, máy khoan thép để gieo hạt, máy liên hợp để thu hoạch và máy đập lúa - và đây là trước khi chúng ta nhận thấy tác động theo cấp số nhân của máy móc chạy bằng than và sau đó là dầu. Nhưng ngay cả

trước đó, những công cụ này, hầu hết được rèn từ thép, đã cắt giảm đáng kể lượng thời gian cần thiết để thu hoạch một lượng lương thực nhất định.
Trong một trang trại điển hình ở New England vào năm 1800, với hầu hết các công cụ bằng gỗ, chỉ mất hơn bảy phút lao động để thu được một kg ngũ cốc. Vào năm 1850, với các công cụ bằng gang, công việc tương tự chỉ mất chưa đầy ba phút. Đến năm 1900, với các dụng cụ bằng thép, tốc độ này là chưa đến 30 giây cho mỗi kg. [5]
Tất nhiên, nông nghiệp chỉ là khởi đầu của nó. Nhưng hãy hình dung những tiến bộ giống nhau đang diễn ra trên mọi lĩnh vực và bạn bắt đầu thấy thép quan trọng như thế nào. Và giống như tất cả 'các công nghệ có mục đích chung' - chẳng hạn như thủy tinh, tua bin hơi nước hoặc chip máy tính - thép không chỉ hữu ích cho những gì chúng ta có thể chế tạo từ nó mà còn cho những gì nó cho phép chúng ta chế tạo. Kim loại rẻ, bền và đáng tin cậy này nhanh chóng trở nên phổ biến. Một khi bạn tính đến rỉ sét, tái chế và chất thải, có khoảng 32 tỷ tấn thép trên thế giới. Đây là khá nhiều. Nếu bạn rèn nó thành những thanh dầm chữ I nặng nề dùng làm khung thép của các tòa nhà, bạn sẽ có thể bao bọc thế giới trong đó gấp 33 lần. Bạn có thể xây dựng bảy tuyến đường sắt cao tốc giữa trái đất và mặt trời. Hoặc nếu bạn chia nó cho mỗi người trên hành tinh, bạn sẽ có khoảng 4 tấn mỗi người. Vì bạn đã biết có khoảng 15 tấn mỗi người ở các nước phát triển, điều đó nhấn mạnh một điểm quan trọng khác: trữ lượng sắt trên toàn thế giới được phân bổ rất không đồng đều.
Trái ngược hoàn toàn với mức 15 tấn thép/người ở các nước giàu, trung bình một người dân Trung Quốc ngày nay có khoảng 7 tấn thép. Một người trung bình sống ở châu Phi cận Sahara có ít hơn một tấn thép bình quân đầu người. Nói về tổng sản phẩm quốc nội của một quốc gia là rất hay, nhưng bạn cũng có thể hỏi liệu quốc gia đó có đủ sắt để xây dựng những bệnh viện có thể cứu sống người dân hay xây dựng những cây cầu và đường sắt cho phép họ đi lại hoặc xây dựng hay không. những ngôi nhà có thể che chở cho họ. Và sự thật là hầu hết mọi nơi trên thế giới đều không làm như vậy. Nói cách khác, mặc dù nhân loại đã triển khai sáu vật liệu trong cuốn sách này và đạt được thành công phi thường, biến chúng thành những công nghệ tiên tiến nâng cao cuộc sống, nhưng những thành tựu đó vẫn chưa được

phân bổ đồng đều. Chúng ta thường xuyên nói về khoảng cách thu nhập giữa các quốc gia nhưng còn bất bình đẳng về silicon, bất bình đẳng về phân bón, bất bình đẳng về đồng và vâng, bất bình đẳng về thép thì sao? [6]

Điều này đưa chúng ta đến một vấn đề khác. Sản xuất thép chịu trách nhiệm cho khoảng 7-8% lượng khí thải nhà kính trên thế giới. Nếu chúng ta muốn tất cả mọi người trên thế giới có cùng lượng thép nhúng như chúng ta được hưởng ở các nước giàu – 15 tấn mỗi người – điều đó sẽ đồng nghĩa với việc tăng tổng trữ lượng hợp kim này trên toàn cầu lên 144 tỷ tấn. Và vì con số đó gần gấp bốn lần những gì chúng ta từng sản xuất kể từ khi loài người bắt đầu xuất hiện, và vì các phương pháp sản xuất thép không có khí thải vẫn còn mang tính thử nghiệm và tốn kém, nên chúng ta đang rơi vào tình thế tiến thoái lưỡng nan. Mục tiêu kép của thế giới là khử cacbon và phát triển đang hướng tới sự xung đột. Khi các quốc gia trở nên giàu có và thịnh vượng hơn, liệu họ có thực sự bị từ chối bê tông hoặc thép mà phương Tây đã đổ và rèn khi nó phát triển?

Sức mạnh của thép

Công cụ này *quan trọng* . Thép không chỉ là bất kỳ chất nào khác; nó là vật liệu nền tảng mà chúng ta đã sử dụng hàng nghìn năm để tiến bộ và trở nên giàu có hơn. Đối với một số nhà cai trị, điều đó có nghĩa là rèn luyện vũ khí và phòng thủ, nhưng cũng thường xuyên, nó có nghĩa là xây dựng các nhà máy, máy móc và tua-bin để biến mọi thứ khác thành có thể, cho dù đó là tạo ra điện, thực hiện các phản ứng hóa học áp suất cao như quy trình Haber–Bosch hay xây dựng những con đường, sân bay và đường sắt mà xã hội xoay quanh. Năm 2018, khi tuyên bố áp thuế đối với thép nhập khẩu, Donald Trump đã tweet rằng ông làm như vậy để bảo vệ Hoa Kỳ và người lao động của nước này. 'NẾU BẠN KHÔNG CÓ THÉP,' ông viết bằng chữ in hoa đặc trưng của mình, 'BẠN KHÔNG CÓ MỘT QUỐC GIA!'

Nói một cách nhẹ nhàng, các nhà kinh tế không có nhiều thời gian cho những lập luận như thế này. Nếu một quốc gia có thể mua thứ gì đó từ nơi khác với giá rẻ hơn thì chắc chắn việc làm đó sẽ hợp lý hơn, họ chỉ ra. Và thật khó để tranh cãi về tính logic. Nhưng Trump không phải là chính trị gia duy nhất kết luận rằng thép xứng đáng được đối xử

đặc biệt; gần như mọi tổng thống Mỹ, cả đảng Cộng hòa và đảng Dân chủ, đều tìm cách bảo vệ ngành này bằng các biện pháp trừng phạt đặc biệt. Xa hơn và xa hơn, Mao Trạch Đông của Trung Quốc bị ám ảnh bởi thép đến mức vào cuối những năm 1950, ông đã đẩy đất nước của mình đến thảm họa khi cố gắng tăng sản xuất kim loại.
Khi Mao khoe khoang về sức mạnh công nghiệp của đất nước mình, điều mà ông thường làm, ông có xu hướng coi đó là sản lượng thép. Trung Quốc sẽ vượt qua sản lượng thép của Anh trong vòng ba năm! Nó sẽ vượt qua nước Mỹ trong vòng mười năm nữa! Các nhà máy thép được lệnh phải nỗ lực hết sức để cố gắng đạt được những mục tiêu đó, và khi điều đó vẫn chưa đủ, người dân Trung Quốc được lệnh xây dựng 'lò nung sân sau' để họ ném kim loại vụn vào đó để nỗ lực sản xuất thép. Những thứ kim loại vụn đó bao gồm nồi và chảo dùng để nấu ăn, dụng cụ và máy cày dùng để làm nông, xe kéo và lon dùng để chở và đựng nước. Nhà cửa bị phá bỏ để củi, rơm rạ đốt làm chất đốt; toàn bộ khu rừng bị chặt cây (điều này đã gây ra lũ lụt trong những thập kỷ tiếp theo); hàng triệu nông dân bị kéo ra khỏi đồng ruộng để lo cho lò lửa. 7
Mao gọi nó là Bước nhảy vọt vĩ đại, và nó chắc chắn đã thúc đẩy sản xuất sắt, nhưng vì cả chủ tịch lẫn nhiều cố vấn của ông đều không hiểu sự khác biệt giữa sắt và thép, nên họ thất vọng khi phát hiện ra rằng phần lớn những gì họ có được từ các lò nung ở sân sau. được đưa vào sử dụng là sắt giòn, vô dụng - không phải thép. Và kim loại đó dù sao cũng có giá rất đắt. Trong những năm tiếp theo, Trung Quốc trải qua nạn đói tồi tệ nhất trong lịch sử. Hàng chục triệu người - con số cuối cùng vẫn còn được tranh luận cho đến ngày nay nhưng những ước tính thận trọng dao động từ 17 đến 30 triệu - đã chết vì đói và mệt mỏi trong 4 năm từ 1958 đến 1962. Một số thậm chí còn dùng đến việc ăn thịt đồng loại. số 8
Thép chỉ đơn giản là một trong những vật liệu mà các nhà lãnh đạo, cả chuyên chế lẫn dân chủ, có xu hướng tập trung vào. Có lẽ vì đây là nguyên liệu thô sơ nhất, có lẽ vì nó được sử dụng trong hầu hết các quy trình sản xuất khác, hoặc có lẽ vì không ai thích ý tưởng phải chế tạo vũ khí từ sắt của quốc gia khác.
Cuối cùng, đó chính là câu chuyện về nguồn gốc của ngành thép Ukraine vào giữa thế kỷ 19. Ngay sau thất bại nhục nhã của Nga trong

Chiến tranh Krym và cái chết của Sa hoàng Nicholas I – người đã bị bắt xuống mỏ muối ở Cheshire chưa đầy một thập kỷ trước đó vào năm 1844 – vị hoàng đế mới Alexander II đã phát động một chương trình cải cách đầy tham vọng với sự tham gia của các nhà lãnh đạo. mục tiêu bắt kịp phương Tây. Lưu vực sông Donets ở Ukraine, khi đó là một phần của Đế quốc Nga, được xác định là địa điểm lý tưởng cho một khu liên hợp luyện kim. Nhưng trong khi ở Donbas có rất nhiều than và quặng sắt, không ai ở Nga biết chính xác cách xây dựng một xưởng luyện sắt. Sau một vài nỗ lực thất bại, họ đã tìm kiếm sự giúp đỡ ở xa hơn. [9]

Nó xuất hiện dưới hình dạng John James Hughes, một doanh nhân có râu đến từ miền Nam xứ Wales. Hughes, có cha là kỹ sư trưởng tại xưởng luyện sắt ở Merthyr Tydfil, lúc đó phụ trách Millwall Iron Works ở London, một trong những nhà sản xuất lớn nhất ở Anh, cung cấp toàn bộ sắt cho Hải quân Hoàng gia Anh để bọc các con tàu của họ. Năm 1870, ông giương buồm tới Biển Azov và đi về phía bắc tới Donbas. Trong vòng vài năm, xưởng luyện sắt của ông đã đi vào hoạt động và trong những thập kỷ tiếp theo, tổ hợp lò cao này sẽ trở thành nơi sản xuất sắt lớn nhất ở Đế quốc Nga. Ông thành lập một khu định cư gần đó, được gọi là Yuzovka (Hughes-ovka). Ngày nay thị trấn đã trở thành một thành phố, được đổi tên thành Donetsk; đây là thủ đô của trung tâm công nghiệp Ukraine.

Đây không phải là lần đầu tiên cũng như lần cuối cùng một quốc gia nhập khẩu kiến thức và thiết bị từ nước ngoài trong nỗ lực xây dựng cơ sở công nghiệp của mình. Mọi người đã làm điều này mãi mãi: George Ravenscroft sẽ không bao giờ tìm ra cách làm ra thủy tinh pha lê trong suốt nếu không có sự trợ giúp từ các nghệ nhân mà ông đã buôn lậu về từ Venice. Vào cuối thế kỷ 19, nhà công nghiệp gốc Scotland Andrew Carnegie đã nhập khẩu bộ chuyển đổi Bessemer vào Mỹ, giúp củng cố vị thế thống trị của ông trong lĩnh vực này. Mọi người đã chú ý vào đầu những năm 2000 khi một công ty Trung Quốc mua nhà máy thép ThyssenKrupp ở Dortmund và vận chuyển từng viên gạch đến địa điểm ở hạ lưu sông Dương Tử. Nhưng người Trung Quốc chỉ đơn thuần làm những gì người Nga, người Mỹ và thực tế là hầu hết các quốc gia đã làm kể từ khi con người lần đầu

tiên khám phá ra cách chế tạo sắt: nhập khẩu bí quyết và sau đó xây dựng một đế chế dựa trên nó. [10]
Đáng chú ý, địa điểm nơi các tòa nhà Đức này được di dời - vị trí hàng đầu của Shagang trên sông Dương Tử, ngay phía bắc Thượng Hải - hiện là nhà máy thép lớn nhất thế giới. 13 lò cao của nó (để so sánh con số này, nhiều nhất trong số các nhà máy thép ở Mỹ hiện nay là 4) tạo ra sản lượng cao hơn gấp đôi toàn bộ sản lượng thép của ThyssenKrupp, một trong những tên tuổi lớn trong ngành. Trong thập kỷ qua, Trung Quốc đã sản xuất nhiều thép hơn Hoa Kỳ kể từ đầu thế kỷ XX. Việc Trung Quốc đi lên đỉnh cao về sản xuất thép cũng giống như câu chuyện của nước này ở những nơi khác trong Thế giới Vật chất: sự thống trị gần như hoàn toàn. Địa điểm của Shagang là một thành phố thép - một cơ sở sản xuất có quy mô không giống bất cứ nơi nào được xây dựng trước đây trên thế giới. [11]
Một nơi có lẽ đã đến gần – hoặc đã đến gần, cho đến khi Trung Quốc trỗi dậy – là nhà máy Magnitogorsk ở Nga. Khu phức hợp rộng lớn gồm 8 lò cao này có từ năm 1932 và là sản phẩm trí tuệ của Joseph Stalin. Ông ra lệnh thành lập một thành phố công nghiệp hoàn toàn mới ở vùng thảo nguyên lộng gió, lạnh giá, phía đông người Urals, sau khi phát hiện ra một ngọn núi ở đó có nhiều quặng sắt đến mức la bàn không thể hoạt động gần nó cũng như chim bay qua nó. Magnitogorsk là đô thị xã hội chủ nghĩa được quy hoạch xây dựng dọc theo 'ngọn núi từ tính' này, tuy nhiên, một lần nữa, bí quyết phải được nhập khẩu (giống như trường hợp của hầu hết các nhà máy thép ở nơi khác, hoặc đối với vấn đề đó đối với các nhà máy máy kéo nổi tiếng của Stalin). Các tòa nhà và đường phố được thiết kế không phải bởi người Nga mà bởi một kiến trúc sư người Đức; Các nhà máy thép được mô phỏng theo nhà máy US Steel ở Gary, Indiana - cho đến thời điểm đó là nhà máy lớn nhất thế giới - và được xây dựng bởi các kỹ sư Mỹ. [12]
Tuy nhiên, vấn đề với Magnitogorsk là mặc dù nó có nguồn tài nguyên sắt dồi dào nhưng lại quá xa mọi nơi. Không chỉ cách cảng gần nhất hàng nghìn km mà còn cách các mỏ than gần nhất gần 2.000 km. Đối với Stalin, đây là một phần của sự hấp dẫn: không một đội quân xâm lược nào có thể tới được các nhà máy thép. Mặc dù vậy, khi tìm kiếm địa điểm tiếp theo cho một nhà máy thép khổng lồ vài năm sau đó, các

nhà lập kế hoạch Liên Xô nhận thấy mình bị thu hút về phía đông Ukraine, nơi sắt, than và nước có sự kết hợp hoàn hảo, cùng với khả năng tiếp cận dễ dàng với các cơ sở hạ tầng. biển Đen. Họ lấy bản thiết kế của Khu liên hợp luyện kim Magnitogorsk và xây dựng một nhà máy thép mới: Azovstal.

Và cùng với người anh em họ ở thảo nguyên, Azovstal dần trở thành huyền thoại của Liên Xô. Đã thách thức Hitler, nó đóng một vai trò then chốt trong nền kinh tế trong những thập kỷ tới: phần lớn mạng lưới đường sắt của Liên Xô, và phần lớn mạng lưới của châu Âu, được xây dựng bằng đường ray thép được đúc ở đây. Khi các quốc gia khác cố gắng xây dựng các nhà máy thép nhỏ hơn, tập trung vào các sản phẩm hoặc chức năng cụ thể, Azovstal chỉ đơn giản là phát triển lớn hơn.

Đến những năm 1990, miền đông Ukraine, nơi có than và thép thống trị, chịu trách nhiệm sản xuất hơn một nửa sản lượng công nghiệp của đất nước. Khi Bức tường Berlin sụp đổ và chủ nghĩa cộng sản kết thúc, những tài sản này đã trở thành một giải thưởng được săn đón, giống như vải công nghiệp ở nước láng giềng Nga. Ukraine độc lập sớm có những nhà tài phiệt riêng, nổi bật nhất trong số đó là Rinat Akhmetov, người đã mua nhiều nhà máy thép, bao gồm Azovstal và nhà máy Ilych ở phía bên kia Mariupol. Không phải cuộc sống đã thay đổi nhiều ở những nhà máy mới được tư nhân hóa này; họ cứ tiếp tục sản xuất thép với số lượng lớn.

Nhà máy thép là lớn bởi sự cần thiết. Một số sản phẩm cán ra khỏi nhà máy có thể dài tới hàng km. Số lượng quặng sắt và than đá được tiêu thụ bởi các lò cao lớn đến mức bạn cần những đống vật liệu khổng lồ có kích thước bằng ngọn đồi chất đống bên ngoài. Năng lực của Azovstal, cơn đói than để rèn sắt, có nghĩa là Mariupol sẽ trở thành một trong những thị trấn bị ô nhiễm nặng nề nhất trong khu vực. Giống như Magnitogorsk, toàn bộ thành phố thường xuyên bị bao phủ trong sương mù cay nghiệt, với tỷ lệ mắc bệnh ung thư và bệnh hô hấp cao hơn hầu hết các vùng trên cả nước.

Nhưng quy mô của Azovstal đồng nghĩa với việc nó cũng tạo ra đủ loại sản phẩm phụ không ngờ tới. Sáu lò cao đã tạo ra nhiều xỉ – một chất thải nóng chảy giàu silic và canxi – đến mức nó được sử dụng rộng rãi quanh Mariupol như một loại xi măng; loại xi măng độc đáo

đó giờ đây có thể là manh mối để tạo ra bê tông mà không thải ra carbon.
Những bộ chuyển đổi thép khổng lồ của nó – hậu duệ của công nghệ mà Bessemer đã phát minh ra, ngoại trừ oxy nguyên chất chứ không phải không khí được thổi vào hỗn hợp sắt – đã tiêu thụ nhiều oxy đến mức các công ty đổ xô đến Mariupol để tận dụng khí thải tạo ra trên đường đi. Gần như tình cờ, Ukraina đã trở thành một trong những nước sản xuất công nghiệp lớn nhất thế giới về neon, một loại khí hiếm được sử dụng trong sản xuất chất bán dẫn cũng như trong các bảng hiệu phát quang.
Tuy nhiên, trên hết, đây là một thị trấn sắt và giống như hầu hết các thị trấn sắt, người dân địa phương thích nói về những công trình kiến trúc mang tính biểu tượng được tạo nên từ thép Mariupol: trang trại gió và tàu du lịch, đường ống và nhà máy điện. The Shard ở London, khu phát triển Hudson Yards ở Manhattan, sân vận động Olympic ở Kyiv và cầu San Giorgio, thay thế cây cầu đường cao tốc Genoa bị sập vào năm 2018: tất cả đều được làm bằng thép từ Azovstal. Tuy nhiên, bây giờ, khi quân đội Nga tiến vào thành phố của ông, Tskitishvili đang dự tính làm chính điều mà những người tiền nhiệm của ông đã làm cách đây 80 năm khi Đức Quốc xã tiếp cận. Anh ta sắp phải đóng cửa nhà máy.

Sự kết thúc của Azovstal

Đóng cửa một nhà máy thép nói dễ hơn làm; không có công tắc tắt và hầu hết các quy trình quan trọng, đặc biệt là lò cao biến quặng sắt thành dạng kim loại của kim loại, được thiết kế để hoạt động liên tục, từ thời điểm chúng được xây dựng cho đến thời điểm chúng ngừng hoạt động – hãy để dành cho những trường hợp không thường xuyên. thời gian bảo trì được tính bằng giờ. Những tổ hợp lồng vào nhau như thế này không dễ dàng được tháo dỡ.
Nhưng với việc pháo binh rơi xuống xung quanh nhà máy, ngày càng rõ ràng là không có giải pháp thay thế nào. Có rất ít tai nạn công nghiệp gây chết người nhiều hơn vụ nổ tại các công trình kim loại nóng. Hãy tưởng tượng nếu một tên lửa xuyên qua lò cao, giải phóng hàng tấn kim loại nóng chảy. Một trong những nhân viên của nhà máy thép cho biết: 'Nó sẽ là một loại Hiroshima nano.'

Vì vậy, Tskitishvili bắt đầu quá trình tắt máy, trông hơi giống một hướng dẫn sử dụng phá hoại công nghiệp. Các lò luyện cốc để nướng than đã được dừng lại và đổ đầy thủy tinh lỏng để ngăn chặn bất kỳ loại khí nguy hiểm nào thoát ra ngoài. Mỗi lò cao được để nguội từ từ, sắt nóng chảy ở đáy sẽ đông đặc lại thành tấm ở phía dưới. Cuối cùng hầu hết nhân viên của nhà máy đã phải rút lui khi quân Nga xâm nhập vào thành phố.

Trong những tuần tiếp theo, Mariupol bị pháo binh Nga tấn công dữ dội. Các khu chung cư, bệnh viện và thậm chí cả một nhà hát, nơi thường dân, phụ nữ và trẻ em đang trú ẩn đều bị ném bom. Đường phố ngổn ngang xác chết. Cảnh quay từ máy bay không người lái về cảng cho thấy nhiều khu chung cư ở đây trông giống như những bộ xương. Hầu hết cư dân sống sót của thành phố đã rời đi khi cuộc oanh tạc bắt đầu, nhưng một số gia đình đã rút vào xưởng thép, vào mạng lưới nơi trú ẩn an toàn nằm sâu bên dưới máy móc.

Quân đội Nga đã giành quyền kiểm soát thị trấn chỉ trong vài tuần nhưng các nhà máy thép tỏ ra là một thách thức lớn hơn. Tskitishvili không hề hay biết, khoảng 3.000 chiến binh Ukraine, một số thuộc Trung đoàn Azov, một đội quân gây tranh cãi mà nhiều chiến binh trong số họ có liên kết cực hữu, cũng đã tìm được đường vào nơi trú ẩn ở Azovstal.

Câu chuyện về cuộc bao vây xảy ra sau đó đã được các mạng tin tức trên khắp thế giới đưa tin. Các lực lượng Ukraine đã xâm nhập vào hệ thống internet vệ tinh Starlink và trong những tuần tiếp theo, họ sẽ phát các thông tin cập nhật trên mạng xã hội và các cuộc phỏng vấn trên các kênh truyền hình. Hàng triệu người chờ đợi những báo cáo chộp được từ các nhà máy thép, nơi binh lính và dân thường trú ẩn bên dưới những lò luyện đã ngừng hoạt động. Công chúng đã xem những thước phim về những quả bom trút xuống nhà máy lớn, nơi bắt đầu giống với bối cảnh từ *Mad Max* .

Và khi cuộc bao vây tiếp tục, nguồn cung cấp lương thực đã cạn kiệt. Người lớn được chia thành một bữa nhỏ mỗi ngày; nguồn cung cấp nước uống cạn kiệt. Có thời điểm, một số người bị mắc kẹt bên trong trở nên tuyệt vọng đến mức họ bắt đầu uống nước từ những chai nước rửa tay chứa cồn được lắp đặt ở đó trong thời gian xảy ra dịch Covid-19. Nó có vẻ giống như một sự viết lại sai lầm về Stalingrad –

cuộc bao vây khủng khiếp trong Thế chiến thứ hai, nơi một nhóm nhỏ quân đội Liên Xô đã chống lại quân Đức trong nhà ga xe lửa của thành phố – ngoại trừ lần này người Nga được chọn vào vai những kẻ xâm lược thay vì những người phòng thủ kiên cường. [13]
Cuối cùng, sau 80 ngày giao tranh và bắn phá tàn khốc, những thường dân bị mắc kẹt trong các đường hầm và tuyến phòng thủ của Azovstal đã được phép rời đi. Họ được đưa ra khỏi khu phức hợp để đến khu vực ngày nay là lãnh thổ của Nga. Số quân còn lại của Trung đoàn Azov đầu hàng và bị bắt làm tù binh. Hầu hết đều được thả trong các cuộc trao đổi tù nhân trong những tháng tiếp theo. Thi thể của hơn 400 binh sĩ đã được đưa về lãnh thổ Ukraine để chôn cất, nhưng thậm chí nhiều tháng sau, một số người được cho là vẫn còn bị chôn vùi trong đống đổ nát của nhà máy thép.
Ngành công nghiệp sắt toàn cầu nhanh chóng đón nhận sự biến mất của địa điểm này và sản lượng của nó. Azovstal tuy lớn nhưng chưa phải là nhà máy lớn nhất thế giới. Có những lò cao lớn hơn ở Hàn Quốc và Trung Quốc, và Nga vẫn rèn hàng triệu tấn thép tại nhà máy ở Magnitogorsk. Nhưng còn có những hậu quả không ngờ khác. Vì Azovstal và các nhà máy thép Ukraina chịu trách nhiệm sản xuất gần một nửa nguồn cung neon trên thế giới, trong những tuần sau khi Tskitishvili bắt đầu đóng cửa, thế giới bắt đầu thiếu khí đốt.
Điều này gây ra những hậu quả không mong đợi đối với việc sản xuất chất bán dẫn, vì neon hóa ra lại là một loại khí cực kỳ quan trọng khác được bơm từ nhà máy phụ lên phòng sạch ở các xưởng đúc. Nếu không có loại khí này thì khó có thể kiểm soát bước sóng laser trong máy quang khắc. Vì vậy, các sự kiện ở Azovstal đã gây ra một làn sóng kinh tế vượt xa Ukraine hoặc ngành thép; chẳng bao lâu sau, các nhà sản xuất chip silicon ở Đài Loan, Hàn Quốc và thậm chí cả Nam Wales đã bắt đầu dự trữ các loại khí này vì lo ngại tình trạng thiếu hụt toàn cầu. Vì vậy, nó diễn ra trong Thế giới Vật chất, nơi một sản phẩm phụ ít người biết đến hóa ra lại rất cần thiết cho một chuỗi cung ứng khác dường như không liên quan ở phía bên kia hành tinh.
Sau khi nắm quyền kiểm soát địa điểm, người Nga thông báo rằng Azovstal đã bị hư hại quá mức không thể sửa chữa được. Ở đó đang nói về việc tháo dỡ nó hoàn toàn và biến nó thành một công viên. Tuy nhiên, trong một đoạn video ngắn được phát hành sau khi đóng cửa

các lò cao, máy chuyển oxy và lò luyện cốc, Tskitishvili khẳng định rằng đây sẽ không phải là dấu chấm hết cho Azovstal. Ông nói, nó đã làm được điều đó trước đây: nó đã vươn lên từ đống tro tàn của sự chiếm đóng của Đức Quốc xã để trở thành nhà máy thép tốt nhất ở châu Âu.

Ông nói thêm: “Chúng tôi sẽ quay lại thành phố, chúng tôi sẽ xây dựng lại nhà máy này, chúng tôi sẽ hồi sinh nó”. 'Nó sẽ có tác dụng và mang lại vinh quang cho Ukraine như nó đã từng làm trước đây. Bởi vì Mariupol là Ukraine, Azovstal là Ukraine. Nó đã, đang và sẽ như vậy. Niềm tự hào cho Ukraine!'

Khi người ta khảo sát đống đổ nát của Azovstal, thật là hấp dẫn để đọc được điều gì đó sâu sắc hơn về nó. Đây có phải là một dấu hiệu khác cho thấy sự lỗi thời của vật liệu này? Ngày nay chúng ta có thực sự cần thép đến vậy không? Nhìn bề ngoài, cuộc chiến Ukraine không hoàn toàn giống hầu hết các cuộc chiến khác: nó dường như được chiến đấu bằng máy bay không người lái và mạng xã hội. Nó trông không giống 'cơn bão thép' mà người Nhật mô tả khi người Mỹ xâm chiếm Okinawa năm 1945.

Tuy nhiên, đừng nhầm lẫn, các cuộc chiến tranh thế kỷ 21 vẫn diễn ra bằng thép: súng thép, bom thép và áo giáp thép. Chúng ta ít chú ý đến nó hơn vì chúng ta có xu hướng coi đó là điều hiển nhiên. Chúng tôi có xu hướng không lo lắng về tình trạng thiếu hụt vì ngay cả khi bạn không còn lò cao của riêng mình, bạn vẫn luôn có thể vận chuyển một số thép cán nguội từ Trung Quốc.

Nhưng giống như muối hay thủy tinh, sắt vẫn là một trong những vật liệu mà quá trình sản xuất, dù có vẻ cổ xưa và công nghiệp, dường như thường cung cấp nền tảng cho thế giới như chúng ta biết. Thép có vẻ giống như một công nghệ của quá khứ, nhưng nó vẫn là một thứ của hiện tại và là chất liệu mà nếu không có nó thì chúng ta không thể xây dựng được tương lai. Đã nói tất cả những điều đó, việc chứng kiến quá trình sản xuất nó ngày nay vẫn giống như một cuộc hành trình quay ngược thời gian, về thời Trung cổ.

SỐ 8

Bên trong núi lửa

CẢNG TALBOT, WALES

Chúng tôi đang đến gần Lò cao số 5, một tòa tháp đen kịt gồm các ống khói và giàn giáo, thì tôi thoáng thấy một trong những quả ngư lôi đang được nạp đạn.

Ngư lôi sắt là những toa xe lửa hình tàu ngầm, trong đó kim loại nóng chảy được đổ vào trước khi nó được đưa đi quãng đường nửa dặm từ lò nung đến nhà máy thép. Một chất lỏng màu vàng đỏ tươi đang chảy từ bệ phía trên đường ray xuống miệng ngư lôi đang phát sáng.

"Trông giống như dung nham," tôi nghĩ thành tiếng.

"Đó *là* dung nham," hướng dẫn viên của tôi nói. Và điều này, tôi chợt nhận ra, chắc chắn là một phần của điều kỳ diệu, sự lãng mạn của thép. Khi làm ra nó, chúng ta đang *làm tan chảy đá* ; con người đang tạo ra dung nham. Ngay cả ngày nay, sau hàng nghìn năm sản xuất thép, ngay cả ở những cơ sở tiên tiến nhất nơi quy trình đã được tinh chế đến mức giới hạn, vẫn có điều gì đó nguyên sơ về việc sản xuất kim loại này. Chúng ta đang ở trong ngọn núi lửa thần thoại cùng với Hephaestus và Vulcan. Ở đây, các bề mặt phủ đầy bụi bẩn và bồ hóng khi tia lửa bay khắp nơi. Đôi khi không khí nồng nặc mùi lưu huỳnh đến mức bạn không thể thở được, mỗi lúc lại có tiếng xì xì và tiếng leng keng.

Những xung động cảm giác này đạt đến đỉnh điểm vào thời điểm lò cao được gõ nhẹ để lấy kim loại nóng chảy. Một lỗ được khoan ở phần đất sét ở phía dưới và sắt bắt đầu chảy. Tôi cho rằng điều gì đó như thế này sẽ xảy ra mà không cần bất kỳ sự can thiệp nào của con người, nhưng ở hầu hết các lò cao, bao gồm cả những lò gần đây đã đóng cửa ở Azovstal, hầu hết các lò ở Mỹ và nhà máy thép Port Talbot ở Nam Wales, quy trình này đều thủ công một cách đáng ngạc nhiên.

Khi chúng tôi đứng sang một bên, một công nhân mặc bộ đồ cách nhiệt ấn vào chiếc điều khiển từ xa và một chiếc cần cẩu lớn lao về phía vách vòi. Một mũi khoan ở phía trước bắt đầu khoan vào đất sét

và đột nhiên có một luồng nhiệt tỏa ra khắp nhà kho ở chân lò. Tuy nhiên, sau vài phút, rõ ràng có điều gì đó không ổn.
'À,' ai đó nói. “Anh ấy bị kẹt mũi khoan trong đất sét ướt.”
Sau nhiều lần búa và khoan, đột nhiên chiếc cần cẩu chìm trong làn khói đen và sau đó là một địa ngục. Pháo hoa ở khắp mọi nơi – một dòng tia lửa màu vàng phun ra từ vách vòi giống như bánh xe Catherine. Và sau vài phút, ánh đèn nhấp nháy và khói lắng xuống, nó ở đó: một dòng chất lỏng phát sáng tràn ra khỏi lò, chảy xuống kênh về phía quả ngư lôi đang chờ sẵn.
Đây là một quá trình khai thác ấn tượng hơn bình thường một chút, nhưng kết quả cuối cùng vẫn giống nhau: một dòng gang nóng chảy – khoảng $4–5\%$ cacbon. Đây là lần đầu tiên trong nhiều sự biến đổi.
Trước đó không lâu, sắt đã được đưa vào lò ở dạng quặng rắn – dạng viên và cục, cùng với các cục cốc và dolomit, đóng vai trò như chất trợ dung để loại bỏ tạp chất bằng cách giảm điểm nóng chảy của chúng, giống như chất trợ dung trong sản xuất thủy tinh. Nguyên liệu thô đã được đổ lên trên từ các thùng chứa tự động khổng lồ, từng lớp một. Trong chuyến thăm của tôi, đó là sắt từ Thụy Điển và than từ Úc và Trung Quốc, sau đó được nung thành than cốc trong các lò nung ở xứ Wales.
Hỗn hợp này đã được nung nóng và tan chảy khi nó chìm xuống sâu hơn, đạt nhiệt độ trên $1.400°C$. Chúng tôi bước tới chỗ bóng tối của lò cao, nơi mà ngoài lớp vỏ và lớp gạch chịu lửa lót trong buồng, sắt đang đạt đến nhiệt độ cao nhất. Ở bên ngoài, trời rất nóng và ồn ào. Lò lửa đang gầm rú. Một người công nhân mở một lỗ mắt nhỏ, đưa cho tôi một bộ lọc để đặt trước mắt và chỉ cho tôi nơi để nhìn. Bên trong, tôi có thể nhìn thấy một tia lửa nóng trắng của thứ gì đó đang được bắn vào giữa lò. Đó có phải là khí gas không?
“Than,” anh ta hét lên. 'Than hạt.'
Bụi than nghiền thành bột chảy vào đáy lò, cùng với những luồng khí nóng từ dãy ống kim loại gọi là tuyeres, là một lời nhắc nhở hữu ích rằng chúng ta không thể bàn đến sắt thép mà không bàn đến than. Đối với mỗi tấn gang nóng chảy, bạn chỉ cần hơn một tấn quặng sắt và chỉ dưới một tấn than, phần lớn được đổ lên đỉnh lò nhưng một số được phun vào các bên ở dạng hạt. [fn1]

Mục đích của than không chỉ là làm nóng lò mà còn tạo điều kiện thuận lợi cho phản ứng hóa học cực kỳ quan trọng xảy ra trong ruột lò. Quặng là một loại đá giàu oxit sắt, về cơ bản là rỉ sét dạng hạt và biến nó thành kim loại đồng nghĩa với việc tách các nguyên tử oxy ra khỏi nguyên tử sắt. Và cuối cùng, mục đích của lò nung khổng lồ này là: cung cấp một môi trường nơi oxy có thể rời khỏi sắt và liên kết với carbon từ than. Nói một cách chính xác, sản phẩm cuối cùng chính của những lò cao này không phải là quặng sắt phun ra ngoài và xỉ được thoát ra sau đó, mà là carbon dioxide và rất nhiều thứ khác. [1]

Sắt, Than và Cách mạng Công nghiệp

Sắt là một sản phẩm nhiên liệu hóa thạch. Mỗi năm chúng ta thải một lượng than đáng kinh ngạc - hơn một tỷ tấn, với công suất lớn hơn trọng lượng của mỗi người trên hành tinh cộng lại - vào khoảng hàng nghìn lò cao đang hoạt động trên khắp thế giới. Sắt chảy ra ở đầu bên kia có thể không chứa nhiều cacbon trong đó, nhưng việc sản xuất ra nó đòi hỏi phải tạo ra một lượng $CO_{2\ \text{khổng lồ}}$ - khoảng 7–8% tổng lượng CO_2 toàn cầu. Không có nguồn khí nhà kính nào tập trung ở một số lượng nhỏ địa điểm như vậy. [2]

Và mặc dù Port Talbot với hai lò cao ngày nay trông có vẻ lép vế so với hầu hết các nhà máy thép của Trung Quốc, nhưng dù sao thì đây vẫn là nhà máy thép lớn nhất và do đó là nơi phát thải carbon lớn nhất ở Anh. Tuy nhiên, có một điều trớ trêu ở đây là, theo một khuôn mẫu mà bạn sẽ thấy lặp lại ở đâu đó trong cuốn sách này, việc đưa than vào sản xuất đồ sắt bắt đầu như một giải pháp *cho* một vấn đề môi trường.

Câu chuyện về sắt đã có từ lâu trước những lò cao đầu tiên. Bên cạnh con bọ thủy tinh màu vàng tuyệt đẹp được tìm thấy trong lăng mộ Tutankhamen là một con dao găm có cán bằng vàng được trang trí công phu, nạm đá quý. Tuy nhiên, có giá trị hơn bất kỳ kim loại hay đá quý nào là bản thân lưỡi dao, được làm từ một loại sắt đặc biệt không bị rỉ sét dù đã có tuổi đời hơn ba thiên niên kỷ. Hóa ra kim loại này đến từ một thiên thạch: một hợp kim tự nhiên của sắt, niken và coban được rèn trong không gian và rơi từ trên trời xuống. Có lẽ, nó được phát hiện ở cồn cát ở sa mạc Sahara, hơi giống tấm kính sa mạc màu vàng trên chiếc vòng cổ của Tutankhamen. [3]

Người Hittite cổ đại, chiếm đóng khu vực ngày nay thuộc Thổ Nhĩ Kỳ và Syria, dường như đã tìm ra cách nấu chảy sắt và chế tạo vũ khí bằng thép vào khoảng năm 1400 trước Công nguyên, và trong những năm sau đó, kỹ năng này đã lan rộng khắp châu Á và châu Âu, khởi động cái mà các nhà nhân chủng học gọi là Thời đại đồ sắt. Nhưng phải đến thế kỷ thứ 5 trước Công nguyên , người Trung Quốc mới phát triển được những lò cao đầu tiên và mãi đến thời Trung cổ chúng mới lan sang châu Âu. Có những lò sản xuất gang ở Sussex vào khoảng năm 1500 và ở Nam Wales không lâu sau đó.

Và những lò nung này có điểm chung: chúng sử dụng than củi làm nhiên liệu. Than củi - một dạng carbon gần như tinh khiết được tạo ra bằng cách nấu các khối gỗ mà không để chúng tiếp xúc với không khí - tạo ra nhiệt độ rất nóng, cực kỳ sạch, lý tưởng cho việc luyện sắt cũng như các hình thức nấu chảy khác hoặc sản xuất bia. hoặc thuốc nhuộm vải sủi bọt. Nhưng khi nhu cầu về than củi tăng lên thì áp lực lên rừng cũng tăng theo. Xét cho cùng, gỗ cũng vô giá trong việc xây dựng nhà ở và đặc biệt là ở Anh, đóng tàu và cột buồm của Hải quân Hoàng gia. Năm 1559, trong bối cảnh có báo cáo cho rằng trữ lượng gỗ xung quanh Worcester đã giảm xuống mức thấp đáng lo ngại, một đạo luật mới đã được đưa ra để ngăn chặn việc chặt cây để sản xuất sắt trong phạm vi 14 dặm quanh sông Severn. Những lo ngại về một thảm họa môi trường sắp xảy ra đã buộc các nhà công nghiệp phải tìm nơi khác. Tiếp theo đó là một trong những sự thay đổi mang tính lịch sử - không chỉ trong lĩnh vực sản xuất sắt mà còn trong câu chuyện của thế giới hiện đại - vì dần dần, các doanh nhân ở Anh và xứ Wales bắt đầu không còn dựa vào gỗ để sưởi ấm mà dựa vào nhiên liệu hóa thạch. [4] [fn2]

Câu chuyện này đan xen với câu chuyện khác – câu chuyện về cuộc cách mạng công nghiệp. Lý do tại sao cuộc cách mạng lại xảy ra ở Anh mà không phải ở nơi nào khác ở châu Âu, hay châu Á hay châu Mỹ, vẫn còn được tranh luận cho đến ngày nay. Có đủ loại yếu tố có thể xảy ra: nhân khẩu học, địa lý, bối cảnh chính trị và thể chế, bản chất của thị trường lao động, sự tích lũy ổn định của những đổi mới trước đó, chưa kể đến những áp lực môi trường xây dựng này khi các nhà sản xuất háo hức tìm kiếm một hình thức rẻ hơn, phong phú hơn. nhiên liệu. Nước Anh cũng may mắn có được nền địa chất khác

thường. Thật khó để tìm thấy nhiều quốc gia nhỏ bé như Vương quốc Anh có sự kết hợp khá phong phú của các loại khoáng sản khác nhau, từ sắt và đá vôi dồi dào cho đến các kim loại ít người biết đến hơn như thiếc, kẽm, đồng và cát silic. Rõ ràng nhất, có một nguồn cung cấp than dường như vô hạn - hầu hết là than antraxit tốt, giàu - gần bề mặt ở phần lớn miền trung Scotland, đông bắc nước Anh, ở Yorkshire, Midlands, Kent, Gloucester và các thung lũng ở Nam Wales .

Vì vậy, khi mối lo ngại ngày càng tăng về nguồn cung gỗ từ thế kỷ XVI trở đi, những doanh nhân đầu tiên này bắt đầu thử nghiệm. Thợ làm bia và thợ nhuộm, thợ làm gạch và thợ gốm, thợ luyện kim và thợ làm thủy tinh: khi thế kỷ XVI nhường chỗ cho thế kỷ XVII, họ bắt đầu sử dụng than. Điều này không phải là không có vấn đề. Trong khi nhiên liệu nguyên chất, có hàm lượng carbon cao như than củi cháy sạch thì than lại bẩn và có mùi hôi. Nó làm đen nhiều viên gạch được làm bằng nó và tạo ra mùi hôi thối độc hại cho các loại bia ủ bằng nó. Nhưng theo thời gian, các nhà công nghiệp đã thích nghi. Một số nhà máy bia đã tính ra rằng nếu họ nung than trước, giống như cách bạn làm với gỗ để làm than, bạn sẽ thu được một dạng than tinh khiết hơn với ít chất gây ô nhiễm khó chịu hơn – than cốc, như người ta thường gọi. Than cốc và than đá nhanh chóng được áp dụng ở những nơi khác: được dùng để sản xuất thủy tinh và được sử dụng rộng rãi bởi các nhà sản xuất muối ở vùng đông bắc và Cheshire. Than được vận chuyển từ Newcastle và Sunderland đến London để cung cấp nhiên liệu cho các nhà máy bia, và các máy cắt than sẽ quay trở lại phía bắc chở đầy cát silic cho ngành công nghiệp thủy tinh ở Tyneside, chưa kể đến các loại hàng hóa độc đáo khác.

Một ngành kinh doanh đang phát triển vào thời đó là sản xuất phèn chua - một loại hóa chất giúp thuốc nhuộm quần áo bền màu. Những tảng đá chứa chất quý này nằm trên vách đá ở Bắc Yorkshire gần Boulby, nhưng quá trình tinh chế bao gồm việc ngâm và hầm đá đã nghiền trong gallon nước tiểu - nhiều hơn mức có thể tìm được ở địa phương. Một chuỗi cung ứng phức tạp sau đó đã xuất hiện, theo tin đồn, thuyền trưởng James Cook đã tìm thấy đôi chân đi biển của mình. Các tàu chở than từ Newcastle sẽ trở về phía bắc chất đầy rác

hôi thối được thu thập từ các nhà vệ sinh ở London. Đây được cho là nguồn gốc của cụm từ 'đi tiểu'. [5]
Và, khi phải đun nóng những thứ pha chế hôi hám của họ, những người làm phèn đã làm điều mà những người khác đang làm: họ bắt đầu đốt than. Dần dần, trong nhiều thế kỷ tiếp theo, than đá trở thành nhiên liệu quan trọng nhất ở Anh. Iron đến bữa tiệc tương đối muộn, không phải vì không ai nhận ra rằng việc tạo ra nó với loại nhiên liệu rẻ hơn, dồi dào hơn này có thể là hợp lý, mà bởi vì làm như vậy hóa ra lại cực kỳ khó khăn. Mỗi lần ai đó cố gắng thay thế than đá, họ nhận thấy bàn ủi của họ bị lưu huỳnh hủy hoại đến mức về cơ bản nó trở nên vô dụng.
Giải pháp cuối cùng đã đến với Abraham Darby, một doanh nhân đến từ Midlands, người bắt đầu cuộc đời làm việc tại các nhà máy bia. Chính từ sự nghiệp đầu tiên này, Darby đã nhận ra lợi ích của việc sản xuất và sử dụng than cốc hơn là than đá. Sau một vài nỗ lực thất bại, vào năm 1709, ông trở thành người đầu tiên cung cấp năng lượng cho lò cao bằng than cốc thay vì than củi. Mối liên kết với gỗ đã bị phá vỡ hoàn toàn khi Henry Cort tìm ra cách biến gang từ các nhà máy của Darby thành sắt rèn nguyên chất hơn mà không cần sử dụng than củi.
Và vì than là loại nhiên liệu giàu năng lượng hơn nhiều so với gỗ, chưa kể còn dồi dào hơn rất nhiều, nên sản lượng sắt của Anh đột nhiên tăng vọt, thúc đẩy một loạt đổi mới khác. Nước Anh càng sử dụng nhiều than và sắt thì càng cần phải khai thác nhiều hơn, và càng khai thác sâu thì càng tốn nhiều công sức để bơm nước ra khỏi hố. Tình thế khó khăn này đã thúc đẩy việc phát minh ra động cơ hơi nước – đầu tiên là những cỗ máy nguyên thủy của Thomas Savery và Thomas Newcomen và sau đó là những động cơ phức tạp hơn của James Watt. Đột nhiên, than có thể được sử dụng không chỉ để sản xuất hóa chất, thủy tinh và sắt mà còn làm nhiên liệu cho một bánh xe chuyển động, có thể dễ dàng đẩy đầu máy xe lửa cũng như bơm nước ra khỏi mỏ.
Than và sắt đang giúp khai sinh ra cuộc cách mạng công nghiệp - than làm nhiên liệu cho máy móc, sắt để xây dựng máy móc. Câu chuyện của họ ngày ấy cũng gắn bó với nhau như ngày nay. Ví dụ, động cơ của Watt chỉ thực sự trưởng thành khi ông gặp John

Wilkinson - một người đàn ông bị ám ảnh bởi kim loại này đến mức ông làm việc tại một chiếc bàn sắt, xây dựng một cây cầu sắt, đóng một chiếc thuyền sắt và yêu cầu được chôn trong quan tài sắt. . Watt biết sắt là vật liệu duy nhất có khả năng chịu được áp suất cực lớn bên trong cỗ máy của mình, nhưng chỉ khi Wilkinson giúp Watt rèn một xi lanh và pít-tông bằng sắt gần như hoàn hảo thì động cơ của anh mới bắt đầu gầm lên. 6

Đây không chỉ là một cuộc cách mạng công nghiệp mà còn là một cuộc cách mạng vật chất và trên hết là một cuộc cách mạng năng lượng - cuộc chuyển đổi năng lượng vĩ đại đầu tiên với việc loài người chuyển từ năng lượng gỗ và than sang năng lượng hóa thạch. Vào đầu thế kỷ 19, hầu hết các ngành công nghiệp ở Anh đều sử dụng than. Điều đáng nói là điều này khá độc đáo. Năm 1800, 95% năng lượng của nước Anh đến từ than đá; vào thời điểm đó, gần như toàn bộ năng lượng của Pháp - hơn 90% - vẫn đến từ việc đốt củi. Nước Anh không còn bị ràng buộc bởi những giới hạn hữu cơ về số lượng cây có thể được trồng trên vùng đất rộng lớn của mình. Và vào khoảng thời gian này, thu nhập bình quân đầu người của nước này, mà trong hầu hết lịch sử ít nhiều tương đương với thu nhập của Pháp, bắt đầu tăng vọt. Vào đầu thế kỷ 19, nước này giàu hơn Pháp 80%. 7

Có lẽ cách đơn giản nhất để minh họa tầm quan trọng của quá trình chuyển đổi năng lượng này - sự đoạn tuyệt với những hạn chế tự nhiên của loài người - là hỏi cuộc sống ngày nay sẽ như thế nào nếu chúng ta loại bỏ than và than cốc khỏi lò cao và quay trở lại sử dụng gỗ và than củi? Xét cho cùng, một số quốc gia, đặc biệt là Brazil, vẫn sử dụng nhiều than củi thay vì than cốc, vì vậy về mặt lý thuyết là có thể thực hiện được - cho đến khi bạn tính toán các con số. Để thay thế toàn bộ than cốc cho lượng tiêu thụ 30 megaton thép của Anh sẽ cần phải sử dụng gần một nửa diện tích nước Anh hoàn toàn để sản xuất than củi. Để làm điều tương tự đối với sản xuất thép toàn cầu sẽ đòi hỏi phải cắt giảm một nửa diện tích Amazon. Thí nghiệm suy nghĩ này có thể gây chán nản, nhưng nó nhấn mạnh lý do tại sao chúng ta vẫn đổ và phun quá nhiều than cứng, giàu năng lượng vào các lò cao giống như lò ở Port Talbot ở đây. số 8

Nơi sắt trở thành thép

Lúc này quả ngư lôi đã chứa đầy gang - nặng tới 300 tấn - nên chúng tôi đi theo khi nó tiến về phía nhà máy thép. Địa điểm ở đây rộng lớn giống như Azovstal rộng lớn: mỗi khu vực khác nhau - lò luyện cốc, nhà máy thiêu kết, lò cao, máy chuyển đổi thép, nhà máy cán, v.v. - giống như một quận riêng lẻ trong một khu đô thị hùng mạnh. Nói chung, nó chiếm 5 dặm vuông, gần gấp đôi không gian so với thị trấn mang tên nó, và bao gồm bãi biển tư nhân lớn nhất châu Âu - một dải cát và cồn cát bị bỏ hoang, sẽ khá hấp dẫn nếu có. không dành cho những nhà máy tối tăm của quỷ satan lù lù đằng sau nó.

Điểm dừng tiếp theo là máy chuyển đổi oxy cơ bản, một cái tên khá buồn tẻ cho một quá trình khá thú vị, vì đây là nơi sắt trở thành thép. Dung nham từ lò cao của chúng tôi được đổ vào một cái muôi khổng lồ để loại bỏ lượng lưu huỳnh còn lại. Sau đó, thùng kim loại lỏng lớn màu đen này được nâng lên và ném về phía bộ chuyển đổi oxy trên thứ mà tôi hy vọng là một chiếc cần cẩu rất chắc chắn. Xem xong cảnh cuối của *Kẻ hủy diệt 2* , tôi biết ngay cả Arnold Schwarzenegger cũng không thể sống sót khi chạm trán với kim loại nóng như thế này. Chất lỏng phát sáng màu đỏ được đổ vào lò chuyển đổi – một chiếc nồi nấu hình quả lê – cùng với 60 tấn thép phế liệu; tất cả mọi thứ từ lon đậu nướng đến phụ tùng ô tô. Việc thép 'mới' thực sự được tái chế một phần là một trong những nghịch lý ít được hiểu về lĩnh vực này, nhìn từ bên ngoài thì cực kỳ bẩn thỉu và lãng phí nhưng hóa ra lại có tỷ lệ tái chế cao nhất ở bất kỳ đâu.

So với lò cao, quá trình luyện thép khá đơn giản và nhanh chóng một cách đáng ngạc nhiên. Một cây thương kim loại được hạ xuống bình chuyển đổi và phun một luồng oxy nguyên chất siêu âm vào dung nham. Hai mươi phút bắn pháo hoa sau đó và thứ được nhập vào là gang, với 4% carbon, còn lại dưới dạng thép nóng chảy, với khoảng 0,4% carbon. Điều đáng chú ý, ngay cả ngày nay, là mọi thứ diễn ra nhanh đến mức nào. Đột nhiên hàng trăm tấn gang đã trở thành thép. Một việc mà lẽ ra phải mất hàng tuần làm việc trước khi Bessemer phát minh ra bộ chuyển đổi của mình, lại được thực hiện trong vài phút. Đứng và quan sát hậu duệ hiện đại của lò luyện kim của Ngài Henry, bạn bắt đầu nhận ra tầm quan trọng của nó cũng như việc nó

đã thay đổi cuộc sống ở đất nước này và hơn thế nữa một cách đáng kể như thế nào. Đột nhiên, thép được cung cấp rộng rãi và quan trọng là giá rẻ.
Và vì nó rẻ nên bạn có thể có thép ở bất cứ nơi nào bạn muốn: thép dùng cho máy cày, động cơ, khung của các tòa nhà và cả những chiếc đinh gắn chúng với nhau. Ở đây chúng ta bắt đầu bài học tương tự như chúng ta bài học từ bê tông: điều gì khiến thép trở thành trụ cột của Thế giới Vật chất? Không chỉ là nó làm rất tốt công việc của mình mà còn rất tốt *và* rất rẻ. Sự rẻ tiền đó - có nghĩa là thép không còn là một phần trong số liệu thống kê GDP của chúng ta - chính là vũ khí bí mật của nó. Trở lại năm 1810, người Mỹ đã chi tiêu một tỷ lệ thu nhập quốc dân cho những chiếc đinh sắt tương đương với tỷ lệ họ chi cho máy tính ngày nay. Ngày nay, những chiếc đinh thép gần như không có giá trị gì - trong khi lại vượt trội hơn nhiều so với những chiếc đinh sắt trước đây - có nghĩa là chúng ta có nhiều tiền hơn để chi cho máy tính. [9]
Điều đó nghe có vẻ hơi nhàm chán và không có gì đáng chú ý, nhưng thành thật mà nói, thế giới mà chúng ta biết được xây dựng dựa trên những bước nhảy vọt nhàm chán như thế này. Thép là một tiến bộ vật chất kỳ diệu nhưng nó thực sự đã lỗi thời một khi nó có thể dễ dàng được đưa vào cuộc sống của con người, điều này không chỉ phụ thuộc vào tiến bộ vật chất mà còn phụ thuộc vào những thứ buồn tẻ như kỹ thuật sản xuất hàng loạt cũng như những thứ tẻ nhạt hơn, như bối cảnh của tiêu chuẩn. Quay trở lại năm 1917, nếu bạn muốn mua một chiếc rìu để chặt cây thì có khoảng một triệu - hay đúng hơn là 994.840 - các loại rìu đơn bit khác nhau để bạn lựa chọn ở Hoa Kỳ. Một trong những tiến bộ ít được đánh giá cao nhất nhưng quan trọng nhất của thế kỷ 20 là sự ra đời - trong trường hợp này là của chính phủ Hoa Kỳ dưới thời Tổng thống Herbert Hoover - về một bộ tiêu chuẩn sản phẩm, có nghĩa là ốc vít và bu lông có một số kích cỡ nhất định chứ không phải tất cả. các loại kích thước ngẫu nhiên. Thép đã thay đổi thế giới vì tất cả những lý do sau: bởi vì mọi người có thể có được nó và làm việc với nó, bởi vì nó có ở khắp mọi nơi và, vâng, bởi vì nó rẻ – phần lớn là nhờ vào những cái vạc khổng lồ như cái trước mặt tôi. [10]

Thép mới đúc - vẫn còn nóng đỏ, trông vẫn giống dung nham cách đây vài phút - được đưa vào một thùng chứa khác và thế là bắt đầu một hành trình khác. Vì đây là điểm bắt đầu của những thứ phức tạp, thời điểm khi thép trơn (thép nhẹ, như đôi khi người ta gọi nó) được biến thành một trong hàng trăm hợp kim khác nhau, mỗi loại có đặc tính và đặc tính riêng.

Thêm mangan (khoảng 1,7% theo thể tích) và bạn sẽ thu được một loại thép cứng, dẻo, rất lý tưởng để chế tạo đường ray xe lửa. Thêm silicon và bạn có một loại thép điện mà bạn có thể sử dụng cùng với đồng trong động cơ hoặc máy biến áp. Thép không gỉ, với đặc tính chống gỉ, có 12% crom, đôi khi được thêm niken để tăng độ bền. Đối với thiết bị hạ cánh máy bay, bạn sẽ cần một hợp kim chắc chắn, dẻo, dai, được làm bằng molypden, silicon và vanadi. Và tiếp tục - ngày nay có hàng trăm loại hợp kim thép khác nhau, nhưng tất cả đều bắt đầu từ đây, với một lượng nhỏ thành phần đặc biệt được cho vào vạc kim loại nóng sủi bọt.

Nhưng trong khi quặng sắt tương đối dễ kiếm thì một số chất phụ gia kỳ lạ này lại không như vậy. Khoảng 70% niobi của thế giới – một nguyên tố đất hiếm giúp làm cứng thép để sử dụng trong động cơ phản lực, đường ống quan trọng, nam châm siêu dẫn, khung cầu và tòa nhà chọc trời – đều đến từ một mỏ duy nhất ở Brazil. Trong Chiến tranh thế giới thứ hai, người Đức và người Anh tranh giành tình cảm của Thổ Nhĩ Kỳ trung lập, một phần vì nước này sản xuất gần như toàn bộ crom mà Đức Quốc xã sử dụng trong vũ khí và máy móc của họ. Khi tôi đến thăm Port Talbot, ngay sau cuộc xâm lược Ukraine, tôi lo lắng về nguồn cung cấp mangan, phần lớn trong số đó đến từ miền trung Ukraine.

Nhưng việc thêm hợp kim vào vạc sủi bọt chỉ là một phần của câu chuyện. Trên thực tế, điều kỳ diệu thực sự vẫn chưa xuất hiện, vì nếu bạn muốn loại thép thực sự bền, thực sự đàn hồi mà bạn có thể sử dụng làm hệ thống cáp treo một cây cầu treo, thì điều đó có nghĩa là phải đập vỡ và biến đổi cấu trúc nguyên tử của nó thành hình dạng. Những người thợ rèn ngày xưa sẽ rèn kiếm của họ để tạo ra một lưỡi kiếm cứng cáp và chắc chắn; các nhà sản xuất thép ngày nay sử dụng những cỗ máy khổng lồ để thực hiện ít nhiều công việc tương tự.

Chúng tôi quan sát thép nóng chảy, giờ đã được bổ sung thêm hợp kim, được đổ vào một cái máng lớn gọi là thùng dư và sau đó chảy xuống một loại hộp thư lớn có lỗ mở trên sàn. Ở đây, thép được làm nguội nhanh chóng và đột nhiên thứ từng là chất lỏng giờ trở thành rắn - ngoại trừ loại kim loại rắn mà bạn có thể quen thuộc. Đây là thép nóng đỏ đang bốc hơi: có thể uốn cong nhưng nặng và cứng.
Nó kêu leng keng và đập mạnh khi nảy xuống băng chuyền về phía nhà máy, nơi nó được chạy qua một loạt con lăn kim loại khổng lồ ép chặt đến nỗi chỉ trong vài phút, một tấm đá đã bị nén xuống từ hơn 200mm đến gần hơn. hơn một milimet. Những gì đi vào là một tấm dài 9 mét hóa ra là một tấm thép mỏng dài một km. Chúng tôi đứng trên lối đi khi những tấm khăn trải giường cuộn lại, vẫn còn đỏ rực như một chiếc bếp điện cũ, được chuyển bên dưới chúng tôi tới một con robot đang chờ, trên đó có viết nguệch ngoạc một mã đặc biệt: loại thép, khách hàng cuối cùng. Khi một người đi ngang qua chúng tôi, trong giây lát tôi cảm thấy như thể mình đang lơ lửng trên một chiếc chảo rán nóng.
Những gì đã từng là đá bây giờ là kim loại. Tôi đứng đó trong nhà kho rộng lớn nhìn chằm chằm vào hàng trăm cuộn thép khổng lồ này, mỗi cuộn được sản xuất chỉ trong vài giờ, mỗi cuộn chờ được vận chuyển đi để được ép vào một cuộc sống mới như một đồng xu kêu leng keng trong túi ai đó, như một khung của máy giặt, khung gầm hoặc thân xe ô tô.

Chế tạo ô tô và đánh chìm tàu

Người ta khó có thể kể câu chuyện về thép mà không dành một chút thời gian để suy ngẫm về ngành công nghiệp ô tô và đặc biệt là một nhà sản xuất ô tô. Khi Henry Ford đi tiên phong trong sản xuất hàng loạt vào đầu thế kỷ 20, đó là câu chuyện về thép: thép trong máy móc trong các nhà máy của ông, thép trong các công cụ được sử dụng trong dây chuyền lắp ráp của ông. và thép trong ô tô. Hóa ra Ford bị ám ảnh bởi ngành luyện kim thép. Anh ấy đã dành nhiều tháng để nghiên cứu các loại hợp kim khác nhau để đưa vào Model T nổi tiếng của mình, cuối cùng là tạo ra thép vanadi, một loại hợp kim nhẹ, bền khiến anh ấy phấn khích đến mức đã kiếm được rất nhiều tiền khi tiếp thị chiếc xe.

Quảng cáo vào thời điểm đó tuyên bố: “Thép Vanadi, loại thép tốt nhất và đắt nhất được sản xuất, được sử dụng cho toàn bộ chiếc xe”. '[T]he trục, trục, thanh nối, lò xo, bánh răng, giá đỡ, v.v. đều được làm bằng thép vanadi.' [11]

Nếu không có loại hợp kim nhẹ hơn, chắc chắn hơn này, Model T có thể đã không bao giờ xuất hiện. Và điều đó lại phụ thuộc vào các nhà sản xuất thép mà Ford và các đồng nghiệp của ông đã thuyết phục thành lập cửa hàng ở Ohio, sản xuất loại vật liệu này với số lượng đủ lớn để cung cấp cho các nhà máy của ông. Nó giúp Model T vượt qua các đối thủ cạnh tranh – nhẹ hơn, dễ điều khiển hơn và có tỷ lệ công suất trên trọng lượng lớn hơn những chiếc xe khác, hầu hết đều được rèn từ loại thép nặng thông thường thời đó. [12]

Và Ford đã đi trước thời đại, vì bạn vẫn có thể tìm thấy vanadi trong khung gầm ô tô ngày nay, mặc dù nằm cạnh một loạt các hợp kim ít người biết đến khác. Có lẽ loại tương đương hiện đại nhất với thép vanadi của Ford là thứ mà các nhà sản xuất ô tô gọi là 'thép cường độ cao tiên tiến' (AHSS), một loại tiêu chuẩn cho hợp kim cường độ cao, trọng lượng nhẹ, có xu hướng chứa nhiều mangan, cũng như silicon và nhôm, và đôi khi cả vanadi. [13]

Những chiếc ô tô ngày nay thực sự nặng hơn đáng kể so với những thập kỷ trước, tuy nhiên điều này ít liên quan đến thép mà liên quan nhiều hơn đến mọi thứ khác. Trọng lượng của khung và thân xe đã giảm trong những năm gần đây nhưng thay vì sử dụng những kim loại nhẹ hơn để tạo ra một chiếc ô tô nhẹ hơn, các nhà sản xuất ô tô có xu hướng bù đắp bằng cách làm cho ô tô của họ lớn hơn và có nhiều tính năng hơn. Đây là một ví dụ quy mô nhỏ về cái mà các nhà kinh tế đôi khi gọi là 'Nghịch lý Jevons', theo tên nhà kinh tế học William Stanley Jevons, người đã khẳng định vào thế kỷ 19 rằng cho dù chúng ta có tạo ra động cơ và máy móc hiệu quả hơn bao nhiêu đi nữa, chúng ta cũng sẽ đơn giản tìm ra những lý do mới để đốt nhiều (hoặc nhiều) than hơn.

Kết quả của cuộc đua nhằm giảm trọng lượng của thân xe (ngay cả khi điều đó có nghĩa là thay thế nó bằng các thiết bị khác) là các nhà sản xuất thép đang tham gia vào một cuộc chiến với vật lý và với các đối tác của họ trong ngành công nghiệp nhôm để sản xuất hợp kim nhẹ hơn bao giờ hết.

Laura Baker, người đứng đầu bộ phận quản lý và phát triển sản phẩm tại nhà máy ở Port Talbot, nói với tôi: “Ở đây chúng tôi có nhiều công nghệ hơn NASA. 'Chúng tôi đang vận chuyển mọi thứ qua nhà máy với tốc độ 1.000 mét một phút. Chúng tôi đang kiểm soát độ dày trong phạm vi 0,05 mm khi chạy ở tốc độ đó. Chúng ta có thể tạo ra thép mỏng hơn bao giờ hết. Đây là một dạng công nghệ nano.”
Và thật hấp dẫn khi cho rằng, khi bạn quan sát dung nham chảy ra từ lò cao, quá trình sản xuất thép cơ bản vẫn bị mắc kẹt trong thời kỳ đen tối, trên thực tế, thứ 'vani' được sản xuất bởi hầu hết các nhà máy thép ngày nay tốt hơn đáng kể so với các loại tương đương chỉ được sản xuất cách đây vài chục năm. Độ bền, hiệu suất điện và khả năng chống ăn mòn của thép đã tăng gần gấp 10 lần chỉ trong nửa thế kỷ qua. [14]
Có lẽ ví dụ điển hình nhất về sự cải tiến liên tục này là vụ tai nạn nổi tiếng nhất: vụ chìm tàu Titanic *vào* năm 1912. Vào thời điểm đó, con tàu được chế tạo bằng một số loại thép bền nhất, cứng nhất hiện có. Tuy nhiên, phân tích kim loại thu được trong những năm gần đây từ thân tàu cho thấy chúng được làm từ những loại thép ngày nay chưa bao giờ đạt tiêu chuẩn: hàm lượng lưu huỳnh cao, hàm lượng mangan thấp và dễ bị vỡ ở nhiệt độ thấp. Nhiều đinh tán giữ thép cố định được làm bằng sắt rèn rẻ tiền chứ không phải bằng thép, điều này một lần nữa khiến chúng dễ bị vỡ hơn. Có phải con tàu được sản xuất bằng thép hiện đại, nó có thể có cơ hội sống sót cao hơn sau tác động của tảng băng trôi. [15]
Titanic cũng không phải là con tàu cuối cùng bị yếu kim loại. Trong Chiến tranh thế giới thứ hai, cả một đội tàu chở hàng - 'Tàu Tự do' - được chế tạo một cách vội vàng để vận chuyển hàng hóa giữa các nước Đồng minh. Nhiều con tàu được chế tạo bằng hợp kim thép hoạt động hoàn hảo ở nhiệt độ phòng nhưng trở nên giòn khi thời tiết lạnh giá. Vì vậy, khi một số tàu đi vào vùng nước lạnh hơn, chúng đã phải chịu thiệt hại thảm khốc. Một số ít bị gãy làm đôi mà không báo trước.
Thép dùng cho đóng tàu ngày nay có khả năng đàn hồi tốt hơn đáng kể và chúng chiếm một phần nhỏ trong số lượng áp đảo - hàng nghìn - thuộc các loại kim loại khác nhau. Có những loại thép uốn cong, có những loại thép cứng, có những loại thép dày hơn thân cây hay mỏng

hơn lá bếp, có những loại thép bọc thép từ Thụy Điển, thép càng đáp từ Sheffield, thép đúc chân không, thép bột dùng cho in 3D…
Tuy nhiên, việc chế tạo những loại thép như vậy không phải lúc nào cũng đơn giản. Phần lớn thép được sản xuất ở Trung Quốc, ít nhất là cho đến gần đây, có chất lượng khá kém. Nó được sử dụng làm thanh cốt thép trong bê tông, nơi nó thường bị mục nát, dẫn đến thiếu sót về kết cấu trong cầu và đường cao tốc. Năm 2015, thủ tướng lúc bấy giờ là Lý Khắc Cường đến thăm Diễn đàn Kinh tế Thế giới ở Thụy Sĩ, cầm bút bi lên và sửng sốt.
“Tại sao,” ông hỏi, “không thể [Trung Quốc] tạo ra một cây bút có thể viết êm và dễ dàng như vậy?”
Hóa ra, câu trả lời là mặc dù sản lượng thép khổng lồ, mặc dù sản xuất 80% số bút trên thế giới, nhưng khả năng sản xuất ổ bi và ổ cắm bằng thép cực nhỏ tạo nên công nghệ chính của những chiếc bút này vẫn nằm ngoài tầm tay của các nhà sản xuất Trung Quốc. Ngòi do Trung Quốc sản xuất thường thô và dễ xước; họ hết mực hoặc ngừng hoạt động sau vài ngày. Khi Các nhà sản xuất muốn có một chiếc ngòi chất lượng, thay vào đó họ sẽ phải nhập khẩu các bộ phận thép từ Nhật Bản, Đức hoặc Thụy Sĩ. [16]
Theo nhận xét của thủ tướng, việc ngành thép không thể tạo ra những sản phẩm chính xác này đã trở thành một nỗi ô nhục quốc gia. Các nhà sản xuất bút và nhà sản xuất thép bị chỉ trích trên truyền hình và yêu cầu giải thích. Cuối cùng, hai năm sau, một trong những công ty thép quốc doanh tuyên bố rằng họ đã thành công trong việc tạo ra một chiếc ngòi bút chất lượng. Thành tích này được truyền hình nhà nước Trung Quốc ca ngợi như một sự kiện ăn mừng quốc gia. [17]
Bạn thấy đấy, thép rốt cuộc không khác gì silicon. Đây là một vật liệu khác được rèn trong lửa và đám mây carbon, câu chuyện của nó không chỉ về lò nung thời trung cổ và kim loại nóng chảy, mà còn về độ chính xác, về khả năng của loài người trong việc thao tác vật liệu một cách cẩn thận và khéo léo. Quả thực, trong số vô số loại thép của thế kỷ 21, có một số loại có cấu trúc tinh thể hoàn hảo đến mức chúng giống với những khối silicon mà chúng ta dùng để chế tạo chip máy tính.
Nhưng trong số tất cả các loại thép này có lẽ loại thép khó hiểu nhất là thứ gọi là thép nền thấp. Đây là kim loại hoàn toàn không bị nhiễm

phóng xạ – một loại năng lượng hạt nhân – và rất cần thiết để sản xuất các thiết bị nhạy cảm như máy đếm Geiger và một số thiết bị y tế. Và việc sản xuất thép nền thấp ngay từ đầu về cơ bản là không thể thực hiện được ngày nay. Kể từ khi những quả bom nguyên tử đầu tiên được kích nổ, bầu khí quyển Trái đất đã chứa một lượng nhỏ ô nhiễm hạt nhân – các đồng vị như coban-60. Số lượng quá nhỏ nên chúng ít gây ra rủi ro rõ rệt cho con người và chúng đang giảm dần, nhưng vì quá trình sản xuất thép liên quan đến việc phun oxy vào hỗn hợp dung nham và vì oxy đó được lấy từ không khí nên vẫn không có cách nào sản xuất thép mà không có một lượng rất nhỏ. các hạt nhân phóng xạ đang tìm đường xâm nhập.
Do đó, cách duy nhất để có được thép nền thấp là tìm nguồn kim loại có từ trước những vụ thử hạt nhân đầu tiên vào năm 1945. Các thiết giáp hạm cũ bị chìm là một nguồn đặc biệt phổ biến. Một số thép từ xác tàu Đức bị đánh đắm tại Scapa Flow trong Thế chiến thứ nhất được cho là đã được tháo dỡ và rèn thành thiết bị y tế. Và hoạt động buôn lậu kim loại từ các tàu chiến cũ đang diễn ra rầm rộ, đặc biệt là ở Biển Đông. [18]
Perth của Úc bị chìm ở Vịnh Banten ngoài khơi mũi phía tây bắc của đảo Java của Indonesia vào năm 1942, đã bị những kẻ nhặt rác bất hợp pháp đánh cắp 60% thân tàu. Điều gì đó tương tự đã xảy ra với xác tàu HMS *Repulse* và HMS *Prince of Wales* ở ngoài khơi Malaysia và các tàu chở hàng của Nhật Bản gần Borneo. Sẽ có vẻ nghịch lý khi những con tàu này, được bảo tồn trong nhiều năm như những ngôi mộ và đài tưởng niệm thủy thủ đoàn, lại bị đột kích và xúc phạm, tất cả chỉ vì kim loại và khoáng chất bên trong chúng. Nhưng mọi chuyện diễn ra như vậy trong Thế giới Vật chất.

Sau khi rời xưởng thép Port Talbot, tôi tìm thấy một vị trí trên đồi nhìn ra khu vực này. Một tàu chở hàng rời đang đổ quặng sắt ra bến tàu phía sau lò cao. Tôi nhìn gò đất màu đỏ nâu trù phú ngày càng lớn lên, trở thành một ngọn núi nhỏ và tự hỏi nó đến từ đâu - tảng đá này sẽ sớm tan chảy thành dung nham và sau đó được rèn thành thép. Những nơi như thế này đang giảm dần về số lượng. Hiện chỉ có hơn 500 nhà máy trên khắp thế giới có lò cao, thực hiện công việc cơ bản là biến đất thành kim loại. Ngày xửa ngày xưa, Vương quốc Anh sản

xuất nhiều thép hơn bất kỳ quốc gia nào khác. Đây là nơi bắt đầu các lò cao và sản xuất thép hiện đại. Ngày nay, cứ hai năm, Trung Quốc sản xuất nhiều thép hơn toàn bộ sản lượng thép của Anh kể từ cuộc cách mạng công nghiệp.

Ngay cả khi tôi ngồi đó ở xứ Wales, nhìn khói và hơi nước bốc lên từ các lò luyện cốc và lò cao, những cuộc trò chuyện đang xảy ra ở London về việc liệu các nhà máy thép có cần được chính phủ giải cứu hay không trước tình trạng giá năng lượng tăng cao. Rõ ràng số phận của trang web đang bị đe dọa. Sau đó, một lần nữa, bạn có thể đã nói ít nhiều điều tương tự ở nhiều thời điểm khác nhau trong nhiều thập kỷ. Họ đã sản xuất sắt ở khu vực này trong gần một thiên niên kỷ và sản xuất nó ở địa điểm này trong hơn một thế kỷ và đã bị xóa sổ nhiều lần đến mức không ai thèm nhớ.

Mặc dù vậy, đối với tất cả nền sản xuất tiên tiến và công nghệ nano đang diễn ra ở dưới đó, vẫn khó có thể kết luận rằng nơi này là di tích của quá khứ. Và, theo một nghĩa nào đó, nó chính xác là như vậy. Bởi vì ngành công nghiệp thép - và vì vấn đề đó, việc buôn bán quặng sắt cung cấp đầu vào chính cho ngành này - sắp trải qua quá trình chuyển đổi lớn nhất kể từ thời Henry Bessemer.

9
Vụ nổ cuối cùng

PILBARA, TÂY ÚC

Không có nơi nào trên hành tinh giống như Pilbara. Vùng đất rộng lớn đầy bụi rậm và bạch đàn, nơi nhiệt độ thường xuyên vượt quá 45°C và các biển báo trên đường cảnh báo rằng trạm xăng gần nhất cách đó hàng trăm km, là một chiếc kính vạn hoa đầy màu sắc. Ở dưới các hẻm núi có những quả sung đá và những bông hoa mulla mulla mềm mại với đầu màu hồng neon; có những cây cọ chai màu đỏ đậm và những hạt đậu Ashburton cao, màu tím, nhưng trên hết là vùng đất Pilbara không thể nhầm lẫn.

Đá đỏ trong thung lũng, đá đỏ trên núi và bụi đỏ khắp nơi. Nó bám vào ủng của bạn, phủ lên quần áo và che kính chắn gió của bạn khi bạn lái xe trên những con đường dài và thẳng tắp mà người Úc gọi là miền Tây hoang dã của họ. Việc trái đất ở đây trông giống rỉ sét là do trái đất ở đây *bị* rỉ sét. Hầu hết đất đai trên thế giới đều có sắt, nhưng không nơi nào khác lại có nhiều sắt với nồng độ cao như vậy trên một phạm vi rộng lớn như ở Pilbara này.

Cắt qua một số tảng đá và bạn sẽ thấy một mặt cắt đặc biệt: một tấm thảm địa chất trông rất giống một tác phẩm nghệ thuật của thổ dân. Có những lớp sắt, đá phiến silic, đá phiến sét, bột kết và dolomit nối tiếp nhau, ngọ nguậy theo thời gian. Địa chất cung cấp nhiều điểm tham quan hấp dẫn hơn so với các thành tạo bằng đá sắt có dải này - tàn tích của hoạt động đại dương từ thời Tiền Cambri, sớm nhất trong lịch sử hành tinh.

Việc loại đá sắt này có màu đỏ gần như máu không phải ngẫu nhiên. Hematite, về mặt kỹ thuật, được biết đến theo tên tiếng Hy Lạp có nghĩa là máu, chứa các nguyên tử sắt ở trạng thái oxy hóa giống như những nguyên tử chảy trong huyết quản của chúng ta. Có nhiều loại quặng sắt khác ở những nơi khác – loại magnetite đen được tìm thấy ở vùng núi từ tính ở Nga, loại limonit màu nâu ở nhiều loại đất, cũng như trên bề mặt Sao Hỏa – nhưng không có loại nào hấp dẫn đến thế.[1]

Người dân ở đây đã tách những tảng đá này ra từ thời tiền sử, sử dụng đá sắt để làm rìu và công cụ thời trang, dùng đá để nghiền thức ăn, giết động vật và đôi khi khắc tác phẩm nghệ thuật vào tường hang động. Bốn mươi nghìn năm trước, những người săn bắn hái lượm ở đây di chuyển từ hố nước này sang hố nước khác, di chuyển trung bình 27 dặm một ngày và rình rập con mồi. Vào mùa đông, họ sẽ tìm nơi ẩn náu trong nhiều nơi trú ẩn bằng đá tự nhiên ở đây và đốt lửa trước khi tiếp tục. Các nhà khảo cổ vẫn đang khám phá bằng chứng mới về những đồ tạo tác bằng đá và xương này, có niên đại hàng chục nghìn năm: sớm hơn các di tích cổ như Stonehenge hay Kim tự tháp Giza vĩ đại.
Nhưng ngày nay bản chất của việc chặt và đào hoàn toàn khác. Để có bằng chứng về điều này, hãy xem xét Núi Whaleback, ngay bên ngoài thị trấn Newman. Đây là một trong những biểu tượng tuyệt vời của khai thác mỏ thời hiện đại. Bản thân ngọn núi đã biến mất từ lâu, thay vào đó là một hố dài 6 km, rộng 3 km và sâu hàng trăm mét. Toàn bộ bề mặt trên cùng của trái đất đã bị cạo đi bởi những chiếc máy đào khổng lồ, nghiền thành từng khối, vận chuyển trên những đoàn tàu rộng lớn, dài hàng dặm và sau đó được vận chuyển đến Trung Quốc hoặc Nhật Bản, nơi nó trở thành những tòa nhà chọc trời ở Thượng Hải và những đường ray chở tàu cao tốc. từ Tokyo tới Osaka. Châu Á thế kỷ 21 – và những nơi khác ngoài – được xây dựng từ sắt Pilbara. Úc có nhiều quặng sắt có thể khai thác được trên thế giới hơn bất kỳ quốc gia nào khác. Mỗi năm, nước này khai thác nhiều hơn gấp đôi so với Brazil, đối thủ gần nhất của nó, và gấp khoảng ba lần so với Trung Quốc. Điều này có ý nghĩa không hề nhỏ, vì việc xây dựng ngành công nghiệp quặng sắt nội địa hàng đầu thế giới đã là một trong những mục tiêu chiến lược chính của Bắc Kinh ít nhất kể từ những năm 1990. Tuy nhiên, không giống như hầu hết các lĩnh vực khác – sản xuất thép, bê tông, nhựa và lắp ráp máy móc – đây là một trong những lĩnh vực hiếm hoi mà hàng tỷ nhân dân tệ và hàng tỷ giờ lao động đó vẫn chưa được đền đáp. Vì vậy, trong khi phần còn lại của thế giới hoàn toàn phụ thuộc vào Trung Quốc về hầu hết mọi sản phẩm có thể giao dịch, thì Trung Quốc vẫn hoàn toàn phụ thuộc vào Úc về mặt hàng cực kỳ quan trọng này. Rốt cuộc thì không có lối thoát

địa chất nào cả, và trữ lượng sắt của Trung Quốc không hề giống với trữ lượng sắt mà bạn tìm thấy ở Pilbara này.

Đủ sắt cho cả thế giới

Việc có sắt ở đây - và rất nhiều trong số đó - đã bị các nhà địa chất nghi ngờ từ lâu. Trở lại năm 1890, một trong số họ, Harry Page Woodward, đã viết rằng 'Có đủ quặng sắt để cung cấp cho toàn thế giới, nếu khai thác được nguồn quặng sắt hiện tại.' Nhưng câu chuyện thực sự bắt đầu vào tháng 11 năm 1952 khi một người tên Lang Hancock đang cố gắng tìm đường trở về Perth cùng với vợ mình, Hope. [2]

Hancock, theo cách nói của tạp chí *New Yorker* , là 'một tác phẩm': cổ hủ, nóng nảy và cánh hữu không biện hộ. Ông từng nói với một người phỏng vấn rằng điều tốt nhất nên làm đối với thổ dân là 'làm hỏng' nước của họ, khử trùng họ và xóa sổ dân cư. Là một phi công nhạy bén với số tiền kha khá từ gia đình và một mỏ amiăng mà anh ta đã bán vài năm trước đó, Hancock đang lái chiếc máy bay hai động cơ của mình qua Dãy Hamersley thì anh ta phát hiện một cơn giông bão. [3]

Hamersley, bắt đầu ở phía tây bắc Newman và trải dài gần 300 dặm về phía sông Fortescue, là một cảnh quan gồ ghề với những rặng núi, cao nguyên, vực sâu và hẻm núi bị cắt bởi những dòng sông xối xả. Nhìn thấy những đám mây đen phía trước, Hancock, một phi công lão luyện, hạ độ cao của máy bay và bắt đầu lao qua các hẻm núi, và khi làm như vậy, anh nhận thấy có điều gì đó rất ấn tượng.

“Đối với tôi, những bức tường trông như sắt đặc”, sau này ông nói với đài truyền hình Australia. 'Tôi đặc biệt cảnh giác trước màu sắc rỉ sét trên chúng, điều này cho tôi biết đó là sắt bị oxy hóa.' [4]

Và, câu chuyện của anh ấy đã diễn ra như vậy (một câu chuyện mà những người viết tiểu sử của anh ấy đã đặt câu hỏi, vì không có ghi chép nào về mưa ở dãy Hamersley vào ngày hôm đó), khi thời tiết quang đãng, anh ấy quay lại để nhìn rõ hơn.

Cách đơn giản nhất để biết những tảng đá bạn đang kiểm tra có chứa nhiều sắt hay không là đẽo một khối và cầm nó trên tay. Quặng sắt *nặng* - nặng đáng kể, nặng hơn nhiều so với hầu hết các loại đá. Và dãy Hamersley, hóa ra, về cơ bản *được tạo thành* từ những loại

quặng hematit nặng này; nó được làm bằng sắt - thực sự là đủ để cung cấp cho thế giới. Vào thời điểm Hancock được phát hiện, thông tin phổ biến cho rằng Úc hầu như không có đủ sắt để tồn tại trong vài thế hệ, vì vậy đã có lệnh cấm vận đối với bất kỳ mặt hàng xuất khẩu nào. Nhưng sau khi lệnh cấm được dỡ bỏ vào năm 1960, Hancock đã thuyết phục công ty khai thác mỏ Rio Tinto ở London bắt đầu khai thác dãy Hamersley. Họ đồng ý trả vĩnh viễn cho Hancock 2,5% tiền bản quyền cho mỗi tấn quặng sắt được sản xuất ở đó. Một tỷ lệ phần trăm nhỏ trong một con số rất lớn vẫn là một con số lớn, và khi quặng sắt bắt đầu chảy, đầu tiên là đến Nhật Bản rồi đến Trung Quốc, Hancock đã trở thành một trong những người giàu nhất nước Úc. Ông qua đời vào năm 1992, sau đó công ty của ông và số tiền bản quyền quan trọng đó được thừa kế bởi con gái ông, Gina Rinehart, mặc dù chỉ sau một trận chiến ác liệt trong phòng xử án với mẹ kế, người mà bà cáo buộc âm mưu giết cha mình. [5]
Ngày nay, hơn nửa thế kỷ đã trôi qua, Rio Tinto vẫn là công ty khai thác chính phần lớn lượng sắt ở Dãy Hamersley cùng với BHP Billiton, công ty khai thác Mount Whaleback. Kỹ thuật khai thác mỏ của họ – cho nổ tung mặt đất bằng chất nổ và sau đó cào lên mặt đất – là hậu duệ trực tiếp của những gì máy móc của Andrew Carnegie bắt đầu ở dãy Mesabi ở phía đông bắc Minnesota vào cuối thế kỷ 19. Vành đai sắt vĩ đại đó, trải dài song song với Hồ Superior, là nguồn cung cấp thép cho ngành công nghiệp ô tô và các tòa nhà chọc trời vĩ đại đầu tiên của nước Mỹ. Ở đó, họ đi tiên phong trong việc sử dụng những chiếc xẻng hơi nước khổng lồ để xới đất và mở ra một chương mới trong mối quan hệ của loài người với trái đất. Khai thác mỏ không còn có nghĩa là cuốc và đường hầm nữa; trên Mesabi, điều đó có nghĩa là lột bỏ toàn bộ cảnh quan và vận chuyển nó đi để chế biến thành thép. Các mỏ sắt ở Mesabi ngày nay vẫn đang được khai thác bởi US Steel, công ty được xây dựng trên đế chế của Carnegie, nhưng khu vực hùng mạnh một thời này hiện gần như đã cạn kiệt. Ngày nay, người ta hướng tới Pilbara khi họ cần rất nhiều sắt rẻ tiền và nhanh chóng.

Một trong những niềm tin chắc chắn của Lang Hancock là thợ mỏ phải được phép khai thác ở nơi họ muốn, ngay cả khi những mỏ đó

nằm trên những địa điểm được các bộ lạc sống ở đây coi là thiêng liêng từ lâu hàng chục nghìn năm trước khi những người định cư đầu tiên xuất hiện. Và cho đến những năm 1970, đó ít nhiều là cách khai thác mỏ của Úc, với hàng trăm dặm vuông bị san bằng và dọn sạch mà không mấy quan tâm đến những người có tổ tiên đã đặt chân lên những vùng đất này. Điều này sẽ không thể chấp nhận được đối với hầu hết các nền văn hóa - hãy nghĩ lại trường hợp của người Shoshone ở Nevada - nhưng nó đặc biệt có sức tàn phá đối với thổ dân Úc, những người có triết lý, Giấc mơ, là về mối liên hệ với vùng đất. Có những câu chuyện về cách linh hồn tổ tiên của họ đã tạo ra các địa điểm và thành tạo như thế nào rải rác trên những ngọn đồi đỏ này. Phá vỡ địa chất và bạn phá vỡ Giấc mơ, vốn lâu đời hơn Kinh Koran hay Kinh thánh hàng chục nghìn năm. Không một dân tộc nào khác trên trái đất có thể khẳng định mình có lịch sử văn hóa lâu dài liên tục như thổ dân - và đối với nhiều người trong số họ, lịch sử đó đã gắn liền với đá sắt Pilbara.

Việc phá hủy bừa bãi các địa điểm linh thiêng được cho là đã chấm dứt khi Đạo luật Di sản Thổ dân năm 1972 được thông qua, quy định rằng Rio Tinto và những người khác sẽ phải công nhận những người có liên quan là chủ sở hữu truyền thống của các địa điểm này, đồng thời đạt được thỏa thuận với họ về việc khai thác và tránh phá hủy bất cứ thứ gì có giá trị văn hóa hoặc lịch sử quan trọng. Nhưng, thỉnh thoảng, mọi thứ lại đi sai hướng – rất sai lầm. Điều này đưa chúng ta đến câu chuyện của Brockman 4.

Brockman 4, đúng như tên gọi, là một nhánh của một mỏ khác, Brockman (thực ra là Brockman 2), ở một góc của Dãy Hamersley lần đầu tiên được đánh dấu vào thời đại của Lang Hancock. Các loại sắt ở đây rất phong phú, lượng hematit trải rộng khắp những ngọn đồi và thung lũng ngoạn mục, và những năm khai thác đầu tiên thực sự rất hứa hẹn – đến nỗi vào năm 2013 Rio Tinto đã xin phép để mở rộng mỏ hơn nữa, khiến nó trở thành mỏ nó lớn thứ hai ở Pilbara.

Vùng đất lân cận được mở rộng tiềm năng bao gồm một khe núi được gọi là Hẻm núi Juukan. Đây là một trong nhiều nhánh sông phù du ở Pilbara, khô ráo cho đến những tháng ẩm ướt khi nước chảy xuống Lạch Purlykuti - một tuyến đường thủy được người dân địa phương đặt tên là Puutu Kunti Kurrama. Điều mà ai cũng có thể nhớ được là

từ lâu, những người này đã đi bộ dọc theo các con suối và thung lũng, hái thuốc từ bụi cây và đôi khi dừng lại trong các hang động gần đó để trú ẩn. Có hai hang động như vậy trên Hẻm núi Juukan, cũng như một hồ đá hình đầu rắn. Giấc Mơ kể về việc làm thế nào Cái hồ này được hình thành từ những tảng đá khi một con rắn nước đi qua nó từ rất lâu rồi.

Rằng nơi này thật đặc biệt đã sớm được xác nhận bởi các nhà khảo cổ do Rio Tinto cử đến đó. Các hang động ở Hẻm núi Juukan có 'ý nghĩa khảo cổ cao', với những mảnh đá sắt được đẽo thành công cụ, cũng như các đồ tạo tác khác có niên đại hàng chục nghìn năm. Nơi này cần được bảo vệ trừ khi không thể tránh khỏi, các nhà khảo cổ đã báo cáo lại cho Rio Tinto. Người thợ mỏ đã cân nhắc ba phương án thay thế, mỗi phương án đều tránh địa điểm khảo cổ. Nhưng những điều này liên quan đến việc hy sinh tới 8,1 triệu tấn quặng sắt - trị giá khoảng 135 triệu USD. Vào cuối năm 2013, Rio Tinto đã nộp đơn xin chính phủ phê duyệt chính thức để 'làm xáo trộn' các hang động. Vài tháng sau, sự cho phép đã được cấp; tất cả những gì Rio Tinto phải làm là báo cáo lại trong vòng 60 ngày kể từ ngày xảy ra xáo trộn về mức độ ảnh hưởng đối với các địa điểm của thổ dân. [6] Giấy tờ đã xong. Đồng hồ lúc này đang điểm.

Nhưng khi các nhà khảo cổ đào sâu hơn vào hang động, họ còn tìm thấy nhiều kho báu hơn, bao gồm cả những đồ tạo tác có niên đại thậm chí còn xa hơn những phát hiện đầu tiên; những cái này đã hơn 40.000 năm tuổi. Có đá mài, ghế đá, xương kangaroo được mài thành giáo và thắt lưng bện tóc người, vốn là gen phù hợp với Puutu Kunti Kurrama. Một trong những chuyên gia kết luận rằng các hang động không chỉ có tầm quan trọng lớn; chúng là 'một trong những địa điểm có ý nghĩa khảo cổ nhất ở Úc'. Mọi người đã trú ẩn ở đây trước, trong và sau Kỷ băng hà cuối cùng - một điều khá hiếm - nhưng những chuyến thăm vẫn tiếp tục cho đến thời kỳ hiện đại. Nói cách khác, nơi này là một sợi dây liên tục nối liền thời kỳ cổ xưa đó với cư dân ngày nay. Đây là lịch sử sống động có tính đa dạng sâu sắc nhất.

Tuy nhiên, lớp đá sắt trên trần của những hang động này - chính mái nhà mà thổ dân cổ đại đã trú ẩn bên dưới - chính xác là thứ mà Rio Tinto đang tìm kiếm. Ngay cả sau những báo cáo này thường xuyên mô tả khảo cổ học về các hang động là 'có ý nghĩa từ thấp đến trung

bình'. Ngay từ khi nhận được sự chấp thuận của chính phủ, nó đã lên kế hoạch tiêu diệt chúng. Mục đích của khảo cổ học không phải là bảo tồn các hang động mà là loại bỏ bất kỳ kho báu nào trước khi những kẻ đào bới và nổ mìn đến. Các đồ tạo tác được đặt trong một container vận chuyển tại khu vực mỏ.
Khai thác là một quá trình lặp đi lặp lại chậm; một khu vực được cho nổ tung, đào và dọn sạch, sau đó công việc sẽ bắt đầu ở khu vực tiếp theo. Hình ảnh vệ tinh cho thấy mỏ Brockman đang dần mở rộng về phía hang động. Vào tháng 9 năm 2010, nó cách Hẻm núi Juukan 4,4 km. Đến năm 2015, nó cách hẻm núi 300 mét. Đến tháng 11 năm 2019 nó đã cách đó 120 mét. Ngọn đồi từng che khuất khe núi đã bị loại bỏ vương miện.
Người dân Puutu Kunti Kurrama sẽ thu được lợi ích tài chính từ việc mở rộng mỏ. Chỉ riêng quặng sắt từ khu vực hang động đã mang lại khoản thanh toán khoảng 3,1 triệu USD. Tuy nhiên, thung lũng và các hang động rõ ràng là quý giá đến mức dường như không thể - thậm chí phi lý - rằng Rio Tinto sẽ thực sự phá hủy chúng. Sự mơ hồ của công ty khai thác mỏ về kế hoạch của mình đã củng cố ấn tượng đó. Tuy nhiên, vào cuối năm 2019, khi các thợ đào hiện đang ở rìa thung lũng, một trong những nhà khảo cổ học, Heather Buildh, đã đến thăm địa điểm này cùng với các thành viên của cộng đồng thổ dân để có cái nhìn khác. Đứng cùng với người quản lý hoạt động của mỏ, Brad Webb, cô ấy chỉ về phía Hẻm núi Juukan và hỏi họ dự định làm gì với nó.
Sau đó, cô nhớ lại, ông đảm bảo với cô rằng 'không có kế hoạch mở rộng mỏ đến Hẻm núi Juukan' và nói thêm rằng nó đang 'được theo dõi tác động rung động của vụ nổ cục bộ để bảo vệ các mái đá'. Webb nhớ khoảnh khắc đó một cách khác hẳn. Sau đó anh ấy nói rằng anh ấy không rõ chính xác cô ấy đang chỉ vào đâu và nói thêm rằng anh ấy đã đưa ra một câu trả lời không cam kết. Dù sao đi nữa, cô ấy rời đi vì nghĩ rằng các hang động sẽ được cứu, và Rio Tinto đã làm như vậy. có chút mâu thuẫn với cô ấy. Trên thực tế, chúng đã được lên kế hoạch tiêu hủy trong vòng vài tháng.
Đến nay, phương pháp xác định niên đại bằng carbon phóng xạ đã đưa các cổ vật vào một trong những hang động, Juukan 2, có niên đại 46.000 năm tuổi - một trong những hang động cổ nhất ở Pilbara - tuy

nhiên chỉ có thời gian để khai quật một nửa hang động. Ai biết được kho báu nào còn được chôn ở đó? Ý nghĩa văn hóa của địa điểm này cũng ngày càng được chú trọng hơn khi có nhiều người lớn tuổi lên tiếng hơn. Hẻm núi Juukan không chỉ là nơi thỉnh thoảng mọi người trú ẩn mà còn là nơi linh hồn của người thân của họ đến an nghỉ. Đó là nơi của 'những người rất, rất già'.
Ngay cả khi thông tin này được chuyển đến Rio Tinto vào đầu năm 2020, công việc chuẩn bị khai thác vẫn đang bắt đầu. Vào tháng 4, những lỗ sâu 11 mét đã được khoan phía trên các hang động. Vào đầu tháng 5, các lỗ được lấp đầy bằng chất nổ gốc amoni nitrat, được thiết kế để tạo ra sóng xung kích tốc độ trung bình có thể làm vỡ đá thành khối lớn. Vì việc loại bỏ những chất nổ này là một nhiệm vụ khó khăn, giống như việc xử lý bom, nên thường không thể quay đầu lại kể từ thời điểm các lỗ nổ được lấp đầy. Tuy nhiên, đại diện của người Puutu Kunti Kurrama - những người đã vô tình cho rằng các hang động sẽ được bảo vệ - chỉ được thông báo rằng chúng sẽ bị phá hủy vào ngày 15 tháng 5 - sau khi chất nổ được đặt. [7]
Một vài ngày hoảng loạn và hỗn loạn xảy ra sau đó khi thổ dân và đại diện của họ cố gắng ngăn chặn các vụ nổ. Họ kêu gọi Rio Tinto, các luật sư, chính phủ. Tuy nhiên, Rio Tinto nói, đơn giản là đã quá muộn. Thuốc nổ đã được đặt. Khuyến nghị của nhà sản xuất là cho nổ chúng trong vòng 14 ngày. Họ đã trì hoãn vụ nổ trong vài ngày nhưng vào ngày 24 tháng 5 năm 2020, họ đã nhấn nút.
Một trong những hang động, Juukan 1, được bao phủ bởi một lớp đá vụn và vữa vụn, nhưng đường viền của mái nhà và tường hang vẫn lộ ra đã sống sót. Hang động còn lại, Juukan 2, hang động quan trọng nhất có bằng chứng về sự cư trú trong 46.000 năm và nhiều kho báu khác có thể vẫn chưa được khám phá, đã bị phá hủy hoàn toàn. Mái nhà, tường và lối vào đã biến mất.
Sự phản đối kịch liệt sau đó đã gây ra một trong những cuộc khủng hoảng doanh nghiệp lớn nhất trong lịch sử khai thác mỏ. Cuộc điều tra của quốc hội Úc tiết lộ rằng mặc dù đã nói với thổ dân rằng không thể gỡ bỏ chất nổ, Rio Tinto đã tìm cách thu hồi được một số cáo buộc, những cáo buộc lẽ ra đã phá hủy hồ rắn linh thiêng - một khu vực mà họ không có quyền hợp pháp để phá hủy. Nó đã không nỗ lực ngăn chặn chất nổ phía trên hang động. Có vẻ như Rio Tinto cũng

chưa bao giờ nói với người dân địa phương về sự tồn tại của ba kế hoạch khai thác thay thế có thể bảo vệ hẻm núi. Nó để lại cho họ ấn tượng rằng đơn giản là không có sự thay thế nào khác.
Rio Tinto đã xin lỗi, nhưng khi quy mô rối loạn của công ty xuất hiện trong những tháng tiếp theo, những cái đầu bắt đầu rối tung. Giám đốc điều hành và hai giám đốc điều hành khác đã từ chức (mặc dù mỗi người đều nhận được khoản tiền thưởng khổng lồ). Chủ tịch cũng làm theo ngay sau đó. Rio Tinto đã tiến hành một cuộc đánh giá bên ngoài về văn hóa nội bộ của mình, trong đó phát hiện ra các mô hình phân biệt chủng tộc, phân biệt giới tính, quấy rối và tấn công tình dục đáng lo ngại.
Sau đó, khi trình bày trước cuộc điều tra của quốc hội, người dân Puutu Kunti Kurrama cho biết họ bị sốc, cảm thấy 'sợ hãi, lo lắng và cảm giác tuyệt vọng khi nghĩ về linh hồn của tổ tiên họ không còn nơi an nghỉ'. Bài trình bày nói về một bà già,
vào cuối những năm 90 và khá yếu đuối. Cô ấy là con gái cuối cùng còn lại của Juukan, và cô ấy đã thay mặt cha mình đặt tên cho Hẻm núi và những nơi trú ẩn bằng đá, một tổ tiên rất được kính trọng của nhiều người.
Không ai nói với cô ấy rằng những tảng đá và Hẻm núi đã bị mất vì tất cả họ đều lo sợ điều đó sẽ khiến cô ấy qua đời. Mọi người đều hy vọng cô ấy sẽ không bao giờ phát hiện ra.
Có một vài lòng thương xót nhỏ. Hồ đá gần như còn nguyên vẹn. Vài tháng sau vụ nổ, một con trăn được phát hiện trong đó – bằng chứng, theo người thổ dân, về tính tâm linh và thiêng liêng của nó. Các hiện vật từ các hang động vẫn còn trong một container vận chuyển, mặc dù với những gì đã xảy ra ở những nơi khác ở Pilbara, không ai cảm thấy đặc biệt yên tâm về chúng. Trở lại những năm 1990 tại mỏ Marandoo, một số tài liệu văn hóa đã được khai quật từ một hầm đá trước khi bị phá hủy và cất giữ ở nơi khác. Sau đó có thông tin cho rằng nó đã vô tình bị ném vào bãi rác ở thành phố Darwin.
Những vụ nổ là nhịp đập của Pilbara thế kỷ XXI. Ở đây đủ lâu và bạn sẽ sớm quen với tiếng thịch-thud-thud xa xôi khi hàng triệu tảng đá - một số thành tạo đá sắt có dải đẹp nhất, lâu đời nhất trên hành tinh - bị vỡ thành từng mảnh. Chỉ riêng Rio Tinto đã cho nổ khoảng một triệu lỗ nổ mỗi năm ở đây, trung bình cứ 30 giây lại có một lỗ nổ, mặc

dù chúng thường được nhóm lại vài trăm lỗ một lần. Một số người đã ước tính rằng một hoặc hai trăm địa điểm và đồ vật khảo cổ và văn hóa quý giá bị phá hủy mỗi năm – luôn luôn có sự chấp thuận của chính phủ. Suy cho cùng, đây là vùng đất có lịch sử văn hóa phong phú như trữ lượng quặng sắt.

Sắt, vàng, uranium, đồng, lithium: có rất ít trữ lượng tốt về những khoáng sản này ở bất kỳ đâu trên thế giới mà bằng cách này hay cách khác không làm ảnh hưởng đến quyền lợi và ký ức của những người vẫn còn sống trên bề mặt. Có lẽ điều khiến việc phá hủy hang động Juukan trở nên đáng lo ngại nhất là tất cả chúng ta, bằng cách này hay cách khác, đều đồng lõa. Quặng sắt giá rẻ từ Úc là một phần của lý do Trung Quốc có thể tiếp tục sản xuất hàng hóa giá rẻ cho phần còn lại của thế giới. Quặng sắt rẻ tiền đó đã trở thành thép mà từ đó Trung Quốc đã xây dựng các nhà máy và máy móc, nơi sản xuất điện thoại thông minh của chúng ta, nơi lắp ráp pin, nơi sản xuất đồ chơi cho trẻ em của chúng ta.

Hôm nay, hoặc có lẽ là ngày mai, một vụ nổ lớn khác sẽ đẩy hàng nghìn tấn đá sắt Pilbara bay cao vài feet trước khi rơi xuống đất thành một đống đá. Những tảng đá sẽ được khai quật bởi những chiếc máy đào cỡ nhà thờ và được nghiền nát và phân loại trước khi được chất lên một chuyến tàu đi về phía bắc tới Port Hedland. Ở đó, tại nơi hiện là cảng xuất khẩu số lượng lớn nhất thế giới – chủ yếu là quặng sắt, nhưng cũng có muối và ngày nay là lithium – trái đất Pilbara sẽ được chất lên những con tàu lớn để vận chuyển đi khắp thế giới: đến Trung Quốc, đến Nhật Bản, Hàn Quốc, Mỹ và đôi khi thậm chí cả nhà máy thép Port Talbot ở miền Nam xứ Wales.

Đây là loại quặng sắt đang dần điều chỉnh sự bất bình đẳng về lượng thép bình quân đầu người giữa các quốc gia, giúp châu Á và sau đó là châu Phi xây dựng đường cao tốc, đường sắt, trường học và phòng khám y tế mà họ sẽ cần nếu muốn nâng cao mức sống của mình. phù hợp với phần còn lại của thế giới. Tuy nhiên, khi bạn khảo sát những tác động khác nhau ở đây – việc san bằng những ngọn đồi và hẻm núi đặc biệt của Pilbara, sự xúc phạm đến các địa điểm văn hóa và thải một lượng lớn carbon dioxide vào không khí – bạn sẽ không hỏi liệu có cách nào tốt hơn không? làm tất cả những điều này?

Thời đại thép phế liệu

Có một số lý do để lạc quan, vì ở phần lớn các nước giàu, nhu cầu về quặng sắt và thép nguyên chất, thép mới sản xuất bằng lò cao đang giảm dần. Chỉ số thép bình quân đầu người ở Mỹ và Anh ít nhiều không thay đổi trong vài thập kỷ, ngụ ý rằng đến một thời điểm nào đó, khi một xã hội có đủ bệnh viện và đường sắt theo dõi, nó đạt đến độ bão hòa. Đến một lúc nào đó, có thể nghịch lý Jevons sẽ không còn áp dụng được nữa và chúng ta thực sự sẽ có *đủ* .

Và vì thép tương đối dễ tái chế (chủ yếu là sắt, hầu hết các loại thép đều có từ tính nên việc phân loại chúng khỏi các chất thải khác khá đơn giản), không có lý do gì, sau khi kim loại đã phục vụ chúng ta trong vài thập kỷ, các dầm và tấm của chúng ta lại không thể được tái chế và tái sử dụng. Thật vậy, đây chính xác là nơi mà phần lớn thép của chúng ta đến từ đó. Tất nhiên, có một lượng phế liệu được đưa vào lò cao, nhưng ngày nay, ngày càng có nhiều thép của chúng ta đến từ cái được gọi là 'nhà máy mini', một cách sản xuất thép hoàn toàn khác, nấu chảy phế liệu trong hồ quang điện. lò nung. Hơn 2/3 thép của Mỹ hiện được làm từ phế liệu, khi các tòa nhà chọc trời và ô tô cũ được tái chế thành các thanh và tấm mới. [số 8]

Hãy nheo mắt một chút và bạn có thể hình dung ra một tương lai nơi các nước giàu sống gần như hoàn toàn bằng thép tái chế. Cứ sau 30 hoặc 40 năm, các tòa nhà và cơ sở hạ tầng cũ có thể bị tháo dỡ, thép bị phá vỡ, nấu chảy trong lò hồ quang điện và được sử dụng lại dưới dạng thép lỏng. Thời đại của lò cao và máy chuyển đổi Bessemer, thời kỳ khai sinh ra cuộc cách mạng công nghiệp, sẽ nhường chỗ cho 'thời đại thép phế liệu'. Đây sẽ là một sự thay đổi địa chấn nhưng chúng ta đang dần dần tiến tới nó. Dựa trên xu hướng hiện tại, vào nửa sau của thế kỷ này, chúng ta sẽ thu được nhiều thép từ tái chế hơn là từ quặng sắt. Nhịp đập của các vụ nổ ở Pilbara sẽ chậm lại và đột nhiên Trung Quốc sẽ có *quá nhiều* lò cao. Trong vòng một thời gian nữa, chúng ta có thể thấy nước này bắt đầu vận chuyển các nhà máy thép của mình tới Châu Phi theo cách tương tự như cách họ nhập khẩu từng viên gạch từ Đức và Mỹ trong nhiều thập kỷ qua. [9]

Và nếu những nhà máy nhỏ sản xuất thép tái chế của chúng ta được cung cấp năng lượng tái tạo thì đây thực sự sẽ là một dạng 'thép

xanh'. Thế giới có thể không bao giờ cần một vụ nổ khác lò nung – ít nhất là không phải cho một vài thế hệ nữa. Tất nhiên, tất cả điều này phụ thuộc vào việc cải thiện khả năng tái chế phế liệu của chúng tôi. Hiện tại, hầu hết thép tái chế đều là thép cấp thấp được đưa vào xây dựng. Ô tô vẫn chủ yếu được làm từ thép nguyên chất. [10]
Nhưng cũng có những cách khác để sản xuất thép nguyên chất mà không cần lò cao và tất cả khí thải của nó. Một công nghệ gọi là 'sắt khử trực tiếp' có thể biến quặng thành một dạng sắt mà không cần đến lượng than mà chúng ta đã thấy ở Port Talbot và không thải ra bất kỳ lượng carbon dioxide nào. Tuy nhiên, có một vài sản phẩm đánh bắt. Đầu tiên là loại thép xanh này cần một lượng hydro khổng lồ để hoạt động và việc sản xuất hydro xanh mà không cần đốt nhiên liệu hóa thạch là một quá trình tốn kém. Thứ hai là bạn không thể ném bất kỳ quặng sắt nào vào đó. Thay vào đó, bạn cần những viên có hàm lượng sắt cao hơn nhiều so với hầu hết các lò cao hiện nay. Khi nói đến loại thép xanh mới này, sắt Pilbara, chất lượng đã giảm sút trong nhiều năm do các loại quặng tốt nhất được khai thác, có thể không đạt tiêu chuẩn.
Điều đó có nghĩa là cuộc săn lùng loại sắt mới, chất lượng cao hơn hiện đang diễn ra ở những nơi khác trên thế giới. Có lẽ mỏ hứa hẹn nhất là mỏ ở bang Pará ở Brazil, nơi có câu chuyện về nguồn gốc tương tự một cách kỳ lạ với việc Lang Hancock phát hiện ra dãy Hamersley. Vào những năm 1960, một chiếc trực thăng chở hai người của đơn vị Brazil của US Steel đã buộc phải hạ cánh xuống một ngọn đồi ở khu vực này. Lý do tại sao nó hạ cánh ở nơi xa xôi này thường được che đậy, nhưng một phiên bản của câu chuyện được các chuyên gia khai thác mỏ ưa chuộng là một trong những nhà địa chất rất cần được giải tỏa. Anh bước ra ngoài và đáp lại tiếng gọi của thiên nhiên, sau đó anh nhìn xuống và nhận thấy mặt đất đã chuyển sang một màu kỳ lạ. Xung quanh có những tảng đá cùng màu nên anh nhặt một viên lên; nó nặng một cách đáng ngạc nhiên. Anh ta dùng búa đập nó và nó nứt ra để lộ ra bề mặt màu đỏ sống động. Đây là quặng sắt nguyên chất – cực kỳ tinh khiết. Ngày nay, Carajás là mỏ sắt lớn nhất thế giới và là lời giải thích tại sao những người trong ngành khai thác lại đôi khi châm biếm rằng đặc điểm quý giá nhất của một nhà địa chất thám hiểm là một cái bàng quang nhỏ.

Tuy nhiên, vẫn có một nhược điểm: mỏ này nằm ở rìa rừng nhiệt đới Amazon. Vale, tập đoàn Brazil khai thác mỏ, khẳng định họ đang làm mọi thứ có thể để đảm bảo môi trường nhạy cảm, nhưng rất khó để khai thác quặng sắt mà không làm bong tróc bề mặt trái đất. Mỗi dặm vuông mới của tôi đồng nghĩa với việc có thêm một dặm vuông nạn phá rừng.

Vì vậy việc tìm kiếm quặng sắt cao cấp mới phù hợp với thép xanh nguyên chất vẫn tiếp tục. Quốc gia Guinea ở Tây Phi có trữ lượng cực kỳ phong phú và Rio Tinto sở hữu quyền khai thác chúng cùng với một tập đoàn Trung Quốc, nhưng doanh nghiệp này đang gặp khó khăn về chính trị. Đầu năm 2022, chính quyền quân sự cầm quyền đột ngột ra lệnh dừng hoạt động khai thác.

Lựa chọn khác là tìm kiếm trữ lượng magnetite - loại quặng khác, thường kém tinh khiết hơn hematit, nhưng có khả năng được chuyển thành dạng viên cô đặc. Vẫn còn trữ lượng này ở mỏ Kiruna ở phía bắc Thụy Điển, nơi họ đã khai thác sắt trong nhiều thế kỷ. Phần lớn vũ khí và áo giáp được sử dụng trong cả hai cuộc chiến tranh thế giới đều được rèn từ sắt Kiruna và ngày nay Thụy Điển đang đi đầu trong việc phát triển thép xanh.

Cuối cùng, có một phần của thế giới nơi câu chuyện này bắt đầu: nơi từng là Liên Xô. Ngọn núi từ tính Magnitogorsk, nơi la bàn vẫn gặp trục trặc và là nơi người ta vẫn khai quật những loại quặng chất lượng cao kể từ khi thành lập thành phố gần một thế kỷ. Và nguồn khoáng chất giàu khoáng chất Kryvyi Rih ở Ukraina, nơi sản sinh ra rất nhiều loại quặng từng cung cấp cho các nhà máy thép Azovstal.

Những nơi như vậy quan trọng vì thép - dù có vẻ nhàm chán và phổ biến - vẫn là nền tảng của thế giới hiện đại. Ngày nay có những vật liệu khác mà chúng ta có thể thay thế cho nó. Bạn có thể xây dựng một tòa nhà chọc trời bằng gỗ. Có chất - cacbon trong số đó có sợi và sợi thủy tinh - với tỷ lệ cường độ trên trọng lượng cao hơn hợp kim này. Bạn có thể sử dụng nhôm thay vì thép để tạo ra phần lớn thân xe. Tuy nhiên, thép vẫn không thoát ra được. Tại sao? Một phần vì nó vẫn có những lợi thế về vật chất và thực tế so với các chất đối thủ. Ngay cả một chiếc ô tô bằng nhôm cũng cần thép boron để củng cố các điểm an toàn quan trọng của nó. Chi phí carbon để sản xuất thép

dù cao nhưng vẫn thấp hơn so với sợi carbon được làm từ dầu thô và khí tự nhiên.
Một phần nó liên quan đến một điều khác: đơn giản là chúng tôi rất giỏi trong việc sản xuất và chế tạo kim loại này. Điều này đưa chúng ta trở lại chủ đề lặp đi lặp lại về Thế giới Vật chất. Điều làm cho những chất này trở nên hữu ích không chỉ ở đặc tính vật lý của chúng mà còn ở chỗ chúng ta có thể thu được chúng một cách dễ dàng và với chi phí tương đối thấp. Sắt trở nên phổ biến từ khi nào? Khi chúng ta bắt đầu khai thác nhiên liệu hóa thạch để sản xuất nhiên liệu mà không tiêu tốn hết rừng (điều này đã kích hoạt kỷ nguyên carbon). Thời điểm thép bắt đầu thay đổi thế giới không phải là khi nó được phát hiện lần đầu tiên cách đây hàng nghìn năm mà là khi Ngài Henry Bessemer phát triển một quy trình tạo ra nó không chỉ trong vài giờ hay vài ngày mà chỉ trong vài phút.
Kết quả là thế giới ngày nay, tức là một thế giới được làm từ thép, trong các công trình chúng ta sinh sống, cơ sở hạ tầng và phương tiện giao thông mà chúng ta sử dụng cũng như các công cụ sản xuất mọi thứ khác. Đây vẫn là kim loại nguyên mẫu vì công dụng của nó vẫn lấn át mọi thứ khác. Sau sắt, nhôm là kim loại được sử dụng phổ biến thứ hai. Tuy nhiên, với mỗi tấn nhôm chúng tôi sản xuất vào năm 2021, chúng tôi tạo ra 28 tấn thép. Không có gì khác có thể sánh bằng, ngoại trừ ở một khía cạnh. Có một kim loại khác mà chúng tôi thậm chí còn nỗ lực khai thác nhiều hơn, một kim loại mà chúng tôi chiếm được nhiều đất hơn bất kỳ kim loại nào trên thế giới. Những cái hố chúng ta đào và những mỏ chúng ta xây để khai thác sắt thật đáng kinh ngạc. Nhưng điều này chẳng là gì so với những gì chúng ta làm để có được chất tiếp theo trong Thế giới Vật chất.

Phần thứ tư

ĐỒNG

10
Điều tuyệt vời nhất tiếp theo

“Thưa các anh chị em,” người đàn ông nói. 'Tôi muốn nói với bạn điều này. Điều tuyệt vời nhất trên trái đất là có được tình yêu của Chúa trong trái tim bạn, và điều tuyệt vời tiếp theo là có điện trong nhà bạn.' Đó là vào đầu những năm 1940. Người đàn ông đó là một nông dân, đang phát biểu tại một nhà thờ ở vùng nông thôn Tennessee. Trang trại của anh ấy đã được điện khí hóa cách đây không lâu và người ta thỉnh thoảng nhìn thấy anh ấy ở ngoài đó, ngồi trên một ngọn đồi, ngạc nhiên nhìn những ánh đèn sáng rực từ ngôi nhà, nhà kho và lò hun khói của anh ấy. [1]

Họa tiết này là một trong nhiều họa tiết của thời đại, khi những dòng điện lan rộng từ các thành phố đến những vùng nông thôn xa hơn của nước Mỹ, thay đổi cuộc sống của người dân một cách đột ngột và sâu sắc mà ngày nay khó có thể đánh giá được. Đã có nhiều cuộc cách mạng về mức sống của chúng ta trong nhiều thế kỷ trôi qua, nhưng rất ít cuộc cách mạng đột ngột và được chào đón như điện.

Một cách để hiểu rõ vấn đề này là hãy xem xét một chiếc bàn ủi - không phải loại bàn ủi mà bạn gặp ở phần trước: thay vào đó, loại bàn ủi bạn dùng để ủi quần áo.

Ngày nay, chúng ta ít quan tâm đến bàn ủi quần áo, những thứ thậm chí còn ít được chú ý hơn so với các thiết bị gia dụng đơn giản khác như lò nướng hoặc máy hút bụi, nhưng không phải lúc nào cũng như vậy. Việc ủi đồ trước đây rất, rất khác và rất, rất khó. Trở lại trước khi có điện, 'ủi quần áo là điều tồi tệ nhất', theo một bà nội trợ Texas. 'Không có gì khó bằng việc ủi quần áo.' [2]

Nhân tiện, đây là những người cực kỳ cứng rắn, mà định nghĩa về 'cứng' gần như chắc chắn khác với chúng ta về mặt chất lượng. Họ dành hàng giờ để chà quần áo trên ván bằng xà phòng ăn da khiến da họ bị phồng rộp. Họ sẽ đi bộ hàng trăm dặm trong một năm, chở nước từ giếng đến trang trại - đến mức hầu hết phụ nữ ở vùng nông thôn nước Mỹ thời tiền điện đều bị khom lưng và khom lưng một cách đáng chú ý ở tuổi trung niên. Một tính toán từ năm 1886 cho thấy một

bà nội trợ điển hình ở Bắc Carolina đã phải gánh tổng cộng 36 tấn nước đi 148 dặm trong một năm. Đó là trước khi tính củi chất vào nhà để đốt lò. Ngay cả việc đun sôi nước cũng là một công việc nghiêm túc; ủi thậm chí nhiều hơn như vậy. [3]
Trong khi bàn ủi ngày nay chủ yếu được làm bằng nhựa với đế bằng thép hoặc nhôm nhẹ, thì bàn ủi trước khi có điện là những khối sắt nặng và rắn chắc. Nếu bạn chơi trò chơi cờ Monopoly cách đây vài năm, trước khi người ta thay miếng sắt bằng một con mèo, bạn sẽ biết những thứ này trông như thế nào. Tuy nhiên, các quân cờ Cờ Tỷ Phú không thể tái tạo lại cảm giác cầm một trong những bàn là buồn bã này (thật buồn là từ tiếng Anh cổ có nghĩa là 'rắn chắc'). Chúng nặng một cách đáng ngạc nhiên - gấp khoảng ba lần trọng lượng của các loại hiện đại - bởi vì đó là cách chúng giữ nhiệt. Dù vậy, chúng vẫn phải được kéo đi kéo lại liên tục vào bếp để hâm nóng – hai lần cho mỗi chiếc áo. Mỗi lần như vậy, lửa sẽ phải được nhóm lên và bề mặt bàn ủi nóng như lửa sẽ phải được chà nhám và cạo sạch để loại bỏ muội than khỏi bếp. Bàn tay của những người vợ nông dân thời đó đầy vết sẹo do va chạm gần với bàn ủi buồn thảm.
Khi điện đến các thị trấn và tiền đồn này, vật dụng đầu tiên mà hầu hết các gia đình mua là bàn ủi điện. Những điều như vậy ngày nay đã bị lãng quên từ lâu. Khi các nhà sử học nói về khi có điện họ thường nói về những điều hiển nhiên – việc thay thế những ngọn đèn dầu hỏa mờ bằng những bóng đèn sáng và sự ra đời của máy bơm điện để nước không còn phải bơm lên từ giếng nữa. Nhưng điều khiến điện trở thành thứ vĩ đại nhất sau tình yêu của Chúa là nó nhanh chóng cải thiện hầu hết mọi khía cạnh của cuộc sống hàng ngày, từ việc lớn đến việc nhỏ. Và vật liệu dùng để tạo ra điện và đưa điện đến nhà người dân, vật liệu giúp mang lại cuộc cách mạng này, chính là đồng.
Tất cả sáu vật liệu được nêu trong cuốn sách này đều cần thiết cho cuộc sống hiện đại, nhưng có một điều gì đó đặc biệt quyến rũ về đồng. Thứ kim loại lấp lánh này đồng thời là biểu tượng của lịch sử cổ xưa và là chìa khóa cho tương lai của chúng ta. Như Robert Friedland, một tỷ phú khai thác mỏ đồng bóng đã nói, 'Dựa trên các vấn đề sinh thái và môi trường trên thế giới, mọi giải pháp đều đưa bạn đến với đồng.' Trong một báo cáo năm 2021, ngân hàng đầu tư Mỹ Goldman Sachs tuyên bố rằng 'đồng là loại dầu mới'. Phần lớn

được làm từ những kim loại khác ít người biết đến hơn, từ vật liệu pin như coban và niken đến kim loại đất hiếm như neodymium, nhưng không có chất nào khác có thể sánh được với đồng vì tầm quan trọng nguyên tố tuyệt đối của nó. Rất ít kim loại khác có sự kết hợp các chức năng khá giống nhau: khả năng dẫn nhiệt và điện qua ma trận nguyên tử của nó; độ dẻo tự nhiên của nó, cho phép nó được cuộn, kéo và xoắn thành dây mà không bị đứt; sức mạnh của nó, khả năng chống ăn mòn và sự phù hợp của nó để tái chế. [4]

Đồng là chất nền tuyệt vời, vô hình hỗ trợ thế giới hiện đại như chúng ta biết. Không có nó, chúng ta thực sự bị bỏ lại trong bóng tối. Nếu thép cung cấp bộ khung cho thế giới của chúng ta và bê tông hóa thịt của nó thì đồng là hệ thần kinh của nền văn minh, là hệ thống mạch điện và dây cáp mà chúng ta không bao giờ nhìn thấy nhưng không thể hoạt động nếu không có nó. Câu chuyện của nó không chỉ nói về những biến đổi phi thường trong mức sống của chúng ta mà còn về một điều khác: nhân loại sẽ như thế nào? đi đến độ sâu phi thường - theo đúng nghĩa đen - để tìm kim loại này và loại bỏ nó khỏi mặt đất. Ở một khía cạnh nào đó, đây là câu chuyện mà bạn đã quen thuộc từ chuyến hành trình của chúng ta qua Thế giới Vật chất, từ việc triển khai rộng rãi bê tông đến việc biến dung nham thành thép. Đó là một câu chuyện về quy mô và sự quyết tâm. Nhưng vì chúng ta hiếm khi nhìn thấy đồng phục vụ cho sức mạnh của mình nên chúng ta hiếm khi dành nhiều thời gian để suy nghĩ xem làm thế nào mà nó thực sự có được ở đây. Vô hình hơn thủy tinh, ít gây khó chịu hơn dầu, tuy nhiên nó là một kim loại phi thường với những đặc tính kỳ diệu.

Để có một minh họa sống động về phép thuật, hãy thử thả một nam châm nặng và mạnh lên một tấm đồng nguyên chất - hoặc dễ dàng hơn nữa là lên mạng nơi có một số người đã quay phim chính xác điều đó. Điều xảy ra tiếp theo khá bất thường: nam châm rơi giống như bất kỳ vật kim loại nào, nhưng ngay trước khi chạm vào đồng, nó lơ lửng một lúc, lơ lửng giữa không trung, trước khi quay chậm và nhẹ nhàng nằm yên trên bề mặt. Việc quan sát có cảm giác hơi khó chịu khi chứng kiến một trong những tên lửa của Elon Musk khai hỏa tên lửa đẩy khi nó sắp hạ cánh – như thể các định luật vật lý đang bị đảo lộn. Nhưng điều tạo nên hiện tượng này còn thú vị hơn nhiều so với nhiên liệu tên lửa: đó là lực vô hình, toàn năng của điện từ, khi các

electron bên trong đồng trở nên điên cuồng khi nam châm đến gần. Thật vậy, điều bạn đang làm khi đưa nam châm đó cạnh miếng đồng là đang tạo ra một dòng điện. Những gì bạn đang làm là tạo ra lực lượng quan trọng nhất của kỷ nguyên hiện đại. [5]

Rất nhiều thứ mà chúng ta phân loại là hoạt động, là năng lượng – từ tiếng ping trên điện thoại di động đến tiếng vo ve của máy điều hòa không khí – vẫn bắt nguồn từ sự tương tác giữa nam châm và kim loại. Nó phụ thuộc vào dòng điện bắt đầu bằng đồng và được vận chuyển bằng đồng (luôn thông qua lõi đồng và lõi sắt của nhiều máy biến áp) đến các thiết bị có mạch được lót bằng đồng. Nhưng vì kim loại chủ yếu được giấu bên dưới lớp vỏ bọc dây hoặc bên trong cơ sở hạ tầng không thể tiếp cận nên bạn rất dễ quên mất mục tiêu của mình. sự phụ thuộc vào nó. Máy phát điện và máy biến thế trong hệ thống điện của chúng ta - được làm chủ yếu bằng thép và đồng - đáng lẽ phải được coi là một trong những phát minh quan trọng nhất (và xuất sắc nhất) trong lịch sử, tuy nhiên chúng thường bị bỏ qua để nhường chỗ cho máy tính hoặc động cơ phản lực. Vì vậy, nó diễn ra trong Thế giới Vật chất, nhưng khi điều đó xảy ra, sự phụ thuộc của chúng ta vào đồng sẽ chỉ tăng lên trong những năm tới khi chúng ta trao đổi hệ thống nhiệt và động cơ đẩy bằng nhiên liệu hóa thạch bằng hệ thống điện. Tuy nhiên, trước khi chúng ta chuyển sang quá trình chuyển đổi năng lượng mới nhất đó, cần dành chút thời gian để suy ngẫm về quá trình chuyển đổi năng lượng lớn thứ hai của thời hiện đại.

Sự xuất hiện của điện đến các trang trại ở Tennessee và các lớp học ở vùng Trung Tây nước Mỹ, chưa kể đến các ngôi nhà ở London và Trung Đông, đã biến đổi hoàn toàn thế giới. Khi ánh sáng có thể được tạo ra chỉ bằng một cú bật công tắc thay vì bật que diêm, mọi thứ đã thay đổi. Những ngôi nhà thời tiền điện, theo tiêu chuẩn hiện đại, tối đến mức đáng kinh ngạc: ngay cả những chiếc đèn tốt nhất đốt khí gas, dầu cá voi hoặc dầu hỏa cũng chỉ có thể tạo ra cường độ chỉ bằng $1/15$ cường độ của bóng đèn 100 watt. Và ngoài việc có mùi hôi và nguy hiểm, đèn tiền điện còn rất đắt tiền. Nhà kinh tế học William Nordhaus từng tính toán rằng một công nhân thế kỷ 19 phải mất gần một nghìn giờ tiết kiệm mới mua đủ nến để tạo ra cùng một lượng ánh sáng phát ra từ bóng đèn 100 watt trong vài giờ mỗi tối. Việc vận hành

bóng đèn đó sẽ tiêu tốn của người công nhân hiện đại tương đương khoảng mười phút làm việc. [6]
Nhà nhẹ hơn có nghĩa là nhà sạch hơn. Trường học nhẹ hơn có nghĩa là trường học thông minh hơn, nơi học sinh có thể đọc và học dễ dàng hơn. Đường phố sáng sủa hơn sẽ an toàn hơn và nơi làm việc nhẹ nhàng hơn có nghĩa là mọi người có thể làm việc lâu hơn. Cũng giống như cách thấu kính thủy tinh giúp kéo dài tuổi thọ làm việc của nhiều người già, bóng đèn điện đã tăng thêm số giờ quý giá mỗi ngày – đặc biệt là ở các vĩ độ phía Bắc. Nhưng ánh sáng chỉ là sự khởi đầu của nó, vì trong nhiều năm sau khi được áp dụng rộng rãi vào những thập niên đầu thế kỷ 20, điện sẽ trở thành nguồn năng lượng thống trị tất cả.
Một trong những câu chuyện kinh tế ít được đánh giá cao nhất của thế giới hiện đại – một lần nữa, bởi vì nó hầu như xảy ra ngoài tầm nhìn của hầu hết mọi người – là bước nhảy vọt đáng kinh ngạc về năng suất mà các nhà sản xuất động cơ truyền động điện mang lại. Những động cơ hơi nước cồng kềnh, kém hiệu quả trong các nhà máy đã biến mất và động cơ điện xuất hiện. Chỉ riêng điều này đã tăng gấp đôi năng suất sản xuất của Mỹ vào năm 1930, và sau đó *lại tăng lên* vào năm 1960. Và đây là trước khi người ta xem xét những cách khác mà điện đã hiện đại hóa hầu hết mọi ngóc ngách khác của cuộc sống: động cơ điện để nghiền đá ở hầm mỏ, quay bánh xe điện, xe điện và xe lửa, cung cấp năng lượng cho thang máy tạo điều kiện cho các tòa nhà chọc trời phát triển hoặc cung cấp điều hòa không khí trong các tòa nhà, giúp toàn bộ khu vực trên thế giới có thể sinh sống được. Ngay cả những bước đột phá nhỏ dường như cũng có ý nghĩa hơn so với những gì chúng tưởng tượng lúc đầu. Có một trường hợp chắc chắn rằng các dụng cụ điện cầm tay (động cơ và mạch điện làm bằng đồng) đã cách mạng hóa thế giới xây dựng gần giống như bê tông trộn sẵn.
Nếu tất cả những điều này vẫn còn quá xa vời và mang tính khái niệm, thì đây là một cách khác để hiểu rõ hơn về sức mạnh của điện: lấy một lát bánh mì và cho nó vào máy nướng bánh mì của bạn. Sau khi nó bật lên và bạn đã phết bơ, hãy lên mạng và tìm kiếm video quay cảnh Robert Förstemann, một vận động viên đua xe đạp Olympic người Đức, sử dụng một chiếc xe đạp trong nhà để cung cấp

năng lượng cho máy nướng bánh mì trong thời gian đủ lâu để làm chín bánh mì. Anh ta dùng hết sức mình thở ra trong khoảng 60 giây trước khi gục xuống. Bánh mì nướng được nướng vừa phải. 7
Điện gần như quan trọng, mạnh mẽ và quý giá đến mức không thể hiểu được. Không giống như hầu hết các dạng năng lượng khác, nó im lặng và về cơ bản là vô hình. Nó không cháy thành ngọn lửa mà cùng lắm chỉ kêu vo ve nhẹ nhàng. Nhưng chúng ta không thể tạo ra hoặc phân phối lực lượng thiết yếu, quan trọng này nếu không có đồng. Quả thực, chúng ta vẫn tạo ra phần lớn điện năng theo cách mà Michael Faraday đã làm vào năm 1831: bằng cách quay một nam châm quanh đồng, hoặc ngược lại, để chuyển chuyển động thành điện năng.
Ngày nay, các tuabin nối với cuộn dây đồng mạnh hơn và hiệu quả hơn bất cứ thứ gì Faraday có thể hình dung; chúng được quay bằng hơi nước được làm nóng bằng than hoặc uranium hoặc bằng cách đốt khí (hoặc vì vấn đề đó là lưỡi sợi thủy tinh của tuabin gió) và nam châm thường là nam châm điện, cũng có xu hướng được làm bằng đồng. Nhưng nguyên tắc vẫn không thay đổi, cũng như phần cốt lõi của kim loại.
Cắt đôi 'đảo điện' tại nhà máy hạt nhân hiện đại như Hinkley Point C đang được xây dựng ở Somerset, Anh, và ở đó, kết nối với tua bin hơi nước General Electric Arabelle – mạnh nhất thế giới – bạn sẽ tìm thấy một máy phát điện có lõi được tạo thành từ cuộn dây này đến cuộn dây đồng khác. Những cuộn dây này, hay còn gọi là cuộn dây, sẽ thực hiện công việc quan trọng là biến chuyển động nhanh đó, một bánh xe quay 1.500 lần một phút, thành dòng điện chạy vào nhà của chúng ta. Những mạng lưới đồng rối rắm này là công cụ lao động của cuộc sống hiện đại, vì chúng là nơi tạo ra phần lớn năng lượng của thế giới. Trong mọi nhà máy điện thông thường, tua-bin gió, nhà máy địa nhiệt hoặc đập thủy điện, đồng là chìa khóa. số 8
Ngay cả các tấm pin mặt trời, một dạng sản xuất điện chủ đạo mà điện không đến từ việc quay đồng quanh nam châm, vẫn có một lượng lớn đồng ở bên trong. Tóm lại, nếu nó có dòng điện thì dòng điện đó phần lớn sẽ tồn tại là nhờ đồng. Bất kỳ công tắc nào bạn chạm vào bất kỳ thiết bị nào trong nhà đều đang phát huy sức mạnh

của đồng. Lấy kim loại này đi thì phần lớn cơ sở hạ tầng điện mà chúng ta dựa vào sẽ không còn nữa. [9]
Tại thời điểm này, điều đáng chú ý là đồng không phải là kim loại duy nhất có khả năng dẫn điện. Nhôm có tác dụng tốt đủ công việc, và vì nó nhẹ hơn đáng kể nên nó thường được sử dụng cho các loại cáp điện áp cao, đường dài cần treo trên dây cao thay vì dưới đất. Bạc thậm chí còn dẫn điện tốt hơn đồng và có thể sánh ngang với độ dẻo của nó nếu không muốn nói là độ bền của nó, nhưng điều này nhấn mạnh một trong những bài học thường xuyên từ Thế giới Vật chất. Giống như bê tông hoặc thép, điều quan trọng ngang bằng với sức mạnh của một vật chất là tính phổ biến của nó. Bạc rất hiếm. Đồng có thể không phổ biến như sắt, nhưng nó có nhiều hơn bạc và nhân loại có nhiều năm kinh nghiệm khai thác và tinh chế nó hơn bất kỳ kim loại công nghiệp nào khác.

Phát minh khai thác mỏ

Mối quan hệ của nhân loại với đồng đã có từ lâu trước điện. Không có câu chuyện nào có nguồn gốc dễ thương như câu chuyện về những người Phoenicia trên bãi biển Địa Trung Hải đang đun nóng cát và vô tình phát hiện ra thủy tinh. Nhưng việc phát hiện ra cách nấu chảy kim loại này có lẽ đã xảy ra gần như cùng thời điểm: khoảng 6.000 năm trước, có lẽ ở đâu đó trong tam giác giữa Armenia, Thổ Nhĩ Kỳ và Ai Cập. Trên một số ngọn núi nhất định ở Síp, đôi khi bạn sẽ vấp phải những mảnh xỉ hóa thạch sẫm màu - tàn tích của quá trình khai thác và chế biến kim loại sớm nhất. Đây là những chất thải cháy thành than do tổ tiên chúng ta nung nóng quặng để sản xuất đồng lỏng từ hàng nghìn năm trước. Đối với những người chứng kiến cảnh tượng này chắc hẳn họ phải chết lặng: thông qua một dạng thuật giả kim hoặc phép thuật nào đó, những nhà thông thái dường như có thể khiến kim loại lỏng màu đỏ phun ra từ thứ trông giống như một viên đá đơn giản. [10]
Sự chuyển đổi từ đá sang công cụ bằng kim loại đã dẫn đến cái mà các nhà nhân chủng học gọi là Thời đại đồ đồng hay thời kỳ đồ đá (từ tiếng Hy Lạp có nghĩa là đồng – *chalkos*). Tiếp theo đó là Thời đại đồ đồng, khi người ta phát hiện ra rằng khi đồng được kết hợp với thiếc, nó tạo ra một hợp kim bền hơn, cứng hơn và phù hợp hơn nhiều để

sử dụng trong các công cụ. Các công cụ bằng đồng cho phép tổ tiên chúng ta săn bắn, xây dựng và chiến đấu. Tất cả điều này đều có trước thời đại sắt, loại sắt có độ bền và khả năng gia công vượt xa đồng. Một lần nữa, thời đại đồ đồng thực sự, thời đại vẫn còn quan trọng cho đến ngày nay, vẫn chưa đến.
Trong những năm qua, trung tâm buôn bán đồng đã chuyển từ nước này sang nước khác, từ Síp đến Israel, từ trữ lượng giàu có ở Rio Tinto của Tây Ban Nha đến Kopparberg của Thụy Điển - ngọn núi đồng vĩ đại. Trong một thời gian, vùng Saxony thuộc nước Đức ngày nay, nơi, giống như cách họ làm với ngành sản xuất bê tông và thủy tinh, những người buôn bán địa phương đã áp đặt một quy định chặt chẽ mới về kỷ luật, thành lập các trường khai thác mỏ đầu tiên và biến những gì vốn là một hoạt động buôn bán không chính thức thành một thứ gì đó giống như một nghề nghiệp. .
Nước Anh, nơi người Celt và La Mã cổ đại khai thác đồng và thiếc, đã nhiều lần xuất hiện rồi biến mất, nhưng đến giữa thế kỷ 19, nước này đã sản xuất hơn một nửa số đồng của thế giới. Phần lớn trong số này đến từ các mỏ ở Cornwall. Đất ở đó đặc biệt giàu có – thậm chí ngày nay một số quặng Cornish còn tinh khiết hơn nhiều so với những gì bạn tìm thấy ở các siêu cường đồng như Chile hay Peru – nhưng sự vượt trội của Anh trong buôn bán đồng cũng là một câu chuyện về việc sử dụng đồng mà nó đặt kim loại. [11]
Khi đó, cũng như bây giờ, Anh có ngành công nghiệp vũ khí bán vũ khí trên khắp thế giới và đặc biệt phụ thuộc vào đồng chất lượng cao. Vào thế kỷ 18, hải quân Anh cũng bắt đầu bọc thân tàu của mình bằng kim loại - đáy đồng, như người ta đã biết - làm cho chúng nhanh hơn, dễ điều khiển hơn, có thể hoạt động trên biển lâu hơn và quan trọng nhất là giúp thân tàu hoạt động tốt hơn. khả năng chống mục nát và bám bẩn thường xảy ra ở vùng nước ấm hơn. Đáy đồng, một trong những công nghệ đầu tiên của kỷ nguyên hàng hải, đã giúp Britannia thống trị các làn sóng. Nó đã thúc đẩy nhu cầu rất lớn về đồng, vì một tàu chiến 74 khẩu pháo điển hình cần 14 tấn đồng để bọc thân tàu. Điều đó đặt ra một câu hỏi: số đồng này sẽ đến từ đâu? Hóa ra câu trả lời là ở một nơi không có nhiều đồng: Nam Wales.
Câu chuyện về việc Swansea trở thành thủ đô sản xuất đồng của thế giới - Copperopolis như nó được biết đến rộng rãi - mặc dù chỉ khai

thác được một hạt kim loại, là một trong những câu chuyện bị lãng quên của Thế giới Vật chất, nhưng nó rất đáng được kể lại, vì nó cung cấp thế giới với mô hình kinh tế mà nó vẫn triển khai cho đến ngày nay. Quả thực, ở một khía cạnh nào đó, toàn cầu hóa như chúng ta biết đã hình thành ở các thung lũng xứ Wales.
Cho đến thế kỷ 19, việc nấu chảy kim loại, như nhà kỹ trị người Pháp Frédéric Le Play đã viết vào năm 1848, đã được địa chất 'xác định một cách chặt chẽ'. Các mỏ địa phương sẽ đào quặng và nấu chảy chúng tại địa phương, sử dụng củi địa phương làm nhiên liệu (do đó, manh mối ban đầu giúp bạn tiếp cận mỏ là khi cây cối đột ngột biến mất). Nhưng, Le Play viết, trong 'hai mươi năm qua, trật tự cũ kỹ này đã thay đổi đáng kể'. [12]
Ông đang đề cập đến Swansea, nơi vào đầu thế kỷ 18 các nhà công nghiệp địa phương đã phát hiện ra cơ hội. Nó có thể không có nhiều đồng - hầu hết trong số đó là ở Cornwall ở phía nam và Anglesey ở phía bắc - nhưng nó có rất nhiều than. Và khi nấu chảy đồng, bạn cần 3 tấn than cho mỗi tấn quặng. Vì vậy, trong những thập kỷ tiếp theo, các thợ mỏ bắt đầu vận chuyển quặng của họ đến Swansea để tinh luyện. [13]
Các nhà máy lọc dầu ở Swansea hoạt động hiệu quả đến mức họ sớm có thể cạnh tranh với hầu hết các nhà máy lọc dầu khác trên thế giới, do đó quặng được vận chuyển đến đó từ khắp nơi: từ Cuba và Úc, từ New Zealand, Mỹ và Peru. Trong một thời gian, Swansea đã tinh chế khoảng 65% lượng đồng của thế giới. Trong bán kính 5 dặm từ trung tâm thị trấn có không ít hơn 36 nhà máy luyện kim, 12 nhà máy luyện đồng và đủ loại đồ kim loại khác, tạo ra những đám mây lưu huỳnh và bị bao quanh bởi những đống rác thải khổng lồ. Thung lũng đẹp như tranh vẽ, xanh tươi này giờ đây không chỉ là một trong những khu vực công nghiệp hóa và phát triển nhất nước Anh mà còn là một trong những nơi ô nhiễm nhất.
Nhưng khi thế kỷ 19 trôi qua, sự thống trị của Swansea trong lĩnh vực buôn bán đồng bắt đầu yếu dần rồi sụp đổ. Các mỏ mới khổng lồ ở Hoa Kỳ bắt đầu tự tinh chế đồng và các nhà máy lọc dầu của xứ Wales đóng cửa, lúc đầu là dần dần và sau đó là đột ngột. Hôm nay tất cả họ đều đã biến mất… à, tất cả trừ một người. Trong số những tàn tích còn sót lại của thời kỳ Copperopolis có một nhà máy lọc niken

ở Clydach, ngày nay thuộc sở hữu của Vale, công ty khai thác mỏ người Brazil có mỏ quặng sắt khổng lồ ở Amazon. Cũng có những lời nhắc nhở về thời kỳ đã qua trên các thị trường tài chính hiện đại, nơi nhiều kim loại được định giá giao hàng trong ba tháng - một quy ước có từ thời phải mất nhiều thời gian để vận chuyển đồng từ Chile đến Swansea.

Tuy nhiên, di sản thực sự của Copperopolis không phải ở Nam Wales mà ở phía bên kia thế giới. Vì không nơi nào áp dụng mô hình Swansea - mô hình chứng tỏ một quốc gia có thể thống trị ngành sản xuất kim loại ngay cả khi nước đó không có nhiều nguyên liệu trong lòng đất - dễ dàng hơn Trung Quốc. Ngày nay, Trung Quốc là nhà chế biến chính của thế giới, nấu chảy và tinh chế gần một nửa nguồn cung cấp đồng của thế giới – chưa kể đến một loạt các kim loại khác.

Lời giải thích khác cho sự sụp đổ của ngành công nghiệp đồng xứ Wales xuất phát từ một nguyên nhân khác. Thật hấp dẫn khi cho rằng tất cả các loại kim loại này ít nhiều giống nhau, hóa ra trong khi đồng Swansea hoàn toàn tốt để lót thân tàu hoặc được chế biến thành đồng thau hoặc đồng thau, thì nó lại ít phù hợp hơn cho thời đại đồng thứ hai: thời đại điện.

Mạng lưới điện

Câu chuyện thông thường về điện khí hóa chủ yếu liên quan đến các nhà khoa học như Humphry Davy, người đã phát minh ra ánh sáng điện đầu tiên – đèn hồ quang – hay người học trò của ông là Michael Faraday. Nó có sự góp mặt của Hans Christian Ørsted, người đã phát hiện ra điện từ và Thomas Edison, người đã mang nguồn năng lượng này đến với đại chúng. Nhưng đây là Thế giới Vật chất, chúng ta cần lật lại câu chuyện, vì sự gia tăng của điện cũng là hệ quả của một điều gì đó trần tục hơn và thực tế hơn: sự sẵn có của đúng loại đồng với số lượng phù hợp.

Quay trở lại giữa thế kỷ 19, khi Hoa Kỳ bắt đầu nối các đường dây điện báo giữa các thành phố của mình và ấp ủ kế hoạch xây dựng dây cáp xuyên Đại Tây Dương, các nhà sản xuất dây điện đầu tiên chỉ có thể sử dụng đồng được sản xuất từ các lò phản xạ ở Swansea. . Nhưng khi thời đại điện thực sự bắt đầu hình thành – với việc Edison và George Westinghouse xây dựng một số nhà máy điện đầu tiên trên

thế giới ở London và New York, được trang bị các máy phát điện lớn chạy bằng đồng – người ta nhanh chóng nhận ra rằng đồng xứ Wales là chất dẫn điện kém. . Lời giải thích quay trở lại vấn đề tương tự mà các nhà sản xuất chất bán dẫn ban đầu gặp phải: cấu trúc nguyên tử của tấm wafer silicon hoặc germanium của bạn càng kém tinh khiết thì các electron càng khó đi qua nó. Và dây đồng cũng vậy.
Nhưng điều đó đã xảy ra ít nhiều vào cùng thời điểm Edison đang tìm kiếm nhiều loại đồng tốt hơn, các thợ mỏ – một số ở Mỹ, một số ở Anh – đã nghĩ ra giải pháp. Thay vì chỉ nấu chảy quặng đồng để giải phóng kim loại, họ còn điện phân chúng – nhúng chúng vào dung dịch và cho dòng điện chạy qua nó. Và đồng tinh chế bằng điện phân còn tinh khiết hơn nhiều: loại duy nhất đủ nguyên chất để các động cơ điện và máy phát điện tiên tiến sẽ cung cấp năng lượng cho tương lai. Kỹ thuật mới này là chiếc đinh đóng vào quan tài đối với các nhà máy lọc dầu của Swansea, nhưng nó lại xuất hiện vào đúng thời điểm đối với ngành điện mới chớm nở. Ngay khi bắt đầu có nhu cầu về đồng siêu nguyên chất, ngành công nghiệp kim loại đã sẵn sàng cung cấp loại đồng đó. Và càng có nhiều điện được tạo ra bởi các nhà máy điện của Edison và Westinghouse như đập thủy điện ở Thác Niagara, thì dòng điện càng lớn thì các nhà tinh chế có thể đi qua các tế bào điện phân của họ, cho phép họ sản xuất ra đồng siêu tinh khiết hơn nữa. Vòng tròn đạo đức này đã giúp Edison và các doanh nhân đồng nghiệp của ông xâu chuỗi mạng lưới dây điện khắp các thành phố của Mỹ và sau đó là phần còn lại của thế giới. Sự giảm giá đáng kể của ánh sáng được định lượng bởi William Nordhaus không chỉ là hệ quả của sự khéo léo và dám nghĩ dám làm mà còn của cả vật liệu nữa. Thật vậy, đây là trường hợp đầu tiên (nhưng không phải là cuối cùng) của thị trường đồng thách thức những người bi quan và cố gắng cung cấp đủ kim loại để đáp ứng nhu cầu toàn cầu. [14] [fn1]
Không phải điều này đã khiến Edison bớt lo lắng về giá đồng. Ông không phải là người đầu tiên phát minh ra bóng đèn - giải thưởng đó có lẽ thuộc về Joseph Swan, một nhà khoa học đến từ vùng đông bắc nước Anh, mặc dù trước ông cũng có rất ít người đã nghĩ ra bóng đèn nguyên mẫu. Nhưng giống như những gì ông đã làm với bê tông, Edison đã biến bóng đèn thành một sản phẩm dành cho thị trường đại chúng. Ông nhận ra rằng chỉ sản xuất bóng đèn hoặc các thiết bị điện

thông minh thôi là chưa đủ; anh ta sẽ phải xây dựng cơ sở hạ tầng điện để có thể cắm những thiết bị đó vào. Và điều đó có nghĩa là rất nhiều đồng: đồng để làm dây điện mà ông chôn dưới đường phố New York, đồng để đi vào nhà và nơi làm việc, đồng để buộc quanh bánh xe máy phát điện. Trên thực tế, nhiều đồng đến mức mặc dù giá của nó đang giảm nhưng Edison vẫn cần số lượng lớn đồng đến mức có nguy cơ khiến ông phải phá sản. Anh ấy đã thiết kế những bóng đèn của mình để chúng hoạt động với dây đồng mỏng hơn và thiết kế mạng lưới điện của mình ở New York để nó không cần đến những dây dẫn bằng đồng dày như dự định ban đầu. Mặc dù vậy, trong khi hệ thống của ông hoạt động rất tốt ở các trung tâm đô thị đông dân cư như New York, thì cách đó khoảng một dặm, nguồn điện bắt đầu cạn kiệt.

Vậy còn những khu vực không cách trạm điện một dặm thì sao? Câu trả lời được đưa ra bởi Westinghouse và Nikola Tesla, những người đi tiên phong trong việc sử dụng dòng điện xoay chiều. Trong khi dòng điện trong dây dẫn của Edison truyền theo một hướng, giống như nước chảy xuống sông, thì dòng điện trong dây dẫn của Westinghouse và Tesla lại chuyển động, hơi giống sóng biển. Điều tuyệt vời của AC là nó có thể gửi điện áp cao dọc theo những sợi dây rất mỏng, điều đó có nghĩa là, trước hết, thế giới sẽ không thiếu đồng và thứ hai, bạn không còn phải đặt trạm điện ngay trong khu vực lân cận của mình nữa. . Và thế là hệ thống năng lượng mà chúng ta vẫn có ngày nay đã ra đời: các nhà máy điện khổng lồ với dây cáp điện cao thế đưa nguồn điện xoay chiều xuống các thành phố, thị trấn và khu định cư nông thôn như các trang trại ở Tennessee. Một hệ thống được xây dựng trên đồng. Tất cả những điều đó đặt ra câu hỏi: số đồng này thực sự đến từ đâu?

11
Lỗ

CHUQUICAMATA, CHILE

Thoạt nhìn Chuquicamata trông rất giống nhiều thị trấn miền núi nhỏ khác mà bạn tìm thấy trên khắp phía bắc Chile.

Tản bộ xuống con đường chính và bạn sẽ thấy một ngân hàng, một rạp chiếu phim, một thư viện và một khách sạn nhỏ thông minh. Có một sân chơi với cầu trượt, xích đu và mô hình Pinocchio sặc sỡ. Có một quảng trường với khán đài và một sân vận động nhỏ – Estadio Anaconda.

Giống như rất nhiều thị trấn khác ở vùng Chile này, một khu vực từng là một phần của Bolivia, gần như mọi con phố khác đều được đặt theo tên các anh hùng trong lịch sử Chile: đây là Calle Lord Cochrane, theo tên sĩ quan hải quân Anh đã giúp đất nước chiến đấu con đường giành độc lập của nó, và ở đó, chạy song song, là Calle Arturo Prat, theo tên người anh hùng trong Chiến tranh Saltpetre. Bề mặt sơn màu của những ngôi nhà lấp lánh dưới bầu trời màu cô-ban, làm lu mờ toàn bộ sự sống của con người ở vùng sa mạc cao này.

Nhưng có hai điều thực sự rất bất thường ở Chuquicamata. Đường đầu tiên được tìm thấy nếu bạn đi theo con đường chính khi nó ngoằn ngoèo về phía đông bắc, cách xa quảng trường thị trấn, hướng tới những ngọn núi ở phía chân trời. Sau một hoặc hai phút, các khu dân cư nhường chỗ cho những kho bê tông và tôn khổng lồ. Có những vũng nước tối tăm kỳ lạ, những đường ray bụi bặm và đống đá ở khắp mọi nơi. Sau đó, sau vài vòng quay bánh xe nữa, bạn đi qua một đường hầm và đột nhiên trước mặt bạn là một khe nứt khổng lồ. Ở đây, trên đỉnh của nơi lẽ ra phải là một ngọn đồi, là hẻm núi toàn năng nhất: hầu như không thể nhìn thấy đáy; các bên đủ dốc để gây ra một cơn rùng mình chóng mặt.

Nhưng đây không phải là hẻm núi, đây là mỏ đồng Chuquicamata. Đó là một cái hố hoành tráng được khoét ra từ cảnh núi non của sa mạc Atacama. Dài và rộng hơn Công viên Trung tâm của New York, nó sâu đến mức nếu bạn thả tòa nhà cao nhất thế giới, Burj Khalifa của

Dubai, vào đó, toàn bộ mọi thứ, cột thu lôi và tất cả, sẽ hoàn toàn bị nuốt chửng bởi vết nứt này. Nhiều trái đất đã bị lấy đi khỏi đây hơn bất kỳ nơi nào khác trong lịch sử, khiến nơi đây trở thành một trong những kỳ quan kỹ thuật khó có thể xảy ra nhất của thời hiện đại. [1]
Đồng đã được khai thác ở đây trong nhiều thế kỷ. Vào năm 1899, một thập kỷ trước khi câu chuyện hiện đại về mỏ này bắt đầu, các nhà thám hiểm đã tình cờ tìm thấy hài cốt của một người thợ mỏ ở đây, bị chôn sâu vài mét dưới lòng đất cùng với các công cụ của anh ta. Giống như người thợ mỏ Celtic cổ đại tại mỏ muối ở Hallein, anh ta đã bị mắc kẹt khi đường hầm anh ta đang đào bị sập. Mặc dù đã có tuổi đời nhiều thế kỷ (sau đó xác định niên đại bằng carbon phóng xạ vào khoảng năm 550 SAU CÔNG NGUYÊN), thi thể của ông vẫn được bảo quản bởi một lớp muối giàu đồng có đặc tính kháng khuẩn giúp bảo vệ nó khỏi bị phân hủy. Tóc anh được tết một cách tinh tế; làn da của anh ta nhuốm một màu xanh kỳ lạ do đồng bị oxy hóa. Ngày nay, 'Người đàn ông bằng đồng', như ông đã được biết đến, có thể được nhìn thấy tại Bảo tàng Lịch sử Tự nhiên Hoa Kỳ ở Thành phố New York, một lời nhắc nhở rằng ngày xưa đây là một nghề buôn bán thủ công nhỏ có nguồn gốc xa xưa. Không phải là có bất kỳ gợi ý nào về điều đó trên mặt đất ngày nay, nơi mọi thứ đều có kích thước siêu lớn. [2]
Những chiếc xe tải chở quặng lên từ sàn mỏ hầu như không thể nhìn thấy được từ bề mặt, tuy nhiên những chiếc ô tô do công ty Komatsu của Nhật Bản sản xuất này lại nằm trong số những chiếc xe lớn nhất hành tinh. Của họ hành trình từ đáy mỏ lên tới đỉnh mất hơn một giờ. Khi họ đến nhà chứa máy bay gần thị trấn, những tảng đá được nghiền nát giống như cách họ làm ở mỏ vàng Cortez ở Nevada. Chúng được nghiền thành bụi, tạo thành bọt trong dung dịch lỏng đặc biệt giúp tách đồng ra khỏi phần còn lại. Sau đó, một số bụi được nung chảy và điện phân, nổi lên dưới dạng những tấm đồng lấp lánh gần như hoàn toàn nguyên chất - như người ta gọi chúng là cực âm. Phần còn lại - 'đồng cô đặc', một loại đất hạt màu sẫm có khoảng 30% đồng - được gửi đi nơi khác để tinh chế thành sản phẩm hoàn chỉnh. fn1
Mỗi ngày đều có một đoàn tàu chất đầy cực âm và đồng cô đặc. Nó chạy trên tuyến đường sắt nổi tiếng đã gây ra Chiến tranh Saltpetre -

xuống bờ biển và trong khi cực âm hướng tới các nhà sản xuất, chất cô đặc được chất lên các tàu container chở đến các nhà máy lọc dầu ở Trung Quốc. Chỉ ở đó, đồng Chile này mới trở thành đồng nguyên chất, tại thời điểm đó không ai thực sự chắc chắn nó đến từ đâu nữa. Phần lớn đồng trên thế giới - khoảng 80% - được sản xuất theo cách này, cách xa nơi nó được khai thác khỏi lòng đất, khiến việc xác định chính xác nơi kim loại đó thực sự được khai thác là vô cùng khó khăn. Hầu hết các tấm, thanh và dây đồng trên thế giới là hỗn hợp các nguyên tử từ khắp nơi trên thế giới: một phần từ Chile, một phần từ Úc, một phần từ Indonesia, một phần từ Cộng hòa Dân chủ Congo, một số được tái chế từ đồng được khai thác từ lâu ở một nơi khác hoàn toàn. Mỗi tấm là một biểu hiện vật lý của toàn cầu hóa. Mặc dù vậy, có thể chắc chắn rằng hiện tại có một chút Chuquicamata ở đâu đó gần bạn, vì nơi này xét về mặt nào đó là mỏ lớn nhất trên hành tinh.

Điều gì tạo nên mỏ lớn nhất hành tinh vẫn còn là vấn đề gây tranh cãi. Bằng một thước đo – lượng kim loại được khai thác từ một nơi – các mỏ quặng sắt của Úc, Brazil hay Nga sẽ dễ dàng vượt qua nơi này. Nhưng vì quặng sắt có xu hướng được tìm thấy với hàm lượng lớn hơn nhiều so với đồng, với khoảng 60% trong mỗi khối quặng, so với chỉ 0,6% trong quặng đồng, nên bạn cần phải vận chuyển nhiều đất hơn cho mỗi tấn đồng *so* với mỗi tấn sắt. Dựa trên những tổng kết sau phong bì của tôi (nghiên cứu rất ít được thực hiện về chủ đề này), việc khai thác đồng dẫn đến sự xáo trộn bề mặt hành tinh nhiều hơn đáng kể so với việc sản xuất bất kỳ kim loại nào khác - mặc dù có rất nhiều sản phẩm cuối cùng ít hơn. fn2

Ngày nay, mỗi năm có thêm nhiều đồng đến từ Escondida, một hố khổng lồ khác cách Atacama vài trăm dặm về phía nam, và có một mỏ đồng cũ khác ở Utah, Bingham Canyon, về mặt kỹ thuật thì sâu hơn. Tuy nhiên, đúng như tên gọi của nó, Bingham Canyon bắt đầu cuộc sống như một vùng trũng trong khi Chuquicamata từng là một ngọn đồi, trước khi nó trở thành một cái hố nên sâu nó có vi khí hậu riêng. Nhưng trên cơ sở thước đo có lẽ là toàn diện nhất – lượng đồng được khai thác từ lòng đất trong suốt thời gian tồn tại của mỏ – thì không nơi nào khác có thể sánh bằng. Trong thế kỷ qua và một chút Chuqui, như cách gọi của người dân địa phương, đã sản xuất ra

nhiều đồng hơn bất kỳ mỏ nào khác trong lịch sử. Trong mỗi 13 gam đồng từng được khai thác và tinh chế từ lớp vỏ hành tinh này, ít nhất một trong số đó đến từ đây. [3]

Trong một phần tư thế kỷ qua, vô số công ty đến rồi đi và các đế chế kinh doanh trỗi dậy rồi sụp đổ. Thời đại điện phát triển, thời đại máy tính ra đời và trưởng thành và ô tô điện bắt đầu thay thế các đối tác xăng dầu, nhưng Chuqui đã vượt qua tất cả. Năm này qua năm khác, hàng tỷ tấn đá đã được khai thác từ lòng đất và tinh luyện thành hàng trăm nghìn tấn kim loại nguyên chất. Từ cái lỗ mà ít người trên thế giới nghe nói đến, chứ chưa nói đến nhìn thấy, đã sản sinh ra đồng đã giúp cung cấp năng lượng cho thế kỷ XX. Nó đã góp phần vào sự trỗi dậy của Trung Quốc và trong những thập kỷ tới, nó sẽ giúp chúng ta xây dựng lưới điện, phương tiện xanh và tua-bin gió nhằm loại bỏ lượng khí thải carbon.

Điều này đưa chúng ta đến vũ khí bí mật của đồng: quy mô. Lý do thế giới có điện một phần là nhờ vào những nơi như thế này, nơi có thể sản xuất nhiều đồng hơn mỗi năm (trong trường hợp của Chuqui là gấp đôi) so với lượng vàng được sản xuất bởi mọi mỏ trên hành tinh kể từ đầu thời gian. . Hãy dành một chút thời gian để thấm nhuần điều đó. Hãy để nó cuốn trôi bạn khi bạn chiêm ngưỡng vực sâu lớn của Chuquicamata, khiến mỏ vàng Cortez ở Nevada trông giống như một vị thần nhỏ trong lòng đất.

Mỏ đã ăn thịt một thị trấn

Điều kỳ lạ khác ở Chuquicamata càng lộ rõ khi chúng tôi quay trở lại con phố chính. Không có trẻ em ở sân chơi, không có ai chơi thể thao ở sân vận động hay xếp hàng ở quầy tính tiền trong ngân hàng. Khu phố cổ cổ kính này hoàn toàn trống rỗng. Hóa ra Chuquicamata lại là một thị trấn ma khác của Atacama. Nhưng không giống như những căn lều bị bỏ hoang cạnh mỏ vàng ở Nevada hay những thị trấn diêm thạch cũ nằm xa hơn trên vùng đồng bằng của sa mạc này, thị trấn này là một câu chuyện cảnh giác không phải về quá khứ mà về tương lai. Thị trấn Chuqui không bị bỏ hoang vì mỏ đóng cửa hoặc hết quặng; hoàn toàn ngược lại. Nó đã bị đóng cửa vì sắp bị mỏ ăn mất. Khi máy móc đào sâu hơn và di chuyển nhiều đất hơn, các đống đá, gạch vụn và chất thải tạo thành phế thải bắt đầu xâm lấn thị trấn.

Vào đầu những năm 2000, đá thải từ Chuqui bắt đầu tràn ra nhà cửa và vườn tược. Những đám mây khí độc đang bay ra từ nhà máy lọc dầu ra các đại lộ và đường phố. Người dân đổ bệnh và mỏ có biệt danh mới - *Chuqui qui mata* , Chuqui giết người. Vì vậy, trong những năm tiếp theo Codelco, tập đoàn nhà nước khổng lồ điều hành mỏ, đã chuyển toàn bộ 20.000 cư dân đến Calama, thành phố gần nhất. Họ được cấp nhà và trường học mới, và đến năm 2008, Chuqui bị bỏ trống và mục nát.
Nhưng vì đây là Atacama, sa mạc khô cằn nhất trên trái đất, nơi môi trường được bảo tồn thay vì xuống cấp nên nhiều tòa nhà vẫn trông giống như khi con người rời bỏ chúng lần cuối. Nhìn vào cửa sổ của trường, bạn vẫn có thể thấy những lời tạm biệt của học sinh được viết nguệch ngoạc trên bảng đen. Trong nhà có bàn chải đánh răng trên bồn rửa và cuộn giấy bếp đang chờ được sử dụng, một tấm thiệp Giáng sinh trên bệ lò sưởi, một danh sách mua sắm để trên bàn bếp. Lái xe đến khu phía bắc của Chuqui và chẳng bao lâu bạn sẽ thấy mình đang ở trong bóng tối của một ngọn đồi rộng lớn, một đống đổ nát khổng lồ. Phong cảnh Chile được điểm xuyết bởi những điều này những ngọn núi nhân tạo mà người dân địa phương gọi là bánh *tortas* . Bánh Chuqui đã ăn hết hơn 1/4 số nhà và cửa hàng. Một bệnh viện bảy tầng, vào những năm 1960 là bệnh viện tiên tiến nhất ở Mỹ Latinh, giờ đây đã bị chôn vùi hoàn toàn và thường xuyên có một con phố mới bị bao phủ bởi đá thải được cho nổ tung và được chở lên từ hố. Hóa ra, đây không phải là thị trấn duy nhất trên thế giới đang bị bom mìn tàn phá. Mỏ quặng sắt Kiruna ở phía bắc Thụy Điển đã trở nên rộng lớn đến mức thị trấn nơi mỏ đào phải di dời, từng tòa nhà, cách đó vài dặm. Ở Chuqui các tòa nhà đơn giản bị bỏ lại phía sau.
Khi tôi đến thăm vào năm 2022, nếu đó là lời nói, tôi đã may mắn được chứng kiến một trong những vụ nổ khi hàng trăm tấn đá khác phát nổ ở tận đáy hố. Ngay cả từ đỉnh mỏ hơn một km trở lên, sóng xung kích vẫn có thể cảm nhận được, tiếng ồn vỡ vụn – to hơn nhiều so với những gì tôi chứng kiến ở mỏ Cortez. Toàn bộ thung lũng nhân tạo nhanh chóng bị nuốt chửng trong một đám mây dày đặc của chất cay đắng. Sau đó, đống đổ nát được chất lên những chiếc xe tải, di chuyển từ từ lên phía mỏ, như họ vẫn làm ở đây 24 giờ một ngày, mọi ngày trong năm. Một phần nhỏ trong số đó được dự định trở thành

đồng hoặc chất cô đặc, phần còn lại sẽ trở thành con *rùa* tiêu thụ thị trấn ma Chuqui.
Tuy nhiên, những núi đá thải này chỉ là hậu quả rõ ràng nhất về hậu quả môi trường của mỏ này. Nó cùng với nhiều mỏ khác trong môi trường khắc nghiệt này cũng đang bị giám sát chặt chẽ vì một lý do khác. Tại sa mạc khô cằn nhất thế giới, tại sao những người kéo đá lên khỏi mặt đất lại sử dụng nhiều nước đến vậy? Việc khai thác và chế biến quặng ở quy mô này đòi hỏi một lượng nước khổng lồ và càng xử lý nhiều đá thì bạn càng cần nhiều nước hơn. Phần lớn lượng nước này được rắc lên những đống quặng nghiền khổng lồ, nằm trên đỉnh tấm nhựa và ngâm trong dung dịch axit loãng. Đây là quá trình lọc theo đống, tương tự như những gì họ làm ở mỏ vàng Cortez, chỉ có điều – đây là đồng – quy mô thật đáng kinh ngạc. Nheo mắt một chút, bạn có thể nghĩ rằng các miếng đệm lọc ở đây là một hình thức nông nghiệp thủy canh, vì chúng trông giống như những cánh đồng rộng lớn với những ống tưới chằng chịt. Nhưng không: nước ở đây đang giúp axit tách đồng ra khỏi đá, trong dung dịch được thoát ra dưới đáy và đưa đến giai đoạn tiếp theo trong nhà máy lọc dầu. Trái đất được tưới nước không phải để hít thở sự sống mà để lấy đi sự giàu có từ nó.
Theo thời gian, những mỏ như thế này đang cố gắng giảm lượng nước tiêu thụ. Một số mỏ đang vận hành đường ống dẫn nước biển thay vì thoát nước từ các con sông địa phương. Nhưng bên cạnh dấu chân carbon và dấu chân nước, còn có một dấu chân khác thậm chí còn khó bỏ qua hơn. Lái xe ra khỏi Chuquicamata, xuống đồi, qua mỏ Ministro Hales lân cận (về mặt kỹ thuật là một hoạt động riêng biệt, nhỏ hơn nhưng đã sản xuất đủ đồng để cạnh tranh với hố lớn), đi qua Calama và đi theo con đường tới San Pedro. Hàng dặm, bạn sẽ thấy mình đang lái xe dọc theo một bức tường đất cao với rất ít manh mối về những gì nằm bên ngoài nó.
Hóa ra câu trả lời là đập chất thải Chuquicamata, nơi chất thải từ quá trình tinh chế được dẫn vào và lắng đọng. Nó khổng lồ như bạn có thể tưởng tượng, vì nó chứa đựng lượng rác thải có giá trị hàng thập kỷ từ mỏ đồng lớn nhất hành tinh. Tên chính thức của bãi rác hoành tráng này là Talabre, một lời nhắc nhở rằng ngày xưa nơi đây từng là một hồ muối có cùng tên. Ngày nay, tất cả số muối đó được bao phủ

trong một lớp bùn màu xám, giàu molypden và asen, bao phủ một khu vực có diện tích tương đương Manhattan. [4]

Điều này nghe có vẻ đáng báo động nhưng đó là một sự cải thiện đáng kể về cách thức mọi việc được thực hiện. Ngày xửa ngày xưa, nước thải từ các mỏ ở Atacama chỉ đơn giản là để chảy tự do vào các thung lũng và kênh rạch gần đó đổ ra biển. Nước trên bờ biển vẫn bị ô nhiễm sau nhiều thập kỷ ô nhiễm không được kiểm soát. Tại cảng Chañaral, khoảng 220 megaton chất thải từ các mỏ đồng đã được đổ và tích tụ trong vịnh, tạo ra một bãi biển nhân tạo trải dài 10 km (6 dặm) dọc theo bờ biển, giết chết phần lớn động vật hoang dã địa phương. Trong khi việc bán phá giá dừng lại sau sự can thiệp của tòa án vào năm 1989, một nghiên cứu gần đây đã phát hiện ra hàm lượng niken, chì và asen tăng cao trong nước tiểu của đàn ông địa phương. [5]

Ngày nay, người dân địa phương ở Calama phàn nàn rằng nước và không khí của họ vẫn bị nhiễm asen. Những người khai thác đồng trả lời rằng thạch tín đến từ lòng đất chứ không phải từ hoạt động của họ, điều này nói đúng ra là đúng, ngoại trừ việc nó che đậy sự thật rằng nếu không tiến hành cuộc khai quật này thì phần lớn nguyên tố độc hại sẽ nằm dưới lòng đất. Khi ở Calama, tôi đã nói chuyện với một bác sĩ nhi khoa địa phương, người này nói rằng ông ấy đã nhận thấy mức độ cao của các vấn đề về sức khỏe hô hấp và dị ứng ở trẻ em - điều mà ông ấy nghĩ là do hàm lượng hạt cao trong không khí. Nhưng ở một thị trấn mà gần như tất cả mọi người sống nhờ khai thác đồng - ngay cả những người hành nghề mại dâm, trong đó có tỷ lệ bình quân đầu người cao hơn gần như bất kỳ thị trấn nào khác ở Chile - một điều mà mọi người có thể đồng ý là mỏ phải tiếp tục đào, kéo dài đến thế kỷ thứ hai.

Nhưng điều đó đưa chúng ta đến một trong những thách thức lớn mà ngành đồng đang phải đối mặt. Khi các mỏ như Chuqui ngày càng sâu hơn và những loại quặng dễ kiếm nhất, giàu nhất được khai thác, điều gì sẽ xảy ra tiếp theo? Với việc thế giới đang khao khát kim loại này hơn bao giờ hết, máy phát điện, động cơ, ô tô điện và tua bin gió, liệu cuối cùng chúng ta có thể cạn kiệt hoàn toàn những thứ này không?

Hóa ra đây không phải là một câu hỏi mới. Đây là một trong những vụ cá cược lâu đời nhất mà con người biết đến và là nguồn cảm hứng cho vụ cá cược nổi tiếng nhất trong lịch sử kinh tế.

Cược

Khi các nhà kinh tế thảo luận về năng suất - yếu tố quan trọng nhất trong tất cả các lực lượng kinh tế - họ thích nói về những thứ như máy tính và trí tuệ nhân tạo. Họ chỉ tay vào những con robot đang bay lượn quanh các trung tâm phân phối của Amazon như một bằng chứng về khả năng của con người trong việc tạo ra nhiều giá trị hơn từ lượng đầu vào ngày càng ít hơn. Họ trích dẫn định luật Moore – nguyên tắc mà chúng ta đã gặp trong Chương 3 – rằng cứ mỗi một hoặc hai năm trôi qua, mật độ bóng bán dẫn trong chip silicon của chúng ta càng lớn hơn. Họ hiếm khi nói về những cái hố trên mặt đất như Chuquicamata.

Một phần là do không giống như máy tính, robot hay thậm chí là dịch vụ tài chính, sản phẩm cuối cùng do mỏ này cung cấp vẫn giữ nguyên trong nhiều thập kỷ. Những chiếc iPhone ngày nay mạnh hơn rất nhiều so với những chiếc máy tính trên tàu đổ bộ Apollo đã đưa con người lên mặt trăng hoặc những chiếc trong máy tính xách tay của bạn cách đây vài năm, nhưng đồng vẫn chỉ là đồng. Tuy nhiên, câu chuyện về khai thác đồng - những hẻm núi và ngọn núi do con người tạo ra, những cảnh quan bị xóa sổ, những chiếc xe tải khổng lồ và tất cả - là một trong những câu chuyện vĩ đại chưa được kể về nỗ lực kinh tế. Đó là một điều kỳ diệu về năng suất, và mặc dù câu chuyện này đôi khi có thể gây khó chịu nhưng nó vẫn là một phần lý giải tại sao tất cả chúng ta đều được hưởng mức sống như hiện nay.

Bước đầu tiên để hiểu điều này là nghe câu chuyện về vụ cá cược được thực hiện vào năm 1980 giữa hai người đàn ông: Paul Ehrlich và Julian Simon. Ehrlich, một nhà côn trùng học có chuyên môn chính cho đến lúc đó là nghiên cứu về các đàn bướm, đã trở nên nổi tiếng như một kiểu Nostradamus thời hiện đại. Vài năm trước đó, vào năm 1968, ông đã viết một cuốn sách bán chạy tên là *Quả bom dân số*, luận điểm bao quát của nó được gói gọn trong những dòng mở đầu: Cuộc chiến để nuôi sống toàn nhân loại đã kết thúc. Trong những năm 1970 và 1980, hàng trăm triệu người sẽ chết đói bất chấp mọi

chương trình khẩn cấp được triển khai hiện nay. Vào thời điểm muộn màng này, không gì có thể ngăn cản được sự gia tăng đáng kể về tỷ lệ tử vong trên thế giới. [6]

Ehrlich dự đoán rằng khi có thêm hàng tỷ người tiêu thụ nhiều tài nguyên hơn bao giờ hết, họ sẽ cạn kiệt nguồn nguyên liệu thô mà hành tinh này phụ thuộc vào. Đất sẽ bị suy thoái, rừng bị tàn phá, ô nhiễm sẽ trở nên không thể chịu nổi và hậu quả là hàng tỷ người sẽ chết. Simon, một nhà kinh tế học vô danh tại một trường đại học tầm thường, đã rất ngạc nhiên và ghê tởm. Anh nghĩ, chắc chắn đó không phải toàn là tin xấu: càng có nhiều người trên hành tinh thì càng có nhiều bộ óc phải nỗ lực tìm ra giải pháp cho các vấn đề môi trường. Chắc chắn chúng ta sẽ đổi mới cách thoát khỏi thảm họa? Có rất nhiều bằng chứng ủng hộ điều này. Amoniac tổng hợp do Fritz Haber và Carl Bosch phát triển có nghĩa là mặc dù đã cạn kiệt toàn bộ phân chim trên Quần đảo Chincha và phần lớn nitrat ở sa mạc Chile, loài người hiện có nguồn cung cấp nitơ về cơ bản là vô hạn để giúp trồng trọt. Sự phát triển các giống lúa mì đặc biệt của Norman Borlaug đã giúp khởi động một cuộc cách mạng xanh cung cấp lương thực cho thế giới. Chắc chắn, hành tinh này theo định nghĩa là hữu hạn, Simon lý luận, nhưng tài nguyên của nó lớn hơn nhiều so với những gì chúng ta tưởng tượng. Và nếu chúng ta hết một loại vật liệu, chẳng phải chúng ta sẽ phát minh hoặc thay thế nó bằng một loại vật liệu khác sao? [7]

Bây giờ, theo một nghĩa nào đó, hai người đàn ông này đang khơi lại một cuộc tranh luận rất xưa, một cuộc tranh luận đã nổ ra ít nhất từ thời Hy Lạp cổ đại. Khổng Tử, Plato và Aristotle đều bày tỏ lo ngại về xu hướng của loài người trong việc khiến thế giới tự nhiên mất cân bằng. Vào cuối thế kỷ 18, những lo lắng như vậy đã được nhà kinh tế học người Anh Thomas Malthus đặt tên và khuôn khổ, *bài luận năm 1798 về Nguyên tắc Dân số của ông* đã cảnh báo rằng con người có xu hướng sinh sôi nảy nở nhanh hơn nhiều so với khả năng của đất đai. để sản xuất đủ thức ăn cho chúng ăn. Malthus cảnh báo rằng chúng ta đã mắc vào một cái bẫy, và dân số càng tăng thì chúng ta càng có nhiều khả năng phải đối mặt với nạn đói, thiếu hụt và tàn phá. [số 8]

Một số đứng về phía bên kia, cả trước và sau Malthus. Nhà triết học thế kỷ XVII, William Petty, đã lập luận – cũng như Simon 300 năm sau – rằng càng có nhiều người trên thế giới thì họ càng có nhiều khả năng nghĩ ra những ý tưởng thông minh để giải quyết vấn đề của mình. Friedrich Engels, đồng tác giả *Tuyên ngôn của Đảng Cộng sản* (1848), đã viết rằng 'Năng suất của đất có thể tăng lên vô tận nhờ áp dụng vốn, lao động và khoa học'.
Theo thời gian, những phe phái này đã được đặt tên. Một bên là những người theo chủ nghĩa Malthus như Ehrlich; mặt khác là những người Cornucopian, được đặt theo tên 'sừng dồi dào' trong thần thoại Hy Lạp cổ đại. Nhưng vào cuối những năm 1960 và đầu những năm 1970, không còn nghi ngờ gì nữa, bên nào đang chiếm ưu thế. Sự lạc quan về công nghệ của thời đại hạt nhân sau chiến tranh đã tan biến; Mỹ đang thua trong Chiến tranh Việt Nam; lạm phát và tội phạm gia tăng. Vào năm 1968, đỉnh điểm của quá trình lên men này, và thực sự là cùng năm Ehrlich xuất bản *Quả bom dân số* , các học giả, nhà hoạch định chính sách và doanh nhân đã thành lập 'Câu lạc bộ Rome', tập trung vào các vấn đề sắp xảy ra - môi trường, văn hóa và kinh tế - mà hành tinh phải đối mặt. Sau đó, họ xuất bản một cuốn sách có tên *Những giới hạn của tăng trưởng* , trong đó cảnh báo rằng nhân loại đang hướng tới một thảm họa sinh thái và môi trường, đồng thời sẽ sớm cạn kiệt toàn bộ tài nguyên thiên nhiên.
Những quan điểm như vậy không phải là ngoài lề. U Thant, tổng thư ký Liên Hợp Quốc, cho biết vào năm 1969 rằng “có lẽ còn mười năm nữa” để cứu hành tinh này khi kêu gọi hợp tác toàn cầu để ngăn chặn thảm họa. Năm 1970, nhà sinh vật học đoạt giải Nobel George Wald đã nói rằng “nền văn minh sẽ kết thúc trong vòng 15 hoặc 30 năm nếu không có hành động ngay lập tức chống lại những vấn đề mà nhân loại đang phải đối mặt”. Ehrlich chỉ đơn giản là tiếng nói mang tính khiêu khích nhất đối với những gì đang nhanh chóng trở thành quan điểm thông thường trong các hành lang quyền lực từ Washington và New York đến London và Bắc Kinh. Mặt khác, Julian Simon lại cho rằng mọi chuyện hơi quá đáng một chút. [9]
“Tin xấu,” ông viết trên tạp chí *Khoa học* , “bán sách, báo và tạp chí; tin tốt chưa thú vị bằng một nửa đâu.” Sau đó, ông xem xét một loạt tuyên bố, nhiều trong số đó lấy từ *Quả bom dân số* và *Giới hạn tăng*

trưởng của Ehrlich , và tuyên bố chúng gần như sai hoàn toàn. Không hề suy giảm, sản lượng lương thực ngày càng tăng, nạn đói ngày càng ít thường xuyên hơn. Ông viết, chắc chắn rằng nếu thế giới tràn ngập con người và tài nguyên thiên nhiên của chúng ta sắp cạn kiệt thì giá của tất cả những thứ này sẽ tăng vọt? [10]
Cho đến lúc đó Ehrlich không chú ý nhiều đến Simon và bất kỳ ai khác cũng vậy. Nhưng Ehrlich không thể cho phép sự xấc xược này kéo dài. Anh ấy đã viết thư cho *Science* để phản đối quan điểm của Simon, và vì vậy bắt đầu một loạt bức thư giữa hai người đàn ông, mà đỉnh điểm là Simon nói:
Tôi sẽ đặt tiền của mình vào miệng tôi. Đây là một đề nghị công khai đặt cược 10.000 đô la vào các giao dịch riêng biệt trị giá 1000 đô la hoặc 100 đô la mỗi giao dịch, với niềm tin của tôi rằng chi phí nguyên liệu thô không do chính phủ kiểm soát (bao gồm cả ngũ cốc và dầu) sẽ không tăng về lâu dài.
Ehrlich nhanh chóng chấp nhận. Ông đặt cược với Simon rằng giá trị của năm kim loại chính – đồng, crom, niken, thiếc và vonfram – sẽ tăng theo giá trị thực (nói cách khác là đã điều chỉnh theo lạm phát) trong khoảng thời gian từ ngày 29 tháng 9 năm 1980 đến ngày 29 tháng 9 năm 1990. Không có gì là ngẫu nhiên trong sự lựa chọn này. kim loại, mà Ehrlich đặt cược 200 đô la vào mỗi kim loại: crom và niken, như bạn biết, là những thành phần quan trọng để tạo hợp kim thép; thiếc và vonfram đều là nguyên liệu quan trọng trong sản xuất vô số mặt hàng điện tử. Nếu thế giới tiếp tục xây dựng, công nghiệp hóa và, trên hết là sinh sản, khi đó nhu cầu về những kim loại này chắc chắn sẽ chỉ tăng lên.
Theo quan điểm của Ehrlich, với ít vật liệu, điều này rõ ràng hơn so với đồng. Trong số tất cả các kim loại công nghiệp như sắt hoặc nhôm, đồng là khan hiếm nhất. Trong những ngày đầu tiên của ngành gia công kim loại, tức là khoảng 10.000 năm trước, đồng đủ dồi dào đến mức đôi khi người ta phát hiện ra nó ở dạng nguyên bản – những hạt cốm nguyên chất đẹp đẽ có thể được lấy ra khỏi mặt đất. Trung tâm khai thác mỏ lớn đầu tiên của nó, Síp (có tên tiếng Hy Lạp là Kupros, là nơi chúng ta có từ đồng), rải rác với lượng quặng dồi dào: những khối đá lớn màu xanh lam có hàm lượng đồng lên tới 20%. Nhưng trong những thiên niên kỷ tiếp theo, chúng ta đã khai thác

được hầu hết những thứ tinh khiết nhất; những gì còn lại là những nguồn tài nguyên loãng hơn nhiều. Vào thời điểm Ehrlich đặt cược, tổng trữ lượng quặng sắt toàn cầu được tính bằng hàng trăm năm. Dự trữ đồng toàn cầu được tính toán chỉ kéo dài hơn 30 năm.
Và khi Ehrlich xem xét giá các mặt hàng mà ông đã lựa chọn trong thập kỷ qua, có lẽ ông có lý do để tự tin: đồng tăng 59%; vonfram tăng bất thường 357%. Với dân số thế giới đang tăng nhanh, chắc chắn anh ta không thể thua? Anh ấy đã chấp nhận 'lời đề nghị đáng kinh ngạc của Simon', anh ấy viết, 'trước khi những kẻ tham lam khác nhảy vào'.
Ngoại trừ việc mọi chuyện không diễn ra đúng như Ehrlich dự đoán. Giữa những năm 1980 và 1990, dân số thế giới đã tăng từ dưới 4,5 tỷ người lên 5,3 tỷ người, tuy nhiên thay vì tăng, giá của mỗi kim loại mà Ehrlich lựa chọn lại thực sự giảm theo điều kiện được điều chỉnh theo lạm phát. Vào tháng 10 năm 1990, Julian Simon mở một phong bì từ Palo Alto, California, để tìm một tờ giá kim loại và một tấm séc từ Ehrlich với giá 576,07 đô la. Không có ghi chú nào; cặp đôi chưa bao giờ gặp nhau. Simon mất năm 1998; tính đến năm 2022, Ehrlich vẫn cảm thấy khó khăn. Và theo một nghĩa nào đó, anh ta có lý: nếu vụ cá cược có diễn ra gần như bất kỳ năm nào trong những năm 1960 hoặc 1970 hoặc thực sự là những năm 2000 thay vì những năm 1980, Ehrlich sẽ liên tục trở thành người chiến thắng. Trong những năm kể từ vụ cá cược này, các nhà kinh tế học thỉnh thoảng bắt tay vào các thí nghiệm tưởng tượng: điều gì sẽ xảy ra nếu Ehrlich chọn những vật liệu khác? Điều gì sẽ xảy ra nếu anh ta cấu trúc vụ cá cược theo cách khác? Câu trả lời ngắn gọn là Ehrlich sẽ thắng thường xuyên hơn Simon. Một lần nữa, nếu bạn điều chỉnh giá đồng phù hợp với tốc độ tăng trưởng thu nhập thay vì giá cửa hàng, Simon sẽ là người dẫn đầu. Cả hai bên đều tuyên bố chiến thắng và mỗi bên có nửa điểm.
Trong những năm tiếp theo, câu chuyện 'The Bet' đã trở thành một loại ngụ ngôn kinh tế và cũng như nhiều câu chuyện như vậy, rất nhiều sắc thái và hầu hết các chi tiết đã bị bỏ lại phía sau. Đối với những người theo chủ nghĩa Malthus, về cơ bản Ehrlich đã đúng; Simon chỉ là may mắn thôi. Đối với Cornucopian, chiến thắng của Simon là bằng chứng cho thấy sự khéo léo của con người luôn vượt qua những thách thức về môi trường và vật chất. Và khi thế giới đón

nhận thị trường tự do vào những năm 1980, 'The Bet' đã trở thành câu chuyện ngụ ngôn hoàn hảo cho kỷ nguyên mới: lo lắng về ngày tận thế? Đừng: tin tưởng vào cung, cầu và thị trường để giải quyết hầu hết mọi việc. Tất nhiên, ngoại trừ điều đó, mọi thứ không bao giờ đơn giản đến thế.

Ehrlich không phải là người đầu tiên cũng không phải là người cuối cùng cảnh báo về tình trạng thiếu kim loại đỏ sắp xảy ra. Trong những ngày đầu của thời đại điện, khi Thomas Edison cố gắng tìm đủ đồng cho máy phát điện và dây điện, những nhà quan sát khôn ngoan thời đó đã dự đoán rằng công nghệ điện mới sẽ bị lật đổ do phụ thuộc vào nguồn tài nguyên thiên nhiên khan hiếm này. Năm 1924, nhà địa chất nổi tiếng Ira Joralemon đã dự đoán rằng 'nguồn cung cấp đồng của thế giới sẽ khó tồn tại trong vài năm nữa', đồng thời nói thêm: 'Nền văn minh dựa trên năng lượng điện của chúng ta sẽ suy yếu và lụi tàn.' [11]

Trong *cuốn sách Giới hạn tăng trưởng*, các mô hình được hiệu chỉnh cẩn thận của Câu lạc bộ Rome cho thấy nguồn cung nguyên liệu thô của thế giới, bao gồm đồng, nhôm, dầu và vàng, sẽ cạn kiệt. trong vòng nhiều thập kỷ. Họ nói, ngay cả trên cơ sở lạc quan, nguồn cung cấp đồng khó có thể kéo dài hơn 48 năm, nghĩa là đến năm 2022. Nói cách khác, thị trấn Chuquicamata được cho là bị bỏ hoang không phải vì mỏ khai thác quá nhiều đá. hết chỗ để đặt nhưng vì nó đã bị đóng cửa hoàn toàn.

Thậm chí ngày nay, các nhà nghiên cứu có thiện chí thường chỉ ra những bộ số liệu tương tự và dự đoán sự sụp đổ sắp xảy ra của ngành sản xuất đồng: một nghiên cứu của Yale năm 2007; một bài báo trên tạp chí *Khoa học* năm 2014, dự đoán sự sụt giảm nguồn cung cấp đồng bắt đầu từ năm 2030. Google 'đỉnh đồng' và bạn sẽ tìm thấy rất nhiều ví dụ khác. [12]

Những tiên đoán này có sức thuyết phục về mặt trực giác vì không thể tránh khỏi thực tế rằng hành tinh của chúng ta và các nguồn tài nguyên của nó là hữu hạn. Mọi dự đoán trước đó đều sai không có nghĩa là dự đoán tiếp theo sẽ không đúng. Cũng không thể thoát khỏi thực tế rằng việc khai thác đồng ngày càng trở nên phức tạp hơn. Trở lại thế kỷ 18, khi phần lớn đồng được khai thác từ lòng đất ở Cornwall, quặng thường chứa 12% đồng trở lên. Vào cuối thế kỷ 19, tỷ lệ này đã

giảm xuống dưới 8%. Trên khắp thế giới, vào đầu thế kỷ 20, nhiều loại có triển vọng nhất đã được khai thác.
Đó chắc chắn là trường hợp ở Chuqui. Những mạch đầu tiên được khai thác ở đây bởi 'người đồng' và những người đào đường hầm cho đến cuối thế kỷ 19 thực sự rất giàu, 10–15% đồng, nhưng đến đầu thế kỷ 20, số quặng còn lại chỉ có cấp độ vài phần trăm. điểm. Mọi người đều biết trong lòng đất vẫn còn rất nhiều đồng; vấn đề là bây giờ nó đã lan ra khá mỏng. Câu hỏi đặt ra là làm thế nào để đưa nó lên khỏi mặt đất – hay đúng hơn là làm thế nào để đưa nó lên khỏi mặt đất trong khi vẫn thu được lợi nhuận. [13]
Vào Guggenheims. Gia đình khai thác mỏ đã chứng kiến những gì Carnegie đã đạt được tại các mỏ quặng sắt của ông ở Mesabi, bằng cách triển khai những máy đào khổng lồ để đào ra số lượng quặng đáng kinh ngạc. Điều gì sẽ xảy ra nếu người ta có thể làm điều tương tự với các kim loại cấp thấp hơn như đồng? Với sự giúp đỡ của một kỹ sư khai thác mỏ dám nghĩ dám làm tên là Daniel C. Jackling, họ bắt đầu sử dụng xẻng chạy bằng hơi nước và một lượng lớn thuốc nổ để khai thác đồng từ quặng cấp thấp tại Bingham Canyon ở Utah – mỏ của Mỹ đôi khi cạnh tranh với Chuqui để giành danh hiệu thợ mỏ thế giới. lỗ lớn nhất. Nhưng nguồn dự trữ ở Chile thậm chí còn hứa hẹn hơn nên gia đình Guggenheim tiến về phía nam và thành lập cửa hàng tại Chuquicamata.
Đó là một câu chuyện hiếm khi được kể: ngay cả khi Henry Ford đang sản xuất hàng loạt ô tô ở Detroit, gia đình Guggenheims đã âm thầm biến hoạt động khai thác mỏ thành hoạt động sản xuất hàng loạt – hay "hủy diệt hàng loạt", như một số người vẫn gọi. Họ đã làm như vậy bằng cách áp dụng thủ thuật của các nhà giả kim cũ: biến tảng đá không có triển vọng thành thứ có thể mang lại cho họ cả gia tài.
Chuqui là nơi mà kỷ nguyên khai thác mỏ cũ – trong đó đá được đào bằng tay và phân loại bằng tay – nhường chỗ cho kỷ nguyên mới. Những chiếc xẻng hơi nước giúp đào kênh đào Panama đã được chuyển xuống Chile và đưa vào sử dụng. Các nhà máy khổng lồ được xây dựng để nghiền đá thành bụi, sau đó các hạt đồng nặng được tách ra khỏi thạch anh nhẹ hơn. [14]
Cuối cùng, Guggenheims đã bán mỏ cho công ty Anaconda Copper để tài trợ cho sự chuyển đổi định mệnh (một số người có thể nói là

thảm họa) sang sản xuất nitrat, nhưng tốc độ khai thác chỉ tăng nhanh hơn. Ngọn núi bị san phẳng thành cao nguyên và sau đó là hẻm núi. 'Bạn không thể nói rằng nó thiếu vẻ đẹp', nhà cách mạng Che Guevara đã viết khi ông đến thăm vào năm 1951, 'nhưng đó là một vẻ đẹp không duyên dáng, hùng vĩ và băng giá.' [15]

Nhưng điều bạn cần tự hỏi khi nghĩ lại cái hố không chỉ đơn thuần là làm thế nào mà nó lại sâu đến vậy mà là làm sao người ta có đủ khả năng *để* đào nó sâu đến vậy? Vì những người thợ mỏ ở đây đã đào sâu hơn nữa để giảm chi phí việc khai thác quặng tăng lên, ngay cả khi chất lượng của những loại quặng đó giảm xuống. Và họ đã rơi. Khi thế kỷ 20 hao mòn, lượng đồng trong mỗi cục đá mới ở đây đã giảm từ 2,4% năm 1913 xuống dưới 2% vào giữa thế kỷ và xuống dưới 1% vào cuối thế kỷ. Và khi chất lượng giảm xuống, công việc khai thác đồng từ quặng trở nên khắt khe hơn đáng kể. Từ năm 1900 đến nay, số lượng đá cần vận chuyển và xử lý để sản xuất ra một tấn đồng đã tăng từ 50 tấn lên 800 tấn. Lượng nước tiêu thụ trên đường đi từ 75 mét khối lên 150 mét khối. Năng lượng cần thiết cho tất cả công việc này tăng từ khoảng 250KWh lên hơn 4.000KWh. Tuy nhiên, đây là điểm dữ liệu nổi bật nhất: trong khoảng thời gian đó, thay vì tăng, giá đồng được điều chỉnh theo lạm phát về cơ bản là không đổi. [16]

Bạn càng nghĩ về điều này thì đó càng là một thành tựu phi thường. Kỷ nguyên điện của thế kỷ 20 được xây dựng từ đồng - một làn sóng đồng lớn dành cho điện khí hóa các thành phố lớn, thời đại điện tử tiêu dùng và sự trỗi dậy của các thị trường khổng lồ mới về hệ thống dây điện và điện tử như Trung Quốc và Ấn Độ. Ngay cả khi con người đòi hỏi nhiều đồng hơn thì trái đất cũng ít sẵn lòng từ bỏ nó hơn. Tuy nhiên, bằng cách nào đó những người làm việc ở Chuqui và những nơi khác vẫn tiếp tục sản xuất ra đồng với mức giá gần như nhau. Nguồn cung giảm; nhu cầu ngày càng tăng. Bạn có thể nghĩ rằng giá đáng lẽ phải tăng vọt, có khả năng cản trở sự tiến bộ của thế giới – nhưng không.

Hãy quay trở lại rìa hẻm núi Chuquicamata. Đưa mắt nhìn xuống phía dưới, tới những chiếc xe tải khổng lồ, những chiếc còn lớn hơn cả một ngôi nhà liền kề. Đây là những chiếc xe Ultra-class, được giới thiệu vào những năm 1980. Trước khi họ đến hiện trường, một chiếc xe tải khai thác trung bình có thể chở khoảng 40 tấn đá; ngày nay, nó

là hơn 400 tấn. Hãy quay lại để nhìn vào những nhà máy nơi những tảng đá được nghiền nát và bạn sẽ thấy từng hàng máy nghiền, mỗi máy nghiền tất cả số đá đó thành dạng bột tan. Nhìn chằm chằm vào những đống nước rỉ rác, khổng lồ đến mức chúng tan chảy vào chân trời sa mạc. Sau đó có một phần bạn không thể nhìn thấy. Sâu bên dưới cái hố Codelco hiện đang khai thác đồng này dưới lòng đất. Hoá ra đây không còn chỉ là mỏ lộ thiên lớn nhất thế giới nữa; nó cũng được thiết lập để trở thành mỏ ngầm lớn nhất thế giới.
Thuật ngữ kỹ thuật cho những gì nó đang làm là 'khai thác khối' và khái niệm về nó đủ để khiến mọi người phải nhăn mặt. Trong khi hầu hết việc khai thác dưới lòng đất liên quan đến việc đào dọc theo một vỉa đá và sau đó khoan hoặc cho nổ quặng, thì việc khai thác theo khối có phần tàn bạo hơn. Thay vì đi theo một đường nối, bạn đào một đường hầm *bên dưới* quặng và sau đó đặt một lượng lớn chất nổ mạnh vào những tảng đá phía trên đầu bạn. Sau khi lùi lại một khoảng, bạn cho nổ tung những tảng đá đó và sau đó để trọng lực thực hiện công việc của nó, khiến hàng trăm nghìn tấn đá rơi vào đường hầm đó. Những tảng đá này sau đó được băng chuyền đưa ra để tinh chế trong các lò luyện của Chuqui hoặc vận chuyển đi nơi khác để xử lý tiếp. Điều đáng lo ngại là công việc ở cả hai phần của mỏ bị chồng chéo lên nhau. Ngay cả khi tôi quan sát những người thợ mỏ lộ thiên đang thổi các lỗ trên mặt đất hướng xuống dưới, đâu đó bên dưới họ là một đội khác đang nổ các lỗ trên trần nhà hướng lên trên. [17]
Khai thác khối là một điều mới mẻ trong khai thác công nghiệp và Chuqui không phải là nơi duy nhất nó được sử dụng. Ở phía bên kia thế giới, thuộc nửa New Guinea của Indonesia, trên một dãy núi xa xôi nhô lên bầu trời hơn 4.000 mét, bạn sẽ tìm thấy Grasberg.
Nó có thể là mỏ ngoạn mục nhất trên thế giới vì nó trông giống như hang ổ của một nhân vật phản diện trong phim được bao bọc trong mây, với một cái hố khổng lồ nhô ra khỏi đỉnh núi. Sự giàu có về quặng ở đây rất lớn: nơi đây có trữ lượng vàng lớn nhất thế giới và trữ lượng đồng lớn thứ hai. Nhưng Sau khi khoét rỗng miệng núi lửa trên đỉnh, những người thợ mỏ hiện đang làm những gì họ đang làm ở Chuqui. Họ đã khoan một mạng lưới đường hầm bên dưới miệng núi lửa để kích nổ và phân hủy trung tâm ngọn núi ngay từ bên trong.

Các đoàn tàu không người lái sẽ di chuyển trên một đường ray dài 23 km (14 dặm) để vận chuyển đá đi, trước khi chúng được xử lý và tinh chế thành các thỏi vàng và cực âm đồng mà cuối cùng sẽ được giấu bên dưới dây điện và hầm, bên trong các máy móc và máy phát điện cung cấp năng lượng. thế giới của chúng ta.

Điều gây ấn tượng ở đây tại Grasberg và Chuqui không chỉ là quy mô hay mức độ mà môi trường bị tổn hại do việc khai thác đồng mà còn là một điều khác: cần bao nhiêu người để làm được khối lượng công việc như vậy. Trong thế kỷ 20, số người làm việc trong lĩnh vực khai thác và sản xuất đồng ở Hoa Kỳ đã giảm 2/3, nhưng lượng đồng được sản xuất lại tăng gấp bốn lần.

Đây là manh mối đầu tiên về lý do tại sao Paul Ehrlich thua cược; chúng tôi ngày càng trở nên giỏi hơn trong việc sản xuất nhiều thứ hơn với ít nhân lực hơn. Vào thời Đế chế La Mã, giá một tấn đồng nguyên chất tương đương với mức lương trung bình khoảng 40 năm. Bốn mươi năm làm việc để có được một tấn đồng. Đến năm 1800, con số này giảm xuống còn 6 năm một tấn. Trong 200 năm tiếp theo, nó giảm xuống chỉ còn 0,06 năm/tấn. Đối với Paul Gait, một nhà đầu tư khai thác đa hình đến từ London, thước đo 'giá thực' của đồng này là một câu chuyện lớn ở đây. Đó là một điều kỳ diệu về năng suất, cũng ấn tượng như định luật Moore đối với chất bán dẫn - tuy nhiên, dường như rất ít người, ngay cả trong ngành, nhận thức được điều đó.

Điều này đưa chúng ta trở lại chủ đề lặp đi lặp lại về Thế giới Vật chất. Khi số lượng vật liệu chúng ta loại bỏ khỏi mặt đất và biến thành những sản phẩm đặc biệt tiếp tục tăng lên, tỷ lệ người cần thiết để thực hiện điều này sẽ giảm đi. Ngay cả bây giờ các thợ mỏ đang tìm ra những cách mới để tự động hóa quy trình của họ. Các điều quan trọng tiếp theo trong kinh doanh là làm cho những chiếc xe tải và máy đào khổng lồ đó không có người lái và kiểm soát toàn bộ hoạt động không phải từ chính địa điểm mà từ xa, đôi khi ở cách xa hàng trăm dặm. Khi ở Antofagasta, tôi đến thăm một trung tâm điều khiển, nơi những người đàn ông và phụ nữ ngồi trước màn hình lắc lư cần điều khiển để điều khiển các máy nghiền và máy đào khác nhau tại một mỏ đồng cách đó hơn một trăm dặm. Các xe tải bên dưới hố Chuquicamata trong mỏ ngầm mới cũng sẽ tự hành.

Sản phẩm phụ đáng mừng của quá trình tự động hóa này là có ít người làm việc trực tiếp với máy móc hạng nặng hơn đồng nghĩa với việc ít tai nạn tiềm ẩn sắp xảy ra hơn. Nhưng với việc ngày càng ít người trong chúng ta làm việc trong lĩnh vực sản xuất của họ, có gì ngạc nhiên khi chúng ta biết rất ít về những gì cần thiết để tạo ra những vật liệu này hoặc biến chúng thành sản phẩm? Có gì ngạc nhiên khi chúng ta coi Thế giới Vật chất là điều hiển nhiên?

Lý do thứ hai khiến Ehrlich thua cược là vì chúng ta đã nghĩ ra những cách nhanh hơn để lấy kim loại ra khỏi đá. Một lần nữa, câu chuyện lại hiện ra trước mắt bạn tại Chuqui: có những nhà máy lớn và máy tuyển nổi bọt đã giúp bạn có thể khai thác những loại đá cấp thấp này hơn một thế kỷ trước. Các miếng lọc này đại diện cho một cuộc cách mạng thủy luyện kim trong những thập kỷ gần đây, nghĩa là quặng có thể được rắc dung dịch để loại bỏ đồng thay vì phải ném vào các lò nung đắt tiền và gây ô nhiễm. Đây là cơ sở điện hóa, nơi chất lỏng cô đặc được điện phân và biến thành cực âm đồng cực kỳ tinh khiết – một cải tiến của những năm 1980. Kỹ thuật khai thác ít người biết đến và những chiếc xe tải khổng lồ - đây là những điều giúp giải thích tại sao tất cả những dự đoán về đỉnh đồng vẫn chưa thành hiện thực. Đây là những gì đã giúp giữ cho mạch máu của thế giới hiện đại luôn chảy. [18]

Nhưng còn thực tế là trên thế giới chỉ còn lại trữ lượng đồng khoảng 30 đến 40 năm thì sao? Hóa ra đây là một trong những số liệu thống kê luôn bị hiểu lầm và hiểu sai, vì vậy đã đến lúc có một bài học ngắn gọn. Khi các thợ mỏ nói về *trữ lượng* mà họ còn lại của một loại vật liệu nhất định, điều đó có nghĩa là mọi thứ họ còn lại trong mỏ hoặc các địa điểm mỏ đã được phê duyệt có thể được khai thác một cách kinh tế tại bất kỳ thời điểm nào. Lý do chúng ta có trữ lượng đồng còn lại khoảng 30 đến 40 năm (42 tại thời điểm viết bài) không phải vì đó là những gì còn sót lại trong lòng đất, mà bởi vì đó là khoảng thời gian mà các thợ mỏ có xu hướng lập kế hoạch. [19]

Tuy nhiên, thỉnh thoảng sẽ xuất hiện một báo cáo cố gắng ngoại suy từ những con số dự trữ này rằng chúng ta sắp cạn kiệt kim loại này - *Giới hạn tăng trưởng* chỉ là nghiên cứu nổi tiếng nhất nhằm thử điều gì đó theo hướng đó. Các báo cáo về thảm họa sắp xảy ra có xu hướng nhận được nhiều sự chú ý hơn so với các số liệu thống kê

cứng nhắc về thế giới thực, vì vậy đây là điểm dữ liệu cần ghi nhớ. Từ năm 2010 đến năm 2020, chúng ta đã khai thác 207 triệu tấn đồng trên khắp thế giới, nhưng không hề giảm, tổng trữ lượng đồng toàn cầu *đã tăng* thêm 240 triệu tấn. Hãy suy ngẫm điều đó một lát. Nhân loại đang tìm cách tăng nguồn cung cấp vật liệu quan trọng này với tốc độ nhanh hơn mức khai thác thực tế của chúng ta.

Trên thực tế, con số tốt hơn để tập trung vào không phải là số liệu trữ lượng mà các nhà khai thác thường trích dẫn mà là một con số khác: tài *nguyên* . Hóa ra, tài nguyên không chỉ là thước đo cho những gì chúng ta đã dự tính cho việc khai thác trong tương lai mà còn là thước đo của *tất cả* kim loại dưới lòng đất, bao gồm cả những thứ chưa được khám phá. Các số liệu ở đây rõ ràng đòi hỏi phải phỏng đoán nhiều hơn, nhưng chúng cũng khiến chúng ta yên tâm hơn phần nào: theo Cơ quan Khảo sát Địa chất Hoa Kỳ, tổng trữ lượng đồng của thế giới là 5,6 tỷ tấn, trong đó chúng ta đã phát hiện được 2,1 tỷ tấn. Con số này tính ra lượng đồng tiêu thụ hàng năm của chúng ta trong khoảng 226 năm hiện nay - hoặc khoảng 115 năm dựa trên mức tiêu thụ của chúng ta trong một thập kỷ nữa, khi quá trình chuyển đổi năng lượng xanh đang diễn ra hoàn toàn. [20]

Tuy nhiên, tất nhiên, có những hậu quả cho tất cả những điều này. Mặt trái của việc khai thác hiệu quả hơn những quặng đồng ngày càng nghèo hơn là chúng ta phải di dời ngày càng nhiều hành tinh để làm điều đó. Từ năm 2004 đến 2016, các công ty khai thác Chile đã tăng sản lượng đồng hàng năm lên 2,6%. Tuy nhiên, lượng quặng họ phải đào lên khỏi lòng đất để tạo ra mức tăng nhẹ về đồng tinh chế này đã tăng 75%. Tuy nhiên, điều đáng kinh ngạc nhất về thống kê này không chỉ là các con số mà thực tế là chúng không xuất hiện trong các tài khoản môi trường hoặc phân tích dòng nguyên liệu, chỉ tính đến kim loại tinh chế. Khi nói đến các biện pháp của Liên Hợp Quốc về mức độ ảnh hưởng của con người đến hành tinh, tảng đá thải này không được tính. [21]

Có một lý do cấp bách khác để bắt đầu cân nhắc điều này, bởi vì việc loại bỏ lượng khí thải carbon về cơ bản liên quan đến việc chuyển đổi nhiều hoạt động của chúng ta từ nhiên liệu hóa thạch sang điện. Hãy bỏ đi những nồi hơi đốt gas và dầu trong nhà của chúng ta; có máy bơm nhiệt điện. Đi ra ngoài ô tô động cơ đốt trong; đến những cái

chạy bằng pin. Từ năm 2020 đến năm 2050, tỷ lệ năng lượng sơ cấp từ điện được dự báo sẽ tăng từ 20% lên 50%. Đột nhiên, đồng trở thành xương sống của mọi thứ.

Một chiếc ô tô trung bình đã có khoảng một dặm dây đồng nối các cảm biến và các bộ phận điện giúp nó hoạt động. Trong ô tô điện, chúng ta cần lượng đồng gấp ba hoặc bốn lần, với khoảng một nửa số đó dùng để chế tạo động cơ và phần còn lại dùng cho bộ dây điện và pin. Một chiếc xe buýt chạy bằng pin sẽ cần gần nửa tấn đồng trong động cơ và mạch điện cũng như các tấm lớn – như tên gọi của chúng là thanh cái – có khả năng mang dòng điện thậm chí còn lớn hơn cả dây dẫn thông thường. Tàu cao tốc sẽ cần nhiều hơn nữa. [22]

Những con số này càng trở nên phi thường hơn nhờ cơ sở hạ tầng mà chúng ta cần để tạo ra nguồn điện xanh bổ sung đó. Vì tất cả điều đó họ có kim loại ở trung tâm của máy phát điện, các nhà máy điện thông thường thực sự có ánh sáng tương đối bằng đồng. Nhưng các tấm pin mặt trời cần lượng đồng gấp bảy lần so với các nhà máy điện thông thường trong khi gió ngoài khơi cần lượng đồng gấp khoảng mười lần để tạo ra cùng một lượng điện năng. [23]

Có lẽ bạn có thể thấy thách thức mà chúng ta đang phải đối mặt: nếu muốn thực hiện những lời hứa khác nhau được đưa ra trong những năm gần đây để đạt được mức 0 ròng, chúng ta sẽ cần một lượng kim loại này đáng kinh ngạc. Giảm lượng khí thải carbon của chúng tôi sẽ có nghĩa là tăng lượng khí thải đồng của chúng tôi. Tin tốt là một số trong số đó có thể đến từ việc tái chế. Tin xấu là ngay cả khi chúng ta tái chế hầu hết mọi thứ có thể từ đường ống và dây điện cũ, chúng ta vẫn sẽ thiếu những thứ chúng ta cần.

Điều này đưa chúng ta đến thách thức thực sự: không đến mức chúng ta có thể hết kim loại, cũng không đến mức nó trở nên quá đắt. Câu hỏi thực sự là người ta sẽ chịu đựng được việc nổ mìn và đào xới này thêm bao nhiêu nữa. Khi cuốn sách này được in, các chính phủ trên khắp Nam Mỹ, bao gồm Chile và Peru, nước sản xuất đồng lớn thứ hai thế giới, đã bày tỏ lo ngại về chi phí môi trường của việc khai thác đồng. Họ bắt đầu áp đặt các giới hạn đối với việc khai thác đồng, đặt ra câu hỏi về nguồn cung trong tương lai.

Buổi bình minh của thời đại điện trùng hợp với một chu kỳ dồi dào khoáng sản, với các kỹ thuật tinh chế điện phân mới được phát minh

và các siêu mỏ mới được khai thác như Chuquicamata giúp đáp ứng nhu cầu về dây đồng, máy phát điện và máy biến áp của Thomas Edison và George Westinghouse. Hiện có khả năng là quá trình chuyển đổi năng lượng mới nhất này có thể trùng hợp với một vòng luẩn quẩn, trong đó sự phản kháng chính trị ngăn cản việc khai thác chính đồng cần thiết để giúp thế giới loại bỏ nhiên liệu hóa thạch. Trên cơ sở một ước tính, nếu muốn đáp ứng nhu cầu đó trong những thập kỷ tới, chúng ta có thể phải xây dựng thêm ba mỏ nữa. như Chuqui *hàng năm* . Tôi đứng một lúc nhìn chằm chằm vào vết cắt lớn trên bề mặt trái đất, cố gắng xử lý nó.

Mặc dù chúng ta đang ngày càng khai thác được nhiều đồng hơn từ các mỏ cũ nhưng những khám phá mới và việc mở mỏ đang giảm tốc. Phần lớn đồng có sẵn trên bề mặt hành tinh có thể không bao giờ được khai thác. Đây là một nghịch lý mà chúng ta mới bắt đầu vật lộn với nó. Không có đồng, sẽ có rất ít hy vọng hoàn thành bất kỳ kế hoạch nào về số 0 do các chính phủ và viện môi trường trên khắp thế giới thiết kế. Vì vậy, khi nhu cầu điện khí hóa của chúng ta ngày càng tăng, một số nhà thám hiểm dũng cảm đang tìm kiếm những nơi sâu hơn, tối hơn và gây nhiều tranh cãi hơn để có được kim loại này.

12
vực sâu

26°B, 45°T

Ở mực nước biển, dãy núi lớn nhất thế giới trông bằng phẳng như một chiếc bánh kếp.

Dãy núi gồm các đỉnh và thung lũng này ngoằn ngoèo hàng chục nghìn dặm từ bắc xuống nam, dài hơn dãy Andes và Cordillera ở Bắc Mỹ và có những nơi cao hơn dãy Himalaya. Tuy nhiên, rất ít người từng nhìn thấy nó chứ đừng nói đến việc trèo lên đỉnh núi vì dãy núi lớn nhất thế giới bị nhấn chìm dưới hàng nghìn mét nước biển.

Chúng tôi đang ở giữa Đại Tây Dương trên con tàu RRS *James Cook* , một con tàu chuyên nghiên cứu khoa học (RRS là viết tắt của Royal Research Ship), và đâu đó dưới chân chúng tôi là Mid-Atlantic Ridge. Biển ở đây động, sóng cao hơn 15 thước; gió mậu dịch thổi qua mặt nước với tốc độ lên tới 50 dặm/giờ, hất con tàu và thủy thủ đoàn theo hướng này và hướng kia. Khi mây tan, không còn chỗ để tắm nắng vì boong tàu này được trang trí bằng cần cẩu và máy móc hạng nặng, liên tục chuyển động. [1]

Trong số những người trên tàu có một đội đặc biệt gồm các nhà địa chất đang thực hiện một nhiệm vụ đặc biệt. Ban ngày họ vận hành máy móc và khi màn đêm buông xuống, người ta thấy họ đang nghiền ngẫm những lõi đá dài, nghiên cứu đá. Những sinh viên của trái đất này đã ra khơi vì ở trung tâm đại dương là nơi hình thành những vùng đất mới.

Điều đó đang xảy ra ngay bây giờ: khi bạn đọc đoạn này, mảng kiến tạo Bắc Mỹ đang dần tách ra khỏi mảng Á-Âu với tốc độ khoảng một inch một năm: một quá trình dần dần, không thể tránh khỏi đã khởi đầu cho sự tan rã của siêu lục địa Pangea 200 triệu năm trước. Và khi hai lục địa này tách ra, tất cả các loại hoạt động địa chất thú vị sẽ xuất hiện để lấp đầy khoảng trống: núi lửa, dung nham gối, những tháp đá nóng bốc khói sủi bọt từ sâu thẳm. Phần lớn những điều này xảy ra ngoài tầm mắt nhưng để hiểu được những gì chúng ta đang nói đến, hãy lưu ý rằng Iceland, vùng đất của núi lửa, dung nham và mạch

nước phun, là một trong số ít phần trên cạn của Sống núi Trung Đại Tây Dương. Bây giờ hãy tưởng tượng nhiều hơn nữa về độ sâu dưới nước đó, theo một đường kéo dài đến tận hành tinh - một dãy núi cận thủy sinh lớn hơn nhiều so với bất kỳ thứ gì trên bề mặt.
Dãy núi này được phát hiện vào năm 1872 bởi phi hành đoàn của tàu HMS *Challenger* , trong sứ mệnh đầu tiên trong số nhiều sứ mệnh lớn nhằm khảo sát đáy đại dương. Trên *Challenger* , một cựu chiến hạm có súng đã được thay thế bằng thiết bị khoa học – dây dẫn dò, máy nạo vét, chai thu thập mẫu và gần 200 dặm dây thừng dệt từ cây gai dầu của Ý – thủy thủ đoàn nhận thấy rằng các đại dương sâu không hề cằn cỗi mà tràn ngập sự sống; địa hình của chúng không bằng phẳng nhưng đa dạng và khắc nghiệt như bất cứ thứ gì được tìm thấy trên mặt nước. Khi khảo sát đáy đại dương để tìm những vị trí tốt nhất để đặt cáp điện báo xuyên Đại Tây Dương, họ nhận ra rằng, khi đi được nửa đường, họ đang đi trên đỉnh một dãy núi. Đó không phải là khám phá tình cờ đầu tiên hay cuối cùng về những điều kỳ diệu của vực sâu. Vào năm 1977, trên một chiếc thuyền ở đâu đó phía trên Rạn nứt Galápagos ngoài khơi Nam Mỹ, nhà địa chất biển Bob Ballard đã tình cờ phát hiện ra các miệng phun thủy nhiệt đầu tiên trên thế giới, nơi nước giàu hóa chất, được làm nóng bằng núi lửa phun ra từ những 'khói đen' này, mang lại sự sống cho vô số loài người. những loài ngoại lai kỳ lạ không cần ánh sáng mặt trời. MỘT Vài thập kỷ sau, các nhà khoa học trong một chuyến thám hiểm khác tới Mid-Atlantic Ridge, sứ mệnh Atlantis Massif của IODP (Chương trình khám phá đại dương quốc tế), đã tình cờ phát hiện ra một điều thậm chí còn hấp dẫn hơn: những ống khói trắng kỳ lạ, nổi lên từ bóng tối, đang tự động tạo ra hydrocarbon – những khối xây dựng của cuộc sống. Thành phố đã mất, như sau này người ta gọi nơi này, có thể nắm giữ manh mối về chính sự sống theo đúng nghĩa đen.
Tất cả những điều đó muốn nói lên rằng có rất nhiều điều chúng ta không biết về những gì nằm dưới đáy đại dương. Theo một nghĩa nào đó, đó chính là mục đích của sứ mệnh mới nhất tới Mid-Atlantic Ridge. Bram Murton, nhà khoa học trưởng của dự án mà họ gọi là Project Ultra, coi nó như một loại câu chuyện bí ẩn về công nghệ cao. Tâm điểm của bí ẩn là một tập hợp các đặc điểm hình nón cao khoảng 150 mét, được phát hiện bởi một cuộc khảo sát độ sâu tại địa

điểm này trên Biển Sargasso nhiều năm trước. “Mọi người đều cho rằng chúng là núi lửa,” Bram nói. 'Chúng tôi không chắc chắn lắm.'
Ngay trước khi con tàu chuẩn bị ra khơi vào cuối tháng 2 năm 2022, Nga đã xâm chiếm Ukraine. Phần lớn công việc chuẩn bị đã được thực hiện bởi một nhóm có trụ sở tại St Petersburg nhưng sau cuộc xâm lược, Bộ Ngoại giao Anh nhấn mạnh rằng các nhà khoa học Nga không được phép lên máy bay theo kế hoạch vì sợ xảy ra sự cố ngoại giao. Việc chuyến đi thăm một gò đất khuất dưới đáy biển đáng lẽ phải thu hút sự chú ý của chính phủ không phải ngẫu nhiên. Những sứ mệnh như thế này đang nhanh chóng trở thành vấn đề an ninh quốc gia, vì họ đang tìm kiếm nguồn tài nguyên khổng lồ – một loại kho báu của thế kỷ XXI dưới những con sóng. Và trong số những kho báu đó có trữ lượng đồng khổng lồ.
Câu chuyện quay trở lại với HMS *Challenger* và một số cục có kích thước bằng củ khoai tây trông kỳ lạ mà cô đã nạo vét từ đáy Thái Bình Dương cách đây một thế kỷ rưỡi. Những viên đá sẫm màu, hơi vụn này, mặt trên nhẵn, mặt dưới thô ráp, sau này được gọi là các nốt đa kim. Bạn có tìm thấy chính mình trên dưới đáy một số khu vực nhất định của Thái Bình Dương - đặc biệt là Vùng Clarion-Clipperton - bạn sẽ thấy vô số nốt sần nằm rải rác khắp đáy biển.
Những củ khoai tây nhỏ bằng đá hình thành qua hàng triệu năm khi các khoáng chất tích tụ xung quanh các mảnh vật chất hữu cơ – răng cá mập hoặc một mảnh vỏ – rơi xuống đáy biển. Điều đáng chú ý về chúng, ít nhất là từ quan điểm của một nhà địa chất, là mức độ tập trung của các mỏ khoáng sản đó: niken, mangan, coban và đồng, ở các cấp độ mà bạn không thể tìm thấy trên bề mặt.
Việc phát hiện ra những nốt sần này là dấu hiệu đầu tiên về kho báu khoáng sản nằm dưới nước, đủ để đáp ứng nhu cầu nguyên liệu thô của nhân loại trong nhiều, rất nhiều kiếp sống. Một nghiên cứu cho rằng dưới đáy biển có đủ vàng để mỗi người trên hành tinh sở hữu 9 pound, tương đương 170.000 USD mỗi người. Một nghiên cứu khác cho rằng việc thực sự nắm giữ số vàng đó sẽ tốn kém gấp đôi số đó, vì vậy đừng nín thở.
Tuy nhiên, để có một minh họa rõ ràng về sự dồi dào khoáng sản này, hãy xem xét trường hợp của coban – một trong những kim loại khan hiếm hơn trên thế giới và là thành phần quan trọng trong pin sạc hiện

đại (chưa kể đến hợp kim thép). Phần lớn trữ lượng coban của thế giới nằm ở một trong những quốc gia bất ổn nhất thế giới: Cộng hòa Dân chủ Congo (DRC), nơi điều kiện khai thác mỏ có thể rất kém. Coban cũng không phải là kim loại pin quan trọng duy nhất đặt ra những câu hỏi như vậy. Chúng ta cũng cần nhiều niken cho nhiều nhà máy hóa học pin hiệu suất cao, tuy nhiên phần lớn niken trên thế giới được sản xuất ở Indonesia, nơi nó thường liên quan đến việc phá hủy các khu rừng nhiệt đới nguyên sơ và nơi chất thải thường xuyên được đổ xuống sông và biển.

Với ý nghĩ đó, đây là một cách để nhìn thấy tiềm năng của những gì dưới biển. Khi mọi thứ ổn định, có khoảng 25 triệu tấn tài nguyên coban trên cạn, hầu hết ở DRC và Zambia. Tổng lượng coban được xác định dưới biển, trong các nốt đa kim và một đặc điểm dưới nước khác gọi là lớp vỏ giàu coban, là 120 triệu tấn. Có khoảng 300 triệu tấn tài nguyên niken trên mặt đất. Người ta ước tính rằng chỉ riêng Khu vực Clarion-Clipperton đã có khoảng 270 triệu tấn niken, nhưng do đây chỉ là một phần của Thái Bình Dương nên tổng số có thể cao hơn nhiều. [2]

Đồng luôn được chú ý đến sau khi thực hiện các phép tính như thế này vì một số lý do. Đầu tiên là chúng tôi, như bạn đã đọc, khá giỏi trong việc lấy đồng ra khỏi lòng đất, vì vậy cho đến gần đây, rất ít nhà địa chất bên ngoài Câu lạc bộ Rome đã suy nghĩ nghiêm túc về ý tưởng về 'đỉnh đồng', theo đó chúng ta đạt đến giới hạn của những gì chúng ta có thể hoặc sẵn sàng loại bỏ khỏi bề mặt. Thứ hai là mặc dù có rất nhiều đồng trong các khối đa kim đó – thực tế là vào khoảng 230 triệu tấn nhưng vẫn có đủ đồng trong Vùng Clarion-Clipperton để cung cấp cho toàn bộ thế giới trong một thập kỷ – những con số này không hoàn toàn thay đổi như trò chơi. đối với coban hoặc niken. [3]

Tuy nhiên, một phần là do trữ lượng đồng dồi dào nhất thực sự được tìm thấy ở nơi khác: trong tàn tích của những người hút thuốc đen đó bơm nước giàu khoáng chất sẫm màu ra khỏi đáy biển dọc theo các dãy núi ngập nước như Mid-Atlantic Ridge. Nếu bạn cắt bỏ một trong những ống khói đen đó, bạn sẽ tìm thấy đủ loại vật liệu: sắt, kẽm, selen và một loại quặng kết tinh gọi là chalcopyrite, có thể chứa tới 20% đồng. Sau khi lò khói đen ngừng hoạt động và sụp đổ, xảy ra sau vài nghìn năm, nó sẽ để lại một số quặng đồng giàu nhất thế giới.

Nhân tiện, Chalcopyrite là một trong những loại đá được tìm thấy ở Chuquicamata - một loại đá vàng lấp lánh có vẻ đẹp mê hoặc. Nhưng những loại bạn thấy trên mặt đất ngày nay hiếm khi phong phú như những loại bạn tìm thấy dưới mặt nước - đặc biệt là sau hàng nghìn năm khai thác liên tục. fn1

Mặc dù chúng ta biết khá rõ có bao nhiêu nốt đa kim loại có thể tồn tại dưới đáy biển, nhưng không ai biết rõ nhất có bao nhiêu trong số những cái gọi là sunfua khổng lồ dưới đáy biển này. Đã có những nỗ lực cố gắng ngoại suy số lượng của họ, dựa trên số lượng người hút thuốc da đen mà bạn có xu hướng tìm thấy trên và dưới các rặng núi giữa đại dương, và chúng không đặc biệt đáng khích lệ. Một ước tính theo hướng đó cho thấy rằng toàn bộ lượng sunfua khổng lồ dưới đáy biển của thế giới có thể mang lại khoảng 30 triệu tấn đồng và kẽm – ít kim loại hơn lượng kim loại được khai thác từ lòng đất tại Chuquicamata. Nhưng nếu họ sai thì sao? Điều gì sẽ xảy ra nếu họ đánh giá thấp mức độ phổ biến của những trang web này, không chỉ một chút mà là rất nhiều, rất nhiều lần? 4

Cuối cùng, đó là lý do tại sao Bram và nhóm của ông đến đây giữa đại dương để kiểm tra một vài gò đất mà hầu hết các nhà địa chất khác không thể bận tâm. Họ đã mang theo một giàn khoan biển sâu khổng lồ, một trong số ít giàn khoan trên thế giới có khả năng chịu được áp lực và căng thẳng khi làm việc ở độ sâu 3.000 mét dưới mực nước biển. Trong một tháng, nó đã khoan sâu vào đáy biển, thu thập các lõi đá dài bất thường và giúp thực hiện các cuộc khảo sát địa chấn ở các gò đất. Những kết quả ban đầu, Bram nói, “khá đáng chú ý”.

'Số lượng khoáng sản ở đó thật đáng kinh ngạc. Tôi nghĩ nó sẽ thay đổi hoàn toàn hiểu biết của chúng ta về lượng đồng dưới đáy biển.” Vì nghiên cứu vẫn đang tiếp tục tại thời điểm viết bài, nên còn quá sớm để nói chính xác điều này đưa ra những ước tính về tài nguyên đáy đại dương của chúng ta ở đâu. Nhưng xét đến một địa điểm nhỏ dưới Biển Sargasso - một khu vực bị loại trừ khỏi những ước tính thông thường về tài nguyên đồng dưới biển - chứa hàng chục triệu tấn quặng, rất có thể chúng sẽ bị loại bỏ. Bram nói: “Bạn có thể dễ dàng xem xét nhiều hơn 20, 30, 40 lần so với những đánh giá đó”. Điều đó có thể hàm ý nguồn tài nguyên đồng dưới biển sâu lên đến hơn một tỷ tấn – một con số đáng kinh ngạc, nhiều hơn toàn bộ trữ

lượng đồng trên đất liền của chúng ta. Chắc chắn là đủ để cung cấp toàn bộ số đồng cho toàn thế giới trong nhiều thập kỷ mà không cần phải đào một hố khác như Chuqui, chứ đừng nói đến ba hố mỗi năm. Tất nhiên điều này đặt ra câu hỏi: lợi ích là gì?

KINGSTON, JAMAICA

Trung tâm hội nghị nơi Cơ quan quản lý đáy biển quốc tế (ISA) tổ chức các cuộc họp có cảm giác hơi giống bối cảnh của bộ phim James Bond thời Roger Moore. Ở đằng kia là dãy bốt điện thoại, nơi Bond kín đáo gọi điện về London trước khi đối đầu với tay sai của Blofeld. Có một cửa sổ kính, chỉ chờ bị đập vỡ để thoát ra khỏi Vịnh Kingston bằng tàu cao tốc. Giấy dán tường sặc sỡ, những chiếc ghế trông giống như những món đồ trong bảo tàng từ những năm sáu mươi hoặc bảy mươi và những chiếc bàn trong sảnh chính rộng lớn có các nút bấm ở khắp mọi nơi: dành cho hệ thống liên lạc nội bộ, để bỏ phiếu, cho ghế phóng?

Rằng nơi này có cảm giác hơi giống một chiếc hộp thời gian, không bị thế giới bên ngoài quấy rầy trong nhiều thập kỷ, khá phù hợp, vì người ta có thể nói điều tương tự cũng xảy ra với ISA, tổ chức của Liên hợp quốc có nhiệm vụ quản lý phần lớn đáy đại dương của thế giới, xác định ai có quyền đối với những khoáng sản dưới sóng. Quy tắc về nơi thẩm quyền của ISA có hiệu lực khá đơn giản: bất kỳ vùng nước nào nằm cách bờ biển của bất kỳ quốc gia nào 200 hải lý đều đủ tiêu chuẩn là một phần của 'biển cả' - một khu vực theo Công ước Liên Hợp Quốc về Luật năm 1982 biển, “di sản chung của nhân loại”. Tôi biết tất cả những điều này vì tôi đã được trao một bản sao khi tôi đến thư viện của ISA, từ một tủ sách lớn chứa đầy các bản sao giống hệt của hội nghị.

Điều đó làm cho biển khơi trở thành một vùng xám về ngoại giao và kinh tế, có nghĩa là không có gì có thể ngăn cản chúng ta sử dụng chúng như một thùng rác chung rộng lớn (chúng ta làm vậy) hoặc đánh bắt chúng quá mức (chúng ta làm vậy). Vậy điều gì sẽ xảy ra khi mọi người bắt đầu thử khai thác chúng? Họ có thể đơn giản gửi máy đào xuống và bắt đầu mài và nổ không? Có bất kỳ giới hạn nào đối với việc khai thác hay, giống như việc buôn bán đánh bắt cá, đây thực chất có phải là miền Tây hoang dã không? Ngày nay, những câu hỏi

này càng trở nên thú vị hơn vì công nghệ tàu lặn hiện đã đủ đủ để thực hiện công việc này. Trong một thời gian dài, việc khai thác biển sâu được coi là một giấc mơ viển vông. Trường hợp thương mại vẫn chưa được chứng minh nhưng không ai còn nghi ngờ rằng nó có thể được thực hiện về mặt vật lý. Quả thực, nhiều người thắc mắc liệu một số quốc gia tập trung vào tài nguyên bí mật hơn – những nơi như Trung Quốc và Nga – đã âm thầm thực hiện điều đó hay chưa.
Tất cả những điều đó đặt ISA vào một tình thế không thoải mái, vì cuối cùng nó được cho là chịu trách nhiệm và phần lớn các nguồn tài nguyên đã biết - những nốt, lớp vỏ và ống hút đa kim loại - nằm dưới biển cả. Thể chế khó hiểu này chính là thứ đứng giữa sự kết thúc giận dữ của một giàn khai thác dưới biển sâu và di sản chung của nhân loại. Tuy nhiên, khi bạn đến thăm các văn phòng xiêu vẹo của nó liền kề với trung tâm hội nghị những năm 1970, bạn sẽ khó có cảm giác đây là tiền tuyến của một cuộc chạy đua toàn cầu để giành lấy vị thế. tài nguyên. Thay vào đó, nó chỉ đơn giản là có cảm giác hơi… trống rỗng. Tôi đã dành thời gian nói chuyện với Michael Lodge, luật sư người Anh vui tính, người đứng đầu tổ chức. Anh ấy dẫn tôi qua những hành lang yên tĩnh đến một căn phòng treo những tấm bản đồ đại dương cỡ áp phích trên tường. Ông chỉ ra đây là Vùng Clarion-Clipperton, đây là Sống núi Trung Đại Tây Dương; có các hộp biểu thị phân đoạn nào đã được phân bổ cho thành viên nào của ISA.
Bạn có thể ngạc nhiên về bao nhiêu phần biển sâu đã được tuyên bố chủ quyền: Trung Quốc là quốc gia đi đầu với bốn hợp đồng ISA và quyết tâm trở thành quốc gia đầu tiên khai thác số lượng lớn. Hàn Quốc có ba, Nga cũng vậy - thực tế, các gò đất mà tàu RRS *James Cook ghé thăm* nằm trong lãnh thổ được chuyển giao cho Moscow. Đức và Pháp có hai quốc gia, Vương quốc Anh cũng vậy, mặc dù nước này đã nhường lại yêu sách của mình cho gã khổng lồ quốc phòng Mỹ Lockheed Martin, hãng có lịch sử đầy màu sắc của riêng mình khi nói đến trò chơi này. Quay trở lại những năm 1970, nó đã công bố rộng rãi về lĩnh vực khai thác biển sâu nhưng sau đó có thông tin cho rằng toàn bộ sự việc này chỉ là bình phong cho nỗ lực của CIA nhằm kéo một tàu ngầm Liên Xô bị chìm ra khỏi đáy biển. Chà, có lẽ không phải là toàn bộ vấn đề: Lockheed cho biết bước đột phá này đã mang lại kiến thức chuyên môn cho doanh nghiệp mà họ

vẫn đang xây dựng dựa trên những nỗ lực ngày nay, mặc dù không ai hoàn toàn chắc chắn rằng nó thực sự đang làm gì.
Việc một công ty Mỹ phải dựa vào Anh để tiếp cận đáy biển quốc tế không phải là không có lý do: Mỹ chưa bao giờ đăng ký công ước liên quan của Liên hợp quốc, do đó ngăn cản nước này tiếp cận ISA. Tuy nhiên, xét đến phần lớn đáy biển nằm trong phạm vi 200 hải lý tính từ bờ biển và đảo của nước này, bao gồm cả một chuỗi trong số đó chia cắt phần lớn Thái Bình Dương, Mỹ vẫn sẽ là một trong những nước hưởng lợi tiềm năng lớn nhất từ hoạt động khai thác biển sâu, ngay cả khi nó giữ vùng đặc quyền kinh tế của riêng mình chứ không phải biển cả.
Điều này nghe có vẻ kỳ lạ là do những gì đã xảy ra với Quần đảo Chincha nhiều năm trước. Lý do là Hoa Kỳ chiếm hữu rất nhiều hòn đảo nhỏ ở Thái Bình Dương và Châu Đại Dương là do Đạo luật năm 1856 được Quốc hội thông qua trong bối cảnh nỗ lực đầu tiên nhằm thu giữ phân chim giàu nitrat được tìm thấy trên những tảng đá của Peru. Nhờ Đạo luật Quần đảo Guano, cho phép công dân Hoa Kỳ chiếm giữ bất kỳ hòn đảo không có chủ quyền, không có người ở nào chứa phân chim, mà Hoa Kỳ đã chiếm hữu Đảo san hô Midway, Đảo Howland và một loạt các tảng đá hoang vắng, cằn cỗi khác ở giữa hư không. Midway, như bạn sẽ biết mình là sinh viên lịch sử hay người xem phim, đã chứng tỏ một trong những căn cứ quan trọng nhất ở Thái Bình Dương trong Thế chiến thứ hai. Và giờ đây, những hòn đảo này, được cho là giúp tăng cường nguồn cung cấp phân bón và chất nổ cho Mỹ, có thể giúp nước này đảm bảo các khoáng sản quan trọng cho thế hệ công nghệ tiếp theo, vì nhiều hòn đảo trong số đó nằm gần một số mỏ quặng giàu dinh dưỡng nhất dưới biển.
Mục tiêu xác định của ISA là tất cả chúng ta, bằng cách này hay cách khác, sẽ được hưởng lợi từ hành trình đến biên giới mới này. Nếu và khi việc khai thác cuối cùng bắt đầu, mỗi quốc gia khai thác ở biển khơi sẽ phải chia sẻ tiền bản quyền với mọi quốc gia khác trên thế giới - vì vậy hãy tôn trọng điều khoản 'di sản chung của nhân loại'.
Sau đó, một lần nữa, liệu chúng ta có sớm đạt được điều đó hay không vẫn là một câu hỏi bỏ ngỏ. Trong nhiều năm, các nhà khai thác khai thác đã theo dõi và chờ đợi khi ISA từ từ soạn thảo một bộ quy tắc khai thác. Những quy tắc đó, bất cứ khi nào chúng được phê

duyệt, sẽ là bước khởi đầu hiệu quả, cho phép các công ty bắt đầu khai thác dưới biển sâu ở vùng biển khơi.
Đối với một số người, súng không thể bắn sớm được. Gerard Barron, người dường như muốn tự phong cho mình là Indiana Jones của biển sâu – toàn bộ áo khoác da và râu ria hàng hiệu – là một nhân vật gây chia rẽ, sau lần đầu tiên thực hiện một trong những nỗ lực khai thác đại dương thất bại ban đầu, thông qua một công ty tên là Nautilus. Nó đã lên kế hoạch khai thác sunfua và lớp vỏ đáy biển ngoài khơi bờ biển Papua New Guinea, nhưng cuối cùng đã phá sản sau khi quan hệ với chính phủ trở nên xấu đi. Barron đang hy vọng những điều tốt đẹp hơn với chiếc xe tiếp theo của mình, từng được gọi là DeepGreen nhưng sau đó được đổi tên thành The Metals Company. Kế hoạch là khai thác các hạt đa kim ở một vùng Thái Bình Dương được phân bổ cho quốc đảo Nauru. Ông nói rằng đồng, niken, coban và mangan sẽ giúp thúc đẩy quá trình chuyển đổi năng lượng.
Các cuộc trò chuyện với Barron liên quan đến việc né tránh một loạt những cái tên bị bỏ rơi ('Đúng, Elon quan tâm… Tôi đã nói với Leo, Hollywood phải bắt tay vào việc này… Lewis muốn làm điều gì đó nhưng F1 vẫn chưa có…'), nhưng hãy điều chỉnh cho phù hợp với họ và chắc chắn có điều gì đó thú vị về giấc mơ mà anh ấy đang bán. “Đây là lần khai thác lớn cuối cùng,” ông nói. 'Chúng ta cần chế tạo pin, nhưng sau đó là tái chế; đó là nền kinh tế tuần hoàn. Chúng tôi không coi mình là người bán kim loại; chúng tôi muốn thuê chúng. Chúng tôi muốn hỗ trợ các thương hiệu sử dụng kim loại tái chế. Quan điểm của chúng tôi là: hãy để khoa học lên tiếng”.
Để đạt được mục tiêu đó, công ty đã tài trợ cho nghiên cứu được bình duyệt cho thấy, trong số những thứ khác, trong khi một kg đồng được sản xuất ở mỏ thông thường tạo ra 460 kg chất thải, thì một kg đồng được sản xuất từ các nốt đa kim chỉ tạo ra 29 kg chất thải. rác thải. Đó là một khái niệm quyến rũ: không còn những hố lớn trên mặt đất nữa; không còn *những khối* đá khổng lồ chôn vùi các thị trấn lân cận; với loại quặng đậm đặc này bạn hầu như không tạo ra bất kỳ chất thải nào cả. Công ty Metals chỉ cần gửi phương tiện tự hành của mình xuống đáy biển để hút bụi những hạt nhỏ này và bơm chúng lên bề mặt – không cần phải nổ mìn hay đào bới. Thật vậy, bạn có thể lập

luận rằng khai thác đồng, hay coban hoặc niken, từ biển sâu là hoạt động khai thác xanh nhất.
Nhưng tất nhiên *có* một cái bẫy ở đây: một mẻ cá khổng lồ. Ngay cả khi Barron đang ủng hộ việc bắt đầu nhanh chóng việc khai thác biển sâu, tích cực thúc đẩy ISA công bố các quy định của mình càng nhanh càng tốt, các nước trên thế giới đang chuyển sang hướng ngược lại. Vào năm 2022, Chile, quốc gia cũng đang thắt chặt các quy định quốc gia về khai thác đồng, đã kêu gọi tạm dừng khai thác dưới biển sâu cho đến khi có thể chắc chắn về tác động môi trường. Nó được tham gia bởi Fiji, Palau và một loạt các quốc gia khác. Tổng thống Pháp Emmanuel Macron kêu gọi các thành viên Liên Hợp Quốc 'tạo khuôn khổ pháp lý để ngăn chặn việc khai thác trên biển'. Do Chile, Pháp và Fiji đều nằm trong cơ quan hoạch định chính sách chính của ISA, nên các cuộc họp của tổ chức này ở Jamaica, từ lâu đã bị coi là chú thích cuối trang trong ngoại giao quốc tế, có nguy cơ trở thành những sự kiện thực sự kịch tính. Có khả năng thực sự là việc khai thác dưới biển sâu có thể bị cấm một cách hiệu quả trước khi nó bắt đầu.
Và người ta có thể hiểu được sự thận trọng. Đáy biển là một trong những môi trường sống nguyên sơ nhất trên hành tinh, tuy nhiên chúng ta biết ít về nó hơn hầu hết các hệ sinh thái khác. Cho đến khi Bob Ballard tình cờ phát hiện ra những sinh vật tổng hợp hóa học sống gần những người hút thuốc đen, các nhà khoa học đã cho rằng mọi sự sống trên trái đất đều phụ thuộc trực tiếp hoặc gián tiếp vào oxy hoặc mặt trời. Gần như mọi chuyến viếng thăm vực sâu kể từ *Challenger* đều mang về tin tức về những loài mà thậm chí không ai từng mơ tới. Nhiều sinh vật dưới đáy biển còn quá mới đối với chúng ta nên chúng chưa được đặt tên chứ chưa nói đến việc nghiên cứu chi tiết. Cá cầu vồng, cá siêu đen, cá không mặt – tất cả các loài sinh vật biển sâu mới được phát hiện trong vài năm qua, cùng với vô số ốc sên, cua và nhím biển, tôm trông giống người ngoài hành tinh, bọt biển và giun ống khổng lồ không có miệng hoặc đường tiêu hóa.
Các nhà sinh vật học tin rằng chúng ta chỉ mới bắt đầu hiểu được môi trường sống mới này. Các thợ mỏ cho rằng có thể khai thác khoáng sản từ một số khu vực mà không gây ra quá nhiều xáo trộn và họ có thể có lý. Những ụ đồng đã tuyệt chủng từ lâu được Bram và nhóm

của ông phát hiện trông giống như đá cẳn cỗi, không có gì giống như những đàn sự sống được tìm thấy xung quanh các miệng phun thủy nhiệt đang hoạt động.
Mặc dù vậy, thật khó để dự đoán rằng không có thiệt hại gì, và mỗi nghiên cứu mới đều đưa ra nhiều lý do cần thận trọng hơn: một nghiên cứu gần đây phát hiện ra rằng thực tế những nốt sần dường như trơ này ở Vùng Clarion-Clipperton cung cấp môi trường sống cho một nửa số loài lớn hơn trong khu vực. Vấn đề sâu xa hơn là chúng ta biết quá ít về các hệ sinh thái dưới nước này đến nỗi ngay cả những biện pháp bảo vệ môi trường nghiêm ngặt nhất cũng gần như chắc chắn sẽ bỏ sót điều gì đó. Có lẽ đó sẽ là sự xáo trộn trầm tích, có thể là ô nhiễm tiếng ồn hoặc làm thay đổi hệ vi sinh vật bên dưới đáy biển – bằng cách này hay cách khác, sự can thiệp của con người chắc chắn sẽ gây ra những ảnh hưởng sinh thái.
Trở lại Jamaica, ISA đã soạn thảo các quy tắc môi trường đó – mức độ gần gũi của một người có thể khai thác với một người hút thuốc đen đang hoạt động, phải làm gì khi gặp phải sinh vật biển, v.v. – nhưng một số người đã đặt câu hỏi liệu tổ chức buồn ngủ này trong tòa nhà yên tĩnh của nó có hoạt động không được trang bị để quản lý quá trình này. Trong khi các cơ quan quản lý khai thác trên mặt đất có xu hướng cử hàng trăm nhân viên liên tục tiến hành kiểm tra tại chỗ tại các địa điểm mà họ giám sát, thì ISA thậm chí không sở hữu máy bay trực thăng hoặc thuyền. Cho đến khi các hệ thống giám sát đáng tin cậy được phát minh, nó sẽ phải dựa vào chính các công ty để tuân thủ các quy tắc của mình. Nhưng vẫn còn câu hỏi về mức độ nghiêm ngặt của nó cho đến nay. Tôi hỏi Michael Lodge liệu tổ chức của ông có bao giờ từ chối đơn xin khám phá một vùng đáy biển để khai thác mỏ hay không. Anh dừng lại một lúc và suy nghĩ. 'KHÔNG.'
Trong số những khu vực được giao cho nhiều chính phủ khác nhau có một khu vực rộng 3.900 dặm vuông của Rặng núi Trung Đại Tây Dương được giao cho Ba Lan, nơi có vẻ không có gì đáng chú ý nếu không có một đội hình nằm ngay bên cạnh ngọn núi biển ở trung tâm của nó: Thành phố Đã mất. Đúng vậy: ISA đã chỉ định tập hợp các ngọn tháp nhà thờ bằng đá đặc biệt đó – chìa khóa dẫn đến sự sống, ví dụ duy nhất được biết đến trên hành tinh – làm địa điểm khai thác dưới biển sâu. Nó hơi thật đáng kinh ngạc: cách đây không lâu

UNESCO, cơ quan của Liên Hợp Quốc chịu trách nhiệm bảo vệ các kỳ quan thế giới, đã tuyên bố rằng đây phải là Di sản Thế giới được bảo vệ, cùng với Grand Canyon và Taj Mahal. Thay vào đó, một cơ quan Liên Hiệp Quốc đã biến nó thành một địa điểm thăm dò khai thác mỏ.

Trên thực tế, không ai mong đợi Ba Lan sẽ phá bỏ Thành phố đã mất; ngoài bất cứ thứ gì khác, không có kim loại có giá trị nào trong những tòa tháp cao màu trắng đó. Và các công ty khai thác mỏ sẽ lập luận rằng việc gửi các phương tiện thăm dò xuống vực sâu sẽ có nghĩa là chúng ta có thể sẽ khám phá được nhiều địa điểm đáng kinh ngạc hơn như thế. Họ nói rằng cuộc đua khai thác sâu sẽ thực sự nâng cao hiểu biết của chúng ta về các thành tạo và hệ sinh thái này. Mặc dù vậy, thật khó để không cảm thấy lo lắng trước biên giới mới này trong lĩnh vực khai thác mỏ.

Nhưng đây không phải là lần đầu tiên ngành khai thác mỏ đưa chúng ta vào tình thế khó chịu khi theo đuổi đồng. Đây cũng không phải là lần đầu tiên công chúng phản đối một phương pháp mới gây tranh cãi để chiết xuất kim loại này. Có lẽ ví dụ nổi tiếng nhất là Dự án SLOOP, một kế hoạch những năm 1960 của Mỹ nhằm sử dụng vũ khí hạt nhân để khai thác đồng. Kế hoạch kích nổ một quả bom 20 kiloton (mạnh hơn quả bom ném xuống Hiroshima khoảng 1/3) thành quặng đồng ở Arizona chưa bao giờ được thực hiện, sau những phản ứng lo ngại của người dân địa phương. Giống như khai thác dưới biển sâu, khai thác hạt nhân là vấn đề lớn tiếp theo cho đến khi đột nhiên nó không còn nữa.

Bài học đạo đức của câu chuyện, nếu có, là những đổi mới gây tranh cãi, thú vị nhất luôn bị vượt qua bởi những tiến bộ tầm thường hơn. Việc khai thác hạt nhân cuối cùng đã trở nên vô nghĩa bởi sự xuất hiện của phương pháp lọc đống và điện phân, những kỹ thuật mà như chúng ta đã thấy, có nghĩa là những người khai thác có thể chiết xuất đồng từ các loại đá từng được coi là rác. Thật hấp dẫn khi người ta cân nhắc xem chúng ta sẽ lấy nguồn cung cấp kim loại này ở đâu cho tua-bin gió và tàu cao tốc trong tương lai để tìm kiếm các giải pháp gọn gàng. như khai thác biển sâu. Nhưng cũng có khả năng tương tự là thay vào đó chúng ta lại quay lại với những gì chúng ta đã làm trong nhiều năm.

Chúng ta sẽ nhận được nhiều đồng hơn từ các quốc gia 'khó khăn', nơi mà điểm vẫn cao, ngay cả khi độ ổn định chính trị thấp. Thật vậy, tại thời điểm viết bài, một mỏ mới khổng lồ ở DRC, Kamoa-Kakula, đang được đưa vào sản xuất. Mỏ này và một mỏ khác ở Mông Cổ – Oyu Tolgoi, được phát hiện bởi cùng một người, Robert Friedland – sẽ sớm trở thành một trong những mỏ lớn nhất thế giới.

Và chúng tôi sẽ tiếp tục cải thiện khả năng ép được nhiều đồng hơn từ những loại đá kém hứa hẹn hơn bao giờ hết. Ở đây cũng có tiến bộ. Một công ty tên là Jetti tuyên bố công nghệ của họ có thể chiết xuất kim loại từ quặng chalcopyrit cấp thấp nhất. Và vì khoảng 2/3 nguồn tài nguyên đồng của thế giới nằm ở loại đá cấp thấp này, đó thực sự là một vấn đề rất lớn.

Hãy xem xét điều đó có ý nghĩa gì đối với một nơi như Chuquicamata. Ở đó, các thợ mỏ có xu hướng xử lý bất kỳ loại đá nào có ít nhất 0,5% đồng và mọi thứ khác đều bị loại bỏ trên *những con rùa đó* . Như chúng ta đã thấy, thị trấn Chuqui – bệnh viện, sân chơi, nhà ở và tất cả – bị chôn vùi trong lớp đá không đạt chuẩn. Bây giờ hãy xem điều gì sẽ xảy ra nếu trên thực tế gần như toàn bộ khối đá đó đều là quặng có thể sử dụng được. Đột nhiên, những ngọn núi nhân tạo bao quanh các loại mỏ này dọc theo chiều dài Chile trở thành nguồn kim loại. Loại đá thải từng bị coi là chướng mắt giờ đây có thể được khai thác để lấy đồng giúp chúng ta giải quyết vấn đề biến đổi khí hậu.

Sẽ phù hợp biết bao nếu những lời tiên đoán về sự diệt vong của Paul Ehrlich lại được chứng minh là sai một lần nữa - nhưng lần này không phải bởi những chiếc xe tải lớn hơn và những hố sâu hơn bao giờ hết. Điều gì sẽ xảy ra nếu 'sự khai thác vĩ đại cuối cùng' mà Gerard Barron đang nói đến không đến từ dưới những con sóng mà từ những đống đá thải làm hư hỏng cảnh quan sa mạc?

Vụ nổ hiện đã dừng lại ở đáy mỏ lớn nhất thế giới. Một chương đang kết thúc - mặc dù đâu đó sâu bên dưới đáy hố vẫn còn tiếng ầm ầm của máy móc khi nổ, khoan và đào vẫn tiếp tục trong các đường hầm lớn của mỏ khối.

Không ai chắc chắn phải làm gì với cái lỗ tiếp theo, nhưng điều gì sẽ xảy ra nếu công nghệ của Jetti tạo cơ hội cho một kết thúc mỹ mãn cho câu chuyện? Điều gì sẽ xảy ra nếu chúng ta có thể lấy đống đổ

nát từ những ngọn núi nhân tạo đó, ép lấy đồng, đặt nó vào tất cả những tuabin gió và tấm pin mặt trời đó và đổ phần đất còn lại vào trong hẻm núi nhân tạo? Những ngôi nhà ở Chuquicamata sẽ được giải phóng khỏi lăng mộ của họ. Các thung lũng Atacama sẽ không còn rải rác những ngọn đồi và thung lũng giả nữa.
Đó chẳng phải là kết quả phù hợp nhất: làm cho cái hố lớn nhất thế giới trở lại nguyên vẹn sao?

Điện không còn chỉ là thứ vĩ đại thứ hai trên thế giới sau Chúa; đó là hy vọng lớn đầu tiên để giải quyết vấn đề biến đổi khí hậu. Nhưng ngay cả trên cơ sở những giả định lạc quan nhất về việc cải thiện tỷ lệ tái chế và cắt giảm sử dụng năng lượng, chúng ta vẫn sẽ cần lượng năng lượng đáng kinh ngạc nếu muốn thành công. Và việc khai thác đồng – dù từ dưới lòng đất hay dưới biển – đều là một công việc lộn xộn.
Một lần nữa, đây chỉ là một trong rất nhiều nghịch lý của Thế giới Vật chất. Một điều đáng lo ngại hơn nữa là chúng ta có thể phụ thuộc vào chính nhiên liệu hóa thạch đã đưa chúng ta vào tình trạng hỗn loạn này để giúp chúng ta thoát khỏi nó.

Phần thứ năm

DẦU

13
Con voi

1940: HARADH, Ả Rập Saudi

Manh mối đầu tiên là dòng sông.

Chà, nó không hẳn là một con sông: đúng hơn là một lòng sông khô cạn - một wadi - nơi chỉ thỉnh thoảng mang nước vào những ngày hiếm hoi khi trời mưa ở sa mạc này. Nhưng khi Ernie Berg đi đi lại lại dọc theo chiều dài của nó, anh ấy *biết* rằng có điều gì đó không ổn. Wadi chạy xuống những ngọn núi gần đó và di chuyển về hướng đông về phía biển gần như suốt chiều dài của nó nhưng ở đây, xung quanh khu vực mà người Bedouin địa phương gọi là Haradh, nó đột ngột uốn cong về phía nam một khoảng khá xa, trước khi uốn cong trở lại về phía đông và tiếp tục di chuyển. trên đường. Tại sao lại uốn cong? Bề ngoài không có gì khác để giải thích điều đó.

Con sông không phải là điều kỳ lạ duy nhất: còn có những ngọn đồi say rượu. Những ụ đất này - ở đây người ta gọi chúng là jebel - là những cao nguyên nhỏ có đỉnh bằng phẳng, dường như tất cả đều chìm xuống và nghiêng theo các hướng ngẫu nhiên. Chúng không thể bị xói mòn bởi gió hay cát, vậy nguyên nhân là gì?

Hầu hết mọi người khó có thể nhận thấy bất kỳ điều gì trong số này nhưng Berg, một nhà địa chất của Công ty Dầu Tiêu chuẩn Ả Rập California (một nhánh của công ty hiện được gọi là Chevron), đang tìm kiếm chính xác những loại dị thường này. Đó là sớm ngày thăm dò dầu khí, rất lâu trước khi hình ảnh vệ tinh, máy đo trọng lực hoặc các công cụ phức tạp khác xuất hiện. Các nhà thám hiểm đã bắt đầu triển khai các cảm biến địa chấn, nhưng đối với Berg, điều đó vẫn không thể thay thế được việc quan sát cẩn thận và một chút công việc thám tử.

Anh đã ở Saudi được vài năm, khảo sát sa mạc hết dặm vuông này đến dặm vuông khác, thử nói tiếng Ả Rập trong những khoảnh khắc hiếm hoi khi người Bedu địa phương đến gần và muốn nói chuyện. Ngày nóng và đêm lạnh không chịu nổi, đặc biệt là vào mùa đông như bây giờ, nhưng giữa người Mỹ và nước chủ nhà Ả Rập Xê Út có một

tình bạn thân thiết. Họ đang ở đây, khám phá những vùng đất hầu như không được lập bản đồ chứ đừng nói đến việc có người sinh sống. Đó là một công việc tràn đầy sinh lực, càng trở nên căng thẳng hơn khi biết rằng chiến tranh đang hoành hành ở những vùng đất không xa họ - một cuộc chiến được thúc đẩy bởi chính thứ mà họ đang tìm kiếm. Đôi khi họ lái xe, đôi khi họ cưỡi lạc đà, thường thì họ phải kiếm ăn hoặc săn lùng thức ăn. Thỉnh thoảng họ đi săn linh dương sừng thẳng Ả Rập và săn chim. Khi họ tìm thấy một nơi có vẻ như là một địa điểm đầy hứa hẹn, sau khi đã thực hiện mọi thẩm định kỹ lưỡng, cuối cùng họ sẽ khoan sâu xuống lòng đất và xem điều gì đã xảy ra. [1]

Hầu hết các giếng 'mèo hoang' này đều là những hoạt động không có kết quả nhưng đôi khi chúng lại gặp may mắn. Vài năm trước, xa hơn về phía đông bắc ở Dammam, ông chủ của Berg, nhà địa chất trưởng Max Steineke, đã có một trong những cảm giác đó, giống như Ernie bây giờ, về vị trí của một số ngọn đồi ở địa phương. Anh ta khoan một giếng, rồi một giếng khác, rồi một giếng khác, nhưng chẳng thu được gì ngoài một ít nước ấm, mặn và một ít dầu đặc quánh, vô dụng cho bất cứ việc gì khác ngoài việc rải nhựa đường. Vào thời điểm giếng số bảy được khoan, sự kiên nhẫn của mọi người đã thực sự cạn kiệt và một số người đã có ý định từ bỏ công việc kinh doanh hoàn toàn. Sau đó, đột nhiên, một vụ nổ khí lớn và sau đó là dầu thô phun ra từ giếng. Hầu như chỉ sau một đêm, Saudi đã trở thành một quốc gia dầu mỏ. [2]

Vàng đen

Dầu thô, cùng với khí đốt tự nhiên, là nguồn năng lượng lớn nhất trong thế kỷ qua. Nếu thép là bộ xương của thế giới hiện đại và là mạch máu của thế giới hiện đại thì dầu mỏ là thực phẩm nuôi sống chúng ta. Nó cung cấp cho chúng ta năng lượng, các chất hóa học để chúng ta tạo ra phân bón giúp duy trì sự sống cho một nửa hành tinh. Nó là máy gia tốc tuyệt vời của sự sống, khơi dậy một cuộc cách mạng vận tải chạy bằng năng lượng bắt đầu từ phương tiện cơ giới và đạt đến đỉnh cao trong máy bay phản lực. Thời đại dầu mỏ, giống như thời đại than trước đó, đã giải phóng loài người khỏi phần lớn sự cực nhọc của lao động chân tay; nó đã nâng cao thu nhập trên khắp

thế giới và giúp chúng ta sống lâu hơn. Các sản phẩm dầu mỏ và năng lượng đã giúp chúng ta giảm thiểu tình trạng tử vong ở trẻ sơ sinh và chống lại tình trạng suy dinh dưỡng. Trên đường đi, họ đã cho phép chúng ta lấp đầy hành tinh này với hàng tỷ linh hồn hơn mức mà chỉ riêng động vật, thực vật và đất đai có thể hỗ trợ. Nói cách khác, thật khó để hình dung một thế giới không có dầu mỏ làm nhiên liệu và nguồn hóa chất. Nhưng ngay cả khi nó thúc đẩy lối sống của chúng ta, dầu mỏ vẫn góp phần phát thải khí nhà kính, đẩy nhanh quá trình biến đổi khí hậu.

Không phải bất cứ điều gì trong số này đặc biệt rõ ràng trong những ngày đầu. Cũng giống như việc than luyện cốc giúp giảm thiểu một thảm họa sinh thái – việc khai thác những vùng rừng rộng lớn để cung cấp nhiên liệu cho các lò cao thời kỳ đầu – dầu mỏ ban đầu dường như là một giải pháp hơn là một vấn đề. Nó đã giúp cứu cá nhà táng khỏi nguy cơ tuyệt chủng bằng cách cung cấp nhiên liệu đèn ưu việt để thay thế cho dầu cá voi. Ô tô có động cơ thay thế xe ngựa đúng lúc các nhà bình luận đang lo lắng rằng các thành phố của họ sẽ sớm chìm trong phân ngựa. Vì vậy, nó đi vào Thế giới Vật chất.

Nhưng câu chuyện về dầu thô đã bắt đầu từ lâu trước khi sự tò mò của Ernie Berg bị khơi dậy bởi dòng sông khô cạn ở Haradh. Những người đã sống ở khu vực này trên thế giới từ lâu đã quen thuộc với cái mà ngày nay chúng ta gọi là dầu thô. Nó sẽ thấm lên từ dưới lòng đất ở nhiều nơi, một lớp bùn đặc, nhớt mà người dân ở Ba Tư và vùng Vịnh đã sử dụng hàng nghìn năm để trát đáy thuyền của họ và làm vữa làm gạch. Bitum từ các hố hắc ín được người Ai Cập cổ đại sử dụng để giúp ướp xác trước khi ướp xác; đôi khi nó được triển khai dưới dạng bom nguyên thủy ban đầu. Nhưng phần lớn tổ tiên chúng ta đã sử dụng dầu như một loại sản phẩm hóa học thay vì đốt nó.

Điều đó đã thay đổi vào giữa thế kỷ 19 khi các nhà hóa học tìm ra cách chưng cất chất lỏng dễ cháy từ nhựa đường. Dầu hỏa, theo tiếng Hy Lạp có nghĩa là sáp, là một sản phẩm kỳ diệu. Nó cháy sáng hơn sáu lần so với tinh trùng chiết xuất từ hộp sọ của cá nhà táng. Khi những người định cư lo lắng về thời điểm sắp xảy ra 'khi tất cả cá voi bị giết', nó mang đến một tia hy vọng trêu ngươi. Tất nhiên, đây là thời kỳ tiền điện mờ mịt, nhưng dù vậy, nhiệm vụ thắp sáng bầu trời đêm,

kéo dài ngày làm việc và cải thiện điều kiện sống của các hộ gia đình đã trở thành một trong những mục tiêu lớn của thời đại. Và thế là bắt đầu theo đuổi việc tìm kiếm thêm nguồn dầu hỏa, một cuộc theo đuổi bắt đầu từ các mỏ dầu ở Baku ở Azerbaijan nhưng được theo đuổi một cách háo hức nhất ở Hoa Kỳ. [3]
Năm 1859 dầu thô được tìm thấy ở Titusville, Pennsylvania. Có một cuộc chạy đua chóng mặt để khai thác dầu khỏi lòng đất ở đó và bất cứ nơi nào khác có thể tìm thấy nó. Như thường lệ, việc theo đuổi sự giàu có đi trước việc theo đuổi sự hiểu biết, và chỉ dần dần các nhà địa chất mới bắt đầu thu thập được dầu hình thành như thế nào và nó có thể được tìm thấy ở đâu. Vài năm sau, khi một mỏ phun nước lớn được khai thác ở Quận Jefferson, Texas, người ta phát hiện ra rằng ngọn đồi nơi nó tọa lạc, Spindletop, thực ra nằm trên đỉnh một mái vòm muối - một lớp halit phồng lên bên dưới mặt đất.
Muối – rắn và không thể xuyên thủng nhưng dẻo và dễ uốn – là chất hoàn hảo để chứa trữ lượng dầu ngầm này tại chỗ. Và ở đâu có muối thì ở đó thường có dầu và khí đốt - điều mà người Trung Quốc đã học được từ hàng thiên niên kỷ trước đó là đốt khí đốt tự nhiên đôi khi bốc lên từ các mỏ muối của họ để giúp làm bay hơi nước muối. Vì vậy, bắt đầu một cuộc chạy đua để khoan vào bất kỳ mái vòm muối nào có vẻ ngoài hợp lý ở Mỹ hoặc xa hơn. Và hóa ra có rất nhiều muối ở Vịnh Ba Tư. Dầu được tìm thấy ở Iran năm 1908, ở Iraq năm 1927, sau đó ở Kuwait và Bahrain vào những năm 1930.
Tin tức này đã thu hút thêm nhiều công ty dầu mỏ của Mỹ và Anh. Họ ký hợp đồng với các tù trưởng địa phương, nhưng những người cai trị dường như quan tâm nhiều đến việc để người dân khoan nước hơn là dầu. Đây là một vùng nghèo, du mục trên thế giới. Trước những năm 1930, mặt hàng xuất khẩu chính là ngọc trai hoang dã được đánh bắt ở vùng Vịnh, cho đến khi một doanh nhân người Nhật, Kokichi Mikimoto, tìm ra cách nuôi cấy những viên ngọc trai này một cách nhân tạo, khiến doanh thu của vùng Vịnh sụt giảm ngay lập tức. Với việc phát hiện ra dầu mỏ, mọi thứ sắp thay đổi, nhưng thực tế bạn sẽ không thể đoán được điều đó.
Vào thời điểm đó, Saudi còn lâu mới trở thành gã khổng lồ dầu mỏ như ngày nay. Một số nhà địa chất tại các công ty dầu mỏ lớn vẫn hoài nghi về tiềm năng của khu vực. Địa điểm thời thượng để tìm

kiếm là Albania hoặc các khu vực khác ở Đông Âu và vùng Kavkaz. Nhưng khi khảo sát những ngọn đồi ở Haradh, Berg cảm thấy *phải* có điều gì đó đang diễn ra ở mảnh đất cằn cỗi này ở rìa của Khu phố trống - sa mạc cát bao phủ phần lớn bán đảo Ả Rập. [4]
Không giống như những nơi khác ở vùng Vịnh, ở đây không có vòm muối; nhưng không nhất thiết phải như vậy. Berg biết mái vòm muối chỉ là một dạng 'bẫy' có thể chặn dầu trong lòng đất. Đôi khi dầu thô có thể bị mắc kẹt bên dưới một đứt gãy địa chất hoặc dưới các nếp gấp của đá được gọi là nếp lồi. Nhưng mỗi loại bẫy thường gây ra những đường gờ nổi bật và chỗ phình ra trên bề mặt – tinh vi đến mức hầu hết mọi người sẽ bỏ qua chúng, ngoại trừ các nhà địa chất như Berg.
Trong suốt nhiều tháng, anh ấy đã tỉ mỉ lập bản đồ và đo lường độ dốc của những viên đá đó và hóa ra chúng đều dần dần nghiêng ra ngoài từ một điểm trung tâm, như thể có thứ gì đó phình ra bên dưới chúng. Anh nghiên cứu lại bản đồ; nếu có một chỗ phình ra, điều đó có thể giải thích tại sao wadi đột nhiên đổi hướng trước khi uốn cong về phía đông? Đúng, có thể là như vậy… Càng nghĩ về điều đó anh càng thấy phấn khích: ở đây có dầu; Anh ta chắc chắn về điều này.

Đã *có* dầu. Lượng dầu đáng kinh ngạc, không thể tin được, có thể thay đổi thế giới. Berg đã phát hiện ra điểm phía nam của vùng mà sau này được gọi là cánh đồng Ghawar. Nó rộng lớn đến mức các nhà địa chất phải mất nhiều năm mới nhận ra rằng cái giếng mà họ đánh cách đó hơn một trăm dặm về phía bắc thực sự đang khoan vào cùng một hồ chứa. Cánh đồng trải dài 175 dặm từ bắc xuống nam và ngang 19 dặm; khi bạn nhìn thấy nó trên bản đồ, nó trông hơi giống cái chân duỗi thẳng của một vũ công ba lê. Ở Ả-rập Xê-út, họ gọi đường phản này là 'En Nala' - đôi dép.
Nhiều mỏ dầu đã được phát hiện trước và sau đó, nhưng không có gì giống như Ghawar. Có một hạng mục dành cho các mỏ có trữ lượng đã được chứng minh là hơn 500 triệu thùng dầu: mỏ khổng lồ. Rồi có những người có từ 5 tỷ trở lên: những siêu khổng lồ. Ghawar lớn hơn bất kỳ siêu khổng lồ nào từng được phát hiện trước đó hoặc kể từ đó. Kích thước chính xác của nó vẫn còn được tranh luận cho đến ngày nay - và thực sự là nó luôn thay đổi khi trữ lượng dầu khí được phát

hiện nhiều hơn - nhưng nó đã sản xuất hơn 70 tỷ thùng dầu và vẫn còn khoảng 50 tỷ thùng nữa dưới lòng đất. Nó thuộc về một phạm trù riêng: không phải khổng lồ hay siêu khổng lồ mà có lẽ, như một số người đã gọi nó, một con voi - hay đúng hơn là *con* voi, vì chúng ta gần như chắc chắn sẽ không bao giờ khám phá ra một nơi nào khác giống như nó. [5]

Để hiểu lý do tại sao, hãy suy ngẫm một chút về các điều kiện hình thành dầu thô. Dầu thô được coi là tốt nhất như một hỗn hợp các hợp chất riêng biệt, từ chất lỏng nặng, hắc ín đến nhiên liệu nhẹ. Quả thực một số người sẽ cho rằng nó nên được gọi ở số nhiều: dầu thô. Chúng tôi sẽ không làm điều đó ở đây, mặc dù chúng tôi sẽ gộp dầu thô cùng với khí tự nhiên – một hỗn hợp gồm metan, etan và propan. Cả dầu và khí đều là hydrocacbon (hợp chất của hydro và cacbon), cả hai đều được hình thành ít nhiều giống nhau và cả hai thường xuyên (mặc dù không phải luôn luôn) được tìm thấy cùng nhau. Ghawar không chỉ là mỏ dầu lớn nhất thế giới mà còn là một trong những mỏ khí đốt lớn nhất thế giới, sản xuất đủ khí mê-tan mỗi năm, cả dưới dạng khí liên kết từ các bể chứa dầu và từ các bể chứa khí riêng biệt dọc theo chiều dài của mỏ, đủ tiêu chuẩn để được coi là khí đốt. khổng lồ quá. [6]

Việc Ghawar tồn tại hoàn toàn là nhờ vào sự nóng lên toàn cầu, nghe có vẻ kỳ lạ. Câu chuyện của nó bắt đầu khoảng 100 triệu năm trước, khi một loạt hoạt động của núi lửa đẩy nồng độ carbon dioxide trong khí quyển lên cao và dẫn đến sự gia tăng lớn về quần thể sinh vật phù du. Xung quanh khu vực ngày nay là Vịnh Ả Rập (nhưng vào thời điểm đó là bờ biển phía bắc của siêu lục địa Gondwana), những tàn tích hữu cơ này dần dần lắng xuống đáy biển, từng lớp một.

Có thể bạn đã biết điều gì xảy ra tiếp theo: động vật phù du và tảo bị nung nóng và nén trong hàng triệu năm và biến thành dầu và khí đốt. Nhưng cũng đáng để tìm hiểu sâu hơn về địa chất ở đây, nếu chỉ vì hiểu được đây cũng là chìa khóa để hiểu chương mới nhất trong lịch sử dầu mỏ - chương mà chúng ta sẽ đọc ngay sau đây.

Điều cần nhớ là nơi dầu *hình thành* và nơi dầu được *tìm thấy* thường không giống nhau. Điều này hoàn toàn khác với than: khi bạn đào và phun than lên khỏi mặt đất, bạn đang xóa sạch các thân cây và thảm cỏ của một khu rừng cổ xưa. Nhưng khi bạn khoan vào một mỏ dầu,

nhìn chung bạn không khai thác được đáy biển cổ xưa. Đội hình mà Ernie Berg tìm thấy là không nằm ở nơi mà các sinh vật phù du và tảo đã định cư cách đây 100 triệu năm: thay vào đó, 'đá nguồn' - đáy biển hóa thạch nơi dầu thực sự hình thành - nằm ở một nơi khác, một lớp đá cứng khổng lồ nằm dưới phần lớn Bán đảo Ả Rập.
Việc có được một vùng biển cổ xưa dày đặc tảo và các sinh vật cực nhỏ khác, sau đó được nén lại thành đá gốc cứng chỉ là bước đầu tiên. Bạn cũng cần một nơi khác để dầu và khí đốt sủi bọt đi vào. 'Đá hồ chứa' này cần phải xốp và dễ thấm, đồng thời được đậy bằng trần cứng để giữ dầu và khí đốt. Đây chính là điều Berg đang tìm kiếm; đây là phần mở rộng của mỏ dầu Ghawar.
Điều khiến vùng Vịnh trở nên đáng chú ý – cho đến năm 2023 vẫn là khu vực giàu hydrocarbon nhất hành tinh với khoảng một nửa trữ lượng dầu mỏ và 40% lượng khí đốt của thế giới – là nó đáp ứng được tất cả các tiêu chí sau: loài tảo cổ đại ở bên phải đá, lượng nhiệt và áp suất phù hợp theo thời gian, bộ đá hồ chứa có khả năng thấm hoàn hảo với đúng loại bẫy để bịt kín tất cả dầu và khí đốt đó. [7]
Có rất nhiều mỏ dầu khác trên khắp thế giới, nhưng không có mỏ nào trong số đó được đánh giá cao một cách nhiệt tình như Ghawar. Berg đã phát hiện ra một kỳ quan địa chất, một nơi có trữ lượng hydrocarbon quan trọng như Pilbara có quặng sắt và chân đồi Andean của Chile và Peru có trữ lượng đồng. Nếu Ả Rập Saudi là quốc gia quan trọng nhất trong lĩnh vực kinh doanh dầu thô - và tại thời điểm viết bài, nước này chắc chắn vẫn được coi là như vậy - thì Ghawar thoải mái là mỏ quan trọng nhất của nước này, chiếm hơn một nửa tổng số thùng dầu được sản xuất. ở Ả-rập Xê-út kể từ khi bắt đầu thời đại dầu mỏ.
Không có mỏ dầu nào khác trên trái đất - cũng như bất kỳ mỏ than nào, mỏ uranium hay nhà máy hạt nhân nào, bất kỳ trang trại gió hoặc năng lượng mặt trời nào, dù lớn đến đâu - tạo ra nhiều năng lượng của hành tinh này. Và cái này đưa chúng ta đến một câu châm ngôn mà chúng ta đã tán thành suốt cuốn sách này: trong Thế giới Vật chất, và đối với vấn đề đó, thế giới thanh tao mà nhiều người trong chúng ta đang sinh sống, năng lượng gần như là *tất cả* .

Cuộc chuyển đổi năng lượng vĩ đại lần thứ ba

Cuộc cách mạng công nghiệp không chỉ là cuộc cách mạng về ý tưởng, kỹ thuật và hóa học; đó là một cuộc cách mạng năng lượng. Phần lớn các quy trình bạn đã gặp ở những trang trước, từ việc biến cát thành thủy tinh, cho đến việc tạo ra các chip silicon, sản xuất clo từ nước muối, biến sắt thành thép và sản xuất điện, đều phụ thuộc vào về lượng năng lượng khổng lồ, hầu hết trong số đó hiện được cung cấp cho chúng ta, trực tiếp hoặc gián tiếp, bằng nhiên liệu hóa thạch. Sự bùng nổ phi thường của sự giàu có và phúc lợi bắt đầu từ đâu đó vào giữa thế kỷ 19 có thể được coi là một sự khai thác phi thường những nhiên liệu này để làm *công* việc. số 8

Chúng ta đã dành phần lớn thời gian trong vài thế kỷ qua để dần dần leo lên các bậc thang nhiệt động lực học. Than có mật độ năng lượng gấp đôi - nói cách khác là lượng năng lượng có thể giải phóng trên mỗi kg trọng lượng - của gỗ. Dầu hỏa, được tinh chế từ dầu thô, có mật độ năng lượng gần gấp đôi than. Và mật độ năng lượng cao hơn có nghĩa là bạn có thể mang theo ít nhiên liệu hơn và đi được quãng đường xa hơn. Điều đó quan trọng vào thời kỳ công nghiệp hóa sớm nhất: cung cấp nhiên liệu cho một con tàu bằng gỗ thay vì than có nghĩa là phải dành hơn gấp đôi không gian lưu trữ để chứa nhiên liệu. Và nó quan trọng trong thời đại của động cơ đốt trong và máy bay phản lực. Một phần lý do giải thích tại sao chuyến bay chạy bằng năng lượng lại xảy ra là do dầu hỏa cực kỳ giàu năng lượng.

Sau đó là những lợi ích thực tế. Than phải được xúc vào lò trong khi nhiên liệu lỏng có thể được bơm, mở ra khả năng đốt trong, cho phép động cơ có hiệu suất cao hơn đáng kể so với động cơ hơi nước của các thế kỷ trước. Nó có thể được bơm lên từ dưới lòng đất, nghĩa là thợ mỏ không cần phải đưa xuống vực sâu và dễ dàng bơm vào tàu và qua đường ống. Thật khó để tưởng tượng thế giới hiện đại không có dầu mỏ và thật khó để tưởng tượng thời đại dầu mỏ mà không có lượng dầu khổng lồ đến từ Ả Rập Saudi.

Tuy nhiên, khi bơm dầu từ lòng đất, chúng ta đang phá vỡ một chu kỳ địa chất kéo dài hơn 100 triệu năm – rất lâu trước khi loài người chúng ta tồn tại. Và khi đốt dầu và khí đốt, chúng ta đang thải carbon dioxide đã được cô lập từ lâu vào các bể chứa dưới lòng đất này trở lại khí quyển, gây ra một kỷ nguyên mới của hiện tượng nóng lên toàn cầu. Điều khiến điều này trở nên khó chịu hơn không chỉ đơn thuần là

những thứ xấu – lượng khí thải carbon mà hậu quả mà chúng ta cuối cùng cũng bắt đầu hiểu được, ô nhiễm dạng hạt trong các thành phố của chúng ta và rác thải nhựa ở biển – mà còn là những thứ *tốt* . Đó là hàng tỷ sinh mạng được sống nhờ dầu khí. Thực tế là dầu và khí đốt *rất hữu ích* nhưng cũng có sức tàn phá rất lớn.

Khi các nhà khoa học phát hiện ra lỗ hổng trên tầng ozone, không mất nhiều thời gian để tạo ra các chất thay thế gần giống hệt với chlorofluorocarbons, nguyên nhân chính gây ra hiện tượng này. Có thể cứu môi trường mà không hề nhận ra. Về bản chất, dầu và khí đốt khó thay thế hơn nhiều vì chúng là nguồn năng lượng gần như hoàn hảo và là nguyên liệu gần như không thể thay thế trong hầu hết mọi sản phẩm được sản xuất. Việc loại bỏ chúng sẽ đòi hỏi nhiều hơn một chút thiện chí và mục tiêu không có lưới.

Điều đó là có thể. Và trong các chương tiếp theo, chúng ta sẽ khám phá một số cách có thể thực hiện được điều đó. Nhưng điều đó sẽ rất khó khăn, bởi vì dầu và khí đốt rất giỏi trong lĩnh vực của chúng, và bởi vì chúng ta vẫn hoàn toàn phụ thuộc vào chúng một cách vô vọng: phụ thuộc đến mức nào. Tôi viết điều này vào năm 2023 và dựa trên những dự đoán lạc quan nhất, phụ thuộc vào năm 2030 và 2040.

Điều đó nghe có vẻ hơi ngạc nhiên khi ngày nay người ta nói rất nhiều về năng lượng tái tạo, với số lượng tua-bin gió và tấm pin mặt trời đã được chế tạo trong những năm gần đây cũng như sự gia tăng nhanh chóng của xe điện. Tuy nhiên, một vài điểm dữ liệu kể câu chuyện đủ rõ ràng. [9]

Tính đến năm 2019, ngay trước khi đại dịch xảy ra và làm sai lệch dữ liệu, chỉ hơn 80% năng lượng sơ cấp của thế giới – bao gồm cả sản xuất điện và các mục đích sử dụng khác như giao thông, sưởi ấm và các quy trình công nghiệp – đến từ việc đốt nhiên liệu hóa thạch. : than, dầu và khí đốt. Điều đáng chú ý về con số này là nó ổn định đến mức nào: chỉ hơn 80% vào đầu thiên niên kỷ, chỉ hơn 80% vào năm 1990 và chỉ cao hơn một chút – khoảng 85% – vào năm 1980. Gió và mặt trời, ngược lại, chỉ cung cấp 1,5% năng lượng của chúng ta vào năm 2019.

Ngay cả ngày nay, chúng ta vẫn sống trong một thế giới nhiên liệu hóa thạch, và ngay cả khi nhiều quốc gia giảm tốc độ đốt than, họ vẫn duy trì hoặc tăng cường sự phụ thuộc vào dầu khí, nguồn cung cấp

khoảng 55% năng lượng của chúng ta ngày nay – một tỷ lệ đã giữ ở mức ổn định đáng kể trong vài thập kỷ qua.
Có rất nhiều giai thoại mà người ta có thể chọn để minh họa cho điều này, nhưng rất ít giai thoại mới mẻ và gay gắt như những gì xảy ra vào năm 2022 sau khi Nga xâm chiếm Ukraine. Trong những tháng tiếp theo, rõ ràng là châu Âu và Mỹ vẫn có nguy cơ bị sụt giảm dù chỉ một phần nhỏ trong nguồn cung cấp các loại hydrocarbon này - Nga chiếm 12% lượng dầu và 17% lượng khí đốt của thế giới. Nền kinh tế toàn cầu vốn đang thoát khỏi thời kỳ suy thoái do dịch bệnh Covid-19 đột nhiên mất đà. Và khi giá dầu và khí đốt tăng vọt, phần lớn thế giới rơi vào tình trạng mà giới truyền thông gọi là 'cuộc khủng hoảng chi phí sinh hoạt'. Giá xăng tăng vọt lên mức cao chưa từng có cùng với giá khí đốt tự nhiên ở châu Âu. Lạm phát – một thước đo mức giá rộng hơn, thứ mà mọi người cho rằng không còn quá nhạy cảm với năng lượng nữa – đã nhảy vọt lên mức cao nhất trong ít nhất bốn thập kỷ.
Với giá xăng tại các máy bơm của Mỹ tăng lên hơn 5 USD một gallon, vào tháng 7 năm 2022, Joe Biden đã đến thăm Ả Rập Saudi và kêu gọi vương quốc này tăng sản lượng dầu thô. Cuộc hành trình này đặc biệt nhục nhã đối với tổng thống Mỹ, người đã vận động tranh cử trên cơ sở rằng Mỹ 'không bao giờ nên kiểm tra các nguyên tắc của mình trước cửa chỉ để mua dầu hoặc bán vũ khí'. Hai năm trước, ông đã loại Thái tử Mohammed bin Salman ra ngoài sau vụ sát hại nhà báo Jamal Khashoggi bởi các đặc vụ Saudi. Ông đã đình chỉ hỗ trợ vũ khí cho Ả Rập Saudi và chỉ trích việc nước này tham gia vào cuộc chiến chống lại Yemen. Tuy nhiên, bây giờ, khi giá xăng tăng lên một tầm cao mới, người ta chụp ảnh anh ta đang đến thăm Jeddah, đấm thẳng vào Hoàng tử Mohammed trên thảm đỏ và tỏ ra tử tế với chính những người mà anh ta đã hứa sẽ xa lánh. [10]
Khi làm như vậy, Biden chỉ đơn thuần lặp lại một nghi thức mà hầu hết những người tiền nhiệm của ông đều phải thực hiện kể từ khi phát hiện ra mỏ Ghawar vào những năm 1940. Cho đến thời điểm đó, Mỹ vẫn là nước sản xuất dầu lớn nhất thế giới, đứng thứ hai là Liên Xô. Nhưng đến năm 1947, khi nguồn cung trong nước cạn kiệt và mức tiêu thụ năng lượng của Mỹ tăng lên gấp bội, nhập khẩu của nước này bắt đầu vượt xa xuất khẩu. Ngay cả những khám phá về các mỏ

siêu khổng lồ, như Vịnh Prudhoe ở Alaska hay trữ lượng dầu ở vùng nước sâu của Vịnh Mexico, cũng không thể chặn được đường trượt. Đột nhiên, nguồn cung cấp nhiên liệu quan trọng này - nguồn năng lượng chính cho vận tải, sưởi ấm và hóa dầu cung cấp cho khu vực tiêu dùng - bị nghi ngờ.

Bị Liên Xô vượt mặt vào giữa những năm 1970 và bị Ả Rập Saudi vào đầu những năm 1990, Mỹ trở nên khó chịu khi nhận thức được sự phụ thuộc của mình vào các quốc gia dầu mỏ. Trong quá trình đó, đã có những cuộc khủng hoảng dầu mỏ liên tiếp, cũng như tình hình chính trị ở Trung Đông, và đôi khi những nơi khác trên thế giới như Nigeria, Nga và Venezuela, trở nên vướng mắc vào nguồn cung dầu. Quan niệm cho rằng người ta có thể đảm nhận một tương lai với nguồn năng lượng vô hạn bắt đầu tan rã. Từ Richard Nixon trở đi, hết tổng thống này đến tổng thống khác đã thuyết giảng về sự cần thiết của 'độc lập năng lượng', trước khi đầu quân cho Ả Rập Saudi, giống như Biden hiện đang làm.

Ngoại trừ việc có điều gì đó đặc biệt nghịch lý về chuyến thăm năm 2022 đó, vì một số người hiện đang thì thầm rằng quyền lực của Ả Rập Saudi đã bắt đầu suy yếu. Ba năm trước, khi công ty dầu mỏ Aramco của Saudi - công ty kế thừa công ty Ernie Berg từng làm việc bị quốc hữu hóa - tìm cách niêm yết công khai một số cổ phiếu của mình, họ đã tiết lộ rằng sản lượng dầu thô hàng ngày của Ghawar thấp hơn đáng kể so với hầu hết mọi người nghĩ. Nó vẫn thoải mái là mỏ dầu lớn nhất thế giới, nhưng ở mức 3,8 triệu thùng một ngày thay vì 5 triệu thùng như mọi người giả định, nó dường như đang có những dấu hiệu rõ ràng của tuổi trung niên. Trong khi đó, một điều gì đó phi thường đã xảy ra ở Mỹ, nơi một cuộc cách mạng trong sản xuất dầu khí đã lật ngược toàn bộ câu chuyện này.

The Frackers

Cuộc cách mạng này bắt đầu vào những năm 1980 với George P. Mitchell, một doanh nhân người Texas, người bắt đầu sự nghiệp của mình với tư cách là một nhà bảo vệ môi trường tận tâm, được thúc đẩy bởi những cuốn sách như The Limits to *Growth của Câu lạc bộ Rome* để cố gắng giảm thiểu thiệt hại đang gây ra cho hành tinh. Trong trường hợp của mình, ông lý luận rằng vì khí đốt tự nhiên ít gây

ô nhiễm hơn than đá – với lượng khí thải carbon hoặc lưu huỳnh ít hơn nhiều lần – nên nó là nhiên liệu của tương lai. [11]

Ngay cả khi Mitchell đang đưa ra quan điểm về khí đốt tự nhiên, hầu hết các nhà địa chất đều kết luận rằng những ngày sản xuất khí đốt tốt nhất của nước Mỹ đã ở đằng sau nó. Nếu nó muốn khí tự nhiên, theo logic, cuối cùng có lẽ họ sẽ phải lấy nó từ những chế độ không ổn định như Iran và Liên Xô. Châu Mỹ lục địa đã được khám phá kỹ đến mức dường như không còn bất kỳ hồ chứa hứa hẹn nào: mọi bẫy có thể có mà dầu hoặc khí đốt có thể di chuyển vào đều đã được khảo sát, thử nghiệm và thường xuyên được khoan. Các công ty dầu khí lớn đang rời bỏ đất liền và tìm kiếm xa hơn, đó là dấu hiệu của sự suy thoái tuyệt vọng hoặc là cơ hội của cả cuộc đời.

Theo bản năng, Mitchell cảm thấy đó hẳn phải là vế sau, nhưng ông đang đấu tranh chống lại sự đồng thuận về địa chất, vì vậy vào năm 1981, khi một người trong nhóm của ông viết một bài báo gợi ý rằng sự đồng thuận có thể sai, ông đã nắm lấy nó. Ý chính của nghiên cứu là người ta có thể lấy khí trực tiếp từ 'đá mẹ' nơi nó hình thành, chứ không phải từ các bể chứa nơi cuối cùng nó kết thúc.

Ý tưởng đó thật hấp dẫn. Người ta đã xác định rõ rằng Hoa Kỳ có một lượng lớn dầu và khí đốt hình thành bên trong các khối đá phiến nằm ở phần lớn Texas và những nơi khác. Nhưng mặc dù đã được nghiên cứu và phát triển sâu rộng trong nhiều thập kỷ nhưng vẫn chưa có ai tìm ra cách khai thác chúng. Vì vậy, theo thời gian, các nhà địa chất ngày càng bị thuyết phục rằng thực sự không có lựa chọn nào khác ngoài việc chờ đợi hàng triệu năm cần thiết cho đến khi dầu hoặc khí đốt sủi bọt lên các hồ chứa, như đã từng xảy ra ở Ghawar. 'Đá mẹ', đáy biển cổ xưa đó, đơn giản là quá cứng và không thấm nước, lượng hydrocarbon quá loãng nên không thể tạo ra nhiều thứ.

Không nản lòng, Mitchell đã thúc đẩy các kỹ sư của mình tìm ra các kỹ thuật để khai thác khí từ Barnett Shale, một phiến đá mẹ khổng lồ nằm bên dưới phần lớn khu vực xung quanh Dallas. Đó là một công việc kinh doanh lâu dài, tốn kém và thường xuyên gặp khó khăn. Họ đã thử nghiệm một kỹ thuật được gọi là bẻ gãy thủy lực - bơm hỗn hợp nước, cát và hóa chất ở áp suất cao vào đá phiến để cố gắng phá vỡ các lỗ chân lông và cho khí thoát ra ngoài. Fracking hầu như không mới: Người Mỹ khoan giếng thông thường từ lâu đã thử

nghiệm bơm hóa chất xuống lòng đất để cố gắng khuyến khích dầu chảy; kỹ thuật này đã giúp tăng sản lượng từ các mỏ dầu cũ.
Nhưng chỉ fracking thôi là chưa đủ. Chỉ khi họ kết hợp nó với một kỹ thuật đã có sẵn khác – khoan ngang – thì các kỹ sư của Mitchell mới bắt đầu thấy được kết quả thực sự. Bằng cách khoan ngang vào đá thay vì khoan thẳng xuống, một phương pháp đắt tiền chỉ được sử dụng bởi những kỹ sư thông thường kiên quyết nhất (bao gồm cả những người ở Ghawar), họ đã nhân lên mức độ tiếp xúc của đá mẹ với giải pháp fracking của họ. Đột nhiên những tảng đá phiến cứng này tiết ra khí.
Đó là một quá trình học hỏi chậm, nhưng cuối cùng thông tin đã lan truyền giữa các nhà khai thác độc lập quanh Texas. Khi thập kỷ đầu tiên của thiên niên kỷ mới kết thúc, hoạt động sản xuất khí đốt tự nhiên của Mỹ đang có sự thay đổi. Sau đó, các công ty dầu mỏ biết rằng họ có thể sử dụng các kỹ thuật tương tự để khai thác dầu thô từ các thành tạo đá phiến. Logic mà Ernie Berg đã sử dụng để tìm ra con voi trên sa mạc đã bị lật ngược đầu. Giờ đây, các nhà sản xuất dầu khí không còn tìm kiếm bẫy nữa mà thay vào đó họ đang tìm kiếm những đáy biển cổ xưa mà những người đi trước của họ cho rằng không thể khai thác được.
Tuy nhiên, đã và đang có một số nhược điểm. Cuộc cách mạng của Mitchell có thể bắt đầu với những nỗ lực giảm thiểu ô nhiễm nhưng cho đến khi ông qua đời vào năm 2013, nó đã trở thành một trong những mục tiêu lớn nhất đối với các nhà bảo vệ môi trường sau thiên niên kỷ. Đã có những báo cáo thường xuyên về tình trạng ô nhiễm nguồn nước, đặc biệt là trong những ngày đầu, với một số tầng ngậm nước bị ô nhiễm bởi các giải pháp fracking nặng về hóa học. Một số cư dân phàn nàn về tác động địa chấn của fracking, có thể gây ra cảm giác giống như những trận động đất rất nhỏ. Sau đó, có những lo lắng về lượng cát bạn cần khai thác và vận chuyển để sử dụng trong các dung dịch được bơm vào đá phiến (cũng như nhiều ứng dụng cát khác, chỉ có một hình dạng và kích thước của hạt sẽ làm được). Các nhà sản xuất có thể cố gắng loại bỏ những lo lắng này, nhưng bên cạnh đó, fracking đắt hơn nhiều so với khai thác dầu truyền thống.
Tuy nhiên, cái nhìn thoáng qua về hoạt động sản xuất dầu khí sẽ khiến bạn không còn nghi ngờ gì về tầm quan trọng của những gì

đang xảy ra. Từ năm 2007 đến năm 2021, sản lượng dầu của Mỹ đã tăng hơn gấp đôi và Mỹ đã vượt qua Saudi và Nga để trở thành nhà sản xuất dầu thô lớn nhất thế giới. Bước nhảy vọt như vậy không chỉ là bất thường mà còn là điều chưa từng có và đối với hầu hết những người quan sát bình thường, gần như không thể hiểu được: nó giống như thể thế giới vừa bổ sung thêm một Ả Rập Saudi hoàn toàn mới vào sản lượng dầu mỏ của mình. Sự độc lập về năng lượng của Mỹ, một mục tiêu lâu dài trống rỗng được các chính trị gia không biết làm thế nào để đạt được nó, bất ngờ xuất hiện trong tầm mắt. Những tác động này đã vượt xa bản thân ngành dầu khí. Năng lượng rẻ hơn, dồi dào hơn có nghĩa là các nhà sản xuất Mỹ có thể cạnh tranh tốt hơn đối thủ của họ. Điều đó có nghĩa là ngành công nghiệp hóa chất của Mỹ có thể sản xuất các sản phẩm rẻ hơn nhiều so với các đối thủ cạnh tranh châu Âu vốn phụ thuộc vào khí đốt của Nga. Nó thậm chí còn giúp giảm lượng khí thải carbon của đất nước, vì nó có thể đẩy nhanh quá trình chuyển đổi khỏi sử dụng than bẩn hơn, ít năng lượng hơn. Fracking đã khiến Hoa Kỳ trở thành siêu cường dầu mỏ không thể tranh cãi - có lẽ là vĩ đại nhất. Tờ *Economist* viết: “Rất ít doanh nhân đã làm được nhiều việc để thay đổi thế giới như George Mitchell”. [12]

Một số thậm chí còn đi xa hơn khi lập luận rằng lưu vực Permian ở Texas, một khu vực rộng lớn có diện tích 86.000 dặm vuông ở phía tây bang, giờ đây đã lớn hơn Ghawar. Mặc dù điều này đúng ở một khía cạnh nào đó - tổng sản lượng dầu từ Permian hiện cao hơn đáng kể so với Ghawar - nó giống như so sánh táo và lê. Permian là một khu vực rộng lớn, bao gồm nhiều hồ chứa dầu và đá mẹ, nên việc so sánh nó với một hồ chứa nhỏ hơn gần 30 lần (ở mức 3.300 dặm vuông) là không thực sự có ý nghĩa. Một so sánh tương tự hơn là toàn bộ lưu vực Saudi, nơi có sản lượng tiềm năng cao hơn gấp đôi so với Permian.

Điều đó đưa chúng ta trở lại với cú đấm gây tranh cãi của Biden ở Jeddah. Thật khó hiểu khi có vẻ như tổng thống Mỹ vẫn phải hợp tác với Saudi Arabia mặc dù đất nước của ông hiện sản xuất nhiều dầu hơn, nhưng vẫn có điều gì đó đặc biệt ở vùng đất sa mạc và dầu mỏ này. Việc bơm dầu thô một cách mạnh mẽ từ đá cứng là một chuyện, như hàng chục nghìn giếng dầu xung quanh Texas đang làm, nhưng

bí quyết của Saudi nằm ở chỗ họ dễ dàng hút được các hydrocarbon này từ các bể chứa khổng lồ của mình. Nó có thể không còn là nhà sản xuất dầu lớn nhất thế giới – sản lượng hàng năm của nước này hiện chỉ ngang bằng với Nga và ít hơn Mỹ hàng tỷ thùng dầu – nhưng Saudi vẫn được coi là một loại ngân hàng trung ương cho thị trường năng lượng toàn cầu: nhà sản xuất giải pháp cuối cùng khi mọi biện pháp khác đều thất bại.

Trong những năm qua, nhiều người đã đặt câu hỏi liệu nó có còn có thể hoàn thành vai trò này hay không. Nhưng những gì thực sự đang diễn ra bên trong đất nước này, bên trong cơ sở hạ tầng dầu mỏ khổng lồ và tại các mỏ như Ghawar, vẫn là một bí mật được bảo vệ chặt chẽ. Đó là một bí mật được giữ kín đến mức ngay cả các nhà lãnh đạo thế giới cũng phải bàn tán về những mẩu tin nhỏ mà họ nhặt được. Chỉ vài tuần trước khi Biden đến thăm Jeddah, micro tại hội nghị thượng đỉnh ở Đức đã bắt được khoảnh khắc ông bị Emmanuel Macron gạt sang một bên. Tổng thống Pháp, sau khi gọi điện cho nhà lãnh đạo Các Tiểu vương quốc Ả Rập Thống nhất, thì thầm một cách hào hứng: 'Saudi có thể tăng thêm một chút, thêm 150 [nghìn thùng một ngày]. Có thể nhiều hơn một chút, nhưng họ không có công suất lớn trước thời hạn sáu tháng.” [13]

Tuy nhiên, nếu có một bài học lâu năm từ thời đại dầu mỏ, đó là bạn đã đánh giá thấp Ả Rập Xê Út trước nguy hiểm. Năm 2005, Matt Simmons, tác giả cuốn *Chạng vạng trên sa mạc* , một cuốn sách dự đoán sự sụp đổ sắp tới của ngành sản xuất dầu mỏ của Saudi, đã đặt cược với một nhà báo của *tờ New York Times* , cuốn sách mang nhiều tiếng vang của câu chuyện nổi tiếng. cá cược giữa Paul Ehrlich và Julian Simon nhiều thập kỷ trước. Simmons đứng về phía Ehrlich, đánh cược rằng khi sản lượng của Saudi đạt đỉnh rồi giảm, giá dầu sẽ tăng hơn gấp ba và duy trì ở mức cao khi mọi người tin rằng chúng tôi sắp hết dầu. Người phụ trách chuyên mục, John Tierney, lấy cảm hứng từ ký ức của Julian Simon, đã đặt cược chống lại anh ta.

Đến năm 2010, giá dầu chỉ cao hơn năm 2005 một chút. Simmons đã thua cược, nhưng than ôi, ông đã chết trước khi biết kết quả. Trong khi đó, mỏ Ghawar, con voi già vĩ đại của sa mạc, đã và vẫn đang bơm hàng triệu thùng dầu mỗi ngày. Tuy nhiên, đây mới chỉ là khởi đầu cho câu chuyện về dầu thô, cả ở Ghawar và những nơi xa hơn.

Điều kỳ diệu thực sự sẽ đến tiếp theo, khi chất lỏng nhớt, đen, bẩn này được chuyển hóa thành những chất mà chúng ta thực sự có thể sử dụng. [14]

14
Ống

COLOGNE, ĐỨC

Có điều gì đó đặc biệt về nhà máy lọc dầu Wesseling – nhưng không ai thích nói về nó.

Đối với những người quan sát không quen biết, tức là hầu hết chúng ta, nó trông giống như bất kỳ nhà máy lọc dầu nào khác: một điểm nối spaghetti gồm các đường ống thép, hộp đựng bằng crom và các ống khói bốc khói, bốc mùi.

Khi tôi đến thăm, lúc đó là đầu mùa hè và Rhineland là một biển cây xanh. Manh mối duy nhất cho thấy đây là trung tâm công nghiệp của Đức là ống khói thỉnh thoảng nhô lên trên những chiếc lá và những âm thanh ầm ĩ phát ra từ mọi nhà kho khác. Tôi đi dọc những con đường dài nối các khu vực khác nhau của nhà máy lọc dầu, cố gắng hiểu những gì tôi đang nhìn thấy.

Tìm hiểu ý nghĩa của một nhà máy lọc dầu có lẽ là nhiệm vụ khó khăn nhất trong Thế giới Vật chất. Nhảy dù xuống mỏ đồng như Chuquicamata hoặc nhà máy nơi quặng bị nghiền nát và kim loại nóng chảy thành cực dương, và bạn có thể trực giác nhìn thấy những gì đang xảy ra trước mắt mình. Nhìn vào một lò nung thủy tinh hoặc thậm chí là một phòng thí nghiệm nơi quy trình Czochralski đang được sử dụng để tạo ra một bó silicon hoàn hảo (mặc dù may mắn vẫn được phép vào) và điều tương tự cũng xảy ra: bạn rất nhanh chóng nắm bắt được những gì bạn đang chứng kiến.

Các nhà máy lọc dầu thì khác. Càng đi sâu vào rừng đường ống, bạn càng khó nhận ra điều gì đang xảy ra. Có lẽ đó là lý do tại sao những nơi này hiếm khi thu hút được nhiều sự chú ý. Khi mọi người nói về dầu, họ chủ yếu nói về nơi nó đến từ trái đất hoặc nơi sản phẩm của nó bị đốt cháy nhưng lại ít quan tâm đến những nơi ở giữa này.

Tuy nhiên, có một loại thuật giả kim được thực hiện ở đây nếu không có nó thì thế giới sẽ thực sự rất khác. Chính trong hệ thống đường ống này, dầu thô được biến thành hydrocacbon nguyên chất mà từ đó chúng ta tạo ra hóa chất, nhựa, nhiên liệu và các chất khác nằm ở

đâu đó trong ô tô, nhà hoặc tủ quần áo của bạn. Ở đây, chất lỏng có thể đi vào bể dưới dạng một tập hợp phân tử và thoát ra hoàn toàn dưới dạng một tập hợp khác; ở đây có những quy trình lấy một thùng dầu và bằng cách nào đó biến nó thành một thùng và một phần tư mà không cần thêm bất cứ thứ gì trong quá trình đó. [1]

Đây là những địa điểm nghịch lý, trong số những biểu tượng mang tính biểu tượng nhất của thời đại carbon nhưng lại là một phần không thể thiếu trong cách chúng ta có thể loại bỏ khí thải và thoát khỏi nhiên liệu hóa thạch. Ở đây, nhiều dầu được đốt cháy và thải ra nhiều carbon nhưng những nơi này đồng thời là hình mẫu về hiệu quả, khai thác giá trị từ mỗi giọt đổ vào hệ thống đường ống.

Và đôi khi, đặc biệt là vào ban đêm khi ánh đèn lấp lánh và bầu trời thỉnh thoảng được chiếu sáng bởi những luồng khí gas từ các ống khói, những nơi này có một vẻ đẹp lấp lánh - hơi giống cảnh mở đầu của Blade Runner, trong đó máy quay *bay* qua trên những ống khói của một Los Angeles lạc hậu. Khi điều đó xảy ra, đạo diễn Ridley Scott của bộ phim cho biết cảnh quay theo dõi được lấy cảm hứng từ ký ức của ông khi ngồi trên những ngọn đồi nhìn ra Teesside, nhìn ra các công trình hóa chất và nhà máy lọc dầu khi chúng phun lửa lên bầu trời. Ít nhất việc gợi nhớ đến vùng đông bắc nước Anh có thể giúp giải thích tại sao trời luôn mưa trong phim.

Cuối cùng, các nhà máy lọc dầu tồn tại với một mục đích rất đơn giản: tách dầu thành nhiều hợp chất khác nhau mà nó bao gồm. Tất cả đều nhằm mục đích làm cho dầu thô bớt thô hơn một chút. Điều này quay trở lại thực tế rằng những gì nổi lên từ lòng đất là một sản phẩm tự nhiên có thể thay đổi rất nhiều tùy thuộc vào việc nó xuất hiện từ giếng nào. Đôi khi nó có nguồn gốc từ các loài sinh vật phù du hoặc tảo thời tiền sử khác nhau, đôi khi có những tạp chất khác nhau thấm vào từ đá mẹ, đôi khi lượng nhiệt và áp suất khác nhau - kết quả là có nhiều loại dầu thô độc đáo.

Chua ngọt, nhẹ và nặng

Ví dụ, dầu khai thác từ Ghawar đôi khi được gọi là 'ánh sáng Ả Rập': nhẹ vì nó ít nhớt và đặc hơn so với dầu thô Merey nặng, nhớt của Venezuela hoặc dầu thô Maya từ Mexico. Và vì bạn có thể bơm dầu nhẹ hơn ra khỏi lòng đất dễ dàng hơn nên dầu của Saudi - ít nhất là

thứ họ có trên đất liền - cần ít công sức và chi phí bơm và tinh chế hơn đáng kể so với hầu hết các loại dầu khác trên thế giới.
Dầu cũng có thể 'ngọt' hoặc 'chua' - thước đo hàm lượng lưu huỳnh, được xác định từ những ngày đầu khi dầu thô chủ yếu được sử dụng để thắp sáng trong nhà. Quá nhiều lưu huỳnh trong dầu hỏa của bạn và không chỉ có mùi độc hại khi đốt mà còn làm xỉn màu bạc trong đèn của bạn. Hồi đó, cách nhanh nhất để kiểm tra điều này trước khi đốt là cho nó nếm nhanh - càng nhiều lưu huỳnh thì càng chua - và cách viết tắt này đã bị mắc kẹt. Nói rộng ra, dầu càng ít nặng và chua thì các nhà máy lọc dầu càng phải tốn ít thời gian và công sức hơn để xử lý nó, do đó, dầu thô nhẹ hơn và ngọt hơn thường có giá cao hơn. fn1
Tại Wesseling, các nhà tinh chế tự hào về khả năng tinh chế nhiều loại dầu khác nhau - khoảng một trăm hương vị khác nhau từ khắp nơi trên thế giới. Ví dụ, thực tế là Liên minh châu Âu vừa cấm nhập khẩu dầu thô của Nga không có vấn đề gì: thay vào đó họ chỉ đơn giản chuyển sang pha trộn từ nơi khác. Đây là một thách thức lớn hơn đối với hầu hết các nhà máy lọc dầu khác, vốn có xu hướng được trang bị để xử lý các loại dầu thô khá cụ thể. Điều đó nghe có vẻ mang tính kỹ thuật, nhưng để có một ví dụ về cách nó định hình thế giới hiện đại, hãy xem xét tình trạng khó khăn hiện tại ở Hoa Kỳ.
Hầu hết các nhà máy lọc dầu của Mỹ đều được thiết lập để xử lý các loại dầu thô nặng, chua mà bạn nhận được từ Canada, Mexico và Venezuela. Điều đó có lý khi có vẻ như Mỹ đang cạn kiệt nguồn dầu trong nước nhưng sau đó lại xảy ra cuộc cách mạng dầu đá phiến. Hóa ra, dầu đá phiến của Mỹ thường nhẹ và chất lượng cao, có nghĩa là nó không phù hợp nhất cho các nhà máy lọc dầu trong nước. Kết quả cuối cùng là mặc dù về mặt số học, Mỹ độc lập về năng lượng – sản xuất nhiều dầu hơn mức tiêu thụ – nhưng trên thực tế, điều đó không như vậy. Họ phải tiếp tục hút dầu nặng từ nơi khác để cung cấp cho các nhà máy lọc dầu của mình trong khi gửi dầu thô Texas tới châu Âu và châu Á để tinh chế. Việc rút mình ra khỏi hệ thống năng lượng toàn cầu thực ra lại khá phức tạp; do đó tại sao các tổng thống Mỹ như Joe Biden phải tiếp tục đi vòng quanh thế giới để thảo luận về dầu mỏ. Và do đó, thật hợp lý khi dành một chút thời gian để suy nghĩ về những loại ống và ống dẫn bí ẩn này - những bộ hóa học khổng lồ được thiết kế để hòa trộn hỗn hợp dầu thô.

Bước đầu tiên và quan trọng nhất đối với bất kỳ nhà máy lọc dầu nào - sau khi dầu thô nhập khẩu từ Saudi, Nigeria hoặc Texas được lọc sạch nước mặn và các chất gây ô nhiễm - là chưng cất. Âm thanh chính xác như thế này: dầu được làm nóng, bay hơi và ngưng tụ nhiều lần để tách các hợp chất khác nhau, mỗi hợp chất có điểm sôi riêng – từ các khí như butan dưới 30°C đến xăng ở nhiệt độ lên tới 104°C, và nhựa đường ở nhiệt độ trên 580°C. Các sản phẩm có điểm sôi thấp hơn đôi khi được mô tả là các phần 'nhẹ hơn', vì chúng nổi lên trên nhanh nhất khi đun nóng; phần dính hơn, rắn chắc hơn là các phần “nặng”, chìm xuống đáy.
Các cột nơi điều này xảy ra rất giống với loại bạn có thể sử dụng để chưng cất rượu whisky, chỉ cao hơn và lớn hơn rất nhiều. Thật vậy, trong những ngày đầu của ngành lọc dầu ở Mỹ những năm 1920, phần lớn bí quyết chưng cất phân đoạn đều đến trực tiếp từ ngành công nghiệp rượu mạnh, nơi nhiều nhà công nghệ đã bị mất việc do bị cấm. Theo thời gian, các nhà tinh chế đã đưa ra những phương pháp khéo léo hơn bao giờ hết: sử dụng sự kết hợp giữa nhiệt, áp suất và chất xúc tác, họ đã tìm ra cách phá vỡ các phân tử lớn thành những phân tử nhỏ hơn và cách tái tạo những phân tử nhỏ thành những phân tử lớn hơn.
Sản phẩm cuối cùng có thể tạm chia thành sáu loại: có xăng cho ô tô; dầu diesel cho xe tải, xe lửa và các phương tiện vận tải hạng nặng khác; hóa dầu, dùng để sản xuất nhiều thứ, bao gồm cả nhựa; dầu hỏa làm nhiên liệu cho máy bay phản lực; sáp và dầu bôi trơn; và nhựa đường, bao phủ các con đường của chúng ta.
Tuy nhiên, đây là một sự đơn giản hóa quá mức vì một thùng dầu có thể tạo ra hàng trăm sản phẩm cuối cùng mà nếu không có chúng thì tất cả chúng ta đều sẽ no. Lấy một ví dụ khó hiểu nhưng ngày càng quan trọng, tôi đã từng đến thăm Nhà máy lọc dầu Phillips 66 Humber ở hạt Lincolnshire của Anh, nơi họ biến thứ hắc ín còn sót lại dưới đáy thùng thành thứ gọi là 'coke kim'. Than cốc hình kim đó – một chất cứng, màu đen, như đá, trông rất như than đá – là nguyên liệu chính để sản xuất than chì tổng hợp, thành phần chính tạo ra cực dương trong pin lithium-ion. Giờ đây, hầu hết chúng ta đều nhận ra rằng pin bên trong điện thoại thông minh và ô tô điện được làm từ nhiều thành phần ít người biết đến mà chúng ta khai thác từ lòng đất – điều này sẽ

được nói rõ hơn ở Phần Sáu – nhưng ít người biết rằng trong số những thành phần đó có một lượng lớn dầu thô.
Vì vậy, mặc dù thật hấp dẫn khi coi những địa điểm này là hình ảnh của quá khứ - những bộ sưu tập đường ống đơn giản không liên quan đến thế giới ngày mai - nhưng điều đó không hoàn toàn đơn giản. Có một điều, phần lớn những gì xảy ra trong các nhà máy lọc dầu đều cực kỳ phức tạp. Quy trình tại Nhà máy lọc dầu Humber khéo léo và phức tạp đến mức vài năm trước, một điệp viên Trung Quốc đã cố gắng xâm nhập vào trụ sở chính của công ty để đánh cắp công thức (anh ta đã bị bắt và sau đó bị bỏ tù). Và một khi bạn hiểu điều gì đang xảy ra bên trong mê cung đường ống và căn phòng này, bạn bắt đầu thấy có nhiều cách mà chúng ta dựa vào những nơi này.

Những bí mật của Wesseling

Tất nhiên, việc hiểu một nhà máy lọc dầu phụ thuộc vào khả năng điều hướng nó, điều mà tôi đã phải vật lộn để làm được ở Wesseling. Trước khi đến Đức tôi đã làm bài tập ở nhà. Tôi đã học được cách nhận biết cột chưng cất và đèn flash chân không; Tôi có thể phân biệt bánh quy giòn với cốc cốc của mình. Tôi biết cách bố trí điển hình của nhà máy lọc dầu điển hình. Nhưng khi dạo quanh Wesseling, tôi lại thấy mình bối rối lần nữa.
Tất cả những đường ống và căn phòng cần thiết đều ở đó, nhưng chúng dường như bị chia thành những khu riêng biệt, xen kẽ với những tòa nhà gạch cũ. Tôi biết các nhà máy lọc dầu rất lớn, với các hệ thống đường ống tập trung, nếu không được cuộn lại, chúng sẽ chạy hàng trăm dặm. Nhưng nhà máy lọc dầu Wesseling lại lớn một cách bất thường. Có một con đường chạy từ trên xuống dưới nhưng dài quá bạn khó có thể nhìn thấy từ đầu đến cuối. Bạn có thể đạp xe quanh chu vi trong một giờ (hầu hết mọi người đạp xe ở đây; động cơ đánh lửa không được tán thành) nhưng bạn vẫn chưa nhìn thấy hết. Ở một mức độ nào đó, kích thước vật lý của nó là một hàm số của đầu ra. Cùng với nhà máy lân cận ở phía bên kia sông Rhine, đây là nhà máy lọc dầu lớn nhất ở Đức, nền kinh tế công nghiệp lớn nhất châu Âu. Nhưng tại sao tất cả không gian dư thừa? Tại sao nó lại được sắp xếp một cách kỳ lạ như vậy?

'Chà,' Marco, giám đốc nhà máy lọc dầu này và là người hàng xóm kế bên của nó nói, 'đó là một câu chuyện dài.'
Chúng tôi đang đi dọc theo điểm khởi đầu trong hành trình của dầu mỏ ở đây. Một hỗn hợp dầu thô từ Nigeria và một số nơi khác mà anh ấy không muốn cho tôi biết (các nhà pha chế hydrocarbon cực kỳ bí mật) đang chảy qua các đường ống phía trên.
'Mặc dù vậy, bạn nói đúng: bạn càng biết nhiều về các nhà máy lọc dầu thì điều đó càng ít có ý nghĩa. Nếu bạn xây dựng nơi này từ đầu thì nó sẽ không giống thế này'. Anh dừng lại một lúc rồi hạ giọng. 'Nơi này có một lịch sử *thú vị* . Người ta thường gọi nó là nhà máy Hermann Goering…"
Hóa ra, Wesseling bắt đầu hoạt động như một phần vũ khí bí mật của Đức Quốc xã để giành chiến thắng trong cuộc chiến: một trong mạng lưới các nhà máy trên khắp nước Đức sản xuất nhiên liệu hàng không cho Luftwaffe. Các nhà máy hóa chất khác đã được lựa chọn cho nỗ lực chiến tranh nhưng nơi này được xây dựng theo yêu cầu riêng cho mục đích này. Cách bố trí ngày nay thật kỳ quặc vì nó được thiết kế kỳ quặc vào những năm 1940; Những khoảng trống rộng rãi giữa mỗi khu vực nhằm mục đích gây nhiễu cho các máy bay ném bom đang lao tới trong các cuộc không kích.
Và trong vài năm, nó đã có tác dụng. Khi Đức chế tạo thêm máy bay để chống lại quân Đồng minh, nơi này tiếp tục cung cấp nhiên liệu mà họ cần. Nó sống sót sau cuộc tấn công này đến cuộc tấn công khác, triển khai các kỹ thuật tiên tiến để che giấu chính mình: một hệ thống mất điện sẽ tắt mọi ánh sáng ngay lập tức, một màn sương mù nhân tạo sẽ che giấu các nồi hơi và bình chứa. Khi đó, cũng như bây giờ, đây là một phần quan trọng trong ngành nhiên liệu của Đức, tuy nhiên có một điểm khác biệt quan trọng: hồi đó, nhiên liệu không được làm từ dầu mà từ than.
Nước Đức từ lâu đã nghèo dầu mỏ và giàu than đá, nhưng một phần của phép lạ kinh tế Đức vào cuối thế kỷ 19 và đầu thế kỷ 20 liên quan đến việc coi điều này như một nguồn lợi thế cạnh tranh. Các quốc gia khác có thể có nhiều hydrocacbon hơn, nhiều kim loại hơn và các khoáng chất kỳ lạ hơn, đất đai tốt hơn và đường bờ biển dài hơn, nhưng Đức có than đá. Và thậm chí không phải là loại than tốt nhất: than non màu nâu bẩn thay vì than antraxit đen, đậm đặc năng lượng

được tìm thấy ở các mỏ than của Mỹ và Anh. Nhưng những gì Đức thiếu về tài nguyên thiên nhiên lại được bù đắp bằng các nhà khoa học, những người có kỷ luật và khéo léo nhất thế giới, có khả năng biến than thành hầu hết mọi thứ.

Trong khi Anh và Mỹ xây dựng ngành công nghiệp hóa chất ban đầu từ muối thì Đức lại triển khai than đá và thuật giả kim. Công ty dược phẩm khổng lồ Bayer đã kiếm được hàng triệu đô la bằng cách biến than đá của Đức thành axit acetylsalicylic, một loại thuốc được biết đến nhiều hơn với cái tên aspirin. BASF đã kiếm được hàng triệu USD bằng cách biến than đá của Đức thành một loại thuốc nhuộm đặc biệt. Trong hoàn cảnh đó, biến than của Đức thành loại xăng có thể sử dụng trong xe tăng, xe tải và máy bay chỉ là bước hợp lý tiếp theo.

Người thực hiện bước đó là Friedrich Bergius, một học trò của Fritz Haber thông minh nhưng đầy rắc rối vào thời điểm ông đang tiến gần đến chén thánh của hóa học, kỹ thuật tạo ra nitrat từ nitơ khí quyển. Đến năm 1913, Bergius đã tìm ra cách áp dụng một số phương pháp của Haber: phản ứng áp suất cao bên trong các bình thép bền với sự có mặt của chất xúc tác. Nứt là từ có ý nghĩa ở đây, vì phản ứng mà Bergius đưa ra tương tự như những gì vẫn xảy ra ngày nay ở nhiều tàu dùng phương pháp hydrocracking ở Wesseling và những nơi khác, nơi hydro được sử dụng để phân tách các phân tử dầu thô thành các hợp chất khác nhau. [2]

Trong một thế giới có nguồn dầu thô vô hạn, kỹ thuật biến than thành dầu có vẻ hơi vô nghĩa, nhưng vào đầu những năm 1920 đã xuất hiện lần đầu tiên trong số nhiều nỗi sợ hãi định kỳ về cái mà sau này được gọi là 'đỉnh dầu'. Tốc độ phát hiện đã chậm lại, gây lo lắng rằng trong vòng vài năm nữa các giếng dầu ở Texas và Baku sẽ cạn kiệt và thế giới sẽ cạn kiệt chất lỏng quý giá này. Vì vậy, ý tưởng cho rằng người ta có thể sản xuất các sản phẩm dầu từ một chất gần như vô hạn đột nhiên rất hấp dẫn – và không chỉ ở Đức.

Các công ty từ khắp nơi trên thế giới đã xếp hàng để có được bằng sáng chế của Bergius cho cái được gọi là kỹ thuật hydro hóa. Họ bao gồm Brunner Mond của Anh – công ty hóa chất Cheshire mà sau này trở thành một phần của ICI – và Standard Oil của New Jersey, một phần của công ty độc quyền Rockefeller đã bị tách ra vài năm trước

đó. Nhưng ít người hào hứng như Carl Bosch. Nhiên liệu tổng hợp có thể là sản phẩm bom tấn theo sau nitrat tổng hợp. Tuy nhiên, vấn đề là chi phí. Biến than thành dầu đắt gấp nhiều lần so với việc chỉ nhập khẩu dầu thô, và khi hàng loạt nhà khai thác mỏ ở Texas và Oklahoma biến tình trạng thiếu dầu thành dư thừa, số tiền đó không còn cộng thêm nữa. Vào đầu những năm 1930, Bosch và IG Farben, gã khổng lồ công nghiệp mà BASF đã sáp nhập, rất cần sự giúp đỡ. Nó xuất hiện dưới hình dạng Adolf Hitler.

Quyết tâm độc lập về năng lượng, quyết tâm loại bỏ dầu nhập khẩu từ Mỹ và Liên Xô, Hitler cũng có tầm nhìn về một nước Đức hiện đại với đầy những đường cao tốc chở ô tô sản xuất trong nước. Ông nói với các giám đốc điều hành của IG Farben: “Một nền kinh tế không có dầu mỏ là điều không thể tưởng tượng được ở một nước Đức mong muốn duy trì sự độc lập về mặt chính trị”. Họ đang rất cần sự hỗ trợ của chính phủ, vì vậy Tuyên bố kết thúc là âm nhạc vang lên trong tai họ: 'Nhiên liệu động cơ của Đức phải trở thành hiện thực, ngay cả khi điều này đòi hỏi phải hy sinh. Vì vậy, việc tiếp tục quá trình hydro hóa than là hết sức cần thiết.” [3]

Khi chiến tranh xảy ra, dầu mỏ là trọng tâm của nó. Chiến tranh thế giới thứ nhất có thể là cuộc chiến tranh vĩ đại đầu tiên của máy móc và động cơ đốt trong, nhưng nó cũng là một cuộc chiến tranh trì trệ, tiêu biểu là các chiến hào ở Mặt trận phía Tây. Ngược lại, Chiến tranh thế giới thứ hai là một cuộc chiến tranh vận động, kéo dài những khoảng cách lớn hơn nhiều trên các khu vực hoạt động lớn chưa từng có. Đây là một cuộc xung đột do dầu mỏ, vì dầu mỏ, và một phần do dầu mỏ quyết định.

Lực lượng của Mỹ ở châu Âu - xe tăng, xe tải, thiết giáp hạm và tàu ngầm - cuối cùng đã tiêu thụ xăng nhiều hơn gấp trăm lần so với cuộc chiến trước. 'Người của tôi có thể ăn thắt lưng của họ', Tướng George S. Patton nói với Dwight Eisenhower, 'nhưng xe tăng của tôi phải có xăng.' Và xăng dầu – thậm chí còn hơn cả thực phẩm hay thép – là yếu tố hạn chế chính đối với cả hai bên. Patton đã dành phần lớn thời gian của cuộc chiến để kêu gọi có thêm nhiên liệu: 'Chỉ cần đưa cho tôi 400.000 gallon xăng, và tôi sẽ đưa bạn vào Đức trong hai ngày', ông nói với một sĩ quan tiếp tế. Bên kia chiến tuyến, Erwin Rommel viết:

Những người dũng cảm nhất không thể làm gì nếu không có súng, súng không thể làm gì nếu không có nhiều đạn, và cả súng lẫn đạn đều không được sử dụng nhiều trong chiến tranh di động trừ khi có phương tiện đủ xăng để chở họ đi khắp nơi.
Phần lớn chiến lược của Nhật Bản ở Thái Bình Dương liên quan đến việc cố gắng chiếm các mỏ dầu ở Đông Ấn Hà Lan, nhưng nhiên liệu vẫn cực kỳ khan hiếm. Đối với các chiến lược gia quân sự Nhật Bản, một trong những điểm hấp dẫn của chiến thuật kamikaze là trong những nhiệm vụ như vậy, bạn chỉ phải chuẩn bị đủ nhiên liệu cho chuyến đi một chiều.
Vì nước này không có dầu mỏ nên phần lớn chiến lược của Đức xoay quanh việc cố gắng mua dầu từ nơi khác: khoảng một thứ ba đến từ các mỏ Ploiesti ở Romania, và một phần lý do cơ bản của việc Hitler xâm lược Liên Xô là để cố gắng đảm bảo nguồn dầu của vùng Kavkaz - của Maikop, Grozny và Baku. 'Cuộc sống của phe Trục', ông nói với Mussolini, 'phụ thuộc vào những mỏ dầu đó.' "Trừ khi chúng ta lấy được dầu ở Baku," ông viết vào năm 1942, "chiến tranh sẽ thất bại."
Wehrmacht chưa bao giờ chiếm được Baku, nhưng Hitler ít nhất có thể dựa vào vũ khí bí mật của mình: nhiên liệu tổng hợp được sản xuất bằng kỹ thuật của Bergius. Vào đầu những năm 1940, có 14 nguồn trải rộng khắp nước Đức, từ công trình khổng lồ Leuna ở phía đông đến nhà máy lọc dầu Wesseling ở Cologne. Than nâu được khai thác từ lòng đất ở các mỏ lộ thiên gần đó ở vùng Ruhr, rồi được nghiền nát và hydro hóa trong các buồng và đường ống xuyên qua những địa điểm rộng lớn này.
Tù binh chiến tranh và tù nhân trong trại tập trung bị bắt vào và buộc phải làm việc trong các nhà máy. Tại Wesseling, hàng nghìn người trong số họ sống trong những doanh trại bằng gỗ có gió lùa bên bờ sông Rhine. Tiền lương tượng trưng của họ đã bị các sĩ quan SS canh gác họ quẹt. Tất cả các nguồn lực có thể được chuyển hướng sang sản xuất nhiên liệu tổng hợp. Một nhà máy thậm chí còn được xây dựng bên cạnh Auschwitz, nơi có lực lượng lao động nô lệ và các mỏ than gần đó có nghĩa là nó 'có vị trí rất thuận lợi' - mặc dù cuối cùng nó không bao giờ sản xuất được một giọt dầu nào. [4]

Các nhà máy chính, từ Wesseling đến Leuna, đóng góp phần lớn nhiên liệu cho Đức. Nếu không có những nơi này, Thế chiến thứ hai sẽ kết thúc sớm hơn nhiều. Vào thời kỳ đỉnh cao, họ sản xuất được 25 triệu thùng dầu mỏ tổng hợp mỗi năm và cung cấp 95% nhiên liệu cho Luftwaffe.
“Các nhà máy hydro hóa là điểm dễ bị tổn thương nhất của chúng ta,” Nguyên soái Erhard Milch tuyên bố vào năm 1943.
Với họ đứng vững và đánh mất toàn bộ khả năng tiến hành chiến tranh của chúng ta. Không những máy bay không còn bay nữa mà cả xe tăng và tàu ngầm cũng sẽ ngừng hoạt động nếu các nhà máy hydro hóa thực sự bị tấn công. [5]
Mùa xuân năm sau, 'cuộc tấn công dầu mỏ' bắt đầu: Máy bay quân Đồng minh thả hơn 200.000 tấn bom xuống các nhà máy. Công việc của Leuna gặp nhiều khó khăn nhưng Wesseling không được tha. Trong một thời gian, những biện pháp đặc biệt đó để bảo vệ địa điểm - khoảng trống giữa các khu vực, tường gạch xung quanh máy móc, nơi trú ẩn và kế hoạch an toàn cho phép nhà máy tắt và bật lại một cách đặc biệt nhanh chóng - có nghĩa là nó đã sống sót sau các cuộc đột kích ban đầu và vẫn tiếp tục hoạt động. về bơm dầu. Cỗ máy chiến tranh của Đức vẫn tiếp tục lăn bánh.
Nhưng sau đó, vào sáng sớm ngày 19 tháng 7 năm 1944, một phi đội RAF gồm gần 100 máy bay ném bom đã tấn công. Đó là một đêm quang đãng – điều kiện lý tưởng. Còi báo động không kích vang lên và các công nhân lao về boongke của họ, nhưng lần này có sự cố xảy ra - sương mù nhân tạo không hoạt động. [6]
Máy bay thả pháo sáng xuống địa điểm, chiếu sáng tất cả các tàu và hộp bằng ánh sáng đỏ rực rỡ, sau đó cuộc ném bom bắt đầu. Trong ba đợt kéo dài khoảng 20 phút, các máy bay đã thả khoảng một nghìn quả bom. Các hầm chứa than bị đốt cháy, các đơn vị sản xuất khí hydro sử dụng trong quá trình này bị phá hủy và địa điểm này chìm trong biển lửa cho đến trưa ngày hôm sau.
Các công nhân đã cố gắng đưa Wesseling trở lại công suất khoảng 40% trong vòng vài tháng, nhưng sau hai cuộc đột kích khác vào đầu tháng 10, lần này là của đội Pháo đài bay B-17 của Mỹ, những gì còn lại về công suất của Wesseling đã bị xóa sạch.

Quân Đồng minh, với nguồn cung cấp dầu mỏ dồi dào của Mỹ và Trung Đông, từ lâu đã có lợi thế về nguồn năng lượng quý giá này, nhưng đến những tháng cuối cùng của cuộc chiến, khoảng cách đã trở nên rõ ràng. Một trong những cuộc tấn công ném bom này vào Các nhà máy nhiên liệu tổng hợp vào cuối năm 1944 đã sử dụng hơn 34.000 thùng xăng máy bay. Vào thời điểm đó, tổng mức tiêu thụ của Không quân Đức - trên toàn bộ hạm đội - đã giảm xuống còn 12.500 thùng mỗi ngày. Đến năm 1945, lực lượng không quân Đức đã bị hạ cánh một cách hiệu quả. Cuối cùng, Hitler, ẩn náu trong hầm trú ẩn của mình ở Berlin, đang chỉ đạo các kế hoạch chiến tranh cho các sư đoàn vốn từ lâu đã bế tắc vì thiếu nhiên liệu. Bên ngoài, xe quân đội đang bị bò kéo lê. [7]

Chiến tranh thế giới thứ hai không chỉ đơn thuần là cuộc chiến chống lại các nhà máy lọc dầu mà còn là cuộc chiến *của* các nhà máy lọc dầu. Ngay cả khi nhắm mục tiêu vào các nhà máy hydro hóa của Đức, quân Đồng minh vẫn vượt trội so với đối thủ của họ, mang lại cho máy bay chiến đấu của họ một lợi thế đáng kể trong quá trình này. Đúng vậy, nhiên liệu tổng hợp của Đức là một điều đáng kinh ngạc, nhưng ở bên kia Đại Tây Dương, các nhà máy lọc dầu của Mỹ đang có những bước đột phá của riêng mình. Trong số đó có công nghệ Cracking xúc tác phức tạp được thực hiện tại các nhà máy lọc dầu cỡ tòa nhà chọc trời sản xuất nhiên liệu 100 octan cao cấp, trái ngược với loại 87 octan được sản xuất ở những nơi như Wesseling.

Chỉ số octan về cơ bản là thước đo mức độ nhiên liệu có thể chịu được áp suất trong động cơ mà không phát nổ sớm hoặc 'gõ cửa', như đôi khi nó được gọi. Nhiên liệu có chỉ số octan cao hơn có nghĩa là Spitfires và Lancasters có thể được trang bị động cơ ưu việt hơn, chẳng hạn như Rolls-Royce Merlin. Chúng có thể bay nhanh hơn 15% so với các đối tác Đức, có tầm bắn xa hơn 1.500 dặm khi thực hiện nhiệm vụ ném bom và độ cao tối đa cao hơn 10.000 feet. Lợi thế về nhiên liệu này thậm chí có thể đã làm thay đổi thế cân bằng trong Trận chiến nước Anh.

Hậu quả nặng nề của kim loại nặng

Vào thời điểm này, có thể rất hấp dẫn để hoan nghênh các nhà tinh chế của Mỹ vì thành tích tuyệt vời như vậy, nhưng cũng có một lăng

kính khác, ít tâng bốc hơn để nhìn câu chuyện này. Những người thông minh này Các kỹ thuật do các nhà máy lọc dầu Mỹ tiên phong nhằm cải thiện chỉ số octan của nhiên liệu là sự kế thừa cho một cách khác, đen tối hơn để giảm tiếng gõ: thêm chì vào hỗn hợp.
Tiếng gõ động cơ là một trong những thách thức lớn ban đầu mà ngành công nghiệp ô tô phải đối mặt. Trong nỗ lực vượt qua các đối thủ tại Ford, vào những năm 1920, General Motors (GM) đã bắt đầu tìm cách giảm tiếng ồn cho động cơ của những chiếc Cadillac của mình. Một trong những kỹ sư của nó, người đàn ông tên là Thomas Midgley, đã phát hiện ra rằng một giọt chì tetraethyl trong xăng sẽ làm tăng mức octan một cách thần kỳ và ngăn chặn mọi tiếng kêu. Và thế là bắt đầu một trong những câu chuyện ô nhiễm đáng xấu hổ nhất trong lịch sử hiện đại – đáng xấu hổ hơn đáng kể so với lượng khí thải carbon ngày nay, vì trong khi khoa học về sự nóng lên toàn cầu xuất hiện sau khi sử dụng nhiên liệu hóa thạch, mọi người đều biết những rủi ro khi cho chì vào xăng ngay từ đầu. bắt đầu.
Vitruvius, triết gia La Mã có công thức làm xi măng giúp truyền cảm hứng cho việc phát minh ra bê tông hiện đại, đã quan sát thấy những người đàn ông làm việc với kim loại nặng này trông có vẻ không khỏe mạnh và khuyên mọi người tránh xa nước uống chảy qua ống chì. Chì là chất độc thần kinh cực mạnh, đặc biệt có hại cho não trẻ em. Các bác sĩ biết, các nhà hoạch định chính sách biết và hầu hết công chúng cũng biết – nhưng thay vì tìm cách loại bỏ chì, GM chỉ đơn giản loại bỏ từ này khỏi tên thương hiệu của hóa chất: họ gọi nó là 'Ethyl'. Đã có những dấu hiệu cảnh báo ngay từ đầu, với hàng loạt bệnh tật xảy ra tại một nhà máy lọc dầu ở New Jersey ngay sau khi nó được đưa vào thị trường. Đàn ông thực sự phát điên, bị ảo giác và sau đó trở nên điên cuồng. Sáu người đàn ông đã chết, tất cả đều làm việc ở cùng một nơi, khu vực của nhà máy lọc dầu nơi họ tổng hợp chì tetraethyl. Đơn vị này được mệnh danh là 'Ngôi nhà của những con bướm' vì người dân ở đó liên tục loại bỏ những con côn trùng tưởng tượng ra khỏi cơ thể họ. số 8
Sau khi có tin về những cái chết, một số bang đã cấm sử dụng xăng pha chì. Nhìn thoáng qua, có vẻ như GM sẽ buộc phải đưa ra một giải pháp thay thế (trong đó có một số ít, bao gồm cả rượu etylic, mặc dù vì loại này không thể được cấp bằng sáng chế nên triển vọng sinh lợi

cũng kém hơn đáng kể). Nhưng sau đó, trong một màn trình diễn phi thường, nhà phát minh Thomas Midgley đã tổ chức một cuộc họp báo, trong đó ông rửa tay trong dung dịch chì tetraethyl và dành một phút để hít khói của nó để chứng minh rằng không có tác dụng phụ nào. Đó là một màn kịch câm kỳ lạ, đặc biệt là vì các nhà báo chứng kiến nó không hề hay biết, Midgley vừa trải qua một thời gian ở Florida để hồi phục sau khi bị nhiễm độc chì. fn2

GM và các luật sư của họ cho rằng những người đàn ông thiệt mạng chắc chắn đã trở thành nạn nhân của sự sơ suất của chính họ và lập luận ủng hộ sự tiến bộ trong việc chống lại động cơ kêu lạch cạch, kém hiệu quả. Đây là thời kỳ Roaring Twenties, nơi mà mọi thứ đều diễn ra, và các lệnh cấm ở từng bang đều bị thu hồi và thời đại xăng pha chì bắt đầu.

Nhưng không có lượng chì an toàn, dù ở mức độ vi mô. Chất này có thể tích tụ theo thời gian trong não, xương và phổi của bất kỳ ai tiếp xúc với nó. Suy giảm chì có nghĩa là cả thế hệ những người hít phải khói này có chỉ số IQ thấp hơn so với trường hợp khác. Thậm chí còn có những nghiên cứu hấp dẫn cho thấy mối tương quan giữa xăng pha chì và hành vi bạo lực.

Chỉ đến những năm 1980, Mỹ mới chính thức cấm chì trong xăng. Rốt cuộc, không có gì có thể ngăn cản các nhà tinh chế tạo ra loại xăng có thể sử dụng được mà không cần chì bằng cách sử dụng một số thủ thuật thông minh mà họ đã áp dụng hiệu quả vào 40 năm trước trong cuộc chiến. Tuy nhiên, nhiều hạt chì thải ra từ ống xả ô tô trong hơn nửa thập kỷ. thế kỷ vẫn còn nằm đó trong đất và bụi bẩn của các thành phố trên khắp thế giới, một tàn tích vô hình của một chương khốn khổ trong lịch sử lọc dầu.

Vì đây là những câu chuyện mà mọi người liên tưởng nhiều nhất đến các nhà máy lọc dầu - những câu chuyện về ô nhiễm, nếu không phải từ chì thì từ benzen hoặc các chất độc khác được tạo ra ở những địa điểm này - có lẽ không có gì ngạc nhiên khi chúng trở nên lỗi thời đến vậy. Ngay cả các tập đoàn dầu mỏ lớn cũng đang bán tháo nhiều nhà máy lọc dầu của họ trước xu hướng mới về ô tô điện và nhiên liệu thay thế hydro. Quan điểm thông thường cho rằng những nơi như thế này sẽ trở thành 'tài sản mắc kẹt', bị bỏ lại khi thế giới tiếp tục phát triển.

Nhưng có một tầm nhìn khác đang được gợi lên ở những nơi như Wesseling. Sau khi kết thúc chiến tranh trong đống đổ nát rối rắm, nơi này được tái tạo để lọc dầu thay vì than. Wesseling đã xây dựng lại các đường ống và xi lanh của mình trên nền tảng cũ kỹ, khó hiểu. Mỗi lần khai quật một khu vực mới, họ lại tìm thấy những quả bom chưa nổ từ cuộc tấn công dầu mỏ. Trong một thời gian, họ đã tạo ra amoniac bằng quy trình Haber–Bosch. Một nhà máy bắt đầu cuộc đời sản xuất hydrocarbon để giết người bắt đầu sử dụng hydrocarbon để nuôi sống con người. Đến những năm 1950, Wesseling một lần nữa sản xuất nhiên liệu hàng không, nhưng lần này là hết dầu thô và lần này là cho các máy bay chở khách bay từ Frankfurt. Vào những năm 2000, đây là một trong những nhà máy lọc dầu phức tạp nhất ở châu Âu.

Nhưng khi tôi đến thăm thì mọi thứ lại thay đổi. Đến năm 2025 các đường ống dẫn dầu thô tới nơi này sẽ bị đóng. Wesseling sẽ bắt đầu sản xuất nhiên liệu từ các nguồn thay thế xanh. Thực vật, dầu thực vật, rác thải đô thị và thậm chí cả phân bò sẽ thay thế dòng dầu thô nhẹ, ngọt của Nigeria.

Khi chúng tôi đi trên những con đường dài chia đôi địa điểm, Marco chỉ về phía một dãy xe tăng màu xanh lá cây được xây dọc theo bức tường gạch. Chúng trông rất giống tàn tích của chiến tranh, và chắc chắn rằng chúng là một trong số ít những bộ phận còn sót lại của chiếc máy bay Đức Quốc xã đầu tiên. thực vật. Ngày xửa ngày xưa, những chiếc xe tăng đó giúp tạo ra nhiên liệu từ than. Sau đó, họ giúp chế tạo nó từ dầu thô. Bây giờ chúng đang được tái sử dụng để chứa hydro xanh, được tạo ra tại một dãy máy điện phân ngay gần đó.

Đó là một kế hoạch đầy tham vọng, chưa được thử nghiệm – có lẽ là quá tham vọng. Và đây chỉ là một nhà máy lọc dầu; Điều đáng chú ý là địa điểm khác của Shell ở phía bên kia sông Rhine sẽ tiếp tục đốt và lọc dầu thô trong nhiều năm nữa. Tuy nhiên: đó là một ý tưởng quyến rũ rằng trang web này, nơi mọi ngóc ngách đều chứa đựng những lời nhắc nhở về một lịch sử không ai thích thảo luận, có thể sớm trở thành một cái nhìn thoáng qua về tương lai.

15
Mọi thứ

Có một câu chuyện xưa đôi khi người ta kể về John D. Rockefeller, người đã xây dựng nên đế chế Standard Oil trong những ngày đầu của dầu thô. Một ngày nọ, anh đang nhìn ra một trong nhiều nhà máy lọc dầu của mình thì nhận thấy ngọn lửa bùng lên từ một trong những ống khói.
'Cái gì đang cháy vậy?' anh hỏi một trong những trung úy của mình.
Lời giải thích đưa ra rằng đó là sản phẩm phụ của quá trình tinh chế. Khi họ chưng cất và tách từng phần dầu thô, họ luôn thu được những hợp chất nhất định không có thị trường. Cái này được gọi là khí ethylene.
“Tôi không tin vào việc lãng phí bất cứ thứ gì,” Rockefeller ngắt lời. 'Tìm ra cách nào đó để làm với nó!' [1]
Câu chuyện gần như chắc chắn là ngụy tạo, nhưng đó là một giai thoại hữu ích nên ghi nhớ trong đầu bạn khi chúng ta dành chút thời gian để suy ngẫm về thế giới hóa dầu kỳ lạ, tuyệt vời và đôi khi đáng lo ngại. Vì câu chuyện về dầu thô gắn liền với câu chuyện về thời đại tiêu dùng hiện đại.
Càng nhiều nhà máy dầu như Wesseling tinh chế, chúng càng có nhiều sản phẩm phụ để bán cho các mục đích sử dụng khác, chủ yếu là nhựa, dược phẩm, phân bón và toàn bộ các sản phẩm hóa dầu khác. Việc những sản phẩm này trở nên rẻ, dùng một lần và phổ biến chính là *do* lượng dầu đáng kinh ngạc được xử lý bởi các nhà máy lọc dầu, chủ yếu là cho xăng và dầu diesel. Khi mọi người nói về việc ô tô đã thay đổi thế giới như thế nào, họ luôn đề cập đến ý nghĩa của nó đối với sự độc lập cá nhân, đối với việc vận chuyển hàng hóa và khả năng di chuyển, nhưng đây mới chỉ là một nửa câu chuyện. Bởi vì, từng thùng một, các nhà máy lọc dầu và những người lái xe ô tô mua xăng của họ hoàn toàn đang cung cấp nhiên liệu cho một lĩnh vực khác.
Phần lớn hydrocarbon vẫn tồn tại trong thùng chứa của các phương tiện giao thông và hầu hết khí tự nhiên được sử dụng để tạo ra điện

và nhiệt. Tuy nhiên, 10% còn lại – sản phẩm phụ của quá trình lọc dầu và khí đốt – đóng một vai trò không cân xứng trong cuộc sống của chúng ta.

Những sản phẩm này giúp chúng ta mặc quần áo và nuôi sống chúng ta. Chúng giúp chúng ta sạch sẽ và khỏe mạnh, đồng thời được đưa vào phần lớn các mặt hàng có sẵn để mua ngày nay. Chúng là một trong những sáng tạo mới nhất của con người mà chúng ta biết, tuy nhiên không thể tưởng tượng thế giới không có chúng. Chúng giúp chúng ta tiết kiệm năng lượng nhưng chúng được sản xuất từ nhiên liệu hóa thạch. Sạch nhưng bẩn, tầm thường nhưng phi thường, điều thú vị nhất về hóa dầu là hầu hết chúng ta dành rất ít thời gian để nghĩ về chúng. Nhưng họ ở *khắp mọi nơi* .

Nhựa, phân bón, bao bì và dược phẩm. Chất bảo quản và nhựa, sơn và chất kết dính, thuốc nhuộm và hương liệu. Nếu công việc của một nhà máy lọc dầu là phân hủy dầu thô thì công việc của ngành hóa dầu là tái tạo những phân tử đơn giản đó thành một số lượng sản phẩm chóng mặt - nhiều hơn những gì chúng ta có thể đề cập riêng lẻ ở đây. Nhưng để hiểu cuộc sống của chúng ta gắn bó như thế nào với những thứ phát sinh từ các hồ chứa dầu khí dưới lòng đất ở Mỹ, Qatar, Ả Rập Saudi và hơn thế nữa, chúng ta cần phải bắt đầu hoàn toàn ở một nơi khác.

Sự thật về cà chua

Hãy hình dung một quả cà chua bi đỏ mọng, mới hái từ cây nho. Nó chín hoàn hảo và cực kỳ hấp dẫn. Da nó săn chắc lấp lánh với những giọt ẩm gợi cảm. Khi bạn cắn một miếng, nó sẽ bùng nổ trong miệng bạn với hương vị bùng nổ mãnh liệt, ngọt ngào và giàu vị umami một cách thú vị. Có trải nghiệm nào khác đưa bạn đến gần với thiên nhiên hơn là ăn sản phẩm sống trực tiếp từ đất không?

Chà… điều này thật khó xử. Bởi vì những gì bạn vừa ăn, thưởng thức và thưởng thức thực chất là thành quả của nhiên liệu hóa thạch. Những loại đường và hương vị đó chứa các nguyên tử bắt đầu cuộc sống của chúng như một phần của phân tử metan – khí tự nhiên – được một công ty năng lượng bơm từ dưới lòng đất lên. Và điều tương tự cũng thường đúng với dưa chuột, hạt tiêu hoặc rau diếp.

Phần lớn những gì chúng ta ăn ngày nay, bằng cách này hay cách khác, là sản phẩm từ nhiên liệu hóa thạch. Điều này hiếm khi được đề cập trên bao bì thực phẩm, trong sách dạy nấu ăn hoặc trên kệ siêu thị bởi vì cũng như rất nhiều thứ khác trong Thế giới Vật chất, không ai muốn nghĩ về điều này. Nhưng khi bạn dành một chút thời gian để suy ngẫm xem quả cà chua này đã ra đời như thế nào, di sản thực sự của nó sẽ trở nên rõ ràng hơn.

Ngày nay, tỷ lệ cà chua trên thế giới ngày càng tăng không được trồng ngoài đất mà ở trong nhà kính. Nông nghiệp môi trường được kiểm soát, như đôi khi được gọi, được nhiều người coi là tương lai cho việc trồng trọt của chúng ta. Với dân số thế giới dự kiến sẽ vượt 10 tỷ người vào cuối thế kỷ này, chúng ta sẽ phải sản xuất nhiều lương thực hơn trong bốn thập kỷ tới so với lượng lương thực mà tất cả nông dân đã sản xuất trong 8.000 năm qua. Và với áp lực ngày càng lớn đối với hệ thống nước ngọt và đất đai ngày càng quý giá, loại hình canh tác này có một số điểm hấp dẫn quan trọng. [2]

Trồng cây bên trong thay vì bên ngoài, trong các nhà kính lớn hoặc thậm chí các trang trại thẳng đứng với ánh sáng nhân tạo, có nghĩa là một mẫu Anh có thể mang lại năng suất gấp 400 lần những gì bạn thu được từ một cánh đồng thông thường. Nông dân không còn cần phải bị bắt làm con tin trước những thay đổi thất thường của thời tiết hoặc chất lượng đất: với khí hậu được điều khiển bằng máy tính và khả năng trồng trọt trong chất nền thủy canh được truyền vào chỉ với lượng chất dinh dưỡng phù hợp, bạn có thể thực hiện việc này ít nhiều ở bất cứ đâu - kể cả khu vực thành thị, nghĩa là không cần vận chuyển tốn kém và bẩn thỉu. Bạn sử dụng ít nước hơn đáng kể trên đường đi và vì cây trồng của bạn đang phát triển bên trong nên bạn không cần phải phun nhiều phân bón và ít cần dùng thuốc trừ sâu khó chịu.

Ở Hà Lan, nơi tiên phong phát triển loại hình nông nghiệp này, các nhà kính có diện tích bằng Paris và đã giúp đất nước có khí hậu không mấy thuận lợi này trở thành nước xuất khẩu thực phẩm lớn thứ hai thế giới. Bay qua nó vào ban đêm và bạn sẽ thấy những tấm kính rộng lớn được chiếu sáng bằng đèn LED, vì thực vật bên trong được tiếp xúc thêm ánh sáng để mở rộng cửa sổ quang hợp. [3]

Nhà kính tại Valley Grown Nurseries, một trong những nhà sản xuất cà chua lớn nhất Vương quốc Anh, nằm ở Thung lũng Lea ngay bên ngoài London, được thiết kế theo thiết kế của Hà Lan. Khi tôi đến thăm, đó là một trong những ngày nhiều mây khi mùa xuân chưa nhường chỗ cho mùa hè và tôi đến nơi và thấy người quản lý, Nof Nicastro, đang nhìn lên bầu trời với vẻ không hài lòng. Trừ khi bạn sử dụng bóng đèn LED – và Nof thì không – ánh sáng là thứ bạn không thể kiểm soát ở những nơi này; mỗi ngày buồn tẻ sẽ khiến cây trồng tụt lại vài điểm phần trăm.

Bên trong nhà kính hình hang, các ống kim loại nóng chạy dọc sàn nhà, giữ nhiệt độ không đổi ở mức 20°C. Những dây leo cà chua treo trên máng xối cách mặt đất vài mét thành hàng dài, trải dài về phía xa. Rễ của chúng không được chôn trong đất mà trong len khoáng – những sợi đá bazan mịn – thường xuyên được cung cấp dung dịch nước và phân bón. Có lẽ điều đáng ngạc nhiên là ong vo ve khắp nơi vì chúng ta vẫn chưa khám phá ra thứ gì khác có thể vượt trội hơn thế giới tự nhiên trong việc thụ phấn cho cây. Một đàn liên tục bay vào và bay ra khỏi các hộp các tông ở cuối mỗi hàng. Nof ngắt một quả cà chua khỏi cành và đưa cho Tôi. Nó có màu đỏ rực rỡ và giống như thứ bạn vừa nếm trong trí tưởng tượng của mình: rực rỡ. Hương vị của nhiên liệu hóa thạch.

Manh mối đầu tiên về di sản đó được tìm thấy trong một nhà kho tôn cạnh nhà kính. Bên trong là một chiếc nồi hơi khổng lồ, có kích thước bằng một chiếc xe buýt. Đây là trung tâm của hoạt động: nguồn nhiệt trong những đường ống chạy qua nhà kính.

Chúng ta có xu hướng không nghĩ nông nghiệp là một hình thức chuyển giao năng lượng, nhưng cuối cùng thì nó chính là như vậy. Khi nông dân trồng lúa mì, ngô hoặc lúa ngoài đồng hoặc ruộng của họ, họ đang chuyển đổi năng lượng mặt trời thành lượng calo ăn được. Khi chúng ta ăn thịt, chúng ta đang tiêu thụ lượng calo mà bò hoặc gà đã từng ăn vào khi nó ăn gạo hoặc ngô đó. Bạn có thể tìm ra mối liên hệ trực tiếp từ những gì bạn ăn tới tia nắng mặt trời. Hay đúng hơn là bạn có thể.

Vì câu chuyện về nông nghiệp hiện đại thực sự là về một điều gì đó lớn lao hơn: chúng ta thay thế các dạng năng lượng tự nhiên bằng nhiên liệu hóa thạch. Những nhà kính này là một ví dụ sinh động:

sưởi ấm bằng khí đốt thay thế hơi ấm của mặt trời. Tuy nhiên, đây mới chỉ là bước khởi đầu, bây giờ hãy xem xét cách chúng ta tạo ra phân bón được nhỏ giọt vào giá thể chứa rễ cà chua.
Trở lại những ngày đầu của quy trình Haber–Bosch, BASF đã sử dụng than để tạo ra lượng hydro cần thiết để cố định nitơ trong không khí, nhưng ngày nay các công ty phân bón luôn sử dụng khí tự nhiên để thay thế: khí tự nhiên để cung cấp năng lượng và khí tự nhiên làm nguồn cung cấp năng lượng. nguyên liệu hóa học để cung cấp hydro. Những quả cà chua này không chỉ được làm ấm bằng khí tự nhiên mà còn được nuôi dưỡng bằng sản phẩm khí tự nhiên.
Đây không chỉ là câu chuyện về cà chua. Đó là một câu chuyện về *tất cả các loại thực phẩm* . Phần lớn cây trồng trên thế giới được duy trì nhờ phân bón nitơ được tạo ra từ khí tự nhiên. Phần lớn động vật trên thế giới được nuôi bằng thức ăn được duy trì bằng phân bón được tạo ra từ khí tự nhiên. Nếu phân bón là một trong những chất quan trọng nhất trên thế giới – và nếu không có chúng thì điều đó là không thể để hỗ trợ gần một nửa dân số toàn cầu thì có thể nói là như vậy - thì khí đốt cũng vậy. Chỉ một phần nhỏ – khoảng hơn 2% – sản lượng khí tự nhiên hàng năm của thế giới được sử dụng để sản xuất phân bón, nhưng đây là những phân tử vô cùng quan trọng.
Sự phụ thuộc của ngành nông nghiệp vào nhiên liệu hóa thạch cũng không dừng lại ở đó. Trở lại nhà kính, Nof cúi xuống và chỉ cho tôi một ống nhựa đục lỗ màu trắng chạy bên dưới những hàng dây leo. Có vẻ như đường ống đang thải ra một dòng khí carbon dioxide đậm đặc. Đây là một sự đổi mới khác của Hà Lan. Vì carbon dioxide, cùng với ánh sáng, là đầu vào chính của quá trình quang hợp, bạn có thể tăng tốc đáng kể tốc độ tăng trưởng bằng cách tăng hàm lượng CO_2 bên trong nhà kính từ mức trung bình trong khí quyển chỉ hơn 400 phần triệu lên 800ppm hoặc thậm chí 1.000ppm. Và lượng $CO_{2\ đó}$ đến từ đâu? Nó được cô lập khỏi ống khói của lò hơi đốt gas và bơm thẳng vào nhà kính.
Đó là một hệ thống được mài giũa một cách tinh xảo, một hệ thống có nghĩa là kiểu canh tác này không chỉ sử dụng ít đất hơn; nó sử dụng ít phân bón hơn (vì dung dịch không được hấp thụ sẽ được tái sử dụng trong quá trình tưới) và nó sử dụng ít hóa chất hơn so với canh tác thông thường trong khi tạo ra nhiều sản phẩm hơn. Nếu bạn là

một nhà kinh tế học theo đuổi một ví dụ về năng suất, bạn khó có thể làm tốt hơn. Tuy nhiên, chất diệp lục bên trong những quả cà chua này chứa carbon từ khí tự nhiên, hydro từ khí tự nhiên và nitơ từ phân bón (được sản xuất bằng khí tự nhiên). Chúng được *làm* từ nhiên liệu hóa thạch.

Kết quả là, một kg cà chua trong nhà kính tạo ra tới 3 kg lượng khí thải carbon. Một số người trồng trọt đang thử nghiệm sử dụng các nguồn năng lượng thay thế, nhưng đại đa số các nhà kính đều sử dụng khí đốt. Và vì hầu hết người tiêu dùng không muốn chi nhiều hơn cho cà chua, và do đó họ ít hiểu biết về cách chúng thực sự được trồng, nên điều đó hoàn toàn phù hợp với tất cả mọi người. [4]

Nhưng thỉnh thoảng lại có những nếp nhăn. Vào năm 2022, khi giá khí đốt tăng vọt sau cuộc xâm lược Ukraine của Nga, một số người trồng trọt đã hoàn toàn chọn không tham gia. Đột nhiên, các nhà kính trở nên trống rỗng, cà chua khan hiếm và giá thực phẩm tăng khắp châu Âu - phần lớn là do thiếu khí đốt tự nhiên. Ngay cả những người trồng cà chua ở Tây Ban Nha và Ý, những người có xu hướng không trồng cà chua trong nhà, cũng bị ảnh hưởng bởi sự gia tăng chi phí phân bón và nhiên liệu diesel trên xe tải vận chuyển sản phẩm của họ. Vaclav Smil đã tính toán rằng mỗi quả cà chua ở vùng này tiêu tốn năng lượng khoảng 5 thìa dầu diesel. [5]

Đây cũng không phải là cách duy nhất mà những quả cà chua này dựa vào nhiên liệu hóa thạch. Nhìn vào bản đồ vệ tinh xung quanh Almería ở phía nam Tây Ban Nha, bạn sẽ thấy hàng trăm dặm vuông được bao phủ bởi màu trắng. Tất nhiên, đây không phải là tuyết mà là những nhà kính nơi trồng phần lớn trái cây và rau quả của Châu Âu. Tuy nhiên, ở đây chúng không được làm từ thủy tinh mà từ nhựa. Đặc biệt hơn, nhựa quan trọng nhất thế giới.

Hành tinh nhựa

Vật liệu tổng hợp quan trọng nhất trên thế giới được phát minh một cách tình cờ. Trong thế giới nhựa, điều này xảy ra không có gì đặc biệt bất thường: gần như mọi biến thể chính đều được phát hiện ít nhiều một cách tình cờ. Nhưng điều làm nên sự khác biệt của vật liệu tổng hợp quan trọng *nhất* thế giới là nó được phát minh một cách tình cờ không phải một hay hai lần mà là ba lần.

Phát hiện đầu tiên xảy ra vào năm 1894 khi một nhà hóa học người Đức tên là Hans von Pechmann đang thử nghiệm với một loại khí nổ có tên là diazomethane. Ông nhận thấy nó bị phân hủy thành một loại bột màu trắng chứa hydro và cacbon mà ông gọi là polymetylen. Anh không nghĩ gì thêm về điều đó nữa. [6]

Sau đó vào năm 1930, một vài nhà nghiên cứu tại Đại học Illinois đã nghiên cứu các hợp chất hữu cơ của asen. Một lần nữa, thí nghiệm của họ để lại một chất cặn màu trắng như sáp kỳ lạ. "Chất rắn này," họ viết, "chưa được nghiên cứu sâu hơn." Và đó là điều đó.

Khám phá cuối cùng – khám phá thực sự quan trọng – xảy ra vào năm 1933 tại phòng thí nghiệm của tập đoàn hóa chất khổng lồ ICI của Anh. Vụ việc xảy ra ở Northwich - cũng chính là địa điểm mà ngày nay tro soda và natri bicarbonate vẫn đang được sản xuất từ nước muối mặn Cheshire. Hai nhà hóa học ICI, Eric Fawcett và Reginald Gibson, đang nghiên cứu các phản ứng hóa học ở áp suất cao, cùng loại kỹ thuật đã giúp Haber và Bosch cố định nitơ từ không khí và giúp Friedrich Bergius biến than thành dầu. Một ngày tháng Ba, họ bắt đầu thử nghiệm với ethylene, loại khí đó được đốt tại nhà máy lọc dầu Standard Oil trong câu chuyện tận thế của Rockefeller. Khi họ đập nó cùng với một loại khí khác, benzaldehyde, ở áp suất 1.400 atm, họ thu được một "chất rắn dạng sáp màu trắng" trên ống phản ứng. Họ đã (tái) phát hiện ra polymetylen, ngày nay được đặt tên là polyetylen, hay ở Anh nó thường được gọi là polythene. [7]

Có rất nhiều loại nhựa khác nhau - thực tế là có hàng nghìn loại - nhưng rất ít loại linh hoạt và hữu ích như polyetylen. Nó có thể được kéo thành các loại có trọng lượng phân tử cực cao, cứng hơn thép hoặc thành tấm có mật độ thấp, mềm như sáp. Độ dẻo đáng kinh ngạc của nó có nghĩa là nó sẽ có xu hướng giãn ra hơn là gãy. Chống nước và bền, chịu nhiệt trên nhiệt độ sôi của nước nhưng vẫn có thể tái chế, polyetylen có thể được xâu thành sợi đủ chắc để làm chệch hướng đạn; đặc tính không dẫn điện của nó có nghĩa là nó là chất cách điện hoàn hảo.

Nhiều ứng dụng trong số này chỉ được phát hiện nhiều thập kỷ sau khi polyetylen được phát minh, nhưng tiềm năng cách điện của nó là thứ ngay lập tức được ICI chú ý đến. Suy cho cùng, đây là thời kỳ đầu của truyền thông quốc tế, nơi đồng Dây điện được đặt khắp nơi cho

đường dây điện thoại và đường dây điện, nhưng tất cả chúng đều cần các lớp bảo vệ, cách điện xung quanh. Vào thời điểm đó, vật liệu thích hợp nhất là gutta-percha, một loại mủ cao su không dẫn điện được làm từ nhựa cây được tìm thấy ở Malaysia. Dây điện sẽ được cách điện bằng gutta-percha và sau đó được bọc trong lớp vỏ chì cứng. Nhưng nguồn cung và chi phí không thể theo kịp nhu cầu về hệ thống dây điện.
Về lý thuyết, polyetylen là chất thay thế hoàn hảo. Hóa ra, vấn đề duy nhất là việc thực hiện nó. Sau khi phát hiện ra chất này, Fawcett và Gibson quay lại phòng thí nghiệm một hoặc hai ngày sau đó và cố gắng thực hiện lại thí nghiệm. Có một vụ nổ lớn làm nổ tung thiết bị của họ. Họ tiếp tục cắm điện và phòng thí nghiệm tiếp tục nổ tung cho đến khi, sau quá nhiều vụ cháy, công việc tiếp theo về ethylene bị đình chỉ, chờ mua thiết bị cứng hơn.
Sau này hóa ra thủ thuật này là chế tạo buồng phản ứng từ một loại thép ít giòn hơn và dẻo hơn một chút: điều đó sẽ cho phép linh hoạt một chút khi đối mặt với áp suất cực lớn cần thiết cho phản ứng. Cuối cùng, vào cuối những năm 1930, ICI đã nghĩ ra một hệ thống sản xuất nhựa hàng loạt và những khối polyetylen chuyên dụng đầu tiên đã được sản xuất. Khi chiến tranh nổ ra ngay sau đó, chất kỳ diệu này nhanh chóng được sử dụng cho nỗ lực quốc gia. Sau khi Nhật Bản nắm quyền kiểm soát Malaysia và tất cả các đồn điền cao su ở nước này, đột nhiên polyetylen có tầm quan trọng đặc biệt. Sản xuất rơi vào tình trạng quá tải; Cáp điện thoại cách điện bằng polyetylen được lắp đặt dọc eo biển Manche vào năm 1944 để giúp duy trì liên lạc với quân đội Đồng minh sau cuộc xâm lược D-Day. Nhưng chính vai trò của chất này trong việc triển khai radar mới được cho là có đóng góp lớn nhất cho cuộc chiến. số 8
Vì polyetylen không chỉ có khả năng chống điện mà còn cực kỳ nhẹ nên Lực lượng Không quân Hoàng gia có thể sử dụng nó để giảm trọng lượng. hệ thống radar của nó vừa đủ để đặt chúng bên trong máy bay của nó. Radar trên không đã mang lại cho quân Đồng minh lợi thế hết sức quan trọng trong Trận chiến Đại Tây Dương, giúp phát hiện tàu và tàu ngầm của đối phương để tránh và tấn công. 9 'Sự sẵn có của polythene', Ngài Robert Watson-Watt, người phát hiện ra radar, nói, 'đã biến đổi thiết kế, lắp đặt, lắp đặt và bảo trì radar trên

không từ dạng gần như không thể hòa tan thành dạng có thể quản lý thoải mái.'
Gần như mỗi tấn polyetylen được sản xuất cho đến năm 1945 đều được đưa vào các dây cáp radar này, nhưng khi chiến tranh kết thúc, ICI đột ngột bị dư thừa nhựa nên phải đi tìm người mua. Điều này sẽ sớm trở thành một chủ đề thường xuyên. Đồ chơi, hạt, đồ trang sức bằng nhựa giá rẻ và những đồ lặt vặt khác như vậy thường tồn tại không phải do nhu cầu của người tiêu dùng mà là do nguồn cung dư thừa. [10]
Có lẽ câu chuyện hay nhất như vậy bắt nguồn từ những năm 1950 khi Phillips Petroleum – công ty mà Nhà máy lọc dầu Humber hiện sản xuất than cốc để trở thành than chì trong pin điện thoại thông minh của bạn – đang thử nghiệm một loại polyetylen bán cứng. Nó phải vật lộn để có được công thức đúng, tạo ra hết mẻ này đến mẻ khác. Ngay khi có vẻ như thí nghiệm có thể gây ra khó khăn tài chính nghiêm trọng, toàn bộ số hàng tồn kho đã được mua lại bởi một công ty tên là Wham-O, công ty này sử dụng nó để sản xuất một món đồ chơi mới: Hula Hoop. Cơn sốt Hula Hoop của những năm 60 và 70 hóa ra được tạo ra từ một sản phẩm phụ của tổ hợp công nghiệp-nhựa. [11]
Tình trạng dư thừa polyetylen sau chiến tranh của ICI cuối cùng đã được giải quyết khi họ bắt đầu sản xuất nó thành màng dài, mỏng, trong suốt và bán cho các nhà sản xuất thực phẩm. Polyethylene là sản phẩm đóng gói hoàn hảo. Bánh mì cắt lát, rau, thịt và pho mát – tất cả đều để được lâu hơn khi được bọc trong polyetylen. Một nghiên cứu cho thấy chuối không được đóng gói trên kệ sẽ bị thối trong vòng 18 ngày trong khi những loại được bọc bằng polyetylen sẽ dùng được hơn một tháng. Loại nhựa này cuối cùng đã được Cơ quan Quản lý Thực phẩm và Dược phẩm Hoa Kỳ (FDA) phê duyệt là 'vật liệu tiếp xúc với thực phẩm' vì họ phát hiện ra rằng các thành phần của nó sẽ không thấm vào thực phẩm. Và thế là bắt đầu một sự gia tăng chóng mặt trong sản xuất.
Ngày nay, polyethylene đã trở thành loại nhựa được sử dụng rộng rãi nhất trên thế giới. Cứ sáu giây một lần, ở Châu Âu chúng tôi sản xuất đủ để quấn quanh Tháp Eiffel từ đầu đến chân. Cứ sáu giây một lần! Chúng tôi sản xuất khoảng 100 triệu tấn mỗi năm – nhiều hơn tổng sản lượng đồng và nhôm toàn cầu cộng lại. Phần lớn trong số đó là

túi nhựa - dù tốt hay xấu thì nó cũng là biểu tượng nhất trong tất cả các vật thể polyme - nhưng đó mới chỉ là khởi đầu của nó. Bên cạnh polyetylen mật độ thấp mà chúng tôi sản xuất thành túi mua sắm và màng bọc thực phẩm, còn có loại có mật độ rất thấp để trở thành túi đông lạnh và phiên bản tuyến tính mật độ thấp mà từ đó chúng tôi tạo ra màng bọc bong bóng và Tupperware. Có polyetylen mật độ cao, trở thành chai đựng chất tẩy rửa và đồ chơi bằng nhựa. Nếu chúng không phải là đồng (hoặc, nếu Chúa muốn, là chì), thì đường ống nước trong nhà bạn có thể sẽ được làm từ polyetylen liên kết ngang. Nó thậm chí còn đủ chắc chắn, ở dạng trọng lượng phân tử cực cao, để đóng vai trò là bộ phận khớp nối của thiết bị thay thế hông hoặc đầu gối hoặc vật liệu cho áo khoác chống đạn. [12]

Bí quyết thành công của polyethylene nằm ở cấu trúc phân tử của nó. Giống như tất cả các loại nhựa khác (và một số chất tự nhiên bao gồm cả protein bên trong cơ bắp hoặc DNA của chúng ta), nó là một loại polymer - một phân tử rất lớn bao gồm nhiều nguyên tử hơn các chất đơn giản khác như nước, rượu hoặc silica. Trong trường hợp polyetylen, các phân tử này là những chuỗi hydro và carbon dài đáng kinh ngạc.

Cách tốt nhất để hình dung những gì đang diễn ra ở cấp độ phân tử ở đây là nghĩ về một bát mì spaghetti. Nếu bạn cắm nĩa vào mì ống và kéo nó lên, bạn có thể sẽ mắc bẫy cả một miếng mì. một loạt các sợi khác khi chúng quấn vào nhau. Về bản chất, đây là cách các polyme như polyetylen có được độ bền: các sợi càng dài thì chúng càng vướng víu và càng khó tách chúng ra khỏi nhau. Hãy suy nghĩ về điều này: nếu bạn cắt sợi mì spaghetti thành những đoạn ngắn như một số người vẫn làm, thì đột nhiên chúng không còn dính vào nhau nữa. [13]

Bây giờ hãy tưởng tượng những sợi này không dài 25–30 cm như trường hợp thường thấy ở hầu hết các gói spaghetti mà dài khoảng 25 *mét* . Hãy tưởng tượng việc tách sợi này khỏi sợi khác sẽ khó khăn đến mức nào. Đó là những gì đang xảy ra ở cấp độ nguyên tử với polyetylen khi nó đang hình thành - chỉ có điều các sợi rất nhỏ, chúng chỉ có chiều ngang vài nguyên tử và chiều dài vài chục nghìn nguyên tử. Và bằng cách thử nghiệm cấu trúc phân tử này, các nhà thiết kế polyme có thể thay đổi độ bền và hoạt động của nó rất nhiều. Hãy gói các chuỗi lại gần nhau để chúng kết tinh lại và cuối cùng bạn có thể có

một chai nhựa cứng; đặt chúng cách xa nhau hơn, với ít tinh thể nhựa siêu nhỏ kết hợp chúng lại với nhau hơn và bạn có một cái chai để ép nước sốt cà chua ra. Thay đổi độ dài và áp dụng điều tương tự: phiên bản áo chống đạn làm từ polyetylen (trọng lượng phân tử cực cao) bao gồm các sợi - nếu chúng có chiều rộng bằng sợi mì spaghetti - sẽ dài khoảng 250 mét.

Polyethylene không phải là loại nhựa duy nhất – thực tế nó là một trong năm họ polymer chính do con người tạo ra. Có polystyrene, nổi tiếng với bọt đóng gói phồng nhưng cũng có khả năng đúc thành nhựa cứng, trong. Có nhựa vinyl – polyvinyl clorua – từ đó bạn có thể làm ống cứng hoặc rèm tắm mềm. Có loại nylon, nổi tiếng với những chiếc tất mềm mượt nhưng cũng dễ dàng đúc vào những chiếc vít máy cứng. Có polypropylen, đủ dẻo để dùng làm nắp chai lật nhưng đủ cứng để tạo thành đồ nội thất. Ngoài ra còn có các vật liệu nhiệt rắn như nhựa epoxy, quen thuộc nhất với chúng ta là keo nhưng quan trọng hơn nữa là ma trận liên kết giúp sợi carbon và sợi thủy tinh tạo thành vật liệu siêu cứng. Nhựa nhiệt rắn phải được nung nóng, xử lý để có dạng hóa học trong khi nhựa nhiệt dẻo, vốn bao gồm hầu hết các loại nhựa ngày nay, thì không. Nó cũng không dừng lại ở đó: có 15 loại polyme tổng hợp khác, cũng như hàng chục nghìn loại phụ – tất cả các vật liệu mà thế giới thực sự chưa từng thấy trước đây.

Trong nhiều thiên niên kỷ, loài người đã bị ràng buộc bởi đặc tính của các chất do thiên nhiên ban tặng. Chúng ta có thể đốt, đập, nấu chảy và tinh chế những gì chúng ta tìm thấy trong lòng đất, điều chỉnh chúng cho phù hợp với nhu cầu của chúng ta. Nhưng với nhựa, chúng ta có thể tiến thêm một bước nữa: chúng ta có thể điều chỉnh vật liệu thay vì uốn cong chúng theo mục đích sử dụng. Và trong một thời gian, mọi người đều nhất trí rằng nhựa thực sự là một điều kỳ diệu. Chúng tôi không chỉ cải thiện thiên nhiên mà còn sử dụng polyme để giúp bảo vệ thiên nhiên. Loại nhựa đầu tiên, celluloid, được phát triển để thay thế ngà voi tự nhiên dùng làm bóng bi-a. Phát minh của nó vào những năm 1860 đã giúp cứu đàn voi châu Phi hoang dã khỏi nguy cơ tuyệt chủng gần như chắc chắn. Celluloid được nhuộm một cách nghệ thuật có thể thay thế cho lông đồi mồi tự nhiên, polyester có thể thay thế cho lông chồn. Nhựa có thể bảo vệ

các loài có nguy cơ tuyệt chủng giống như dầu hỏa đã bảo vệ quần thể cá nhà táng trên thế giới trong những ngày đầu của dầu mỏ.
Với bao bì nhựa, chúng ta không còn phải nung chảy nhiều cát thành thủy tinh hay chặt nhiều cây cối và biến chúng thành giấy và bìa. Vật liệu cách nhiệt bằng polyetylen đã giúp bảo vệ cây gutta-percha của Malaysia, chưa kể đến các vật liệu khác. Một báo cáo của Bell Labs vào những năm 1970 cho thấy nếu Mỹ tiếp tục bọc dây cáp điện thoại bằng chì thay vì polyetylen thì chỉ riêng việc sử dụng này đã tiêu thụ 4/5 tổng lượng chì sản xuất trong nước. [14]
Khi những năm bốn mươi và năm mươi nhường chỗ cho những năm sáu mươi và bảy mươi, dường như những điều kỳ diệu không có hồi kết. Các công ty hóa chất, được cung cấp bởi naphtha và ethylene từ các nhà máy lọc dầu và từ các nhà máy khí đốt, tạo ra ngày càng nhiều nhựa, cũng như các hóa chất và dược phẩm, có thể được thiết kế riêng từ các phân tử hydrocarbon. Trong khi việc sử dụng nhựa ngày càng phổ biến, hầu hết các vật liệu mới vẫn dựa trên năm dòng nhựa chính này, được phát hiện vào thời kỳ hoàng kim - những năm trước Thế chiến thứ hai. Chắc chắn đã có những bước đột phá, nhưng không có gì giống với những gì Fawcett và Gibson đã khám phá ra – hay đúng hơn là khám phá lại – tại Northwich.
Các phòng thí nghiệm ICI ở Cheshire đã đóng cửa từ nhiều năm trước - rất lâu trước khi công ty giải thể hoặc bán địa điểm này cho Tata Chemicals. Ngày nay không có biển báo hoặc điểm tham chiếu trên bản đồ; không có gì trên internet cung cấp bất kỳ manh mối nào về việc tòa nhà có tồn tại hay không - hoặc thực sự nó ở đâu. Rất ít chất đã thay đổi thế giới nhiều như chất này, nhưng có vẻ như đây là một khám phá quan trọng mà mọi người đang cố quên đi.
Vì vậy, vào một buổi sáng mùa đông se lạnh, tôi lái xe đến Northwich để xem liệu có thể tìm được phòng thí nghiệm cũ hay không. Tôi bắt chiếc A533 qua thị trấn và khi đi qua Winnington, ngay trước khi băng qua River Weaver, tôi phát hiện ra một tòa nhà gạch nâu đẹp đẽ ở bên phải mình. Những cửa sổ cao của nó được che bằng cửa chớp kim loại màu trắng, nhưng tôi nhận ra một đặc điểm mà tôi đã thấy trong một số bức ảnh cũ: hình tròn đặc biệt của một chiếc ô phương Đông bằng thạch cao phía trên mỗi cửa sổ.

Tôi đỗ xe trước tòa nhà. Có một vài camera an ninh và một tấm biển: 'Xin vui lòng rời khỏi cơ sở với một chút suy nghĩ cho cư dân địa phương'. Một tấm bảng mờ ở bên hông tòa nhà cho thấy nơi này từng là phòng tập thể dục trong thời gian ngắn; một người khác quảng cáo nó như một trung tâm bắn súng sơn trong nhà. Tuy nhiên, gần như chắc chắn đó là tòa nhà phù hợp, cho đến tận những chiếc đèn lồng theo phong cách Art Deco ở lối vào.
Tôi bước về phía cửa và nhìn thấy nó – một tấm bảng màu xanh ở góc:
Trong tòa nhà này, nơi đặt Phòng thí nghiệm Nghiên cứu Winnington của ICI cho đến năm 1995, RO Gibson và EW Fawcett đã phát hiện ra Polythene vào ngày 27 tháng 3 năm 1933. Một ứng dụng ban đầu quan trọng là trong việc phát triển RADAR. Polythene tiếp tục trở thành loại nhựa có trọng tải lớn nhất thế giới.
Đài tưởng niệm được cất giấu kín đáo đến mức bạn khó có thể nhận ra nó từ trên đường.
Một lúc sau, tôi gửi email cho Tata Chemicals để hỏi chuyện gì đã xảy ra với tòa nhà lịch sử này; nó được dùng vào việc gì hôm nay? Cuối cùng có câu trả lời: 'Bây giờ nó là phòng tắm hơi.'

Trong 13 năm qua, chúng tôi đã sản xuất nhiều nhựa hơn toàn bộ sản lượng của chúng tôi từ khi phát minh ra nó vào đầu thế kỷ 20 đến năm 2010. Trừ một số thời điểm suy thoái như đại dịch COVID-19 năm 2020 và cuộc khủng hoảng dầu mỏ vào đầu những năm 1970, sản lượng nhựa có xu hướng tiếp tục tăng theo cấp số nhân. Có rất ít dấu hiệu thuyết phục về sự chậm lại.
Ethylene, chất thải mà John D. Rockefeller được cho là đã phàn nàn khi chứng kiến nó bị đốt cháy tại một trong những nhà máy lọc dầu của mình, giờ đây đã trở thành nền tảng của một ngành hóa dầu mới khổng lồ. Nó được bơm vào những chiếc bánh quy khổng lồ có pháo sáng định kỳ thắp sáng bầu trời. Nhà máy ICI, nơi từng cung cấp polyetylen cho phần lớn thế giới, vẫn đang hoạt động, nằm dọc theo bờ sông Tees ở Wilton. Ngày nay, nó thuộc sở hữu của SABIC - chi nhánh hóa dầu của gã khổng lồ dầu mỏ Aramco của Saudi. Ngay cả khi người Saudi tiếp tục bơm dầu thô ra khỏi Ghawar, họ cũng vận hành nhà máy lịch sử cách đó hàng ngàn dặm, hít phải hydrocarbon

và thải ra hàng triệu viên nhựa nhỏ – những hạt nhựa đôi khi được gọi như vậy. Không ai thích nói về thực tế là một cơ sở ở Teesside vẫn sản xuất nhựa cho phần lớn túi xách của lục địa này.
Tuy nhiên, đó là một lời nhắc nhở rằng Châu Âu và Hoa Kỳ đã từng thống trị lĩnh vực này cho đến gần đây hơn những gì bạn có thể có. giả định. Sản xuất polyetylen là một công việc khó khăn và rất lâu sau khi Trung Quốc trở thành nhà sản xuất lớn nhất thế giới, nước này vẫn nhập khẩu phần lớn nhựa thô từ các địa điểm ở phương Tây. Nhưng kể từ năm 2010, điều đó đã bắt đầu thay đổi. Ngày nay, một phần ba nhựa thô của thế giới được sản xuất tại Trung Quốc, phần lớn được sản xuất từ than chứ không phải dầu hoặc khí đốt, như người Đức đã từng làm ở Wesseling nhiều năm trước. Ở đó, mối tình vẫn chưa chua chát.
Ở châu Âu này, thứ từng là vật liệu kỳ diệu giờ đây bị nghi ngờ và mất tinh thần. Những chất mà chúng tôi tạo ra đã giúp chúng tôi vượt qua nhu cầu về nguyên liệu thô truyền thống như kim loại và đá đã biến thành biểu tượng của Anthropocene. Ngoại trừ việc chúng chưa hề xuống cấp chút nào; đây đúng hơn là một vấn đề. Chúng vẫn còn ở rất nhiều với chúng ta, đôi khi có thể nhìn thấy được bằng mắt thường, đôi khi thì không. Có những hạt vi nhựa trong đại dương, những hạt vi nhựa trôi nổi khắp hầu hết các ngôi nhà của chúng ta mà không bị phát hiện, những hạt vi nhựa ngay cả ở những nơi không có người ở trên thế giới, ở trên núi cao, rải rác theo gió. Mỗi tháng đều có nghiên cứu mới về sự nguy hiểm của nhựa đối với động vật, con người và môi trường rộng lớn hơn.
Chúng ta đang biết rằng nhựa có thể truyền các hóa chất độc hại vào môi trường xung quanh, chúng có thể chứa vi khuẩn kháng kháng sinh và khi được nghiền thành quy mô nhựa nano, chúng thậm chí có thể đi qua màng sinh học, có thể vào não. Mặc dù thiệt hại đối với các loài sinh vật biển đôi khi bị phóng đại, nhưng có rất ít nghi ngờ về việc ô nhiễm nhựa đã lan rộng ở các vùng biển. Tỷ lệ các đại dương rải rác vi nhựa vẫn còn nhỏ, nhưng do chúng ta chỉ phát minh ra những vật liệu này cách đây vài thế hệ và với số lượng nhựa chúng ta đã sản xuất trong thập kỷ qua trở lên, điều này không đặc biệt yên tâm. [15]
Hiện nay, nhiều quốc gia đã cấm túi mua sắm bằng nhựa dùng một lần và các vật dụng khác như ống hút nhựa. Trong một số trường

hợp, những lệnh cấm này rất thiển cận: việc sản xuất túi giấy và ống hút có thể tạo ra lượng khí thải carbon nhiều hơn đáng kể so với việc sản xuất chúng. đối tác nhựa. Ống hút nhựa có thể được tái sử dụng nhiều lần trong khi ống hút giấy khó có thể hút được nhiều hơn một vài lần - như bất kỳ bậc cha mẹ nào có con nhỏ đều sẽ làm chứng. Một số polyme phân hủy sinh học thiếu độ bền và tính ổn định của nhựa truyền thống mà chúng được cho là sẽ thay thế; đôi khi chúng không xuống cấp như đã hứa. Họ đe dọa sẽ ngồi cạnh những thứ khác mà chúng ta vô tình vứt bỏ.

Và mặc dù có thể tái chế nhựa trên quy mô lớn, nhưng thách thức là trong khi một số loại nhựa hoàn toàn phù hợp để nấu chảy và đúc lại, thì một số loại khác thì không. Ví dụ, chai nước giải khát làm từ polyethylene terephthalate (PET) có thể dễ dàng tái tạo thành sợi polyester. Nhưng nếu thêm một loại nhựa khác vào quy trình tái chế, chẳng hạn như nhựa nhiệt rắn, thì những gì tạo ra sẽ hơi lộn xộn. Một lập luận về lý do tại sao tỷ lệ tái chế nhựa vẫn rất thấp (chỉ khoảng 25% ở châu Âu và 10% ở Mỹ, so với 80% đối với thép) là vì nó quá phức tạp, người tiêu dùng được yêu cầu phân biệt giữa bảy loại khác nhau. các loại nhựa (mã tái chế mà bạn đôi khi nhìn thấy trên chai) trước khi bỏ chúng vào đúng thùng. Lập luận còn lại là nguyên liệu thô, những hạt nhựa đó được sản xuất từ các nhà máy sản xuất bánh quy ethylene trên khắp thế giới, rẻ đến mức việc tái chế không mang lại nhiều ý nghĩa kinh tế. [16]

Có một điều trớ trêu ở đây: những loại nhựa này là sản phẩm của một ngành công nghiệp dầu mỏ rất hà khắc, quyết tâm không lãng phí dù chỉ một phần nhỏ nhất của thùng, đến mức biến từng giọt cuối cùng thành sản phẩm và lợi nhuận. Nó khuyến khích việc tạo ra các ngành công nghiệp và vật liệu hoàn toàn mới trong quá trình phát triển. Chúng ta bị nhấn chìm bởi đồ nhựa rẻ tiền và dồi dào đến mức chúng gần như vô giá trị và chỉ dùng một lần. Nhưng những gì các nhà máy lọc dầu cứu được khỏi việc trở thành chất thải cuối cùng lại trở thành chất thải: rác thải vứt trên bãi biển, đường sá, biển và bãi rác.

Phần tái bút: Đỉnh dầu

RAS TANURA, Ả Rập Saudi

Khi bạn nhìn ra từ Bến tàu phía Bắc, tất cả những gì bạn nhìn thấy là hết tàu chở dầu này đến tàu chở dầu khác.

Đó là một ngày nắng nóng, nhiệt độ lên tới 40°C, nhưng qua làn sương mù, bạn có thể thấy rõ khoảng 15 hoặc có thể 16 con tàu này, một số đang chất hàng, một số đang chờ, một số đang được điều động vào vị trí; được kéo và đẩy theo hướng này hay hướng khác bằng những chiếc tàu kéo nhỏ, chắc nịch, thỉnh thoảng biến mất dưới hình bóng to lớn của tàu chở dầu.

Tên kỹ thuật của lớp tàu này là VLCC – tàu chở dầu thô cực lớn. Đây là những con ngựa thồ của đại dương: có khả năng chở tới 350.000 tấn dầu, dài hơn cả chiều cao của Tòa nhà Empire State. Ngày nay có những tàu chở dầu lớn hơn - loại tàu chở dầu thô cực lớn - nhưng chúng gần như *quá* lớn: không thể cập cảng ở bất kỳ cảng nước sâu nào ngoại trừ những cảng nước sâu nhất, vì vậy ngày nay chủ yếu là VLCC.

Các phi công của Aramco lên từng tàu để giúp lái chúng vào cảng. Đôi khi điều đó liên quan đến việc nhảy đúng lúc từ thuyền phóng lên thang dây; đôi khi nó liên quan đến việc rơi xuống từ một chiếc trực thăng khi nó bay lơ lửng trên boong. Các con tàu được đưa vào vị trí, một số trong số đó hướng tới Sea Island có vẻ ngoài kỳ lạ – một nền tảng dài bằng ống và thép cách biển vài hải lý, nơi mà ngay cả những tàu chở dầu lớn nhất cũng có thể cập bến mà không bao giờ tiếp xúc với đất liền. Mọi chuyện đều ổn, sẽ mất khoảng một ngày - đôi khi là một ngày rưỡi - để mỗi con tàu chất hàng, boong của nó chìm xuống gần mực nước hơn vì nó chứa đầy dầu thô được bơm tới đây qua các đường ống dài từ Ghawar và các mỏ lân cận khác. .

Trạm cuối tại Ras Tanura có niên đại từ năm 1939, khi dầu từ mỏ dầu đầu tiên của Saudi tại Dammam bắt đầu chảy. Vua Abdul Aziz Ibn Saud đã nghi thức mở van và dầu đã chảy ít nhiều liên tục kể từ đó. Và từ đây, cơ sở xuất khẩu dầu lớn nhất thế giới, hãy bắt đầu những chuyến hành trình khiến cả thế giới phải hồi hộp.

Nhiều tàu chở dầu trong số này sẽ đi đến Trung Quốc và Ấn Độ, nơi chúng sẽ giúp cung cấp nhiên liệu cho 1/4 sản lượng kinh tế thế giới. Một số sẽ khởi hành đi châu Mỹ hoặc châu Âu. Họ sẽ đi về phía nam, qua eo biển Hormuz, vòng quanh Bán đảo Ả Rập và về phía bắc tới Biển Đỏ, hướng tới Kênh đào Suez. Nhưng vì thân tàu chở dầu VLCC chở đầy hàng quá sâu để di chuyển trên các tuyến đường thủy nông của Suez, họ sẽ chuyển một số dầu thô vào các đường ống tại kho cảng Ain Sukhna trước khi đi qua kênh đào đến Địa Trung Hải và lấy dầu ở đầu bên kia. .

Quá trình được mài giũa tinh xảo này đang diễn ra ngay khi bạn đọc nó - một dòng hydrocarbon huyết mạch liên tục dọc theo biển cả và xuyên qua các ống thép nếu không có nó thì hầu hết những gì bạn đã đọc ở đây sẽ ngừng hoạt động.

Tất cả những điều đó khiến Ras Tanura trở thành một nơi rất quan trọng nhưng cũng là nơi rất dễ bị tổn thương. Đối diện trực tiếp, ở phía bên kia Vịnh Ba Tư, là Iran, một trong những kẻ thù lớn nhất của Saudi. Địa điểm này nằm trong tầm bắn của vô số tên lửa Iran, có thể san bằng cảng trong vòng vài phút. Có định kỳ các cuộc tấn công bằng máy bay không người lái vào các cơ sở của Saudi, thường do phiến quân Houthi từ phía bắc Yemen thực hiện, được Iran tài trợ hoặc hỗ trợ. Vào năm 2021, Saudis cho biết cảng đã chặn một cuộc tấn công bằng máy bay không người lái và tên lửa. Cho đến nay, chưa có cuộc tấn công nào trong số này gây ra thiệt hại lâu dài cho dòng dầu, nhưng các nhà phân tích lo ngại đó chỉ là vấn đề thời gian. Đây cũng không phải là mục tiêu duy nhất, vì cách đó hơn 100 dặm về phía đông nam là một cảng khác mà ngày nay có thể còn quan trọng hơn.

RAS LAFFAN, QATAR

Ras Laffan nằm trên mũi đất của bán đảo Qatari. Đó là một rừng đường ống trải dài trên sa mạc: một số làm sạch và xử lý khí đốt tự nhiên, một số làm ngưng tụ và làm mát khí thành dạng hóa lỏng. Khi tôi đến thăm vài năm trước, tôi đã dành vài giờ lái xe qua mê cung thép trên một chiếc xe golf chạy điện nhỏ, cố gắng xác định xem quá trình hóa lỏng thực sự diễn ra ở đâu, nhưng đã thất bại. Đó là một trải nghiệm khó hiểu khác giống như nhà máy lọc dầu Wesseling ở

Cologne. Chỉ có điều ở đây, hydrocarbon có phần nhẹ hơn, hơi khác một chút.
Nếu dầu đánh dấu sự chuyển đổi năng lượng lớn thứ ba trên thế giới – thời điểm chúng ta khám phá ra cách tinh chế dầu mỏ, dầu diesel và các hóa dầu khác từ dầu thô – thì khí đốt tự nhiên đôi khi được mô tả là đánh dấu sự chuyển đổi năng lượng thứ tư. Mặc dù dầu có mật độ năng lượng cao hơn đáng kể so với hầu hết các loại than, được trang bị tốt hơn để cung cấp nhiên liệu cho động cơ đốt trong, nhưng khí đốt vẫn biến nhiên liệu thành điện năng tốt hơn. Tua bin khí ngày nay là thiết bị chuyển đổi năng lượng tốt nhất hiện nay, giúp khí đốt trở nên hiệu quả nhất và ít gây ô nhiễm nhất trong tất cả các loại nhiên liệu hóa thạch. Nếu Trung Quốc chuyển tất cả các nhà máy nhiệt điện than sang khí đốt, thì thế giới sẽ ngay lập tức đi đúng hướng để đạt được các mục tiêu về khí hậu.
Tuy nhiên, quá trình chuyển đổi này đã mất một thời gian để bắt đầu. Dầu đã vượt qua than để trở thành nguồn năng lượng lớn nhất thế giới giữa những năm 1960 nhưng khí đốt chỉ mới bắt đầu vượt qua than vào thời điểm viết bài, đầu những năm 2020. Một phần điều này là do việc di chuyển khí đốt khó hơn rất nhiều so với dầu; nó đòi hỏi mạng lưới phân phối rộng lớn và phải mất nhiều năm để xây dựng. Ngày nay có những đường ống xuyên lục địa xuyên suốt Bắc Mỹ và Trung Quốc, xuyên suốt phần lớn Trung Đông và vùng Kavkaz; có những đường ống nối các mỏ khí đốt của Nga ở Siberia với châu Âu, mặc dù một số hiện không hoạt động và đường ống lớn nhất trong số đó, Nord Stream, đã bị phá hoại vào năm 2022. Sau đó, ngày càng có nhiều nhà ga thực hiện những gì họ làm ở Ras Laffan, nén tự nhiên. khí thành dạng hóa lỏng siêu mát, sau đó có thể được vận chuyển trong các tàu LNG đặc biệt, giống như những tàu chở dầu khổng lồ lưu thông trên toàn cầu.
Và nơi này thậm chí còn quan trọng hơn các cảng và nhà máy khác dọc theo bờ biển vùng Vịnh, vì nó nằm cạnh nguồn năng lượng lớn nhất trên hành tinh. Trong khi Ghawar là mỏ dầu lớn nhất thế giới thì North Field, nằm dưới biển ngay gần Qatar, lại là mỏ khí đốt tự nhiên lớn nhất thế giới. Và vì chúng ta có thể biến khí tự nhiên thành nhiệt hoặc năng lượng hiệu quả hơn nhiều so với bất kỳ loại nhiên liệu nào khác, lượng năng lượng hữu ích mà chúng ta có thể khai thác từ đây

lớn hơn bất kỳ nơi nào khác trên hành tinh – thậm chí lớn hơn Ghawar và tất cả lượng dầu chảy qua Ras Nhà ga Tanura ở Ả Rập Saudi. Vào thời điểm viết bài, không nơi nào khác có thể sánh bằng North Field, khiến nó trở thành nguồn năng lượng quan trọng nhất trên trái đất. [1]

North Field rất *lớn* – một hồ chứa khí đốt khổng lồ dưới lòng đất có diện tích 3.750 dặm vuông, phần lớn nằm dưới vùng biển Qatar nhưng một số trải dài vào lãnh thổ Iran. Qatar bơm khí lên qua các đường ống và CO_2 và lưu huỳnh được loại bỏ tại khu rừng thép Ras Laffan. Thật khó, ngay cả khi một người bước qua khu phức hợp kim loại đáng kinh ngạc này, để hiểu được nơi này quan trọng đến mức nào. Nơi duy nhất này cung cấp khoảng 4 mỗi % năng lượng toàn cầu – nhiều hơn mọi tấm pin mặt trời và tua-bin gió trên thế giới cộng lại. Và khi thế giới tiếp tục chuyển từ than và dầu sang khí đốt, Ras Laffan sẽ càng trở nên quan trọng hơn. Vì vậy có phần đáng lo ngại khi nơi này cũng nằm chắc chắn trong tầm ngắm của tên lửa hành trình Iran. Hai quốc gia này - một nhỏ, một lớn, một liên kết với phương Tây, quốc gia còn lại thuộc cái gọi là 'trục ma quỷ' - đều đang dồn nỗ lực của mình vào cùng một bể chứa. Cả hai đều đang không thoải mái khai thác cùng một loại hydrocarbon, các sinh vật phù du hóa thạch nằm ở vùng biển nhiệt đới hàng trăm triệu năm trước, bên dưới khu vực giàu năng lượng nhất thế giới này.

Tất nhiên có những nơi khác trên thế giới sản xuất khí đốt tự nhiên. Cách hàng ngàn dặm về phía bắc ở vùng Bắc Cực thuộc Siberia, hàng triệu mét khối khí đốt lặng lẽ chảy ra khỏi tổ hợp giếng dầu của Nga. Trong nhiều thập kỷ, những phân tử này đã di chuyển theo đường ống tới châu Âu, nơi có hệ thống năng lượng phụ thuộc vào khí đốt từ phía đông. Cường quốc sản xuất của Đức dựa vào khí đốt giá rẻ của Nga, nguồn cung cấp năng lượng cho phần lớn ngành công nghiệp và cung cấp năng lượng cho hầu hết các nhà máy hóa chất. Ô tô và máy móc của Đức được sản xuất bằng thép được rèn ngày càng nhiều ở Trung Quốc bằng cách sử dụng hydrocarbon chiết xuất từ Nga. Nhưng cho đến khi xảy ra cuộc xâm lược Ukraine vào năm 2022, rất ít chính trị gia ở Berlin đã suy nghĩ kỹ về điều này.

Bên kia Đại Tây Dương, tại các giếng Texan phía trên lưu vực Permian, các nhà khai thác bơm xuống dung dịch cát, hóa chất và

nước, đồng thời bơm lên một lượng lớn dầu và khí đốt. Logic không thể thay đổi của một thế giới nơi mọi hoạt động kinh tế đều là một hình thức truyền tải năng lượng cho thấy rằng cuộc cách mạng fracking sẽ giúp hỗ trợ hoạt động kinh tế và sự thịnh vượng của Mỹ trong những thập kỷ tới. Khi nguồn cung cấp năng lượng từ Nga của châu Âu bị cắt giảm, chính dầu khí của Mỹ và Qatar đã giúp lấp đầy khoảng trống.

Quá trình chuyển đổi năng lượng thứ tư vẫn đang được tiến hành và khí đốt sẽ sớm cung cấp nhiều năng lượng cuối cùng của chúng ta hơn dầu hoặc than đá. Chúng ta đã dựa vào khí đốt tự nhiên để làm nóng lò nung chảy cát thành thủy tinh; biến muối thành hóa chất; nấu chảy và tinh chế đồng; ngày nay thậm chí còn có khí tự nhiên được bơm vào lò cao cùng với than. Nó không chỉ là phân bón, hóa dầu và cà chua.

Trong suốt thời đại dầu mỏ, luôn có những nỗi sợ hãi định kỳ rằng thế giới có thể sắp cạn kiệt dầu mỏ: rằng Ghawar cuối cùng có thể đã đi đến thời kỳ hoàng hôn. Có một số logic cho điều này, vì ngày càng khó tìm thấy các vỉa đồng dồi dào trong lòng đất, trữ lượng dầu dễ dàng nhất đã cạn kiệt từ lâu. Thước đo tốt nhất cho việc này là so sánh lượng năng lượng mà người ta phải tiêu tốn để khai thác dầu với lượng năng lượng chúng ta thu được - lợi tức đầu tư năng lượng (EROI) như đôi khi nó được gọi. Quay trở lại những ngày khám phá đầu tiên và sôi nổi đó, bạn có thể mong đợi khoảng 100 thùng dầu cho mỗi thùng bạn cần dùng để khoan và bơm nó lên. Ngày nay, bạn có thể chỉ nhận được 5 thùng cho mỗi thùng bạn đưa vào. Nỗ lực lớn nhất là ở các lưu vực đá phiến của Mỹ, nơi tiếp theo sự tăng trưởng chóng mặt của những năm 2010 là sự tăng trưởng nhạt nhẽo trong những năm 2020.

Tuy nhiên, bài học cũng rất giống với đồng: con người ngày càng trở nên khéo léo hơn trong việc khai thác hydrocarbon, cho dù đó là từ sâu dưới đáy biển, từ những nơi xa xôi trên thế giới hay từ đá phiến sét cứng hơn là từ các hồ chứa như Ghawar. . Mỏ của Saudi đã suy giảm một cách duyên dáng thay vì sụp đổ, được bổ sung bởi các mỏ dầu mới hơn trên đường đi. Cuộc cách mạng fracking của Mỹ có nghĩa là không còn ai nghiêm túc nói về 'đỉnh dầu' nữa. Hoặc nếu họ

làm vậy thì đó là vì họ đang đề cập đến không phải nguồn cung cao điểm mà là nhu cầu cao nhất.
Vì trong khi khí đốt tự nhiên là loại nhiên liệu hiệu quả nhất và ít gây ô nhiễm nhất trong số tất cả các loại nhiên liệu hóa thạch – tạo ra ít carbon hơn 1/5 so với dầu và ít hơn 1/3 so với than tốt nhất – thì nó vẫn là một phần của một loại nhiên liệu khác. vấn đề. Khi dân số thế giới và nhu cầu sử dụng năng lượng đều tăng lên, lượng khí thải carbon tổng hợp của chúng ta cũng tăng theo. [2]
Ngày nay hầu hết các quốc gia trên thế giới đã xác định rằng chúng ta phải trải qua quá trình chuyển đổi năng lượng lần thứ năm. Lần này mục tiêu không phải là tăng mật độ năng lượng trong nhiên liệu của chúng ta như trong mọi quá trình chuyển đổi trước đó mà là loại bỏ hoàn toàn lượng khí thải carbon. Mục tiêu là thay thế gần như toàn bộ việc sử dụng nhiên liệu hóa thạch của chúng ta bằng các nguồn tài nguyên tái tạo như thủy điện, năng lượng mặt trời, gió và hạt nhân.
Nó đã xảy ra rồi. Ngay cả khi năng lượng cần thiết để ép dầu ra khỏi đá tăng lên, chúng ta đã trở nên giỏi hơn trong việc đạt được hiệu suất cao hơn từ động cơ và quy trình của mình, do đó lượng dầu cần thiết để cung cấp cho mỗi đô la mới trong sản lượng kinh tế đang giảm. Bước tiếp theo là giảm sự phụ thuộc tổng thể của chúng ta vào dầu thô và khí đốt tự nhiên, và trên cơ sở những gì các chính phủ đã cam kết vào năm 2022, nhu cầu dầu khí toàn cầu có thể ổn định vào giữa những năm 2020. Thật vậy, trong một phân tích được công bố vào năm 2023, gã khổng lồ dầu mỏ BP cho biết nhu cầu về dầu thô có thể đã đạt đỉnh, mặc dù mức tiêu thụ khí đốt tự nhiên sẽ mất nhiều thời gian hơn để đạt đến điểm đó. Tuy nhiên, phần lớn sẽ phụ thuộc vào việc liệu các chính trị gia có thể kết hợp một số lời hứa táo bạo với hành động hay không. [3]
Việc loại bỏ phần lớn việc sử dụng dầu và khí đốt có thể được thực hiện. Nó không phải là không thể. Nhưng xét đến mức độ chúng ta phụ thuộc vào chúng để thúc đẩy và nuôi sống chúng ta, thì đây sẽ không phải là một kỳ tích nhỏ. Nó có nghĩa là xây dựng năng lực năng lượng mới chưa từng thấy trên khắp thế giới: các tấm pin mặt trời, tua-bin gió và nhà máy hạt nhân, với tốc độ mà loài người chưa từng đạt được trước đây. Nó sẽ có nghĩa là quay ngược đồng hồ ở một khía cạnh quan trọng: giống như tổ tiên của chúng ta đã ít nghĩ

đến việc đốt dầu, trong tương lai, một lần nữa, chúng ta có thể sử dụng chất đặc biệt này ít làm nhiên liệu hơn là làm thành phần hóa học. Các sản phẩm phức tạp được chưng cất trong các nhà máy lọc dầu có thể giúp chúng ta tạo ra các thành phần pin cần thiết để giải quyết tình trạng thiếu năng lượng tái tạo không liên tục. Họ có thể giúp chúng tôi sản xuất nhựa đàn hồi mà chúng tôi cần cho tua-bin gió lớn nhất, cứng cáp nhất. Nhưng chẳng ích gì khi giả vờ rằng điều này sẽ dễ dàng hoặc nó sẽ đến mà không có một số thỏa hiệp khó chịu. Thoát khỏi dầu mỏ sẽ đưa chúng ta đến con đường hướng tới một kỷ nguyên khai thác khoáng sản mới. Vàng đen của thế kỷ 20 sẽ được thay thế bằng vàng trắng dạng bột, hứa hẹn mang lại sức mạnh cho thế kỷ 21. Ở phía bên kia hành tinh tính từ Vịnh Ả Rập, thời đại mới này đang bắt đầu thành hiện thực.

Phần thứ sáu

LITHIUM

16
Bạch kim

SALAR DE ATACAMA, CHILE

Nép mình bên những đồng bằng mặt trăng kỳ lạ, những hồ nước đỏ tươi, những núi muối và những ngọn núi lửa bốc khói, Salar de Atacama là một nơi có vẻ đẹp hiếm có nhưng khó chịu. Ở rìa của nó là chim hồng hạc, guanacos và vicuñas, những người anh em họ hoang dã của llama và alpaca. Nhưng khi bạn hành trình vào bên trong, hướng tới cái mà các nhà khoa học gọi là hạt nhân, sự sống bắt đầu biến mất. Ở đây, trong sa mạc cằn cỗi lại là một vùng đất rộng lớn thậm chí còn cằn cỗi hơn.

Đây là nơi khô cằn nhất trên trái đất, ngoại trừ một số khu vực tăm tối ở Nam Cực. Bạn nhận thấy nó ngay khi bạn đến: bạn cảm thấy nó trên da, trong cổ họng và trên đôi môi nứt nẻ của mình. Vào thời tôi ở đó, độ ẩm không vượt quá 12%, mức lý tưởng cho phòng tắm hơi kiểu Phần Lan nhưng lại kém lý tưởng cho đời sống sinh học.

Giải thích kỹ thuật là sa mạc cát, đá và muối này nằm trong cái được gọi là bóng mưa hai mặt. Về phía đông của nó là dãy Andes; về phía tây của nó là dãy núi ven biển Chile. Kết quả cuối cùng là mưa rất hiếm. Có một số trạm thời tiết chưa bao giờ ghi nhận một giọt nước nào, mặc dù ở một số nơi, bao gồm cả Salar, thỉnh thoảng có những cơn mưa rào xối xả. Người dân địa phương gọi chúng là mùa đông Bolivian, mặc dù điều nghịch lý là chúng thường rơi vào mùa hè.

Bản thân Salar là một hồ muối, mặc dù nó trông không giống loại hồ muối mà bạn có thể tưởng tượng trong đầu: những vùng rộng lớn, bằng phẳng màu trắng như Hồ Muối Lớn của Utah hay Salar de Uyuni ở Bolivia . Ngược lại, Salar de Atacama có màu nâu và hơi có vảy. Màu nâu thực chất là một lớp cát phủ rất mỏng, được thổi từ sa mạc lân cận lên bề mặt ở đây và bám vào muối. Độ vảy là do bề mặt muối vẫn đang phát triển chậm, không thể nhận thấy, với những vết muối mới vươn như ngón tay lên trời. Các hồ muối khác có màu trắng và phẳng vì mưa có xu hướng cuốn trôi cát và làm tan các vảy trước khi

chúng kịp hình thành. Nhưng vì ở đây trời không thực sự mưa nên các ngón tay và lớp vỏ từ từ tiếp tục phát triển.
Có lúc tôi bước ra bề mặt giòn này và nhanh chóng nhận ra mình đã phạm sai lầm. Bạn phải đeo găng tay cứng nếu đến gần muối chưa vỡ vì những ngón tay và cạnh đó sắc hơn dao của đầu bếp. Bề mặt không bằng phẳng và khó đoán đến mức khó có thể đi qua mà không thỉnh thoảng vấp ngã, và nếu bạn vấp ngã và dùng tay để đỡ cú ngã… sau năm phút loạng choạng tìm đường xuyên qua lớp muối dày đặc, tôi dừng lại, nhìn xuống các ngón tay của tôi, hình dung chúng trông như thế nào nếu tôi ngã và quay lại. Với mỗi bước đi mới, muối kêu răng rắc và chộp lấy chân tôi. Những âm thanh kỳ lạ vang lên trên bề mặt giống như băng tan trên một hồ nước Bắc Âu. Những âm thanh này càng ma quái hơn vì những gì tôi biết nằm cách bề mặt vài mét: một hồ chứa nước mặn đậm đặc cực kỳ khổng lồ dưới lòng đất. Nước mặn này, nước muối này là công việc kinh doanh; đó là lý do chúng tôi ở đây. Nó là một dung dịch đậm đặc, đậm đặc của nhiều loại muối khác nhau của natri, magie, kali, boron và, vâng, cả lithium. Có một logic thực nghiệm nhất định đảm bảo vị trí của lithium với tư cách là một trong sáu thành viên chủ chốt của Thế giới Vật chất. Đây là một kim loại ma thuật: cùng với hydro và heli, nó là một trong ba nguyên tố nguyên thủy được tạo ra trong Vụ nổ lớn, khiến nó trở thành một trong những mảnh vật chất lâu đời nhất trong vũ trụ. Không có nguyên tố nào khác có sự kết hợp hoàn toàn giống nhau giữa độ nhẹ, độ dẫn điện và năng lượng điện hóa. Không có kim loại nào khác có khả năng lưu trữ năng lượng tốt như vậy. Nhẹ đến mức nó nổi trong dầu, mềm đến mức bạn có thể cắt nó bằng dao làm bếp nhưng phản ứng mạnh đến mức nó sủi bọt và nổ tung khi tiếp xúc với nước và không khí, nó là một trong những vật liệu bạn chưa từng thấy ở dạng nguyên tố. bên ngoài phòng thí nghiệm hóa học. Và phản ứng này giúp giải thích tại sao lithium là trung tâm của loại pin mạnh nhất, và do đó là trung tâm của thế giới thế kỷ XXI.
Nếu chúng ta muốn loại bỏ lượng khí thải carbon và loại bỏ dần nhiên liệu hóa thạch trong những thập kỷ tới, chúng ta sẽ phải điện khí hóa phần lớn thế giới (ít dầu hơn nhưng nhiều đồng hơn). Chúng ta sẽ cần xây dựng thêm nhiều tua-bin gió (thép, silic và đồng) và các tấm pin mặt trời (đồng và silic luyện kim), chưa kể đập thủy điện (bê tông).

Nhưng không điều nào trong số này có tác dụng trừ khi chúng ta có cách lưu trữ năng lượng đó. Chúng ta sẽ cần lưu trữ nó trong thời gian ngắn để giải quyết tình trạng không liên tục vốn có của các nguồn năng lượng tái tạo như mặt trời và gió. Và chúng ta sẽ cần lưu trữ nó để các phương tiện giao thông đường bộ có thể đi từ A đến B mà không cần đốt nhiên liệu hóa thạch.

Mặc dù pin không cung cấp tất cả các câu trả lời nhưng chúng là một phần lớn của mối liên kết còn thiếu có thể đưa chúng ta đến đó. Và mặc dù có nhiều hóa chất khác bên trong pin – về sau sẽ được nói đến nhiều hơn – nhưng không có lithium nào có thể đánh bại được về độ nhẹ và khả năng lưu trữ năng lượng của nó. Như nhà văn khoa học Seth Fletcher đã nói, 'Vũ trụ không mang lại cho chúng ta điều gì tốt hơn'. [1]

Lý do chúng tôi quay trở lại Chile một lần nữa là vì cũng giống như không có nơi nào khác trên hành tinh có nhiều đồng như vậy, cũng không có nơi nào khác trên hành tinh có nhiều đồng như vậy. chúng ta có thể có được khá nhiều lithium. Salar de Atacama là nguồn cung cấp lithium lớn nhất ở bất cứ đâu.

Làm thế nào nó lại xuất hiện ở đây là một trong những bí ẩn mà chúng ta chỉ mới bắt đầu tìm hiểu, nhưng với tình hình hiện tại, lời giải thích thuyết phục nhất là như sau. Hãy coi Salar như một loại vạc, với một bên là núi lửa Andean và một bên là dãy đồi nhỏ hơn. Nước chảy xuống từ dãy Andes ở một số con sông khác nhau, chảy qua các hẻm núi sâu – *quebradas* – về phía lưu vực. Trên đường đi, dòng nước này mang theo một lượng cực nhỏ các khoáng chất bất thường trên đất Chile, nhưng khi chạm tới đáy thung lũng, nó sẽ không đi đâu được. Bị mắc kẹt bên trong vạc, nước thấm vào lòng đất đầy sỏi, nơi - đây là một trong những vùng khô nhất trên trái đất - phần lớn nước bốc hơi.

Chỉ khi bạn tưởng tượng quá trình này diễn ra trong hàng triệu năm sâu thẳm – nước sông với một lượng nhỏ khoáng chất núi lửa bị rửa trôi chảy vào lưu vực, thấm qua quạt phù sa và sau đó bốc hơi dưới ánh mặt trời khắc nghiệt của Nam Mỹ – bạn mới bắt đầu tưởng tượng hiểu hồ muối khổng lồ này hình thành như thế nào. Hết thiên niên kỷ này đến thiên niên kỷ khác, nước bốc hơi, để lại hỗn hợp muối lỏng đậm đặc đó. Hết thiên niên kỷ này đến thiên niên kỷ khác, natri clorua,

kết tủa nhanh hơn các thành phần khác trong nước muối này, tạo thành một lớp vỏ trên bề mặt: lớp vỏ đó mà tôi đã vấp phải trong một thời gian ngắn. Ở những khu vực xa sông nhất, muối tạo thành cả một dãy núi, Cordillera de la Sal, khi các mảng kiến tạo bên dưới cảnh quan này tiếp tục kêu lạo xạo với nhau. Quá trình này có lẽ vẫn đang diễn ra cho đến ngày nay, nhưng quá chậm để có thể nhận thấy rõ ràng.

Và bạn có nó rồi đấy! Salar chắc chắn rất ấn tượng, nhưng điều đáng kinh ngạc hơn là những gì nằm bên dưới nó. Ở một số nơi, lớp muối dày ít nhất 3 dặm. Ở một số nơi chỉ có một lớp da mỏng và bên dưới là lượng lớn nước muối cổ xưa, nằm bên dưới bề mặt, ngấm xuống lòng đất như một miếng bọt biển, trong ít nhất 3 triệu năm. Chúng ta có xu hướng nghĩ nước luôn chuyển động, dù ở biển hay sông hay trong những giọt nước bay hơi từ hồ thành mây rồi mưa xuống và hoàn thành chu kỳ. Nhưng nước ở đây đã bị giam cầm trong ngục tối mặn mà – tĩnh lặng và trơ lì này – từ rất lâu trước buổi bình minh của loài người.

Việc pin trong điện thoại di động, máy tính xách tay và ô tô điện được tạo ra một phần từ chất lỏng cổ xưa này là một trong những nghịch lý khác mà bạn đã quen thuộc trong Thế giới Vật chất: cái rất cũ sinh ra cái rất mới. Nhưng dù sao cũng có điều gì đó khiến người ta choáng váng. Khi quan sát dòng nước mặn chảy ra từ các đường ống ở đây, bạn khó có thể tin rằng đây là lần đầu tiên nó nhìn thấy ánh sáng sau hàng triệu năm. Hoặc nó sẽ sớm được chôn lại bên trong một cục pin trong một thiết bị kỳ lạ ở bên kia thế giới.

Hai công ty khai thác lithium trong nước muối. Có Albemarle, khởi đầu là một công ty sản xuất giấy và hóa chất trước khi tăng gấp đôi lượng lithium, và SQM, chính công ty hóa chất mà chúng tôi đã gặp ở khu vực muối, chuyên khai thác caliche và biến nó thành phân bón ở những nơi khác trong Atacama.

Cách hoạt động của loại hình khai thác lithium này tương đối đơn giản. Nước muối cổ xưa được bơm ra từ dưới lớp vỏ muối, từ các giếng nước muối nằm trên khắp Salar. Nó được dẫn vào các ao khổng lồ, nơi nước bị bốc hơi. Đó là một quá trình chậm chạp kéo dài nhiều tháng: đầu tiên là natri clorua kết tủa, sau đó phần nước muối còn lại được dẫn vào một ao lớn khác, nơi muối kali kết tủa, sau đó

vào một ao bay hơi khác nơi muối magie được loại bỏ. Cuối cùng, sau hơn một năm, lượng nước muối chảy ra từ hồ chứa dưới lòng đất như một chất lỏng màu xanh nhạt đã được cô đặc thành dung dịch màu vàng lục, sáng gần như đèn neon. Ở giai đoạn này, nó chứa khoảng 25% lithium clorua, mặc dù màu xanh thực sự đến từ boron vẫn còn trong dung dịch.

Bạn có thể nhận thấy rằng quá trình này không chỉ khá đơn giản mà còn giống hệt kỹ thuật mà người Phoenicia đã sử dụng khi làm muối ở Ibiza hàng nghìn năm trước và các nhà sản xuất thủ công ngày nay vẫn sử dụng để biến nước biển thành hoa bách *hợp* . Chỉ ở đây, cùng với natri clorua là muối lithium: lithium clorua. Thực sự, sự khác biệt chính là quy mô của nó: các ao bốc hơi tạo ra muối Địa Trung Hải được đo bằng mét trong khi các ao ở Salar ở đây được đo bằng km. SQM, công ty ngày nay khai thác phần lớn lithium, đã trở thành một trong những nhà sản xuất lithium lớn nhất thế giới một cách tình cờ. Ban đầu họ bắt đầu bơm nước muối từ Salar vào những năm 1990 không quá nhiều để sản xuất lithium mà để sản xuất kali: kali. Lithium là một sản phẩm phụ thú vị. Quả thực, cho đến gần đây, không ai quan tâm nhiều đến yếu tố này, không giống như những tài liệu khác trong cuốn sách này, nó chỉ đóng vai trò nhất thời trong nền văn minh. Có lẽ công dụng quan trọng nhất của nó là làm dược phẩm: lithium đã trở thành một phương pháp điều trị phổ biến cho chứng rối loạn lưỡng cực và trầm cảm đến mức nó đã đi vào từ vựng văn hóa, xuất hiện trong các bài hát của Evaneshood và Nirvana. Thật vậy, nó có tác dụng thay đổi tâm trạng một cách tinh tế đến mức một số người cho rằng nên thêm nó vào nước uống giống như cách nhiều quốc gia thêm florua để hỗ trợ sức khỏe răng miệng. Nó có một vai trò nhỏ nhưng hết sức quan trọng trong các công nghệ điện hạt nhân mới. Lithium hóa ra là chất làm mát thiết yếu cho các lò phản ứng muối nóng chảy và là cách chính để tạo ra tritium mà chúng ta sẽ cần nếu có thể đạt được phản ứng tổng hợp hạt nhân chính thống. Có một số công dụng khác: nó có thể giúp tăng cường độ cứng cho kính (lithium là một trong những nguyên tố đầu tiên mà Otto Schott đã thêm vào sự tan chảy của mình vào thế kỷ 19). Nó đóng vai trò như một hợp kim trong một số kim loại và tính trơn trượt của nó có nghĩa là các hợp

chất lithium tạo ra chất bôi trơn tuyệt vời, cũng như cải thiện vẻ ngoài và độ mài mòn của gốm sứ.
Tất cả những điều đó khiến lithium trở thành thứ gì đó ngoại lệ trong Thế giới Vật chất. Tất cả những vật liệu khác mà chúng ta gặp cho đến nay đều là những phần thiết yếu trong cuộc sống của chúng ta qua nhiều thế hệ nếu không muốn nói là hàng thế kỷ. Nhưng nếu cuốn sách này được viết cách đây vài thập kỷ thì lithium có thể sẽ không lọt vào danh sách rút gọn. Vị trí của nó như một trong những chất thiết yếu trong cuộc sống của chúng ta là kết quả của một thách thức lâu dài, giống như việc khám phá lại công thức sản xuất xi măng hoặc phát minh ra chất bán dẫn ở trạng thái rắn. Nhiệm vụ tạo ra một loại pin mạnh mẽ, bền bỉ và có khả năng phục hồi đã được thực hiện trong một thế kỷ.

Pin tốt hơn

Kỹ sư đầu tiên sử dụng lithium trong pin không ai khác chính là Thomas Edison. Sau khi thành thạo việc sản xuất bê tông bằng cách tập trung cao độ vào việc cải tiến công thức và hệ thống hóa quá trình sản xuất nó, ông đã tìm cách làm được điều tương tự với pin. Việc sử dụng những thiết bị này để lưu trữ năng lượng không phải là điều gì mới mẻ ngay cả khi ông bắt đầu nghiên cứu chúng vào buổi bình minh của thế kỷ XX. Thật vậy, những ngày đầu tiên của kỷ nguyên điện hầu như chỉ được cung cấp năng lượng bằng pin. Trở lại trước khi phát minh ra máy phát điện và máy phát điện sản xuất phần lớn điện năng của chúng ta ngày nay, máy điện báo và đèn điện đầu tiên chạy bằng pin nguyên thủy.
Hóa học của họ bắt nguồn từ Alessandro Volta, một người Ý, vào đầu thế kỷ 19, đã phát hiện ra rằng bằng cách xếp chồng các lớp đĩa kẽm và đồng ngăn cách nhau bằng bìa cứng ngâm nước muối, ông có thể tạo ra dòng điện, chảy từ một điện cực (trong trường hợp này là các đĩa kim loại) sang điện cực kia. Đống điện cực của ông là cục pin đầu tiên trên thế giới – một tế bào điện – hay đôi khi người ta vẫn gọi nó là một đống (vì bản chất của nó là một đống). Điều đó đưa chúng ta đến câu hỏi nhức nhối là nên gọi những thứ này là gì. Những người theo chủ nghĩa thuần túy sẽ lập luận rằng một trong những thiết bị này, cho dù đó là nỗ lực đầu tiên của Volta hay thứ bạn tìm thấy trong điện

thoại thông minh của mình, đều nên được gọi là tế bào. Họ nói rằng pin là một từ chỉ được sử dụng cho một mảng gồm nhiều ô. Nhưng ngày nay hầu hết mọi người (kể cả tác giả này) đều sử dụng các từ này thay thế cho nhau. fn1

Nửa thế kỷ sau, nhà vật lý người Pháp Gaston Planté đã phát minh ra loại pin sạc đầu tiên sử dụng một cuộn điện cực chì xoắn ốc ngâm trong axit, đặt trong hộp thủy tinh. Pin axit chì, các phiên bản vẫn được sử dụng để khởi động động cơ ô tô ngày nay, có thể cung cấp năng lượng nhanh chóng, nhưng mật độ năng lượng tương đối thấp có nghĩa là chúng không đặc biệt tốt trong việc lưu trữ năng lượng. Trong nỗ lực cải thiện hóa học, Edison bắt đầu thử nghiệm bảng tuần hoàn theo cách của mình. Đi ra ngoài chì và axit sulfuric, rồi đến một loạt các thành phần khác: đồng, coban và cadmium, chỉ kể tên một số C. Có rất nhiều khởi đầu sai lầm và một cuộc chiến lớn về bằng sáng chế trong quá trình thực hiện nhưng cuối cùng, sau một thập kỷ thử nghiệm, Edison đã tạo ra một hỗn hợp phức tạp gồm niken và sắt, nhúng trong dung dịch kali hydroxit và đóng gói thành loại thép tốt nhất của Thụy Điển. 'Pin lưu trữ duy nhất có cấu trúc và các bộ phận bằng sắt và thép', hãy đọc quảng cáo,

Các thí nghiệm của Edison đã nhấn mạnh ít nhất một điều. Mặc dù việc hóa học pin gặp nhiều khó khăn nhưng chắc chắn vẫn có thể cải thiện công thức axit-chì của Planté. Suy cho cùng, như Edison đã từng nói: 'Nếu Thiên nhiên có ý định sử dụng chì trong pin để cung cấp năng lượng cho xe cộ thì bà đã không làm nó nặng đến thế'. Và nếu chì là kim loại nặng thì không còn nghi ngờ gì nữa về kim loại nhẹ nhất – nguyên tố tối ưu để chế tạo pin. Nó nằm ở đầu đối diện của bảng tuần hoàn, cách xa chì, ngay dưới hydro và heli: lithium. Edison đã thêm một lượng nhỏ lithium hydroxit vào dung dịch điện phân trong pin của mình, được gọi là tế bào A, và cùng với kali trong chất lỏng và các điện cực niken và sắt, nó đã mang lại những kết quả đáng khích lệ. Lithium đã nâng công suất của pin lên 10% - mặc dù không ai có thể xác định được chất hóa học đang diễn ra bên dưới bề mặt.

Trong những năm tiếp theo, các nhà khoa học tiếp bước Edison và phát triển các loại pin hóa học khác, bao gồm niken-cadmium và niken-hydrua kim loại, là nền tảng cho hầu hết các loại pin sạc tiêu dùng như pin AA mà bạn có thể có ở nhà. Tuy nhiên, họ đã gặp khó

khăn trong việc kết hợp yếu tố hứa hẹn nhất. Thập kỷ này qua thập kỷ khác, hết bài báo khoa học này đến bài báo khác đều chỉ ra rằng loại pin cuối cùng sẽ dựa trên thành phần hóa học lithium. Nhưng cho đến những năm 1970, không ai có thể chế ngự được chất dễ bay hơi này đủ để đưa nó vào sử dụng trong pin. Pin là một dạng nhiên liệu – mặc dù là điện hóa chứ không phải hóa thạch. Những gì xảy ra bên trong pin là một phản ứng hóa học được kiểm soát, một nỗ lực truyền năng lượng nổ có trong các vật liệu này và biến năng lượng đó thành dòng điện. Và không có thành phần nào dễ nổ hơn lithium. [2]

Bước đột phá đầu tiên đến vào những năm 1970 tại ExxonMobil, hay như tên gọi lúc đó là Esso. Trước cú sốc giá dầu, trong một thời gian, gã khổng lồ dầu mỏ đã có một trong những đơn vị pin được tài trợ tốt nhất ở bất kỳ đâu, với đội ngũ nhân viên là một số nhà hóa học tài năng nhất thế giới đang cố gắng vạch ra tương lai của công ty trong một thế giới không có hydrocarbon. Trong số đó có một người Anh có giọng nói nhẹ nhàng tên là Stan Whittingham. Chẳng bao lâu sau, Whittingham đã có một trong những khoảnh khắc Eureka làm thay đổi thế giới pin mãi mãi.

Cho đến thời điểm đó, một trong những vấn đề chính mà các nhà sản xuất pin phải đối mặt là mỗi lần họ sạc hoặc xả pin, cấu trúc hóa học của điện cực có thể thay đổi không thể đảo ngược. Edison đã mất nhiều năm cố gắng khắc phục hiện tượng này, nhưng hậu quả thực tế của nó là pin không dùng được lâu nữa. Whittingham đã tìm ra cách khắc phục điều này, chuyển các nguyên tử lithium từ điện cực này sang điện cực kia mà không gây ra nhiều thiệt hại.

Có nguy cơ khiến bất kỳ nhà hóa học pin nào đọc được điều này phải nhăn mặt, đây là một cách hữu ích để hình dung điều này. Hãy nghĩ về pin như một bộ gồm hai tòa nhà chọc trời, một trong số đó là khu văn phòng và tòa nhà còn lại là khu chung cư. Những tháp này đại diện cho cực dương và cực âm – điện cực âm và dương. Khi pin sạc của điện thoại thông minh hoặc pin ô tô điện cạn kiệt, điều đó có nghĩa về mặt điện hóa là có rất nhiều nguyên tử lithium nằm ở cực âm – trong khu chung cư – hoạt động rất ít.

Nhưng khi cục pin đó được sạc, những nguyên tử đó (hoặc, như chúng được gọi về mặt kỹ thuật, vì chúng chứa điện tích, các ion) sẽ chuyển sang tòa nhà chọc trời khác – cực dương hoặc, theo cách

tương tự này, khối văn phòng. Họ đi làm. Và pin được sạc đầy là pin có cấu trúc cực dương chứa đầy các ion lithium tích điện này. Khi pin đó được sử dụng, các ion sẽ quay trở lại khu chung cư, tạo ra dòng điện trên đường đi. Hiểu được sự di chuyển qua lại giữa cực âm và cực dương và bạn sẽ hiểu rộng hơn về cách thức hoạt động của pin sạc. fn2

Khái niệm này – khái niệm cho rằng các ion có thể di chuyển từ cấu trúc tinh thể của một điện cực để làm tổ trong cấu trúc tinh thể của điện cực khác – là sóng não của Whittingham. Ông gọi nó là sự xen kẽ và nó vẫn là nền tảng cho cách thức hoạt động của pin ngày nay. Whittingham áp dụng lý thuyết này và tạo ra pin lithium có thể sạc lại đầu tiên trên thế giới. Đó chỉ là một thứ nhỏ – một cục pin cỡ đồng xu được thiết kế để sử dụng trong đồng hồ – nhưng đó là một sự khởi đầu. Trên mỗi kg trọng lượng (hay đúng hơn là với kích thước của nó, trên mỗi gam), pin của anh ta có thể chứa điện tích gấp 15 lần pin chì-axit. Nhưng mỗi lần Whittingham cố gắng chế tạo một cục pin lớn hơn một cục pin nhỏ bằng đồng xu, nó lại bốc cháy. Trong nỗ lực chế ngự khả năng phản ứng vốn có của lithium, ông đã hợp kim hóa nó với nhôm, nhưng điều này không đủ để khuất phục hoàn toàn nó. Vì vậy, pin của Whittingham vẫn là thứ đồ cổ cho đến thập kỷ tiếp theo, khi các nhà nghiên cứu làm việc ở Anh và Nhật Bản cuối cùng đã giải được mã. 3

Nhân vật chủ chốt ở đây là một người đàn ông phi thường tên là John B. Goodenough, một nhà vật lý người Mỹ, sinh ra ở Jena, thành phố của Đức, nơi Otto Schott và Carl Zeiss lần đầu tiên hoàn thiện kỹ thuật chế tạo thủy tinh. Sau khi học tại Yale, Chicago và Viện Công nghệ Massachusetts, Goodenough cuối cùng nhận thấy mình phụ trách bộ phận vô cơ. phòng thí nghiệm hóa học tại Đại học Oxford vào cuối những năm 1970 và đầu những năm 1980, nơi ông đóng vai trò then chốt trong bước đột phá về pin. Trong số những thành tựu của nhóm ông – được kỷ niệm ngày nay trên một tấm bảng màu xanh lam bên ngoài phòng thí nghiệm – là việc phát hiện ra công thức tối ưu cho cực âm (tòa nhà chọc trời chung cư đó) trong pin lithium-ion. Vật liệu được đề cập là oxit lithium coban, một hợp chất giúp cải thiện độ an toàn và dung lượng của các loại pin này, cung cấp cho chúng một ma trận cực âm ổn định trong đó các ion lithium có thể làm tổ. Không

thể loại trừ khả năng xảy ra cháy nổ pin, nhưng ít nhất chúng không còn là điều không thể tránh khỏi.
Bước nhảy vọt về trí tuệ cuối cùng xảy ra vài năm sau đó tại Nhật Bản, nơi một nhà nghiên cứu tên là Akira Yoshino đã hoàn thiện các thành phần khác. Ông ghép cực âm oxit lithium coban của Goodenough với cực dương làm từ một loại than chì cụ thể - loại rất đa dạng mà họ vẫn tạo ra từ than cốc được sản xuất tại Nhà máy lọc dầu Humber - và sự kết hợp này đã hoạt động rất xuất sắc. Các ion lithium di chuyển an toàn và êm ái từ bên này sang bên kia khi anh sạc và xả pin. Ông cũng tìm ra cách tốt nhất để lắp hai điện cực này lại với nhau: bằng cách dán các vật liệu lên các tấm giấy mỏng và cuộn chúng lại với nhau trong một hộp kim loại, ngăn cách bằng một màng mỏng. Cú đột phá cuối cùng này – có nghĩa là nếu pin bắt đầu quá nóng thì dải phân cách sẽ tan chảy, giúp ngăn chặn bất kỳ vụ nổ nào – cũng gợi nhớ đến những tế bào đầu tiên được Gaston Planté tạo ra ở Pháp. Pin sạc bắt đầu hoạt động như một hình xoắn ốc của kim loại được nén vào hộp; sau hơn một thế kỷ thử nghiệm và biến đổi hoàn toàn các vật liệu, nó đã trưởng thành với hình dạng ít nhiều giống nhau.
Nhưng phải mất vài năm nữa những viên pin này mới đến được tay người tiêu dùng và điều đó sẽ còn rất xa mới đến được các phòng thí nghiệm của Esso hoặc cơ sở hóa học của Oxford. phòng thí nghiệm. Công ty điện tử Nhật Bản Sony đang tìm kiếm loại pin tốt hơn để cung cấp năng lượng cho máy quay của mình và đã tìm thấy bản thiết kế do Goodenough soạn thảo và được điều chỉnh bởi Yoshino. Điều chỉnh các kế hoạch này và bổ sung thêm những thành tựu riêng của mình, vào năm 1992, công ty đã tạo ra pin lithium-ion sản xuất đầu tiên: bộ cấp nguồn tùy chọn cho một số mẫu máy quay Handycam của họ. Những gói này nhỏ hơn và nhẹ hơn một phần ba so với pin hydrua kim loại niken tiêu chuẩn, nhưng chúng thậm chí còn có dung lượng lớn hơn. Trong những năm tiếp theo, pin lithium-ion dần dần phổ biến trên mọi loại thiết bị, nhưng phải đến khi điện thoại thông minh ra đời, chúng mới tìm thấy tiếng gọi thực sự đầu tiên của mình. Những thiết bị này, với mạch điện, chất bán dẫn, chip modem và màn hình sáng, cực kỳ ngốn điện, đòi hỏi loại pin mạnh nhất trong tất cả các loại pin. Ngày nay, hầu hết điện thoại thông minh đều chạy bằng

pin bắt nguồn từ những khám phá của Whittingham, Goodenough và Yoshino. Bộ ba này đã được trao giải Nobel Hóa học năm 2019.
Việc phát minh này - lần đầu tiên được tạo nguyên mẫu ở Mỹ và sau đó chủ yếu được phát triển ở Anh - chỉ được sản xuất hàng loạt ở Nhật Bản là một trong những chủ đề vẫn gây ra sự thất vọng trong thế giới nói tiếng Anh. Tại sao, trong khi có rất nhiều tiến bộ trí tuệ trong thiết kế pin diễn ra ở Châu Âu và Châu Mỹ, thì hoạt động sản xuất lại luôn do Châu Á thống trị? Câu trả lời ngắn gọn là Nhật Bản có một thị trường đang phát triển để sản xuất các mặt hàng điện tử – ban đầu là máy quay video và máy nghe nhạc Walkman – vốn cần pin mật độ cao hơn.
Khi những năm 1990 nhường chỗ cho những năm 2000, pin lithium-ion đã trở thành một thành phần thiết yếu của thế giới điện tử, trong máy tính xách tay, điện thoại thông minh và cuối cùng là ô tô điện. Điện thoại thông minh không thể ra đời nếu không có những con chip silicon đặc biệt bên trong, cung cấp năng lượng cho mạch điện, chứa các bộ xử lý và cung cấp bộ nhớ lưu trữ, chưa kể đến việc cung cấp cảm biến quang học cho máy ảnh. Nhưng không có thiết bị nào trong số này có thực tế khi không có ánh sáng, pin mạnh có mật độ năng lượng lớn hơn nhiều so với các loại pin trước đó.
Tất cả những điều đó là lý do tại sao nhu cầu về lithium đã bắt đầu vượt xa khả năng khai thác nó từ trái đất của chúng ta. Và không giống như đồng hoặc sắt mà chúng ta đã có kinh nghiệm sản xuất trong nhiều thế kỷ, ngành công nghiệp lithium vẫn còn ở giai đoạn sơ khai. Cho đến gần đây, có rất ít mỏ và các hồ ở Salar de Atacama vẫn còn tương đối nhỏ. Ngày nay chúng đủ lớn để có thể dễ dàng nhìn thấy từ không gian, một bảng màu sơn phấn khổng lồ đập ngay giữa sa mạc.

Mặt tối của kim loại nhẹ nhất

Có rất ít hình ảnh minh họa tốt hơn về Anthropocene so với các ao bốc hơi rộng lớn màu ngọc lam ở Atacama, rất ít dấu hiệu rõ ràng hơn về những gì cần thiết để thỏa mãn một thế giới nghiện điện thoại thông minh và quyết tâm điện khí hóa để thoát khỏi sự phụ thuộc vào nhiên liệu hóa thạch. Tuy nhiên, thật khó để thoát khỏi một suy nghĩ khó chịu hơn: có phải chúng ta chỉ đang thay thế một dạng dấu chân

môi trường này bằng một dạng dấu chân môi trường khác? Chúng tôi hầu như không hiểu các quy trình đã lắng đọng nước muối lithium giàu này dưới bề mặt hồ muối này nhưng ở đây chúng tôi đang hút nó lên và gửi nó đến các nhà máy lọc dầu nhanh nhất có thể. Nhưng nếu không phải từ đây thì ở đâu?

Salar de Atacama của Chile không phải là *salar duy nhất* trên thế giới; nó thậm chí không phải là lớn nhất. Có một số khá ít trong số chúng nằm rải rác quanh góc này của Nam Mỹ, ở Chile, Bolivia và Argentina – nơi được gọi là "tam giác lithium". Salar de Uyuni của Bolivia có lẽ là nổi tiếng nhất. Nó có diện tích lớn hơn nhiều – 4.650 dặm vuông, so với 1.160 dặm vuông của Atacama – và chứa nhiều lithium hơn. Tuy nhiên, trong khi chính phủ Bolivia đã bắt đầu khai thác và cam kết tạo ra ngành công nghiệp pin của riêng mình thì họ vẫn đạt được rất ít tiến bộ vào thời điểm viết bài. TRONG Một phần điều này xuất phát từ lý do chính trị và một phần là do nước muối ở đó dù dồi dào nhưng cũng khó xử lý hơn nhiều: nó có ít hơn một nửa lượng lithium mỗi lít so với ở Atacama và nhiều hơn ba lần lượng magie. .

Trong khi tam giác lithium tự hào có nồng độ nước muối lithium lớn nhất thế giới, thì cũng có một số lượng được tìm thấy ở các hồ muối thuộc cao nguyên Thanh Hải–Tây Tạng ở Trung Quốc. Bạn cũng có thể chiết xuất kim loại này từ một loại đá cứng màu be gọi là spodumene – lithium nhôm silicat. Thật vậy, nguồn gốc của đá cứng này giúp giải thích tại sao lithium có tên như vậy – từ tiếng Hy Lạp có nghĩa là đá, *lithos* . Khai thác spodumene giống như khai thác sắt hoặc đồng hơn nhiều: nó phải được cho nổ ra khỏi lòng đất trước khi được nghiền và xử lý theo cách tương tự như cách chúng ta khai thác và tinh chế hầu hết các loại đá khác. Điều này hiện đang diễn ra với tốc độ nhanh đến mức Úc đã vượt qua Chile để trở thành nhà sản xuất lithium lớn nhất thế giới, mặc dù gần như toàn bộ spodumene của họ thực sự được vận chuyển đến Trung Quốc để xử lý, giống như chúng ta làm với quặng đồng và gần như mọi thứ khác. quặng trên thế giới.

Việc gửi những tảng đá này đi tinh chế ở Trung Quốc cũng giúp ích theo một cách khác ít được thảo luận hơn: điều đó có nghĩa là Úc không cần phải chịu trách nhiệm về tất cả lượng khí thải tạo ra khi chúng được tinh chế, con số này khá nhiều. Như bạn đã thấy, biến đá

thành một sản phẩm tinh chế là một công việc khó khăn, tốn rất nhiều năng lượng và thải ra khá nhiều khí nhà kính. Thật vậy, lithium được sản xuất từ đá cứng là nguyên nhân gây ra lượng phát thải khí nhà kính và sử dụng nước gấp nhiều lần so với lithium được sản xuất từ nước muối bên dưới Salar ở Chile. Nếu bạn mua một chiếc ô tô điện, bạn thường không biết lithium trong bộ pin của mình đến từ đâu, nhưng việc trả lời câu hỏi đó sẽ cần một chặng đường dài để hiểu được quá trình sản xuất nó thân thiện với môi trường hay không thân thiện với môi trường như thế nào. Cuối cùng, sau vài năm sử dụng, chiếc xe đó sẽ "trả hết" những khoản bảo vệ môi trường đó. chi phí so với một chiếc ô tô chạy bằng xăng, nhưng khoảng thời gian đó có thể thay đổi đáng kể. [4]

Và khi thế giới đang gấp rút đảm bảo có thêm lithium, những cân nhắc đó hiện đang bị lùi lại phía sau. Phân khúc phát triển nhanh nhất của ngành công nghiệp lithium là khai thác đá cứng chứ không phải nước muối, phần lớn là do việc cho nổ và đào đá dễ dàng hơn nhiều so với việc kiên nhẫn chờ đợi hàng triệu lít chất lỏng bay hơi. Và trong nỗ lực sản xuất nhiều thứ hơn, các công ty khai thác mỏ cũng đang theo đuổi những nguồn lithium mới hơn, xa lạ hơn.

Ở vùng cực Tây Nam nước Anh, hai công ty đang hy vọng khai thác lithium từ các mỏ đá cũ chưa được khai thác trong nhiều thập kỷ. Trong khi đó, Rio Tinto – cùng công ty khai thác sắt ở Pilbara của Úc – đang đặt hy vọng vào một tảng đá được phát hiện ở thung lũng Jadar ở Serbia vài năm trước. Jadarite hóa ra có thành phần hóa học tương tự đáng kể với Kryptonite, tinh thể làm suy yếu Superman - ít nhất là trên cơ sở công thức được mô tả trong bộ phim Superman Returns năm 2006 - với điểm khác biệt chính là, không giống như Kryptonite, jadarite không phát sáng màu xanh lục và thực sự tồn tại. Điều đó nói lên rằng, kế hoạch khai thác mỏ đã khiến cộng đồng địa phương phẫn nộ đến mức gây ra các cuộc biểu tình rầm rộ nhất ở Serbia trong nhiều thập kỷ. Đầu năm 2022, chính phủ đã thu hồi giấy phép thăm dò của Rio.

Ở những nơi khác, có kế hoạch khai thác các nguồn địa nhiệt ở Rừng Đen của Đức và chiết xuất lithium từ một số loại đất sét, và một số thậm chí còn đề xuất chiết xuất nó từ nước biển, nơi nó được tìm thấy với nồng độ 0,2 phần triệu. Một số chương trình thí điểm này cuối

cùng có thể thành công, nhưng không thể biết được chúng ta sẽ cần tiêu tốn bao nhiêu năng lượng và chất thải để đạt được điều đó. Tuy nhiên, không thiếu những thứ trong nước muối hoặc trong đá, và cũng giống như việc chúng ta ngày càng sản xuất đồng tốt hơn, điều tương tự chắc chắn sẽ chứng minh rằng trường hợp với lithium. Câu hỏi thực sự không phải là liệu có đủ hay không mà là cần phải làm gì - cả về tiền bạc và tác động môi trường - để loại bỏ nó.

Hãy xem xét tình hình ở Atacama này. Có thể hiểu được phần lớn sự náo động về môi trường xung quanh việc khai thác tài nguyên này tập trung vào nước. Tại sao trên *trái đất* lại có người dự tính khai thác bằng nước ở sa mạc khô cằn nhất thế giới? Đó là lời phàn nàn mà bạn nghe đi nghe lại từ người dân địa phương, tài xế taxi, các nhà hoạt động và nông dân sống quanh Salar.

Và họ có lý: để chuyển nước muối từ ao khổng lồ này sang ao khổng lồ khác, những người khai thác lithium thực sự đã bơm nước ngọt lên khỏi mặt đất từ rìa hồ muối - từ điểm đó nước sông đã rút xuống dưới lòng đất nhưng vẫn chưa biến thành nước muối. Các thợ mỏ nói rằng nếu không bơm nước vào các kênh giữa các ao này thì toàn bộ hệ thống sẽ bị tắc nghẽn; ergo, không có lithium. Họ chỉ ra rằng lượng nước họ khai thác được là nhỏ so với lượng nước bạn cần để khai thác và tinh chế đồng hoặc lượng nước mà cộng đồng du lịch sinh thái địa phương bơm lên. Ngoài ra, họ nói thêm, vào thời điểm họ lấy được nước ra khỏi lòng đất, người dân địa phương đã có thể lấy nước từ các con sông chảy qua *quebradas* . Chính xác thì họ đang tước đoạt ai?

Ngoại trừ việc nó không đơn giản như vậy, vì thực sự có hai vấn đề riêng biệt ở đây. Có nước mà các thợ mỏ đang khai thác từ các mặt của bãi muối và sau đó là nước muối - hồ chứa ngầm thời tiền sử mà từ đó họ lấy được lithium thực sự. Điều này đưa chúng ta đến câu hỏi thoạt nghe có vẻ kỳ quái: *nước là gì?* Vì sự sẵn có của khoáng chất quan trọng này trong tương lai – và do đó, pin sạc trong tất cả các thiết bị của chúng ta – có thể sẽ dẫn đến câu đố này. Cụ thể hơn, liệu định nghĩa về 'nước' có bao gồm chất lỏng lấp lánh trong các vũng trên bãi muối không?

Đối với nhiều người, kể cả những người sống ở vùng ven, câu trả lời là có. Chắc chắn, nước muối có muối trong đó - khoảng 25–30% theo

thể tích - nhưng phần còn lại là nước. Ngay cả khi người dân địa phương đấu tranh để bảo tồn từng giọt nước, những gì đang bốc hơi từ những ao hồ rộng lớn dưới ánh mặt trời chói chang của sa mạc chính là nguồn nước giải khát và mang lại sự sống. Và đối với nhiều người, đáng chú ý nhất là các cộng đồng bản địa địa phương sống trong các ngôi làng nhìn ra Salar và coi đó là một phần lãnh thổ do Chúa ban cho họ, điều đó có nghĩa là nước muối phải được xác định là một phần tài nguyên nước của họ.

Một trong những ngôi làng này, Río Grande, là một cộng đồng nơi người dân vẫn kiếm sống bằng nghề nông, tưới tiêu cho cây trồng bằng nguồn nước quý giá đôi khi chảy xuống từ dãy Andes. Khi tôi đến thăm, một trong những người dân địa phương, Pamela Condori, đã dẫn tôi đến cánh đồng nơi một người nông dân đang chăm sóc vụ tỏi của mình. Anh ấy đưa cho chúng tôi một vài bóng đèn.

“Tỏi này nổi tiếng lắm,” Pamela nói, bóc một tép và đưa cho tôi. 'Nó rất ngọt ngào và tinh tế. Họ xuất khẩu nó sang Thụy Sĩ.”

Cô ấy nhìn tôi đầy mong đợi và tôi nhét tép sống vào miệng, cố gắng không để bị xúc phạm. Cô ấy cứ nhìn chằm chằm vào tôi nên tôi mỉm cười thân thiện và cắn vào đó. Có một sự bùng nổ của các hương vị - một số trong số chúng dễ chịu, hầu hết thì không - và tôi đột nhiên lắp bắp và không nói nên lời, cố gắng tìm hiểu xem liệu vị chát chát trên nụ vị giác được cho là có tác dụng chữa bệnh hay là một hình thức tra tấn. Sau đó, một lần nữa, không giống như quả cà chua tôi đã ăn trong nhà kính ở Thung lũng Lea, món này, tôi cố tự nhủ, cũng tự nhiên như bạn nhận được.

Pamela lợi dụng sự im lặng của tôi để giải thích về những vấn đề liên quan đến việc khai thác lithium.

“Họ đang cưỡng hiếp Mẹ Thiên nhiên”, cô nói. 'Chúng tôi tôn trọng cô ấy. Nhưng ngành khai thác mỏ đến nơi để thực hiện tất cả việc khai thác và họ lấy đi nước, lấy đi quyền của chúng ta đối với nước - như muốn nói: đây là của tôi. Đó là điều khiến chúng tôi khó chịu, bởi vì không: nó không phải của họ, mà là của chúng tôi. Chúng tôi đã đến đây lần đầu tiên trên lãnh thổ này.'

Trên một mũi đất nhìn ra Salar, những hồ nước trong xanh có thể nhìn thấy từ xa, một người địa phương khác, Christian Espíndola, rót một ít rượu và rải vài lá coca lên một ngôi đền.

'Ở đây không mưa. Nhưng nước giống như máu chảy trong huyết quản của chúng ta', ông nói. 'Các công ty khai thác như SQM đang phá hủy Salar de Atacama. Họ đang trực tiếp giết chết sự sống của Salar.'

Nhưng đối với các thợ mỏ và cơ quan quản lý của họ, chất lỏng trong các bể đó chắc chắn *không phải là* nước. Qua một loạt bài thuyết trình PowerPoint, các giám đốc điều hành của SQM đã giảng cho tôi rất nhiều rằng nước muối tốt hơn nên được coi là một loại khoáng chất. Nước muối hoạt động rất khác với nước, hiếm khi trộn lẫn với nước và chìm sâu vào lòng đất hơn nước ngọt. Các nhà địa chất thủy văn làm việc tại các công ty khai thác mỏ này cho rằng điều gì đó tương tự đang xảy ra dưới lòng đất ở Salar. Họ nói rằng hai chất lỏng đang đẩy nhau, tạo ra các lớp riêng biệt và hoạt động giống như những chất rất khác nhau.

Nếu ở giai đoạn này bạn cảm thấy hơi bối rối thì bạn không đơn độc. Trong thời gian ở Salar, tôi liên tục bị khiển trách vì gọi nước muối là từ w ('Ed, đó không phải là nước!') cho đến khi một trong những giám đốc cấp cao khác mà tôi đang phỏng vấn mắc phải sai lầm tương tự: 'Rất tiếc - tôi vừa nói nước. , nhưng đó không phải là nước.' Tiếng khiển trách chấm dứt. Khi ngay cả những người trong cuộc chỉ đạo điệu nhảy định nghĩa kỳ lạ này thỉnh thoảng cũng vấp ngã, bạn sẽ biết mình đang ở trong một lãnh thổ có phần u ám.

Dù sao đi nữa, khoa học về các loại hệ thống nước này (xin lỗi: 'khoáng chất lỏng') quá mới lạ và mù mờ nên việc cố gắng xác định tác động mà việc khai thác lithium đang gặp phải là vô cùng khó khăn. Một điều mà mọi người đều có thể đồng ý là khi các thợ mỏ bơm thêm nước muối, họ sẽ làm cạn kiệt các hồ chứa ở đây, khiến nhiều người phải chịu thiệt hại. hàng triệu năm hình thành. Sau đó, một lần nữa, bạn có thể nói nhiều điều tương tự về hầu hết các hình thức khai thác, Corrado Tore, nhà địa chất thủy văn hàng đầu của SQM cho biết. Chúng tôi đang đứng trên bờ một trong những hồ nước ở Salar. Ở giai đoạn này, nước muối đã trôi qua được gần một năm; hầu hết các khoáng chất khác – clo, kali và magie – đã bị loại bỏ và những gì còn lại là chất lỏng sền sệt, màu vàng xanh. Gió thổi qua Salar, quất vào chúng tôi những tinh thể muối.

Ông nói: “Không có hoạt động nào của con người mà không có bất kỳ tác động nào”. 'Đúng, chúng tôi đang gây ra tác động ở đây. Nhưng điều quan trọng là phải kiểm soát được tác động đó – giảm thiểu rủi ro và thực hiện việc đó theo cách thân thiện nhất có thể với môi trường. 'Chúng tôi cố gắng giải thích cho cộng đồng địa phương những gì chúng tôi đang làm ở đây. Đó là khai thác – vâng. Giải pháp thay thế là gì? Chỉ là không làm gì cả. Nhưng bạn cần vật liệu đó – bạn sẽ lấy vật liệu đó từ nơi này hay nơi khác.”

Chúng tôi nhìn lại vùng nước muối, giờ đã thức tỉnh sau giấc ngủ hàng triệu năm và đang bắt đầu một cuộc hành trình rất khác. Nó đang được khai thác với tốc độ vượt xa khả năng tự bổ sung của Salar nhưng không ai hoàn toàn chắc chắn điều gì tạo nên tỷ lệ 'an toàn'. Việc khai thác gây ra sự thay đổi không thể đảo ngược trong môi trường địa phương ở điểm nào? Các nhà sinh vật học chỉ ra những dấu hiệu mà họ cho là đại diện cho chim hoàng yến trong mỏ lithium: những cây chết dần ở rìa Salar, và quần thể chim hồng hạc, theo một bài báo được trích dẫn nhiều, đã giảm dần kể từ khi khai thác nước muối. Ngược lại, SQM chỉ ra nghiên cứu của riêng mình về quần thể hồng hạc, thậm chí còn xa hơn nữa, cũng như thực tế là các loài chim này là loài du mục và vì vậy người ta không thể đọc quá nhiều về số lượng của chúng… Bạn hiểu ý rồi đấy. [5]

Nhưng câu trả lời ngắn gọn cho tất cả những điều này là chúng ta biết rất ít về cách hệ sinh thái này được tạo ra hoặc cách nó đối phó. ngày nay mà không ai có thể biết chắc liệu chúng ta có đang gây ra thiệt hại không thể khắc phục hay không. Giống như khai thác dưới biển sâu, một nỗ lực khác nhằm khai thác lãnh thổ xa lạ, những điều chưa biết nhiều hơn đáng kể những điều đã biết.

Vì vậy, chúng ta quay trở lại tình trạng căng thẳng tương tự mà chúng ta đã gặp đi gặp lại trên khắp Thế giới Vật chất. Làm thế nào để cân bằng hai điều này: một mặt là nhu cầu về hàng hóa (và phần thưởng dành cho những người cung cấp nó) và mặt khác là hậu quả? Trong trường hợp của lithium, sự cân bằng thậm chí còn khó đạt được hơn, vì đó là phương tiện để chúng ta thoát khỏi sự phụ thuộc vào nhiên liệu hóa thạch. Tuy nhiên, cũng giống như động cơ đốt trong đã giúp loài người thoát khỏi một lỗ hổng (sự ô nhiễm ở các thị trấn và thành phố của chúng ta do phân ngựa) nhưng lại giúp tạo ra một lỗ hổng

khác, khả năng điều tương tự xảy ra với lithium, coban hoặc niken hay mangan?
“Đây là ngã tư của tương lai nhân loại,” Stefan Debruyne, một giám đốc điều hành khác của SQM, cho biết khi chúng tôi kết thúc chuyến tham quan các bể nước muối. 'Chúng ta cần cho cộng đồng địa phương thấy sự hy sinh mà họ dành cho hành tinh này quan trọng như thế nào. Chúng ta có thể thấy tác động của nó đối với tầm nhìn vũ trụ của họ – rằng nó đang làm tổn thương Pachamama [mẹ trái đất] của họ… Rằng chúng ta đang khoan vào lòng đất và hút nước muối ra ngoài.'
Khi tôi đến Chile, tôi đang ở giữa một quá trình mà trong một khoảng thời gian có vẻ như nó phải đối mặt trực tiếp với những tình huống khó xử đó. Sau các cuộc biểu tình trên đường phố vào năm 2019, được thúc đẩy bởi thực tế rằng đất nước này là một trong những nền kinh tế bất bình đẳng nhất thế giới, Chile đã cam kết viết lại hiến pháp của mình, có từ thời chế độ độc tài quân sự của Augusto Pinochet. Một hội nghị đã được thành lập, quy tụ mọi người từ khắp mọi miền đất nước để cố gắng đưa ra một tài liệu mới. Trong một thời gian, mọi thứ đều được đặt lên bàn, bao gồm cả ý tưởng quốc hữu hóa sản xuất lithium, giống như cách quốc hữu hóa đồng. của chính phủ Salvador Allende vào những năm 1970. Một số thậm chí còn lập luận ủng hộ việc cấm hoàn toàn việc khai thác lithium. Những cuộc trò chuyện tương tự cũng đã diễn ra trên khắp châu Mỹ Latinh; Mexico vừa theo chân Bolivia và quốc hữu hóa ngành công nghiệp lithium (nhỏ hơn, kém phát triển hơn). Ở Chile, thời gian trôi qua, hầu hết các đề xuất gây tranh cãi đều bị bác bỏ. Giữa quá trình, một nhà vận động chống cháy 36 tuổi tên là Gabriel Boric đã được bầu làm tổng thống, làm dấy lên hy vọng trong số các nhà vận động rằng có lẽ Chile, với trữ lượng đồng và lithium hàng đầu thế giới, sẽ suy nghĩ kỹ về việc trở thành Ả Rập Saudi tiếp theo. Nhưng khi tôi đến thăm Cristina Dorador, một nhà sinh vật học và là một trong những thành viên nổi bật nhất của hội nghị hiến pháp vào giữa năm 2022, cô ấy có vẻ hơi lạc quan về triển vọng của nó.
Bà nói: “Gần như không thể dừng việc khai thác lithium vào thời điểm này”. Chúng tôi đã gặp nhau ở Antofagasta, thị trấn cảng có tuyến đường sắt đồng dẫn lên dãy Andes vẫn mang theo cực âm và tập

trung từ các mỏ đồng lớn nhất thế giới cho đến tận ngày nay. Chúng tôi đứng trò chuyện trên một lối đi dạo ven biển, dựa vào lan can khi những con sóng ập vào bên dưới chúng tôi. Phía sau chúng tôi là một trung tâm mua sắm lớn nhưng Cristina chỉ vào cầu cảng tiếp theo, phần còn lại của một bến tàu gỗ cũ.
Cô nói: “Đó là nơi lực lượng Chile đổ bộ khi họ xâm chiếm vào đầu Chiến tranh Thái Bình Dương. Tôi nhìn chằm chằm vào những gốc cây gỗ. Vì vậy, đây là nơi nó bắt đầu, cuộc chiến tranh giành caliche trên sa mạc; cuộc chiến bắt đầu vào năm 1879 do tranh chấp về thuế do một công ty đường sắt vô danh nộp và cuối cùng đã tước đi bờ biển của Bolivia, củng cố vị thế của Chile là quốc gia giàu khoáng sản nhất thế giới. Đó là một buổi sáng mùa đông trong lành và mặt trời sắp xuyên qua những đám mây.
Cristina không đặt mục tiêu trở thành một nhà vận động hay thực sự dành thời gian cạnh tranh với các luật sư, soạn thảo một tài liệu được thiết kế để thay đổi các luật cơ bản ở Chile. Cô đã dành phần lớn sự nghiệp của mình để nghiên cứu về loài tảo ít người biết đến ở Salar, chỉ để bị đẩy vào thế giới kỳ lạ này khi cô tìm thấy dữ liệu cho thấy số lượng chim hồng hạc đang ăn tảo đã giảm.
'Đó là một nghịch lý lớn. Ở giữa sa mạc Atacama - sa mạc khô cằn nhất thế giới - nước đang bốc hơi', cô nói trước khi dừng lại và nhìn lại cầu tàu lân cận.
Bà nói: “Chúng ta cần hiểu rằng có thể sẽ có những loại pin khác. 'Chúng tôi đã có trải nghiệm này với nitrat. Hầu như toàn bộ nền kinh tế Chile đều dựa vào việc khai thác nitrat, nhưng rồi đột nhiên người Đức phát minh ra nitrat nhân tạo và [gây ra] một trong những cuộc khủng hoảng chính ở đất nước này - đặc biệt là ở khu vực này.
‘Sự phụ thuộc vào nguyên liệu thô này cũng có thể khiến chúng tôi rơi vào tình thế rất khó khăn trong tương lai.’
Nói cách khác, chúng tôi đã từng ở đây trước đây. Nếu bạn đi lên từ Antofagasta, qua những ngọn đồi, vượt qua những căn lều đầy màu sắc của thị trấn tồi tàn, và đi theo tuyến đường sắt leo lên phía dãy Andes, sau khoảng 10 dặm bạn sẽ gặp một dãy nhà đổ nát và một tấm biển: O 'Higgins.
Được đặt theo tên người đã giải phóng Chile khỏi ách thống trị của Tây Ban Nha, đây là một trong những ga đầu tiên của tuyến đường

sắt, được xây dựng để kết nối cảng với một trong những mỏ caliche đầu tiên. Tất nhiên, khu mỏ đã không còn hoạt động từ lâu và nhà ga đã bị bỏ hoang từ lâu, nhưng các đoàn tàu vẫn chạy qua vài lần một ngày. Và khi họ đi qua đống đổ nát của 'vàng trắng' của ngày hôm qua, họ cũng đi ngang qua thứ tương đương hiện đại, vì ở Salar del Carmen đây là nhà máy lọc lithium lớn nhất thế giới.
Mô tả tốt nhất mà tôi có thể nghĩ ra cho khu phức hợp này, cũng do SQM điều hành, là nó trông hơi giống một nhà thờ, điều này nghe có vẻ phi lý vì tất nhiên nó trông chẳng giống một nhà thờ chút nào – giống một nhà máy lọc dầu hoặc nhà máy hóa chất hơn . Nhưng tại nó Tận sâu trong tâm hồn, được bao quanh bởi tất cả các đường ống và ống khói bốc khói, là một nhà chứa máy bay tôn cao chót vót, sáng rực đến chói mắt, trông gần giống như một nhà thờ ván lợp khổng lồ màu trắng, được thắp sáng bởi Đấng Toàn năng.
Khi tôi đến gần hơn một chút, tôi nhận ra chuyện gì đang thực sự xảy ra. Toàn bộ tòa nhà được bao phủ bởi một lớp bột màu trắng cực kỳ mịn bám vào mọi bề mặt của nó. Bên trong nó cũng có bụi trắng, chất thành từng đống lớn trong nhà kho, trên đường ống, lối đi và lan can. Nước muối chứa nhiều lithium, màu vàng lục, nhờn từ Salar được chở đến, vẫn ở dạng lỏng. Nó được bơm vào các đường ống và buồng, nơi nó trải qua nhiều chu kỳ bay hơi hơn và được trộn với các hóa chất, giúp nó tạo thành bột mịn màu trắng. Có nhiều loại khác nhau, loại tốt nhất sàng lọc các hợp chất lithium thành các hạt có kích thước chỉ 5 micron – nhỏ đến mức bột hoạt động giống chất lỏng hơn là chất rắn, văng ra xung quanh khi bạn xử lý.
Điều đó giúp giải thích tại sao toàn bộ nhà máy lại phủ đầy bụi trắng. Cho đến nay trong chuyến hành trình xuyên Thế giới Vật chất, tôi đã bị nhấn chìm trong pháo hoa bằng sắt lấp lánh trong lò cao, bị bao phủ bởi chất nổ từ chất nổ ở các mỏ và đã lái xe qua những đường hầm bụi muối sâu dưới Biển Bắc. Bây giờ tôi đang bị bao phủ trong một đám mây lithium rối rắm. Chúng tôi có khẩu trang, kính bảo hộ và các thiết bị PPE cần thiết nhưng tôi bắt đầu lo lắng rằng một số trong số đó sẽ xâm nhập vào hệ thống của tôi. Sau đó tôi nhớ ra lớp bụi này cũng là một loại thuốc không có tác dụng khó chịu, lập tức cảm thấy dễ chịu hơn một chút. Tôi cân nhắc xem liệu lithium trong không khí có giúp ích hay cản trở thành tích an toàn của nhà máy hay không.

Một số công nhân, mặc bộ đồ bảo hộ toàn thân, mạo hiểm tiến sâu vào máy móc và quay trở lại như những bóng ma màu trắng ma quái. Nhiệt độ ở đây thậm chí còn nóng hơn cả Salar, một phần là do chúng tôi ở gần mực nước biển hơn và thực tế là tất cả các thiết bị kêu lạch cạch này đều rất nóng.
Và nó có thể có cảm giác rất giống một môi trường sống ngoài hành tinh khác nếu không phải vì tôi đã nhìn thấy thứ gì đó tương tự cách đây không lâu. Cách đó hàng ngàn dặm ở Cheshire, nơi các nhà máy cũ vẫn sử dụng nước muối địa phương và biến nó thành tro soda và bicarbonate của soda, việc bố trí trông giống nhau một cách kỳ lạ: bụi trắng giống nhau ở khắp mọi nơi, cùng những chiếc máy nóng hổi tạo ra 5 loại giống hệt nhau. - tấn bao được xe nâng chở đi. Hóa ra, việc sản xuất lithium không khác mấy so với việc sản xuất baking soda. Quả thực, trong những năm tới, các nhà sản xuất lithium có thể sẽ phải mượn thêm ý tưởng từ các nhà sản xuất muối cũ. SQM đang cân nhắc thay đổi cách biến nước muối thành lithium bằng cách triển khai một kỹ thuật được gọi là chiết xuất lithium trực tiếp (DLE). Những ao màu ngọc lam khổng lồ trên Salar sẽ bị loại bỏ, thay vào đó là các nhà máy bốc hơi có nguồn gốc từ những ao mà British Salt đã sử dụng từ lâu để biến nước muối Cheshire thành muối ăn. Và thực tế là bạn không thể tạo ra lithium nếu không sử dụng chính những hóa chất được sản xuất từ muối. Để tạo ra lithium cacbonat, công thức đi vào các tế bào được sản xuất với số lượng lớn ở Trung Quốc, bạn thêm tro soda. Để tạo ra lithium hydroxit, một dạng khác được sử dụng chủ yếu trong pin tầm xa, bạn thêm xút: chất được sản xuất từ nước muối theo quy trình chloralkali. Ngay cả ở sa mạc Chile này, chúng tôi vẫn đang đi trên những con đường muối cũ.
Từ nhà máy lọc dầu, các túi lithium cấp pin được vận chuyển bằng xe tải và sau đó vận chuyển đi, chủ yếu đến châu Á nhưng có lẽ trong tương lai sẽ đến các nhà máy ở Mỹ và châu Âu, nếu kế hoạch hiện tại có kết quả, cuối cùng sẽ thay thế các nhà máy ô tô ngày nay. . Vật liệu này, chỉ cách đây vài năm được coi là một sản phẩm hóa học, giờ đây đã trở thành tâm điểm của cơn sốt vàng trắng. Và những gì chúng ta đang chứng kiến ở đây, khi lượng thuốc súng đó được chở từ sa mạc Atacama, không chỉ đơn thuần là sự chuyển đổi của ngành công nghiệp ô tô mà là sự thay đổi bản đồ địa chính trị thế giới.

Cũng giống như cách chúng ta nói ngày nay về các quốc gia dầu lửa như Ả Rập Xê Út hay Nga, thời đại pin đang sinh ra một loại *máy điện mới* : các quốc gia như Chile, Argentina, Australia và tất nhiên là cả Trung Quốc, những quốc gia sẽ thống trị việc khai thác và tinh chế của những vật liệu này. Giống như câu chuyện địa chính trị của thế kỷ 20 được xác định bởi ý muốn bất chợt của các nhà độc tài và bạo chúa ở Trung Đông và Nga, khi thế kỷ 21 trôi qua, cuối cùng chúng ta có thể thấy họ được thay thế bằng một dàn nhân vật và quốc gia mới mà phần còn lại của thế giới dựa vào. thế giới sẽ dựa vào những nguyên liệu thô quan trọng này.

Ngoại trừ việc lần này có ba điểm khác biệt quan trọng. Đầu tiên là lần này chúng ta đang di chuyển *xuống* bậc thang năng lượng thay vì đi lên. Pin lithium-ion có mật độ năng lượng thấp hơn đáng kể so với dầu, khí đốt hoặc thậm chí là than đá. Thứ hai là vật liệu chúng tôi khai thác không bị đốt cháy; năng lượng của chúng không bị bốc hơi mà được lắp đặt bên trong pin, về mặt lý thuyết, ít nhất có thể được tái chế.

Thứ ba là các quốc gia thực hiện việc khai thác không còn chắc chắn rằng họ muốn làm điều đó nữa. Ngay sau cuộc trò chuyện của tôi với Cristina, dự thảo hiến pháp mới của Chile đã được đưa ra trưng cầu dân ý trong nước. Người dân đã bỏ phiếu bác bỏ nó, nhưng chính phủ Boric đã thúc đẩy kế hoạch thắt chặt các quy định về khai thác cả đồng và lithium. Ngay cả khi thế giới cần nhiều khoáng sản này hơn, vẫn chưa rõ liệu các cơ quan điện lực có sẵn sàng cung cấp chúng hay không.

17
Bánh cuộn thạch

TIA LỬA, NEVADA

Vẫn còn tuyết trên các đỉnh núi ở vùng sa mạc phía bắc Nevada. Những con ngựa hoang rượt đuổi nhau lên xuống sườn đồi, tung bờm khi chạy nước kiệu. Và nếu không có những gì ở dưới đáy thung lũng, bạn có thể bị lừa khi nghĩ rằng chúng ta đang ở trong một cảnh trong một bộ phim Miền Tây hoang dã.

Nhưng không: những gì chúng ta đang nhìn thấy, ở bên dưới chúng ta, là một trong những tòa nhà hấp dẫn nhất trên thế giới. Không phải nhìn từ bên ngoài nó có vẻ cực kỳ thú vị; tất cả những gì chúng ta có thể thấy từ đây là một tòa nhà đồ sộ hình chữ L được bao phủ bởi các tấm pin mặt trời với một đường màu đỏ chạy ngang trên đỉnh. Điều chính khiến bạn ấn tượng ngay cả khi nhìn từ xa là quy mô của nó: có kích thước bằng 33 sân bóng đá Mỹ. Nhưng khi bạn bóc bỏ các mặt thì mọi thứ mới bắt đầu trở nên thú vị. Những gì nhìn từ xa giống như một tòa nhà phẳng, thấp thực sự có ba tầng nhà xưởng cao gấp đôi. Và sau đó chúng ta biết được những gì họ thực sự đang làm ở đây. Toàn bộ 2/3 khu phức hợp khổng lồ này được dành cho việc sản xuất pin. Chúng ở *khắp mọi nơi* bạn nhìn thấy: hàng triệu tế bào – những ống trụ kim loại có kích thước bằng ngón tay trông không khác gì pin AA mà chúng ta đều quen thuộc, mặc dù lớn hơn một chút. Hãy quan sát họ đi vòng quanh các máy móc một lúc và cuối cùng bạn sẽ tìm thấy bản thân bạn cảm thấy hơi bị thôi miên. Whiz! Họ di chuyển trên những đường ray nhỏ và những băng chuyền, mang trên những chiếc caddie nhỏ bằng nhựa, được giữ cố định bằng những thanh ray thép. Ping! Chúng di chuyển lên xuống, trước khi được xoay quanh những thứ trông giống như vòng quay ngựa gỗ thu nhỏ, tất cả đều phát ra tiếng leng keng và leng keng của kim loại.

Lần đầu tiên tôi nhìn thấy một trong những bộ phận lắp ráp pin này với các ống thép quay vù vù, tôi đã nhớ lại, dù điều này nghe có vẻ kỳ lạ, đến một nhà máy sản xuất cá ngừ đóng hộp mà tôi đã thấy vài năm trước ở Seychelles, mặc dù không có mùi khó chịu của cá chết. Tuy

nhiên, những gì chúng ta đang chứng kiến ở đây có lẽ là điều gần gũi nhất với một cuộc cách mạng công nghiệp thời hiện đại. Những ống thép nhỏ này là những tế bào giúp điện khí hóa phương tiện giao thông đường bộ.

Vì đây là nơi lithium được chiết xuất từ bên dưới Salar de Atacama được chuyển thành thứ mà chúng ta thực sự có thể sử dụng. Trong khoảng thời gian từ khi rời Chile đến khi đến đây, kim loại này đã có mặt trên khắp thế giới. Tại một nhà máy khác, nó được trộn thành một hỗn hợp gồm những vật liệu hoạt tính cathode, được dán vào các điện cực trước khi đưa vào các hộp thép này.

Nhà máy sản xuất pin này là nơi lĩnh vực khoa học vật liệu đối đầu trực diện với các yêu cầu cấp thiết về *quy mô* . Thách thức thực sự ở đây – vấn đề cần giải quyết nếu có hy vọng ngăn chặn biến đổi khí hậu – không chỉ đơn thuần là tìm ra chất hóa học tốt nhất bên trong những viên pin đó mà còn tạo ra đủ chúng để biến xe điện thành hiện thực với giá cả phải chăng. Những gì chúng ta đang thấy ở đây bên trong nhà máy này là khoảnh khắc của Thomas Edison trên bê tông, khoảnh khắc của Henry Ford trên ô tô, nơi một thứ gì đó thông minh và thủ công bắt đầu được sản xuất với số lượng khá đáng kinh ngạc. Đó là nơi nước muối lithium cổ xưa mà chúng ta thấy ở Chile được tái sử dụng thành thứ có thể thực sự thay đổi thế giới.

Rốt cuộc, không thể loại bỏ lượng khí thải carbon nếu không giải quyết việc chúng ta sử dụng ô tô chạy bằng xăng và dầu diesel và xe tải. Tính đến năm 2020, hơn 1/5 tổng lượng khí thải nhà kính của chúng ta có thể bắt nguồn từ các phương tiện chạy bằng nhiên liệu hóa thạch. Không có hoạt động đơn lẻ nào khác có ảnh hưởng lớn đến lượng khí thải carbon của chúng ta, đó là lý do tại sao ngày nay có khá nhiều nỗi ám ảnh về pin và tại sao những nơi như tòa nhà này lại khá quan trọng.

Nhà máy Gigafactory

Cho đến vài năm trước, một công ty sản xuất pin được coi là một công ty lớn nếu sản xuất được 5 triệu pin mỗi tháng. Nhà máy này sản xuất nhiều như vậy trong vài ngày. Trong vòng vài năm kể từ khi được xây dựng, nó đã tạo ra hơn một tỷ tế bào và vào thời điểm bạn đang đọc bài viết này, nó có thể đã vượt qua con số 10 tỷ – một loại

pin dành cho mọi đàn ông, phụ nữ và trẻ em trên hành tinh, và tất cả đều từ thế giới tiềm ẩn này. thung lũng ở vùng hoang dã Nevada. Đây là Gigafactory 1 của Tesla (còn gọi là Gigafactory Nevada); gigafactory đầu tiên trên thế giới. Ngày nay có khá nhiều tòa nhà khác mang tên đó; tại thời điểm viết bài, Tesla còn có bốn nhà máy khác – một ở Thượng Hải, một ở Berlin, một ở Texas và một ở ngoại ô New York, mặc dù Tesla vẫn gọi nhà máy cuối cùng đó là nhà máy gigafactory nhưng hầu hết những nhà máy khác thì không. Dù sao đi nữa, định nghĩa về gigafactory vẫn khá mơ hồ, phần lớn là do thuật ngữ này về cơ bản đã bị CEO Tesla, Elon Musk, người hay thay đổi cách đây vài năm, và bởi vì định nghĩa chính xác của chính ông dường như đã thay đổi theo thời gian. qua. Tuy nhiên, ngày nay, hầu hết mọi người trong ngành kinh doanh pin dường như đã đồng ý với một định nghĩa rộng: gigafactory là bất kỳ nhà máy sản xuất lớn nào sản xuất ra rất nhiều pin – và vì 'gigafactory' cuối cùng của Tesla sản xuất các tấm pin mặt trời nên nó không còn nữa. đủ điều kiện.

Tuy nhiên, Gigafactory Nevada chắc chắn làm được điều đó. Vẫn chỉ bằng một phần ba quy mô dự kiến, nhà máy này đã quá rộng lớn rồi mà công nhân của nó di chuyển từ khu vực này sang khu vực khác bằng xe đạp và xe ba bánh. Diện tích sàn được dành hoàn toàn cho việc sản xuất tế bào, bộ pin và động cơ điện, tất cả đều được vận chuyển đến nhà máy Fremont, California của Tesla để lắp vào ô tô. Đúng vậy: hóa ra nhà máy mang tính biểu tượng nhất của công ty ô tô này thậm chí còn không sản xuất ô tô.

Sau đó, một lần nữa, đối với Musk và JB Straubel, người đồng sáng lập của ông và bộ óc kỹ thuật thực sự đằng sau công ty trong những ngày đầu thành lập, đó chính xác là vấn đề. Điều thực sự quan trọng trong kinh doanh ô tô điện, trên hầu hết mọi thứ khác, là sản xuất pin. Musk và Straubel đã chế tạo ra những chiếc ô tô đủ hấp dẫn để hàng triệu người tiêu dùng xăng dầu sẵn lòng thực hiện bước nhảy vọt khỏi động cơ đốt trong. Họ thách thức các châm ngôn cố hữu của ngành về thiết kế khung gầm và tạo ra các hệ thống quản lý năng lượng nội bộ tuyệt vời cũng như các tính năng phần mềm mà nếu không có những điều đó thì ngay cả những loại pin tốt nhất cũng sẽ bị hỏng. Vì vậy, công nghệ pin chắc chắn không phải là lời giải thích duy nhất cho việc họ đã đảo lộn thị trường ô tô như thế nào. Nhưng nếu không có

loại pin lithium-ion được sản xuất với tốc độ phi thường như vậy tại nhà máy ở Nevada này thì điều đó đã không xảy ra.
Tuy nhiên, điều hấp dẫn nhất về nhà máy này không phải là nó đang sản xuất cái gì mà là *ai* đang tạo ra nó. Mặc dù logo Tesla được dán khắp tòa nhà này nhưng hóa ra mọi tế bào được sản xuất ở Nevada trên thực tế đều do Panasonic sản xuất. Khoảng 2/3 diện tích không phải do Tesla mà do công ty điện tử Nhật Bản có tuổi đời hàng thế kỷ này chiếm giữ. Quả thực, nếu bạn cảm thấy đặc biệt táo bạo, bạn thậm chí có thể gọi nó là Panasonic Gigafactory. [1]
Vấn đề ở đây là cũng giống như việc Apple không sản xuất máy tính hay chip silicon của riêng mình, điều tương tự cũng được áp dụng trong trường hợp xe điện (EV). Các Pin bên trong hầu hết các xe điện - cho dù chúng mang nhãn hiệu Tesla, Ford, GM hay VW - trên thực tế luôn được sản xuất bởi một số công ty khác, những công ty nằm ngoài tầm radar. Và vì chúng ta quan tâm đến Thế giới Vật chất, nơi những chất đơn giản như lithium được biến thành sản phẩm phục vụ cuộc sống của chúng ta, nên chúng ta nên tập trung vào những công ty ít tên tuổi này. Suy cho cùng, nếu hành tinh này cuối cùng được cứu thoát khỏi động cơ đốt trong thì đó sẽ là nhờ Panasonic và LG Chem, Northvolt và BYD, cũng như các hãng xe hơi đang gây chú ý.
Và việc sản xuất pin ở cấp độ này là một công việc cực kỳ khó khăn, ngay cả khi khoa học cơ bản khá đơn giản. Trên thực tế, việc sản xuất tế bào có nét gì đó của những năm 1980, điều này không có gì đáng ngạc nhiên vì nó là họ hàng gần của việc sản xuất băng cassette. Cả hai đều liên quan đến việc dán bùn hóa học lên các tấm mỏng rồi cuộn chúng lại, và quá trình sản xuất cuộn này hoạt động tốt như nhau đối với những cuộn điện cực xoắn ốc quấn bên trong pin lithium-ion giống như đối với băng từ trong âm thanh. băng cassette. Quả thực, có một câu chuyện đôi khi được kể trong giới pin rằng nếu không có phát minh ra đĩa compact và DVD – thứ khiến vô số băng cassette và máy sản xuất băng video trở nên dư thừa một cách thực sự – thì những cục pin sạc này vẫn chỉ là một cái ống. mơ lâu hơn rất nhiều.
Một phần lý do giải thích tại sao các công ty Nhật Bản như Sony lại dẫn đầu trong lĩnh vực sản xuất pin không chỉ vì họ cần loại pin tốt hơn cho các thiết bị của mình như Handycam; đó là họ có thể tái sử

dụng dây chuyền lắp ráp reel-to-reel của mình để cuộn dây cực âm và cực dương thay vì băng cassette, từ đó khai sinh ra thời đại pin hiện đại. Quay lại lịch sử công ty của hầu hết các công ty pin lớn và bạn thường có thể tìm thấy tàn tích hóa thạch của một trong những thương hiệu mà bạn có thể nhớ (nếu bạn đủ tuổi) từ VHS và băng cassette: Sanyo, hiện là một phần của Panasonic; TDK, hiện là một phần của CATL khổng lồ của Trung Quốc, sau này còn có nhiều hơn nữa.

Nếu bạn mổ xẻ một trong những tế bào họ tạo ra ở Nevada, bạn sẽ hiểu ngay điều tôi đang nói. Bên trong hộp thép có ba tấm rất mỏng, mỗi tấm dài khoảng một mét: hai tấm kim loại phủ lớp đen và một tấm làm bằng nhựa trắng. Những tấm mỏng này *chính là* pin: chúng là cực âm, nơi chứa nhiều lithium, cực dương và dải phân cách. Quay lại với sự tương tự của tòa nhà chọc trời đó: khi bạn sạc pin, các ion lithium sẽ di chuyển theo đúng nghĩa đen từ lá cực âm dài đến lá cực dương, đi qua dải phân cách trên đường đi. fn1

Điều đang xảy ra trong những cỗ máy tạo ra tiếng leng keng đó là những lá kim loại này được cuộn chặt lại và đóng gói vào hình trụ đó, do đó trở thành thứ được gọi là 'cuộn thạch'. Điều này bắt đầu như một cái gật đầu nhẹ nhàng đối với những chiếc bánh khúc gỗ cuộn Thụy Sĩ, cũng có mặt cắt ngang hình xoắn ốc, nhưng theo thời gian, thuật ngữ này đã trở thành một thuật ngữ kỹ thuật: các gigafactories trên khắp thế giới đứng vững hay thất bại tùy thuộc vào hiệu suất của 'thạch' của họ. -máy xúc cuộn. Sau khi được cho vào các hộp, những cuộn thạch này sau đó được đổ đầy dung dịch điện phân gốc lithium, bịt kín và đóng lại bằng nắp thép; và đó là khá nhiều đó.

Ở giai đoạn này, có lẽ cần lưu ý rằng những ống trụ kiểu AA này không phải là dạng pin sạc duy nhất. Ví dụ: các tế bào bên trong điện thoại thông minh của bạn có nhiều khả năng là hình chữ nhật - được gọi là tế bào túi hoặc tế bào hình lăng trụ. Tuy nhiên, nguyên lý của nó cũng giống như bên trong các cuộn thạch hình trụ – các ion lithium truyền từ tấm cực âm mỏng này sang tấm cực âm mỏng khác. tấm anode – ngoại trừ trong trường hợp này, các điện cực lá chỉ được gấp lại hoặc xếp chồng lên nhau thay vì cuộn thành hình xoắn ốc. Sau đó, chúng được đặt trong một hộp nhựa, đôi khi mềm (túi) và đôi khi cứng (hình lăng trụ).

Không có quy tắc cứng nhắc và nhanh chóng nào về hình dạng nào là tốt nhất, mặc dù điều này không ngăn được các chuyên gia về pin tranh luận về ưu và nhược điểm của kiểu dáng này so với kiểu dáng khác trong nhiều giờ liền. Vì sự tỉnh táo của bạn, tôi khuyên bạn nên tránh những cuộc trò chuyện như vậy, mặc dù đôi khi chúng lại mang lại một điều thú vị. Một điều tôi gặp phải là một phần nguyên nhân khiến Tesla trở nên vĩ đại là do hãng đã chọn đúng hình dạng pin – hoặc có lẽ là sai hình dạng – vào đúng thời điểm. Khi công ty đang lắp ráp các bộ phận cho chiếc ô tô đầu tiên của mình, chiếc Roadster, có điều gì đó đang xảy ra ở nơi khác trong ngành công nghiệp pin. Trong nỗ lực tạo ra những chiếc máy tính xách tay mỏng hơn, Apple và các nhà sản xuất khác đã chuyển từ hình trụ sang dạng túi và hình lăng trụ. Đột nhiên, trên thị trường xuất hiện tràn lan các ô hình trụ giá rẻ, kết quả là công ty khởi nghiệp ô tô ít tên tuổi này đã có thể mua rất nhiều *ô* hình trụ này với giá *rất* thấp. Một số người cho rằng toán học sẽ không thành công đối với Tesla nếu không có sự may mắn này. Và trong khi hầu hết các nhà sản xuất ô tô khác đã lựa chọn những bộ pin hình vuông to lớn cho ô tô của họ thì hầu hết ô tô của Tesla vẫn chạy trên một khay chứa hàng ngàn viên pin máy tính xách tay nhỏ – nhiều trong số đó được sản xuất tại 'phòng khô' của Gigafactory Nevada.

Nó được đặt tên như vậy vì không khí được giữ không bị ẩm có thể làm hỏng các hợp chất hóa học dễ vỡ trên các điện cực. Công nhân mặc bộ quần áo bảo hộ từ đầu đến chân để ngăn chặn bất kỳ hạt bụi hoặc giọt nước cực nhỏ nào có thể khiến pin bị hỏng. Bạn càng tạo ra nhiều pin thì bạn càng có nhiều khả năng tạo ra một số pin yếu và vì một cục pin kém tốt nhất sẽ làm giảm phạm vi hoạt động của ô tô điện và tệ nhất là khiến nó tự bốc cháy, nên tính nhất quán và độ tin cậy là quan trọng một cách phi thường. Panasonic thậm chí còn tự hào về thành tích không bao giờ phải đưa ra bất kỳ đợt thu hồi pin lớn nào hơn là về số lượng pin mà hãng sản xuất ra hàng ngày.

Cách điều này thể hiện ở đây, trên sàn nhà máy ở Nevada, là ở mức độ kỷ luật và khó tính gần như ám ảnh. Đứng ở phía cuối của nhà máy gigafactory của Panasonic và bạn có cảm giác giống như được dịch chuyển đến một nhà máy công nghệ cao của Nhật Bản hoặc một nhà máy bán dẫn ở Đài Loan. Nhưng cũng giống như một nhà máy ở

Đài Loan không thể hoạt động nếu không có silicon trong các tấm bán dẫn, môi trường sạch sẽ, vô trùng của dây chuyền lắp ráp pin chỉ đơn giản là một điểm dừng trong hành trình đưa lithium từ dưới lòng đất đến cuộc sống của bạn.

Điều kỳ lạ là ở phía bên kia của nhà máy, ở khu vực cuối của Tesla, nơi các tế bào Panasonic được lắp ráp thành bộ pin sẽ đặt dưới gầm ô tô của mọi người, bầu không khí rất khác: hỗn loạn và lộn xộn hơn, với pin và gói nằm khắp nơi.

Vì hai đầu của nhà máy được điều hành bởi các công ty riêng biệt với lịch sử và triết lý cực kỳ khác nhau nên đặc điểm nổi bật của tòa nhà khổng lồ này thực sự là thứ mà bạn không thể nhìn thấy từ bên ngoài: một bức tường vững chắc chạy xuyên qua giữa nó, giữ cho nó luôn được bảo vệ. hai công ty tách biệt hoàn toàn. Xe đẩy robot đi qua lãnh thổ Panasonic đến lãnh thổ Tesla mang theo những khay pin, nhưng không con người nào được phép vượt qua biên giới nội địa này.

Sự sắp xếp Đông-Tây-Tây này có vẻ kỳ lạ nhưng nó ngày càng trở thành tiêu chuẩn trong sản xuất pin khi các nhà sản xuất ô tô châu Âu và Mỹ hợp tác với các công ty Nhật Bản, Hàn Quốc và Trung Quốc để giúp họ sản xuất ô tô điện mà chính phủ và người tiêu dùng ngày càng muốn họ bán. Theo một nghĩa nào đó, đây là lời nhắc nhở hữu ích rằng ngay cả khi các nhà bình luận than phiền về sự kết thúc của toàn cầu hóa thế kỷ 21, một số liên kết kinh tế nhất định đang mạnh lên thay vì suy yếu, với việc hầu hết các công ty ô tô đều vui vẻ giao việc sản xuất cho các công ty đến từ bên kia thế giới, ít nhất là trong thời điểm hiện tại.

Cụm từ 'hiện tại' có khá nhiều ý nghĩa ở đây, vì một số nhà sản xuất ô tô, bao gồm cả Tesla, hiện đang cố gắng sản xuất pin của riêng họ. Tesla đã nói rất nhiều về kế hoạch bắt đầu sản xuất pin hình trụ béo hơn với mật độ năng lượng cao hơn và chi phí thấp hơn so với loại pin hiện đang được Panasonic cung cấp. Tuy nhiên, những loại pin được gọi là 'lon Coke' này hóa ra lại rất khó sản xuất - dễ bị quá nhiệt và hỏng hóc. Tất cả những điều đó giúp giải thích tại sao tâm trạng ở Gigafactory Nevada lại khó chịu một cách kỳ lạ – hai công ty này bị mắc kẹt trong một mối quan hệ rối loạn giữa sự phụ thuộc và sự cạnh tranh. fn2

Dù sao thì đó cũng là một lời nhắc nhở hữu ích rằng trong số rất nhiều tổn thất trong quá trình chuyển đổi sắp tới từ xăng sang năng lượng điện sẽ là quan niệm thông thường về những gì một công ty ô tô nên và không nên làm. Liệu họ có nên bám theo mô hình thế kỷ 20 do Henry Ford đặt ra và kiểm soát càng nhiều quy trình sản xuất càng tốt hay họ nên cố gắng bắt chước Apple, chủ yếu quan tâm đến việc thiết kế, bán ô tô và gia công phần lớn hoạt động sản xuất vật chất? Điều này đặt ra thêm câu hỏi: Tesla là công ty công nghệ hay công ty ô tô? Nó chủ yếu liên quan đến phần cứng hay phần mềm? Nói cách khác, nó quyết định tương lai của nó nằm ở Thế giới Vật chất hay thế giới thanh tao?

Và điều này có ý nghĩa gì đối với nền kinh tế và cơ cấu công nghiệp của chúng ta? Hãy nghĩ về điều này: trong một chiếc ô tô chạy xăng, bộ phận có giá trị nhất là động cơ đốt trong. Một phần lý do khiến ngành công nghiệp ô tô vẫn là một trong những điểm yếu cuối cùng của ngành sản xuất đòi hỏi tay nghề cao, lương cao ở châu Âu, Nhật Bản và Mỹ là vì các nhà sản xuất ô tô này phần lớn vẫn tự sản xuất động cơ của riêng mình. Một phần lý do khiến ngành sản xuất ô tô từ lâu vẫn bị thống trị bởi những khu vực 'di sản' này là do việc chế tạo động cơ rất *khó khăn* . Nhưng nếu thế kỷ trước chỉ có piston và tạp dề phủ đầy dầu thì thế kỷ tiếp theo sẽ là về ống nghiệm, phòng sạch và bộ quần áo bảo hộ hazmat cũng như hiểu biết về các phản ứng điện hóa xảy ra bên trong các tế bào dường như trơ. Đột nhiên mọi thứ bắt đầu trông rất khác: trong một chiếc ô tô điện, pin chứ không phải động cơ mới là bộ phận có giá trị nhất.

Vì vậy, ai là người tạo ra vấn đề này cực kỳ quan trọng, và câu trả lời cho câu hỏi đó – cũng như rất nhiều câu hỏi khác trong Thế giới Vật chất – chủ yếu là Trung Quốc. Hiện tại, Trung Quốc kiểm soát khoảng 80% công suất sản xuất pin của thế giới. Thật vậy, theo Benchmark Mineral Intelligence, một trong những người ghi chép về kỷ nguyên mới của các nhà máy khổng lồ, ngay cả khi tất cả tầm nhìn lớn của châu Âu và Mỹ về sản xuất pin thực sự thành hiện thực, thì đến đầu những năm 2030, Trung Quốc vẫn sẽ có bảy trong số tất cả các nhà máy sản xuất pin. mười pin được sản xuất ở bất cứ đâu trên thế giới. [2]

Khi tôi bắt đầu viết cuốn sách này, nhà máy gigafactory của Tesla/Panasonic ở Nevada lớn hơn rất nhiều so với bất kỳ cơ sở đối thủ nào khác đến nỗi hầu hết những người trong cuộc đều mong đợi mọi thứ sẽ tiếp tục như vậy trong tương lai gần. Sau đó, bất ngờ xuất hiện tin tức vào năm 2022 về một nhà máy ở thành phố Fuding, phía đông nam Trung Quốc, có khả năng sản xuất 60GWh pin mỗi năm và đang tăng lên, khiến nó lớn hơn nhà máy Nevada một phần ba. Năm 2023, Tesla công bố kế hoạch mở rộng công suất của nhà máy Nevada một lần nữa lên mức đáng kinh ngạc 140GWh, nhưng tại thời điểm viết bài, vẫn chưa thể đoán được liệu điều này có thực sự xảy ra hay không và liệu sau đó nó có bị vượt qua một lần nữa hay không. Cuộc chiến giành ưu thế về pin đang tăng tốc. Công ty Trung Quốc giành chiến thắng trong cuộc đua, công ty có nhà máy ở Fuding, là Contemporary Amperex Technology Co. Limited (CATL), một doanh nghiệp bí mật bán pin của mình cho hầu hết các nhà sản xuất ô tô lớn nhất thế giới, bao gồm GM, VW, BMW và, như nó xảy ra, Tesla. Nó đã tạo ra một vị thế dẫn đầu đến mức đối với nhiều nước châu Âu, hy vọng tốt nhất hiện nay không phải là tạo ra một nhà vô địch quốc gia mà là thuyết phục CATL xây dựng một nhà máy địa phương. Trung Quốc có thể đang gặp khó khăn trong việc sản xuất chip silicon theo tiêu chuẩn và thông số kỹ thuật giống như các đối tác Đài Loan nhưng không còn nghi ngờ gì nữa, ai sẽ chiến thắng trong cuộc chạy đua vũ trang về pin.

Sự thống trị này có thể không đặc biệt rõ ràng ở bề ngoài, vì nhiều ô tô chạy bằng pin Trung Quốc vẫn mang huy hiệu của Mỹ hoặc châu Âu, nhưng càng đi sâu xuống bề mặt thì càng khó thoát ra. Vì các công ty Trung Quốc không chỉ kiểm soát khoảng 80% hoạt động sản xuất pin mà còn kiểm soát khoảng 80% hoạt động sản xuất nguyên liệu chế tạo nên những loại pin này. Bước tiếp theo trong chuỗi sản xuất pin này có vẻ hơi tầm thường, nhưng đừng để bị lừa; Xét cho cùng, thành phần có giá trị nhất của pin không phải là kỹ thuật hay vỏ mà là nguyên liệu thô được dán ở dạng bùn trên các cực âm và cực dương đó. [3]

Biến lithium và than chì thành các hóa chất đủ tinh khiết để đóng vai trò cực âm và cực dương – những ma trận hoàn hảo trong đó các ion lithium có thể làm tổ – là một công việc phức tạp đến mức nó đại diện

cho toàn bộ khu vực kinh tế của riêng nó. Vì vậy, việc cung cấp cho các công ty pin mà có thể bạn chưa từng nghe đến này là một tập hợp các công ty vật liệu hoạt động cực âm mà bạn gần như chắc chắn chưa bao giờ nghe đến: Panasonic nhận hầu hết nguyên liệu từ Sumitomo Khai thác kim loại; CATL nhận hầu hết nguyên liệu từ một công ty tên là Ronbay Technology.

Hãy nói chuyện với ai đó đang làm việc trong thế giới này và bạn sẽ sớm thấy rõ rằng *điều này* – việc tinh chế và trộn kim loại thành vật liệu hoạt tính cực âm cực kỳ tinh khiết – là nơi điều kỳ diệu thực sự xảy ra; không phải là sản xuất thạch cuộn. Và thực ra, họ có lý, vì khi bạn nghĩ về nó, đó không phải là tâm điểm của bất kỳ cục pin nào: nơi mà các ion lithium di chuyển và tích tụ? Đây chính xác là nơi nó *xảy ra* . Và tính chất hóa học của những vật liệu pin này – tỷ lệ chính xác và cấu tạo phân tử của lithium và các bộ phận cấu thành khác – tạo ra sự khác biệt to lớn đối với hiệu suất cuối cùng của pin.

Có công thức pin truyền thống, lithium coban oxit (LCO): thứ gần giống nhất với những loại pin lithium-ion đầu tiên do John Goodenough tiên phong và vẫn là hóa chất cực âm phổ biến nhất trong điện thoại thông minh và máy tính xách tay ngày nay. Ngoài ra còn có niken, mangan và coban cùng với lithium (NMC), ít năng lượng hơn nhưng bền lâu hơn nhiều. Đây là những loại pin mà hầu hết ô tô điện mới sử dụng, mặc dù pin Tesla mà Panasonic sản xuất ở Nevada có công thức khác biệt một chút với niken, coban và oxit nhôm cùng với lithium (NCA). Có một thứ gọi là lithium ferro-phosphate (LFP), sự kết hợp giữa sắt và lithium phosphate, ổn định hơn nhiều so với các loại pin lithium-ion khác nhưng không chứa nhiều năng lượng. Bạn hiểu ý: rất nhiều công thức nấu ăn, mỗi công thức đều có sự đánh đổi riêng.

Trung tâm của vấn đề

Tuy nhiên, trong tất cả các ngành hóa học này, vẫn có một kim loại không đổi, một kim loại mà chúng ta không thể thiếu: lithium. Nó là sức mạnh điện hóa của yếu tố kỳ lạ, khó nắm bắt này giúp biến thế giới điện thoại thông minh, máy tính xách tay và tất nhiên là ô tô điện của chúng ta thành hiện thực.

Nó cũng không kết thúc ở đó. Khi thế giới điện khí hóa, chúng ta sẽ cần pin ở những nơi không ngờ tới: pin để trong nhà để bạn có thể sạc chúng từ lưới điện khi giá rẻ nhất; pin để lưu trữ năng lượng mặt trời của riêng bạn, để sử dụng khi mặt trời lặn. Một số công ty khởi nghiệp đã phát minh ra những chiếc bếp mới thông minh có pin cho phép họ đun sôi nước nhanh hơn nhiều so với những chiếc bếp thông thường chạy bằng gas hoặc cắm vào nguồn điện. Tất cả những điều đó có nghĩa là chúng ta sẽ cần nhiều bánh thạch hơn nữa mà Panasonic và những hãng khác đang sản xuất tại các nhà máy lớn của họ.

Điều này rất thú vị nhưng nó càng làm tăng thêm nhu cầu về hóa chất bên trong các tế bào này. Về lâu dài, có thể có những lựa chọn thay thế cho lithium – ví dụ như pin natri-ion – nhưng xét về vị trí của nó trong bảng tuần hoàn, natri sẽ không bao giờ cung cấp nhiều năng lượng và công suất điều chỉnh theo trọng lượng như lithium. Có thể sẽ có những đột phá khác. Các nhà khoa học hiện đang nghiên cứu loại pin thể rắn loại bỏ chất điện phân lỏng mà bạn hiện cần đưa vào pin lithium-ion – một bước nhảy vọt hứa hẹn sẽ mang lại hiệu quả cho pin thông thường giống như chất bán dẫn silicon đã làm cho công tắc chân không cũ. Một số đang nghiên cứu loại pin sử dụng không khí như một phần của phản ứng hóa học. Nhưng gần như tất cả các nguyên mẫu này vẫn tận dụng các đặc tính điện hóa đặc biệt của một nguyên tố cụ thể: pin lithium thể rắn, pin lithium không khí… mọi con đường đều dẫn trở lại lithium.

Một loại pin ô tô điện thông thường chứa khoảng 40kg lithium, cùng với 10kg coban, 10kg mangan và 40kg niken. Đây là trước khi bạn xem xét than chì đi vào cực dương. Tất nhiên, những vật liệu này phải đến từ đâu đó và cuộc chạy đua để có được chúng đang tăng tốc. Chủ sở hữu tỷ phú của CATL Robin Zeng đã mua quyền lợi khai thác ở Tây Tạng. Nhưng kể từ khi Trung Quốc thoải mái là nhà sản xuất pin lớn nhất thế giới, những hồ chứa này không thể đáp ứng nhu cầu khổng lồ về lithium. Dự trữ kim loại này tập trung ở một số quốc gia, vì vậy trong khi phần còn lại của thế giới lo lắng về sự thống trị của Trung Quốc trong chuỗi cung ứng pin thì nhiều người ở Bắc Kinh lại đồng thời lo lắng về sự phụ thuộc của Trung Quốc vào phần còn lại của thế giới về nguyên liệu thô. Vì vậy, nó đi vào Thế giới Vật chất.

Trong cuộc đua thu mua các khoáng sản này, Trung Quốc đã có khởi đầu thuận lợi khi thực hiện các thỏa thuận với các quốc gia từ Nam Mỹ đến châu Phi cận Sahara để đổi lấy nguồn vốn và đầu tư. Năm 2023, CATL đã đạt được thỏa thuận với chính phủ Bolivia để bắt đầu khai thác lithium từ Salar de Uyuni khổng lồ. Liên minh châu Âu và Mỹ hiện có các chính sách khoáng sản quan trọng nhằm đảm bảo nguồn cung của họ. Ở Mỹ, các kho chứa cũ đang được dọn sạch và tái sử dụng cho cuộc chạy đua khai thác khoáng sản ở thế kỷ 21. Khi điều đó xảy ra, một trong những địa điểm của kho dự trữ này có thể được tìm thấy không xa nhà máy gigafactory ở Nevada. Lái xe khoảng một trăm dặm về phía nam và ngay sau khi bạn vượt qua Hồ Walker, một vùng nước màu bạc được bao quanh bởi sa mạc và núi non, bạn sẽ đến một thị trấn tên là Hawthorne. Đây là nơi đặt căn cứ quân sự Hawthorne hay đôi khi được gọi là 'tổng kho lớn nhất thế giới'. Điều đó có nghĩa là trong thực tế là vô số nhà chứa máy bay, một số nhỏ và một số lớn, dàn trải khắp thung lũng bụi bặm này, bao phủ một diện tích đáng kinh ngạc là 225 dặm vuông. Nhiều nơi chứa đạn dược cho lực lượng vũ trang Hoa Kỳ nhưng bên trong một số nhà kho này là hàng đống kim loại quan trọng, một loại rương chiến tranh nguyên tố trước một trận chiến công nghiệp sắp tới. [4]

Cho đến gần đây, những kho dự trữ này được coi là biểu tượng của quá khứ - sự gợi lại những ngày hoang tưởng về kinh tế thời Chiến tranh Lạnh. Trong nhiều thập kỷ, đặc biệt là sau Thế chiến thứ hai, Hoa Kỳ đã dự trữ các nguyên liệu quan trọng, chủ yếu dùng cho quân sự nhưng cũng đề phòng trường hợp thiếu hụt cho thương mại, nhưng sau Bức tường Berlin sụp đổ và lịch sử 'kết thúc', các chính trị gia cho rằng không cần thiết nữa. Với việc thế giới được liên kết kinh tế chặt chẽ hơn và dường như vĩnh viễn ít bị xung đột hơn, các kho dự trữ dần dần cạn kiệt và bị bán tháo. Đến đầu những năm 2020, chúng gần như cạn kiệt.

Donald Trump và Joe Biden lại có lập trường khác. Năm 2022, Tổng thống Biden đã viện dẫn Đạo luật Sản xuất Quốc phòng để giúp bảo vệ ngành công nghiệp pin của Mỹ. Luật này trao cho Nhà Trắng quyền cung cấp hỗ trợ đặc biệt cho các công ty đang cố gắng khai thác và cung cấp các nguyên tố quan trọng này – lithium, coban, niken, mangan và than chì – trong nước thay vì nhập chúng từ nước ngoài.

Tổng thống Biden nói: “Chúng ta cần chấm dứt sự phụ thuộc lâu dài vào Trung Quốc và các nước khác về những nguyên liệu đầu vào sẽ cung cấp năng lượng cho tương lai”. sản phẩm năng lượng. Tuy nhiên, ở giai đoạn này vẫn chưa rõ điều đó sẽ dễ dàng như thế nào. Vì Trung Quốc không chỉ kiểm soát phần lớn hoạt động sản xuất pin mà còn phần lớn quá trình xử lý vật liệu pin, nên Mỹ hoàn toàn phụ thuộc vào nước này, theo cách chưa từng xảy ra trong bất kỳ cuộc cách mạng công nghiệp nào trước đây kể từ đầu thế kỷ XX. Thời đại động cơ, thời đại silicon, thời đại bê tông, thời đại khai thác mỏ công nghiệp: Hoa Kỳ đã chiếm ưu thế dẫn đầu về các công nghệ này ít nhiều ngay từ đầu. Điều này không xảy ra trong thời đại pin, nơi mà nó phải dựa vào Trung Quốc về đồng và nhôm tinh chế trong các lá điện cực cũng như hầu hết các vật liệu hoạt tính cực âm và than chì được dán lên chúng. Ở một khía cạnh nào đó, mọi người đều được hưởng lợi từ quy mô thống trị và tham vọng của người châu Á, vì nó đã giúp giảm giá pin một cách đáng kể. Họ đã giảm 89% về mặt điều chỉnh theo lạm phát từ năm 2010 đến năm 2020. Mỹ và các đồng minh có thể giành chiến thắng trong cuộc chiến giành quyền kiểm soát chuỗi cung ứng chất bán dẫn; không phải như vậy đối với pin. [5]
Hawthorne và năm kho khác, nơi những kho dự trữ này từng chất đống cao, đang chuẩn bị cho một kỷ nguyên tích trữ vật chất khác. Lần này, cùng với coban và niken mà họ luôn dự trữ, còn có lithium hydroxit và lithium cacbonat – những vật liệu được trộn thành bột cathode và dán lên các điện cực. Lần này, kho dự trữ sẽ được bổ sung bằng bột sản xuất từ khoáng chất của tam giác lithium và các mỏ spodumene của Australia.
Nếu tất cả những điều này nghe có vẻ hơi giống sự quay trở lại một thời đại mới tự cung tự cấp – kinh tế tự cung tự cấp – thì đó là vì nó có thể là như vậy. Không ai đã khảo sát mức độ phức tạp của Thế giới Vật chất có thể đoán được việc định vị toàn bộ chuỗi cung ứng pin, chất bán dẫn, thủy tinh tiên tiến hoặc hóa chất, ở một quốc gia duy nhất. Nhưng điều này không ngăn cản được nhiều quốc gia hàng đầu thế giới hứa hẹn thực hiện chính xác điều đó.
Cũng có tiếng vang của thế kỷ 19, khi các nước châu Âu xâm chiếm phần lớn thế giới, tìm kiếm cao su ở đây, đồng ở kia, chưa kể đến các mặt hàng khác như vàng và diêm tiêu. Liệu những cơn sốt khoáng

sản định kỳ này có bao giờ kết thúc? Có phải chúng ta liên tục bị định mệnh phải tiếp tục đào và cho nổ tung con đường của mình sâu hơn vào lòng đất cho đến khi không còn gì? Có lẽ hy vọng tốt nhất nằm ở một vài loài thực vật ít người biết đến, nơi mọi người đang cố gắng làm mọi việc khác đi một chút. Và một trong những loài thực vật đó thực sự có một lịch sử rất thú vị.

18
phi sản xuất

BRUSSELS, BỈ

Nếu bạn từng thấy mình ở Brussels, đây là một mẹo tham quan. Hãy đến Cung điện Hoàng gia, tòa nhà lớn từ thế kỷ 18, nơi diễn ra các sự kiện cấp nhà nước. Nhưng khi bạn đến nơi, đừng lảng vảng bên ngoài phía trước cùng với những khách du lịch còn lại - thay vào đó, hãy đi bộ xung quanh bên ngoài, dọc theo Rue Ducale, cho đến khi bạn thấy mình ở cổng sau.

Ở đó bạn sẽ thấy một bức tượng đồng của một người đàn ông trung niên. Người đàn ông này gần như có thể coi là một tu sĩ, mặc một loại áo khoác ngoài với bộ râu dài cắt vuông. Anh ta ngồi trên một con chiến mã khổng lồ, nhìn ra xa một cách hống hách về nơi từng là một đại lộ lớn nhưng giờ đây đã trở thành một đường hầm xấu xí với những khối văn phòng có mặt tiền bằng kính. Lần cuối cùng tôi đi ngang qua, có một người đàn ông vô gia cư đang ngủ trên bậc thềm bên dưới bức tượng. Các bạn trẻ thường đến đây vào những buổi tối mùa hè, ngồi hút thuốc và uống lon bia. Trong một thời gian dài, chiếc cột và những thứ đặt trên nó chỉ là một phần của đồ nội thất đô thị.

Ngoại trừ việc đây không phải là nhà sư. Người cưỡi ngựa là Leopold II - vị vua Bỉ đã cai trị Congo như thái ấp riêng của mình trong hơn hai thập kỷ vào đầu thế kỷ XX. Dưới sự cai trị của ông, hàng triệu người ở Congo đã chết dưới chế độ thuộc địa của họ. các lãnh chúa trở nên giàu có lạ thường, từ xuất khẩu cao su để làm lốp cho những chiếc ô tô đầu tiên, từ ngà voi từ những con voi bị giết thịt, và trên hết, giàu có nhờ nguồn tài nguyên khoáng sản dồi dào của đất nước này. [1]

Vua Leopold II, người thậm chí chưa bao giờ đặt chân đến Congo và do đó chưa bao giờ phải tận mắt chứng kiến những gì đang xảy ra ở Thế giới Vật chất xưa kia, đã qua đời cách đây hơn một thế kỷ. Nhưng ông vẫn phủ bóng đen lên Bỉ, đất nước dường như bị đóng băng trong ánh đèn pha của lịch sử, không chắc chắn hoặc không thể đối phó với di sản của hành trang thuộc địa tàn bạo. Thỉnh thoảng bức tượng bị làm xấu mặt, sau đó hình vẽ bậy được loại bỏ một cách tỉ mỉ

và sau đó là một cuộc trò chuyện nghiêm túc về những việc cần làm tiếp theo. Sau cái chết của George Floyd vào năm 2020, bức tượng này – và một số bức tượng khác của Leopold II – đã bị vẽ bậy. Bàn tay anh được sơn màu đỏ máu. 'ĐÀN ÔNG NÀY ĐÃ GIẾT 15 TRIỆU NGƯỜI', đọc dòng chữ được phun trên bệ. Lớp sơn đã được làm sạch và một báo cáo được xuất bản vài năm sau đó nêu lên khả năng nung chảy bức tượng và biến đồng thành một thứ gì đó để tưởng nhớ người dân Congo, nhưng ít nhất tại thời điểm viết bài, Leopold vẫn còn sống. trên yên ngựa, trông vẫn không bằng lòng và không ăn năn như mọi khi.

Di sản của chủ nghĩa thực dân là nền tảng khó chịu của Thế giới Vật chất. Tất nhiên, Bỉ không phải là quốc gia duy nhất tham gia vào 'cuộc tranh giành châu Phi'. Anh, Pháp, Đức, Tây Ban Nha và phần còn lại cũng chạy đua xâm chiếm, phân chia và kiểm soát lục địa, khai thác khoáng sản, buôn bán ở nơi khác và bỏ túi số tiền thu được. Một quá trình tương tự đã xảy ra nhiều lần trước đây, từ La Mã cổ đại cho đến cuộc chinh phục châu Mỹ, nhưng cuộc tranh giành tài nguyên (cả khoáng sản và con người, dưới hình thức nô lệ) đặc biệt tàn bạo. Đôi khi việc bóc lột mang lại lợi ích cho các công dân thuộc địa, nhưng thay vào đó, hầu hết tiền đều chảy vào. trở lại với những người cai trị của họ. Trong khi đó, các quốc gia bị chiếm đóng phải chịu một di sản hủy diệt thường tồn tại rất lâu sau khi các lãnh chúa của họ đã rời đi. Quả thực, trong khi bạn có thể mong đợi các quốc gia có nguồn tài nguyên khoáng sản dồi dào sẽ có triển vọng tốt hơn các nước láng giềng, thì thực tế luôn ngược lại, vì sự phong phú về địa chất có tương quan với tốc độ tăng trưởng kinh tế yếu. Và khi nói đến 'lời nguyền tài nguyên' - hậu quả của một phần nạn tham nhũng tràn lan thường được thúc đẩy bởi tiền bản quyền khai thác mỏ sẵn có - rất ít quốc gia cung cấp một trường hợp nghiên cứu sinh động như Congo thuộc Bỉ, hay như ngày nay, Cộng hòa Dân chủ Congo. Cộng hòa Congo (DRC). Ở đây, thu nhập bình quân đầu người cũng như tuổi thọ trung bình thuộc hàng thấp nhất thế giới. Hầu hết đất nước sống trong cảnh nghèo đói tột cùng trong khi một số ít người kiếm được số tiền không thể kể xiết. Tuy nhiên, không có quốc gia nào trên thế giới có nguồn tài nguyên khoáng sản quan trọng như vậy.

Trong các trang trước chúng ta đã ghé thăm một số nguồn khoáng sản phong phú nhất thế giới, nhưng ít ai có thể khẳng định đó là những nguồn khoáng sản dị thường thực sự. Chile và Pilbara lần lượt có lượng đồng và sắt rất lớn, nhưng bạn có thể tìm thấy những nơi khác có chất lượng tương tự, nếu không nói là số lượng, của những kim loại này. Mặt khác, DRC nằm trên một tập hợp các đặc điểm địa chất thực sự độc đáo. Nổi tiếng nhất được tìm thấy ở tỉnh Katanga cũ ở phía nam đất nước.

Nằm ở đó có một mỏ cũ tên là Shinkolobwe, nơi có trữ lượng uranium dồi dào nhất từng được phát hiện ở bất kỳ đâu trên thế giới: nồng độ gần 70%, so với $0{,}01\%$ ở những nơi khác. Trong khoảng thời gian đầu thế kỷ 20, mỏ này độc quyền cung cấp uranium cho thế giới, phần lớn được chuyển đến Bỉ để xử lý. Little Boy, quả bom nguyên tử rơi xuống Hiroshima, chứa đầy uranium từ Katanga.

Có trữ lượng lớn đồng và số lượng coban đáng kinh ngạc. Coban thường được tìm thấy cùng với quặng đồng nhưng điểm số hầu hết đều rất nhỏ, dưới 1%. Ở đây, nhờ một đặc điểm địa chất, chúng rất đáng kinh ngạc: lên tới 10 đến 15%. Không có nơi nào khác trên hành tinh giống như vậy.

Đến bây giờ bạn sẽ nhận thấy rằng coban không phải là một trong sáu chất chính trong Thế giới Vật chất. Điều này không có nghĩa là nó không cực kỳ quan trọng. Chắc chắn là vậy. Nhiều công thức chế tạo pin lithium-ion dựa vào coban để giúp các electron di chuyển an toàn từ cực âm sang cực dương. Cobalt là một thành phần quan trọng trong hợp kim thép và thực tế là phần lớn cobalt được tập trung ở một quốc gia - một quốc gia không ổn định - khiến các chính phủ trên thế giới từ lâu đã lo lắng về sự sẵn có của nó. Điều kiện ở một số mỏ 'thủ công' không chính thức thường rất khủng khiếp, các gia đình, kể cả trẻ nhỏ, thường sử dụng dụng cụ cầm tay để cạo quặng khỏi đất đỏ ở miền nam DRC. Ở đây không có biện pháp bảo vệ hoặc chăm sóc sức khỏe theo quy định và tai nạn và thương tích gây tử vong là điều thường xuyên xảy ra. Vì vậy, có những lý do quan trọng để lo ngại về việc cung cấp coban. Nhưng lý do nó không đạt được đẳng cấp rất đơn giản: ít nhất ngày nay bạn có thể tạo ra những cục pin tốt mà không cần đến nó - điều mà bạn thực sự không thể nói về lithium. [2]

Nhưng công ty từng khai thác toàn bộ uranium, đồng và coban đó có thể sẽ đóng một vai trò quan trọng trong tương lai của lithium. Đi vòng ra phía sau bức tượng Leopold ở Brussels và bạn sẽ thấy một tấm bảng đồng cũ, trong đó, bằng chữ viết cổ của Pháp, có ghi: 'Đồng và thiếc của bức tượng này đến từ Congo thuộc Bỉ. Chúng được Liên minh Miniière du Haut-Katanga tặng."
Ngoại trừ bản thân Leopold, không có tổ chức nào khác ủng hộ việc Bỉ khai thác tài nguyên của Congo một cách trực tiếp như Union Minière. Bắt đầu từ năm 1906, khi nhà vua tìm cách chuyển quyền sở hữu quốc gia châu Phi này cho nhà nước Bỉ, công ty này đã kiểm soát và điều hành ngành khai thác mỏ của Congo. Đồng và coban, thiếc và uranium, kẽm và germanium, bạc và vàng – tất cả đều được khai thác bởi Union Minière, với phần lớn lợi nhuận được chuyển về quê hương. Nếu Bỉ có được phần lớn của cải trong thời kỳ này là nhờ khoáng sản Congo (và chắc chắn là như vậy), thì trung tâm của sự chiếm đoạt này là Union Minière. Đến những năm 1920, đây là nhà sản xuất đồng lớn nhất thế giới; đến những năm 1960, đây là công ty khai thác coban lớn nhất thế giới - chưa kể là nhà cung cấp nhiên liệu hạt nhân hàng đầu thế giới.
Có tới một phần tư triệu người bị ép phải làm việc cho công ty, mặc dù gọi nó là công ty thì hơi quá, vì nó giống một thể chế chính trị, một nhà nước độc đảng ở Katanga hơn. Những công nhân không khoan nhượng thường xuyên bị đánh bằng *roi da* - một loại roi làm từ những dải mỏng da hà mã khô - ngay cả sau khi hình phạt về thể xác được cho là bị đặt ra ngoài vòng pháp luật. Khi các quốc gia châu Phi khác giành được độc lập vào giữa thế kỷ 20, Union Minière đã tài trợ cho các đảng chính trị và các cơ quan tình báo đang cố gắng chống lại chính nghĩa. Những phong trào đòi quyền tự trị này được tuyên truyền đều là một phần trong âm mưu của Liên Xô. [3]
Và khi nền độc lập cuối cùng cũng đến vào năm 1960, công ty đã ủng hộ kế hoạch biến Katanga trở thành một nước cộng hòa ly khai, tương tự như nhà nước phân biệt chủng tộc ở Nam Phi. Âm mưu thất bại, nhưng nhà lãnh đạo đầu tiên sau độc lập của Congo, Patrice Lumumba, đã bị phế truất trong một cuộc đảo chính do CIA hậu thuẫn và giao cho những kẻ ly khai, những kẻ sau đó đã giết ông ta và vứt xác, mặc dù một sĩ quan vẫn giữ một trong những chiếc răng bọc

vàng của Lumumba làm vật chứng. một chiếc cúp. Chỉ đến năm 2022, chiếc răng cuối cùng mới được trả lại cho các thành viên trong gia đình Lumumba, trong một buổi lễ ở Brussels chỉ cách bức tượng Leopold, được đúc từ kim loại từ đất Katanga vài trăm thước. Chiếc răng đã được đưa trở lại Kinshasa, nơi cuối cùng nó được an nghỉ. Ngay cả trong câu chuyện này, bạn cũng không thể thoát khỏi Union Minière, nơi được cho là đã cung cấp axit sulfuric dùng để hòa tan hài cốt của Lumumba.

Như các giám đốc điều hành của công ty đã lo sợ, các mỏ ở Katanga đã bị quốc hữu hóa vào những năm 1960, sau đó Union Minière quay trở lại với các hoạt động kinh doanh khác của mình, chủ yếu là luyện kim loại tại nhà máy của họ ở Hoboken, ngoại ô Antwerp, nơi họ bắt đầu khai thác. bạc từ chì được tập trung từ thế kỷ 19. Năm 2001, công ty được hợp nhất thành một cơ cấu pháp lý mới và đổi tên thành Umicore, hai chữ cái đầu tiên đó là tàn tích chính của quá khứ thuộc địa của nó.

Tuy nhiên, ngay cả sau khi Congo giành được độc lập, công ty thỉnh thoảng vẫn gặp phải những tranh cãi. Vào những năm 1970, người ta phát hiện ra rằng trẻ em sống gần nhà máy Hoboken có hàm lượng chì trong máu rất cao. Như chúng ta đã thấy trước đây, không có mức độ an toàn nào của kim loại độc hại này, đặc biệt là đối với trẻ em, tuy nhiên các hạt chì đã trôi dạt ra khu vực lân cận trong nhiều thập kỷ. Những nỗ lực nhằm giảm thiểu ô nhiễm, dọn dẹp nhà cửa và sân bãi ở địa phương dường như đã có kết quả nhưng nồng độ chì trong máu trẻ em lại tăng đột biến vào năm 2015 và sau đó là vào năm 2020. Kế hoạch là cố gắng mua lại những ngôi nhà lân cận và thay thế chúng. có không gian xanh nhưng nhiều người dân địa phương từ chối bán. [4]

Dù sao đi nữa, gộp tất cả những điều này lại với nhau – uranium trong bom hạt nhân, lịch sử khai thác đáng xấu hổ ở Congo, vụ ngộ độc chì ở trẻ em địa phương, lạy Chúa – và bạn có thể sẽ không có thiện cảm với một công ty như Umicore. Nhưng đây mới là lúc mọi thứ trở nên… kỳ lạ, đối với công ty này, với lịch sử 'đầy màu sắc', có thể là một trong những bánh răng quan trọng nhất trong cỗ máy giúp chúng ta hướng tới một tương lai xanh.

Ở đâu có Muck Ở đó có đồng thau

Nhà máy của Umicore bên bờ sông Scheldt ở Hoboken trông không giống một viễn cảnh về tương lai. Địa điểm này được bao quanh bởi cọc đất đen chất thành đống và ở giữa là những ống khói khổng lồ đang phun khói lên trời. Nơi này, vẫn là điểm nóng về ô nhiễm chì, khó có thể coi là chìa khóa cho một tương lai lành mạnh hơn, bền vững hơn.

Nhưng đừng để bị lừa. Vì đây là nơi họ sản xuất vật liệu hoạt tính cực âm cho pin. Công ty trước đây gọi là Union Minière có thể không còn khai thác coban ở DRC nữa, nhưng họ vẫn xử lý kim loại từ đó – cùng với niken, mangan và tất nhiên là cả lithium – thành các loại cocktail siêu tinh khiết được dán vào pin sạc điện cực. Rất có thể chiếc ô tô điện tiếp theo của bạn sẽ chứa pin có hóa chất do Umicore xử lý.

Nhưng lý do chính khiến chúng tôi ở đây là vì Umicore cũng là công ty tiên phong trong một lĩnh vực mà rất nhiều lĩnh vực khác sẽ phụ thuộc vào trong những năm tới. Sau khi trốn tránh, hay chính xác hơn là đã bị loại khỏi hầu hết các mỏ của mình, Umicore giờ đây trở thành cái mà bạn có thể gọi là 'thợ mỏ đô thị'. Thay vì chỉ tinh chế kim loại từ quặng khai thác từ lòng đất, nó còn tinh chế chúng từ chất thải – đồ điện tử, pin cũ và các thiết bị kỳ lạ khác. Liti hydroxit tái chế của nó, hay các thỏi vàng và bạc, trông giống như những gì bạn có thể tìm thấy ở bất kỳ nơi nào khác, ngoại trừ việc nó không đòi hỏi phải phá hủy một ngọn núi - hay đúng hơn là có thể đã làm vậy, nhưng chỉ một lần .

Trong phần lớn lịch sử loài người, nguồn nguyên liệu chính cho các sản phẩm chúng ta sử dụng là đá và đất dưới chân chúng ta. Nhưng trong tương lai, hầu hết vật liệu đó có thể đến từ những sản phẩm cũ mà chúng ta đã loại bỏ. Hiện tại, đây vẫn chỉ là một giấc mơ vì chúng ta vẫn còn một chặng đường rất dài mới đến được miền đất hứa đó.

Thép, như bạn biết, có lẽ là kim loại được tái chế nhiều nhất trên hành tinh, và ở Hoa Kỳ, phần lớn vật liệu được xay đều được làm từ phế liệu nấu chảy trong các nhà máy mini. Trên khắp thế giới, tỷ lệ tái chế cuối đời – tỷ lệ tỷ lệ phế liệu tiếp tục được tái sử dụng – nằm trong khoảng từ 70% đến 90%. Đối với nhôm tỷ lệ này là 42–70%; đối với

coban là 68%; đối với đồng 43–53%. Đối với lithium, tỷ lệ này ít hơn 1%. [5]

Khái niệm 'nền kinh tế tuần hoàn' cho rằng chúng ta nên cố gắng ngày càng cố gắng xử lý chất thải như một loại tài nguyên. Nếu thế kỷ 20 là kỷ nguyên của sự lỗi thời có kế hoạch, nơi mà những người lái xe đầu tiên và sau đó là người tiêu dùng thuộc mọi chủng tộc được khuyến khích nâng cấp sản phẩm của họ thường xuyên nhất có thể, thì chúng ta được biết rằng kỷ nguyên sắp tới là thời kỳ mà ưu tiên hàng đầu là loại bỏ rác thải. Tái chế từ một màn trình diễn phụ trở thành màn trình diễn chính. Mọi thứ đều trở thành vòng lặp khép kín.

Pin chỉ là một phần của câu chuyện này. Chúng ta sẽ cần cải thiện hơn nữa việc tái chế các cánh tuabin gió, hiện nay hầu hết bị vứt đi, hoặc đôi khi được cắt nhỏ và sử dụng trong bê tông, vì chúng được tạo thành từ nhựa nhiệt rắn không thể nấu chảy và tạo hình lại. Chúng ta sẽ cần tìm ra cách tái chế các tấm pin mặt trời, hệ thống dây điện và mạch điện cũng như tất cả những thứ linh tinh khác của Thế giới Vật chất. Tuy nhiên, pin là một ví dụ hữu ích vì một số lý do. Đầu tiên là chúng chứa các khoáng chất mà chúng ta muốn khai thác ít hơn trong tương lai.

Trong trường hợp coban, điều này sẽ quay trở lại DRC; vì điều kiện khai thác ở đó rất khắc nghiệt và do phần lớn nguồn cung của thế giới tập trung ở một nơi duy nhất nên có cả lý do đạo đức và chiến lược để cố gắng tìm kiếm các nguồn thay thế. Và vì rất nhiều người vẫn còn lo lắng một cách dễ hiểu về việc khai thác dưới biển sâu, nên có thể nói, vẫn còn những dấu hỏi lớn về điều đó. Và với những vấn đề tương tự xung quanh tác động môi trường của việc khai thác lithium, chưa kể đến niken, các nhà sản xuất ô tô trong những năm gần đây ngày càng tập trung vào nguồn gốc khoáng sản của họ. Nhiều người trong số họ đã đăng ký một chương trình mới gọi là Liên minh Pin Toàn cầu, nhằm mục đích tạo ra một loại 'hộ chiếu' có thể ghi lại nguồn gốc của các khoáng chất trước khi chúng hoặc chiếc ô tô chúng được đưa đến phòng trưng bày. Ở một khía cạnh nào đó, điều này có cảm giác giống như một lãnh thổ xa lạ, mặc dù bạn cũng có thể nghe thấy những tiếng vọng rõ ràng về nỗi ám ảnh của Henry Ford về nguồn gốc thép của ông.

Lý do thứ hai khiến việc suy nghĩ về pin là hợp lý vì sản xuất pin lithium-ion là một ngành mới đến mức có cơ hội đóng lại một số vòng lặp đó ngay từ đầu. Điều này hoàn toàn trái ngược với hầu hết các quy trình công nghiệp khác, trong đó chất thải đôi khi là một vấn đề xa vời. Ô nhiễm thủy ngân từ pin bị vứt vào bãi rác là một vấn đề nghiêm trọng ở Nhật Bản vào những năm 1980. Một số người lo ngại rằng chì từ một thế kỷ sử dụng pin axit-chì đang tiếp tục góp phần gây ô nhiễm chì trên toàn thế giới. Có lẽ, với những loại pin mới này, có thể sẽ có cơ hội làm điều đó theo cách khác.

Bảo hành pin trên ô tô điện thông thường có xu hướng kéo dài khoảng tám hoặc mười năm, do đó, bảo hành pin trên những chiếc ô tô được mua bởi làn sóng lái xe Tesla đầu tiên hiện đã hết hạn – và khi họ làm như vậy, điều đó có nghĩa là sẽ có nhiều vật liệu hơn cho những người khai thác đô thị như Umicore. . Điều này không có nghĩa là chúng ta vẫn sẽ không cần nhiều nước muối từ vùng *biển* của tam giác lithium ở Nam Mỹ và từ spodumene được phun ra từ vùng hẻo lánh của Úc. Đến năm 2030, trên cơ sở lạc quan, các khoáng chất cũ có nguồn gốc từ pin chỉ có thể cung cấp khoảng 1/10 nhu cầu dự báo. Tuy nhiên, đó là một sự khởi đầu. Và vì lithium trong pin lithium-ion đã cạn kiệt vẫn là lithium nên về mặt lý thuyết, người ta có thể tái sử dụng nó mà không lãng phí. Về lý thuyết.

Umicore không phải là công ty duy nhất tham gia trò chơi này. JB Straubel, một trong những người đồng sáng lập Tesla, hiện đã rời hãng xe hơi để thành lập Redwood Materials, công ty hứa hẹn sẽ "không sản xuất" hàng triệu pin xe điện cũ trong những năm tới. Có một công ty khởi nghiệp ở Canada tên là Li-Cycle và một công ty Trung Quốc được gọi là GEM cũng như cánh tái chế của CATL, Brunp. Ngày nay, lấy đồng từ bùn là một công việc lớn.

Từ ngọn lửa

Vì Umicore đã làm công việc này lâu hơn nên rất đáng để ghé thăm nhà máy của họ ở Hoboken để xem nó được thực hiện như thế nào. Bên trong, có những người đi lại mặc những bộ đồ sáng bóng, cách nhiệt mà các nhà nghiên cứu núi lửa đôi khi mặc khi họ đến bất cứ nơi nào gần dung nham. Trước khi một tế bào được phép sử dụng ở bất kỳ đâu gần đây, nó cần được tách ra khỏi phần còn lại của bộ pin,

một điều nói thì dễ hơn làm. Các nhà sản xuất pin có xu hướng ưu tiên sự an toàn của hành khách hơn mọi thứ khác, dẫn đến kết quả là các gói được lắp ráp lại với nhau tại Gigafactory Nevada được đóng chặt bằng chất kết dính và ốc vít đến mức không có cách nào dễ dàng để tháo rời chúng. Vì vậy, một trong những bước khó nhất trong quy trình tái chế thực sự là bước đầu tiên, kéo bộ pin ra, lý tưởng nhất là không đốt cháy.
Tuy nhiên, bước tiếp theo chính xác là như vậy. Những cục pin nhỏ đó được thả vào một lò cao khổng lồ, nơi chúng được nấu chảy thành chất lỏng nóng chảy. Nếu bạn nghĩ điều này nghe có vẻ giống sản xuất sắt thì bạn không hoàn toàn sai, ngoại trừ ở đây chất lỏng nóng chảy ra khỏi lò có chứa niken, coban và đồng trong khi xỉ chảy ra có chứa lithium. Nhìn những viên pin rơi xuống đỉnh lò là một trải nghiệm thỏa mãn không ngờ, bởi sau khi mỗi viên rơi vào miệng hấp sẽ có tiếng ợ ra tia lửa vàng và hơi nước khi tiêu hóa. Hóa ra, tiếng ợ này là năng lượng được tích trữ trong lượng lithium đó, giúp đốt cháy lò và làm tan chảy phần còn lại của chất bên trong.
Khi bạn quan sát quá trình nấu chảy và xử lý các kim loại này, điều đáng chú ý là chúng rất giống với các kim loại thông thường. khai thác mỏ. Umicore chỉ đơn giản xử lý xỉ lithium thoát ra khỏi lò giống như cách các nhà tinh chế Trung Quốc làm với spodumene đến từ Úc. Một số công ty khởi nghiệp tái chế khác nói rằng họ có thể tồn tại mà không cần cái gọi là bước luyện kim này nhưng Umicore, công ty đã thực hiện việc này lâu hơn bất kỳ ai khác, cho biết đây là lựa chọn tốt nhất hiện có và nó có thể phục hồi hơn 95 mỗi lần tái chế. % đồng, coban và niken được đưa vào. Con số lithium kém ấn tượng hơn: trên 50% và đang tăng lên.
Nhưng ngay cả tỷ lệ 95% cũng không tạo nên một nền kinh tế tuần hoàn thực sự. Hãy xem xét một cục pin trong ô tô điện, có thể dùng được 10 năm. Cứ mười năm một lần, nó phải được đưa trở lại lò nung và tái chế, và mỗi lần bạn phải thêm 5% nguyên liệu mới (hoặc hơn, trong trường hợp của lithium). Hãy ngoại suy điều đó trong vài thập kỷ và trong một trăm năm nữa, pin chỉ còn lại ít hơn 60% số nguyên liệu thô ban đầu đó. Phần còn lại sẽ phải đến từ hoạt động khai thác mới: nổ mìn, tháo nước và tinh chế nhiều hơn.

Mặc dù vậy, tương lai của việc khai thác khoáng sản có thể sẽ rất khác so với trước đây. Trong tương lai, phần lớn vật liệu của chúng ta có thể không đến từ các mỏ ở Chile hay đá lithium ở Tây Úc mà từ các thiết bị cũ mà chúng ta không còn cần nữa. Hãy nhớ rằng phần lớn giá trị của pin không đến từ kỹ thuật mà đến từ nguyên liệu thô. Thách thức ở đây là trong khi các quốc gia phát triển đã có đủ lượng thép họ cần thì họ lại không có đủ pin để điện khí hóa đường sá. Ngay cả trên cơ sở những dự báo lạc quan về việc phát hiện và mở mỏ, thế giới sẽ không có đủ lithium để đáp ứng nhu cầu vào năm 2030. Các công ty khai thác Salar de Atacama không thể đẩy nhanh quá trình bay hơi nước muối của họ đủ nhanh để cung cấp toàn bộ lithium hydroxit cho nhu cầu của họ. các nhà sản xuất cực âm và nhà sản xuất pin đang có nhu cầu cao. Và nếu họ thúc đẩy việc rút nước hồ muối nhanh hơn, chính quyền Chile có thể cấm họ hoàn toàn. [6]
Nói tóm lại, chúng ta đang hướng tới một vài năm gập ghềnh. Trong nhiều thập kỷ, chúng ta đã tự thuyết phục mình rằng hạn chế chính mà nhân loại phải đối mặt là phạm vi trí tưởng tượng của chúng ta. Chúng ta đã tạo ra một hệ thống kinh tế phức tạp và liền mạch đến mức nó cho phép chúng ta quên đi những vật liệu xây dựng nên nó. Nhưng trong nỗ lực xây dựng con đường đạt tới số 0, chúng ta đang phải đối mặt với những hạn chế không thể tránh khỏi của nhiệt động lực học và những hạn chế về vật chất.
Tuy nhiên, có một sự khác biệt quan trọng ở đây. Lần này chúng tôi đang *xây dựng* con đường của mình tới tương lai. Trong nhiều thế kỷ, loài người đã khai thác các mặt hàng năng lượng từ lòng đất để *đốt cháy* chúng. Than, dầu và khí đốt được khai thác rồi đốt, giải phóng carbon trên đường đi. Lần này, chúng tôi đang khai thác và tinh chế lithium để chế tạo thành pin mà chúng tôi có thể tái sử dụng và tái chế. Bước chuyển dịch này sẽ không ngăn cản chúng ta đào nổ hơn bao giờ hết; nó sẽ không ngăn cản chúng ta sử dụng nhiên liệu hóa thạch trong tương lai gần. Nhưng nó có thể, chỉ có thể, có nghĩa là lần này thực sự khác.

Phần kết luận

Trong quá trình viết cuốn sách này, chúng ta đã tua đi tua lại theo thời gian. Chúng ta đã tăng tốc theo bốn quá trình chuyển đổi năng lượng lớn của kỷ nguyên hiện đại và chạm tới bước thứ năm. Chúng ta đã cõng các nguyên tử silicon và lithium khi chúng chu du khắp thế giới để trở thành chất bán dẫn và pin. Chúng tôi đi xuống các đường ống của một nhà máy lọc dầu, vào các lò nơi cát được nấu chảy thành thủy tinh và dọc theo các dây đồng cung cấp năng lượng cho thế giới hiện đại, nhưng dù sao đây cũng chỉ là chuyến tham quan hấp dẫn nhất đến Thế giới Vật chất. Chỉ có một cửa sổ ngắn vào những mạng lưới nội dung và trí thông minh ẩn giấu này mới khiến thế giới quay tròn.

Không còn độc lập với thế giới vật chất xung quanh, chúng ta chưa bao giờ phụ thuộc vào nó nhiều hơn thế, cho dù đó là năng lượng trong một phân tử khí tự nhiên, bê tông mà nếu không có nó thì thế giới xây dựng sẽ sụp đổ hay sợi quang mà hầu hết các công trình của chúng ta sử dụng. dữ liệu di chuyển. Điều làm cho sáu vật liệu này trở nên đặc biệt không chỉ đơn thuần là chúng có tác dụng rất tốt – từ tính dẫn điện của đồng đến mật độ năng lượng của dầu – mà còn ở một số tính năng khác nữa.

Đầu tiên là chúng tôi đã tìm ra cách biến những sản phẩm phức tạp thành những món đồ thông thường. Chiếc điện thoại thông minh trong túi của bạn và chiếc máy tính tôi đang gõ những dòng này chỉ là bước khởi đầu của nó. Mọi người đều mơ hồ hiểu được rằng chip silicon bên trong chúng là những vật thể có độ phức tạp đáng kinh ngạc, mặc dù có lẽ không đến mức độ đó - rằng các bóng bán dẫn giờ đây nhỏ hơn nhiều so với một con virus và sẽ bị một trong các tế bào hồng cầu của bạn làm cho nhỏ đi. Tuy nhiên, việc ít người quan tâm đến vậy không phải là điều đáng thất vọng. Đó là một dấu hiệu của sự thành công. Tất cả đều rất tốt khi tạo ra những vật thể đáng kinh ngạc trong phòng thí nghiệm, nhưng tạo ra thứ gì đó vừa đáng kinh ngạc vừa đi vào túi của hàng tỷ người, nơi nó hoạt động một cách lặng lẽ và tinh

tế và hầu như không thì thầm về sự sáng chói của nó… đó thực sự là một điều đáng ngạc nhiên.
Thứ hai là những mặt hàng này không chỉ đơn thuần là phổ biến mà thường là rẻ. Nó không phải luôn luôn như vậy. Nhiều thế kỷ trước, thủy tinh là một trong những sản phẩm quý giá nhất do con người tạo ra. Tuy nhiên, theo thời gian, giá trị của nó đã giảm đáng kể đến mức thứ từng là thứ xa xỉ nay trở nên rẻ và phổ biến. Thép đã từng đặc biệt đến mức chỉ những người cai trị giàu nhất mới có thể mua được một thanh kiếm được rèn từ nó, nhưng ngày nay chúng ta sản xuất gần 2 tỷ tấn mỗi năm. Bạn có thể nói điều gì đó tương tự về chuyến bay có động cơ, về ô tô, về thuốc giảm đau hoặc vận chuyển hàng hóa bằng container. Chi phí sản xuất polyetylen, loại nhựa đã bùng nổ tại phòng thí nghiệm ICI ở Northwich suốt những thập kỷ trước, đã giảm một phần ba chỉ từ năm 1958 đến năm 1972, và sau đó tiếp tục giảm. Chúng tôi càng làm nhiều thì nó càng trở nên rẻ hơn. [1]
Nó vẫn đang xảy ra ngày hôm nay. Bạn đã đọc ở những trang trước về định luật Moore, ý tưởng cho rằng mật độ chất bán dẫn đã tăng theo cấp số nhân trong hầu hết nửa thế kỷ qua, nhưng bây giờ hãy xem xét tất cả những tiến bộ đó đã ảnh hưởng như thế nào đến giá cả của sức mạnh tính toán. Trở lại năm 1960, một megabyte bộ nhớ lưu trữ trên máy tính có giá lên tới 5,2 triệu USD (các chip nhớ riêng lẻ nhỏ hơn nhiều so với một megabyte nên không ai thực sự trả hàng triệu đô la cho mỗi chip, trong trường hợp bạn tự hỏi). Đến năm 1990, giá mỗi megabyte đã giảm xuống còn 46 USD. Đến năm 2016, giá mỗi megabyte chỉ dưới 1 xu. [2]
Hay còn các tấm pin mặt trời, anh em họ silicon của chất bán dẫn thì sao? Giá của các mô-đun quang điện đã giảm một nửa 500 lần từ năm 1975 đến năm 2019, đến mức pin mặt trời mới hiện rẻ hơn đáng kể, trên mỗi megawatt giờ điện, so với các nhà máy đốt than hoặc khí đốt mới. Câu chuyện tương tự xảy ra đối với cả tua-bin gió ngoài khơi và trên bờ, giá của chúng đã giảm khoảng 13% mỗi năm. Sau đó là pin lithium-ion, giá mỗi kilowatt giờ đã giảm từ 7.500 USD năm 1991 xuống còn 181 USD vào năm 2018 – mức giảm đáng kinh ngạc 97%. Pin trong Tesla Model S có giá khoảng 12.000 USD vào năm 2022; vào đầu những năm 1990, dung lượng pin tương tự có thể có giá gần một triệu đô la. Chúng ta càng tìm hiểu về cách biến vật liệu thành sản

phẩm, thì càng có nhiều cuộn thạch leng keng trên băng chuyền của các nhà máy lớn như cơ sở mà chúng ta đã ghé thăm ở Nevada, chúng ta càng hiểu rõ hơn về nó, và phần lớn, những thứ này càng rẻ. sản phẩm trở thành. [3]

Việc điều này xảy ra trên rất nhiều sản phẩm khác nhau không phải là ngẫu nhiên. Thật vậy, chúng ta đặt tên cho hiện tượng này: đường cong học tập. Chúng ta càng có nhiều kinh nghiệm chế tạo thì chúng ta càng thực hiện chúng tốt hơn và chi phí càng thấp, cho cả người sản xuất và người tiêu dùng. Vòng tròn đạo đức này đã thay đổi kể từ khi những người Phoenicians trong câu chuyện của Pliny vô tình làm ra thủy tinh trên một bãi biển Địa Trung Hải và những người đàn ông và phụ nữ trên vách đá ở Boulby bắt đầu sản xuất muối, mặc dù mãi đến những năm 1930, người ta mới nghĩ ra được một công thức cho hiện tượng đó. Người đó là Theodore Wright, một kỹ sư hàng không người Mỹ, người đã nhận thấy giá máy bay dường như đang giảm dần qua từng năm. Sau đó, ông nhận thấy điều tương tự với ô tô: một thập kỷ rưỡi sau khi Henry Ford sản xuất chiếc Model T đầu tiên, giá đã giảm 3/4.

Ford, Wright nhận thấy, đang áp dụng một trong những bài học quan trọng được Adam Smith đưa ra trong tác phẩm kinh tế vĩ đại đầu tiên *Sự giàu có của các quốc gia* , rằng bằng cách chuyên môn hóa vào một số nhiệm vụ riêng biệt, con người có thể hoàn thành được nhiều việc hơn. Những nhà máy sản xuất ô tô khổng lồ ở Detroit này là nơi khái niệm "phân công lao động" của Smith trở thành hiện thực trên quy mô lớn. Tuy nhiên, đó không chỉ là sự phân công lao động đẩy giá cả xuống mà còn là sự tích lũy kinh nghiệm chậm chạp. Theo thời gian, các công nhân và người quản lý của họ đã tìm ra cách sản xuất nhiều ô tô hơn nữa (hay đúng hơn là các bộ phận riêng lẻ của ô tô) với ít nỗ lực hơn bao giờ hết. Các nhà cung cấp của họ đã tìm ra cách cung cấp thép tốt hơn với giá thấp hơn. Các công ty hóa chất đã nghĩ ra loại sơn mới khô nhanh hơn và cần ít lớp phủ hơn, nghĩa là các nhà máy có thể sản xuất ra nhiều phương tiện hơn nữa.

Khi Wright quan sát thấy sự giảm giá đều đặn và sự cải thiện về chất lượng, ông đã đưa ra một quy tắc kinh nghiệm: mỗi khi sản lượng của một mặt hàng tăng gấp đôi, chi phí của nó sẽ giảm khoảng 15%. Và định luật Wright, như đôi khi người ta gọi nó, đã thành công một cách

kỳ lạ trong việc giải thích sự sụt giảm giá của mọi thứ, từ tàu container đến nhựa chuyên dụng.
Khi thành quả của Thế giới Vật chất trở nên rẻ hơn bao giờ hết, chúng chiếm một phần ngày càng nhỏ trong chi tiêu quốc gia của chúng ta, dẫn đến kết quả là chúng thường bị bỏ qua trong các tài khoản thông thường của nền kinh tế. Hãy cố gắng lập luận rằng mọi người nên coi trọng muối hơn, rằng họ nên coi nó không chỉ là một thứ gia vị tầm thường mà còn là một chất giúp thế giới hiện đại vận hành, và bạn sẽ gặp phải những cái nhìn khó hiểu. Tôi biết điều này từ kinh nghiệm cá nhân.
Tuy nhiên, không có muối chúng ta không có clo và không có clo chúng ta không có nước uống tinh khiết, chưa kể đến một loạt các loại thuốc cứu sinh. Không có muối thì sẽ không có vi mạch hoặc tấm pin mặt trời, vì bạn không thể biến silicon luyện kim thành polysilicon siêu tinh khiết nếu không có hydro clorua mà chúng ta điện phân từ đó. muối. Nếu không có muối, chúng ta sẽ không có thủy tinh (vì dòng soda-tro mà chúng ta sử dụng để làm tan chảy cát chủ yếu thu được từ muối) và nếu không có nền văn minh thủy tinh như chúng ta biết thì nó sẽ sụp đổ. Sẽ không có lọ để vận chuyển thuốc, không có thấu kính để nhìn hoặc huấn luyện tia laser mà chúng ta sử dụng để khắc chip silicon. Cuộc sống của chúng ta đang bấp bênh trên những hạt muối và cát.
Điều đó đưa chúng ta đến một điều đặc biệt khác về sáu tài liệu này: mức độ mà các câu chuyện của chúng đan xen với nhau. Bê tông và thép đều là những chất tuyệt vời, nhưng chỉ khi thép được bọc trong bê tông thì chúng mới biến thành vật liệu xây dựng tối ưu. Pin cũng phụ thuộc vào đồng cũng như phụ thuộc vào lithium bên trong chúng. Bóng đèn sẽ vô dụng nếu không có kính. Bạn không thể có một máy biến áp mà không có lõi bằng thép silicon hoặc dây đồng quấn quanh nó - và nếu không có máy biến áp, cải tiến không được đánh giá cao nhất, lưới điện của chúng ta sẽ sụp đổ. Việc chúng ta không chú ý nhiều đến Thế giới Vật chất mới là vấn đề. Tại sao chúng ta lại làm như vậy khi nó chỉ… hoạt động? Chúng tôi đã mong đợi rằng dần dần, mỗi năm, mọi thứ *sẽ trở nên tốt hơn* . Các bóng bán dẫn đã được thu nhỏ lại, các máy biến áp trở nên hiệu quả hơn, các tua-bin hơi nước đã chuyển đổi nhiệt thành điện năng tốt hơn bao giờ hết.

Nhưng có một mặt tối của sự tiến bộ này. Một phần lý giải cho việc chúng ta ngày càng tiến bộ hơn trong việc chế tạo và làm đồ vật là nhờ học hỏi và trải nghiệm – theo định luật Wright. Nhưng một phần lời giải thích là chúng ta đang đồng thời leo lên một bậc thang năng lượng. Từ gỗ đến than đá và từ than đá đến dầu rồi đến khí đốt, mật độ năng lượng của các nhiên liệu này tăng lên theo từng bước. Chúng tôi đã nhận được nhiều năng lượng hơn từ việc đốt ít nhiên liệu hơn. Một mặt, bản thân nhiên liệu ngày càng sạch hơn đáng kể: quá trình đốt gỗ thải ra tới 110 kg carbon dioxide trên mỗi gigajoule năng lượng, so với khoảng 60 kg $CO2_{cho}$ mỗi gigajoule do khí tự nhiên cung cấp. Tuy nhiên, những cải tiến đó không thể bù đắp được thực tế là ngày càng có nhiều người trong chúng ta tiêu thụ năng lượng. [4]

Đó cũng là hệ quả của Thế giới Vật chất. Trong suốt chặng đường, chúng tôi đã đi từ việc phải dựa vào mặt trời để cung cấp nguồn dinh dưỡng, được bổ sung bằng một số loại phân bón khai thác được như caliche của Atacama, sang dựa vào nhiên liệu hóa thạch. Ngày nay, cà chua, khoai tây và hầu hết mọi thứ khác của chúng ta đều được nuôi dưỡng bằng phân bón làm từ khí tự nhiên. Nhờ quy trình Haber–Bosch, tất cả chúng ta đều được tạo ra từ nhiên liệu hóa thạch. Điều đó cho phép dân số toàn cầu phát triển vượt quá giới hạn Malthusian của nó – khả năng chịu tải của hành tinh nếu chúng ta chỉ có thể dựa vào các nguồn tài nguyên tái tạo như mặt trời, gió và đất không được bón phân – nhưng khi dân số của chúng ta tăng lên thì số lượng cũng tăng theo cấp số cộng. nhiên liệu hóa thạch mà chúng ta đã đốt. Có một nghịch lý ở đây. Nếu không có nhiên liệu hóa thạch, khoảng một nửa trong số chúng ta sẽ không thể sống được. Tuy nhiên, hiện nay, lượng khí thải carbon từ nhiên liệu hóa thạch đang gây ra những vấn đề đe dọa tất cả chúng ta.

Giờ đây, các chính phủ muốn giảm lượng khí thải carbon của chúng ta xuống mức 0 về mặt giá trị ròng - nói cách khác, sau khi tính đến lượng CO_2, chúng ta sẽ đưa $CO2$ ra khỏi khí quyển bằng cách thu giữ nó hoặc trồng cây. Ngày kỳ diệu được chọn cho quá trình chuyển đổi này là giữa thế kỷ này – năm 2050 – một thời điểm không có gì đáng chú ý ngoại trừ đó là một con số tròn đẹp. Nhưng việc đưa thế giới về mức 0 vào khoảng thời gian đó sẽ giúp chúng ta giữ được sự

nóng lên toàn cầu ở mức dưới 2°C và thậm chí có thể ở mức gần 1,5°C.

Điều này là *vô cùng* tham vọng. Chưa từng có quá trình chuyển đổi năng lượng nào thuộc loại này đạt được nhanh chóng như vậy, thực sự, bốn giai đoạn trước sẽ được đo lường tốt hơn trong nhiều thế kỷ và chúng ta vẫn phụ thuộc vào than để cung cấp năng lượng nhiều hơn dầu. Và đây là trước khi bạn tính đến điều đó trong mỗi quá trình chuyển đổi trước đó – chuyển từ than sang dầu và từ dầu sang khí đốt – đều có động lực lớn để chuyển đổi: các nhà sản xuất có thể hưởng lợi từ nhiên liệu rẻ hơn, giàu năng lượng hơn. Mỗi ca làm việc trước đó đều khiến cuộc sống của họ dễ dàng hơn. Lần này, điều ngược lại thường xảy ra. Ngoại trừ năng lượng hạt nhân, chúng ta đang chuyển sang các nguồn năng lượng ít đậm đặc hơn. Và chúng tôi đang làm như vậy ngay cả khi các quốc gia đông dân nhất thế giới đang công nghiệp hóa và do đó mức tiêu thụ năng lượng của họ ngày càng tăng. Những con số đầy thách thức: một số người có thể nói gần như không thể như vậy.

Một phần lý do khiến nhiều người vẫn lạc quan một cách vô tư về thách thức này là vì khi nghĩ đến quá trình chuyển đổi năng lượng, họ có xu hướng nghĩ chủ yếu về điện. Về mặt này, mọi thứ đang diễn ra khá tốt - ít nhất là ở các quốc gia phát triển. Ở Anh, lượng điện do than tạo ra đã giảm từ hơn 65% năm 1990 xuống chỉ còn 3% vào năm 2021. Khi có gió thổi, có những khoảng thời gian trong ngày hơn một nửa năng lượng của Anh đến từ các nguồn tái tạo. Ở những nơi khác, câu chuyện thậm chí còn đáng khích lệ hơn: ở California, có một vài ngày vào năm 2022, năng lượng tái tạo đã cung cấp hơn 100% nhu cầu của bang. Texas không chỉ đơn thuần là một cường quốc dầu khí; nó tạo ra nhiều năng lượng gió hơn bất kỳ tiểu bang nào khác. [5]

Nhưng đáng khích lệ như thế này, nhưng đó không phải là bức tranh đầy đủ, bởi vì năng lượng tái tạo vốn không liên tục và chúng ta vẫn chưa xây dựng được kho lưu trữ năng lượng có thể giúp giữ cho lưới điện hoạt động khi mặt trời không chiếu sáng và gió không chiếu sáng. thổi. Pin, tuy xuất sắc nhưng không đủ đậm đặc năng lượng để giải quyết câu hỏi hóc búa này. Phương án dự phòng khả dĩ nhất, cùng với một loạt hồ chứa thủy điện mới, là một loại nhiên liệu hoàn toàn mới: hydro.

Cho dòng điện chạy qua nước và bạn tạo ra hydro và oxy. Lưu trữ hydro trong các bể điều áp và sau đó đốt nó trong các nhà máy điện để dự phòng khi mặt trời lặn. Sản phẩm thải duy nhất là nước. Tuyệt vời phải không? Điều tuyệt vời khác về hydro là nó cũng có thể được triển khai ở nơi khác. Bạn có nhớ nhà máy lọc dầu ở Wesseling không? Nó cần hydro để giúp nó nứt dầu (hoặc các sản phẩm thải mà nó sẽ tinh chế trong tương lai) thành các khối xây dựng hóa dầu mà tất cả chúng ta đều cần. Và hydro là thành phần thiết yếu trong quy trình Haber–Bosch. Nói cách khác, thay vì sử dụng than hoặc khí đốt để làm phân bón, trong tương lai chúng ta có thể cung cấp nhiên liệu cho thế giới bằng amoniac làm từ hydro xanh, được tạo ra từ năng lượng gió.

Tuy nhiên, sử dụng điện phân để tạo ra hydro là không hiệu quả. Hãy xem xét nhà máy nitrat lớn nhất ở Anh: nhà máy ICI cũ bên bờ sông Tees ở Billingham, nơi Aldous Huxley đã đến thăm trước khi viết *Brave New World* . Đây là một địa điểm hơi rộng rãi, nhưng hoạt động kinh doanh chính, chuyển đổi không khí và hydro thành amoniac, đều diễn ra trong một số bình cao, chiếm ít không gian hơn một tổ hợp văn phòng cỡ trung bình. Việc tạo ra hydro xanh mà bạn cần để cung cấp cho nhà máy phân bón này sẽ tiêu thụ toàn bộ sản lượng của trang trại gió lớn nhất thế giới, Hornsea One ở Biển Bắc, vào thời điểm viết bài. Tất cả 174 tuabin gió khổng lồ – có thể sản xuất hơn một gigawatt điện vào một ngày đẹp trời, đủ cung cấp điện cho hơn một triệu ngôi nhà – sẽ cần được chuyển giao toàn bộ cho các tàu ở Billingham.

Và tất nhiên, đây chỉ là một phần nhỏ của bức tranh lớn hơn. Nhà máy phân bón này thực tế có quy mô trung bình theo tiêu chuẩn toàn cầu; nhiều trong số đó ở Mỹ và Trung Quốc có quy mô lớn hơn đáng kể, do đó sẽ cần nhiều năng lượng hơn từ nhiều tua-bin gió hơn (hoặc các tấm pin mặt trời hoặc nhà máy thủy điện) nếu chúng muốn chuyển sang màu xanh. Hơn nữa, sản xuất phân bón chỉ là một phần của chiếc bánh công nghiệp. Việc sản xuất thép xanh sẽ tiêu thụ nhiều hydro hơn nữa. Những điều như vậy có vẻ không quan trọng nhưng thực ra chúng chính là vấn đề. Các quy trình công nghiệp này thậm chí còn chiếm nhiều năng lượng sử dụng cơ bản của thế giới hơn mức mà hầu hết mọi người nói đến – sản xuất điện. Hóa ra, điện lại là một việc dễ dàng. [6]

Tuy nhiên, không có lý do lý thuyết nào giải thích tại sao chúng tôi không thể tìm cách đạt được con số 0. Hãy áp dụng một số kiến thức mà chúng ta đã học được từ hành trình xuyên qua Thế giới Vật chất này. Rốt cuộc, tuabin gió ngoài khơi là gì? Câu trả lời ngắn gọn: một cấu trúc làm bằng thủy tinh, sắt, đồng và dầu, có rắc muối.

Hãy bắt đầu với cột đơn nằm dưới nước - một ống được cắm xuống đất để làm móng. Nó được làm bằng các tấm thép nặng, chỉ riêng nó đã nặng tới 800 tấn, tương đương với ba máy bay phản lực khổng lồ. Ngoài ra còn có thép ở tháp, thép ở vỏ bọc ở phía trên, nơi đặt máy phát điện và thép ở 'các phần chuyển tiếp' đan kết cấu lại với nhau. Các cánh buồm phía trên có khung bằng gỗ balsa được bao phủ chủ yếu bằng sợi thủy tinh, đơn giản là những sợi dây thủy tinh mỏng được phủ nhựa polymer. Các điểm chịu mài mòn cứng nhất được gia cố bằng sợi carbon, được làm từ hỗn hợp nhựa, từ propylene đến benzen và amoniac, cũng như các hóa chất gốc clo mà chúng ta thu được từ muối. Sau đó, toàn bộ số đồng sẽ giúp tạo ra năng lượng và đưa năng lượng trở lại đất liền. Mọi con đường đều dẫn về sáu chất của Thế giới Vật chất.

Bạn sẽ nhận thấy rằng không có cách nào để sản xuất hàng loạt tuabin gió (hoặc chất nền silicon của các tấm pin mặt trời) mà không sử dụng nhiên liệu hóa thạch. Hiện tại, cách duy nhất để biến silica thành kim loại silicon là nấu chảy nó bằng than cốc. Trong khi đó, các cánh của tuabin gió đặc biệt được làm từ nhựa được chiết xuất chủ yếu từ dầu thô và khí tự nhiên. Câu chuyện tương tự ở những nơi khác: bạn không thể tạo ra pin lithium-ion hiệu suất cao nếu không sử dụng than chì thu được từ dầu thô.

Tuy nhiên, có một sự khác biệt quan trọng giữa việc sử dụng nhiên liệu hóa thạch này và cách chúng ta chủ yếu sử dụng chúng trong ba thế kỷ trước. Ở đây, chúng tôi đang *xây dựng* với họ chứ không phải đốt cháy họ. Tiết kiệm than cốc, giúp chúng ta luyện kim silicon, chúng ta đang biến những nhiên liệu hóa thạch này thành sản phẩm chứ không phải là dòng năng lượng, nung cacbon tích hợp thành vật dụng chúng ta sử dụng thay vì thải nó vào khí quyển. Chúng ta đang nhớ lại những gì tổ tiên chúng ta đã từng làm, trước khi họ học cách tinh chế dầu thô thành dầu hỏa, khi công dụng chính của nó là bôi hắc ín đáy thuyền và trộn gạch vữa lại với nhau. Xây dựng, chứ không phải đốt

cháy, là tên của cuộc chơi trong những thập kỷ tới, và quy mô của dự án xây dựng đó gần như chắc chắn vượt xa những gì bạn tưởng tượng.

Có thể nheo mắt nhìn vào khoảng cách và hình dung ra một kỷ nguyên mà loài người đã thay thế hầu hết nhiên liệu hóa thạch bằng các lựa chọn thay thế có thể tái tạo. Chúng ta có thể vẫn cần dầu cho một số sản phẩm, chẳng hạn như than chì trong pin. Chúng ta sẽ cần một ít than cho một số quy trình công nghiệp và một ít khí tự nhiên - nhưng với liều lượng nhỏ hơn rất nhiều so với hiện nay. Mọi việc đều ổn, chúng tôi cũng sẽ có các kế hoạch hợp lý để thu giữ tất cả lượng khí thải mà chúng tôi chưa loại bỏ được. Nếu các nhà hoạch định chính sách có ý thức, chúng ta sẽ xây dựng nhiều nhà máy điện hạt nhân mới (uranium nằm ở bậc thang mật độ năng lượng *cao* hơn hầu hết mọi thứ khác) và sẽ điện khí hóa đường bộ. Chúng tôi sẽ lắp đặt các dây cáp điện dưới biển để tạo ra một mạng lưới quốc tế, để những quốc gia có nhiều nắng và gió có thể cung cấp năng lượng cho những quốc gia còn lại. Chúng ta sẽ phát triển nhiên liệu xanh cho tàu bè và thậm chí có thể cả máy bay phản lực cũng như phân bón xanh cho các cánh đồng của chúng ta. Các nhà máy lọc dầu như ở Wesseling sẽ sản xuất nhựa và hóa chất từ tinh bột và chất thải sinh học thay vì dầu.

Có lẽ chúng ta sẽ học được cách sử dụng tất cả những vật liệu này một cách thận trọng hơn và ít lãng phí chúng hơn. Chúng tôi sẽ có các địa điểm như nhà máy tái chế Umicore ở Hoboken trên khắp thế giới để tối đa hóa việc tái sử dụng vật liệu. Thế giới sẽ là một nơi lành mạnh hơn, năng suất hơn, với ít ca tử vong do ô nhiễm hơn và vì chúng ta sẽ khai thác ít nhiên liệu hóa thạch hơn hiện nay nên dấu chân của chúng ta thực sự sẽ đã bị thu hẹp trên toàn thế giới. Và nó trở nên tốt hơn. Bởi vì mặc dù năng lượng tái tạo có mật độ thấp hơn đáng kể so với nhiên liệu hóa thạch nhưng trên thực tế nó lại vô hạn. Cần nhiều công sức hơn – nhiều tấm pin và tua-bin hơn – để thu được năng lượng từ mặt trời và gió, nhưng nếu chúng ta thu được đủ năng lượng thì chi phí điện có thể giảm đáng kể.

Khi lượng khí thải carbon của chúng ta ổn định và giảm xuống, thế giới cũng có thể trở nên ít bị hạn chế hơn bởi năng lượng và thậm chí còn giàu có và năng suất hơn. Và nguồn năng lượng siêu dồi dào sẽ

mở ra hàng loạt lựa chọn hấp dẫn khác. Chúng ta có thể sử dụng tất cả sức mạnh đó để tách carbon dioxide trực tiếp từ khí quyển và biến nó thành polyetylen, giải quyết hiệu ứng nhà kính đồng thời cung cấp cho chúng ta nhiều nhựa hơn mức chúng ta cần. Chúng ta có thể tạo ra nhiên liệu tổng hợp có thể cung cấp năng lượng cho máy bay siêu thanh, giảm thời gian hành trình giữa London và Tokyo xuống còn vài giờ. Với nguồn năng lượng thực sự dồi dào và rẻ tiền, chúng ta thậm chí có thể thiêu kết những hạt cát sa mạc hình cầu, mịn màng thành những loại có góc cạnh hiếm hơn được sử dụng trong xây dựng. Sự trỗi dậy của mafia cát, sự tàn phá đồng bằng sông Cửu Long và nhiều hậu quả môi trường do khai thác cát đều có thể tan biến.
Đó là một tầm nhìn quyến rũ. Nhưng nó sẽ đòi hỏi một nỗ lực to lớn, rất nhiều thời gian và tiền bạc để đạt được điều đó. Chúng ta không thể bật một công tắc nào để biến toàn bộ Thế giới Vật chất thành năng lượng tái tạo. Và nó sẽ cần một lượng lớn nguyên liệu thô. Hãy xem xét cần những gì để thay thế một tuabin khí tự nhiên nhỏ, tạo ra 100 megawatt điện, đủ cho 100.000 ngôi nhà, bằng năng lượng gió. Bạn sẽ cần khoảng 20 tuabin gió khổng lồ. Để chế tạo những tuabin đó, bạn sẽ cần gần 30.000 tấn sắt và gần 50.000 tấn bê tông, cùng với 900 tấn nhựa và sợi thủy tinh làm cánh quạt và 540 tấn đồng (hoặc gấp ba lần so với một trang trại gió ngoài khơi). Mặt khác, tuabin khí sẽ cần khoảng 300 tấn sắt, 2.000 tấn bê tông và có lẽ 50 tấn đồng trong cuộn dây và máy biến áp. Trên cơ sở một phép tính, chúng ta sẽ cần khai thác nhiều đồng hơn trong 22 năm tới so với toàn bộ 5.000 năm lịch sử loài người vừa qua. [7]
Tuy nhiên, đây là điều đáng lo ngại nhất về viễn cảnh tương lai này: nhiều người trong chúng ta - có lẽ là hầu hết chúng ta - sẽ không bao giờ trải nghiệm được nó.
Việc tính toán những điều này là một công việc khó khăn khi có bao nhiêu biến số đang diễn ra, nhưng hãy lấy mô hình được sử dụng phổ biến nhất và giả sử mọi thứ khác đều diễn ra theo đúng kế hoạch và chúng ta sẽ đạt mức 0 ròng vào năm 2050. Trong trường hợp đó, 'năm hòa vốn', khi mức carbon trong khí quyển giảm xuống và lợi ích kinh tế và khí hậu bắt đầu lớn hơn chi phí, sẽ là vào khoảng năm 2080. Các mô hình khác thậm chí còn đưa ra kết luận muộn hơn. [số 8]

Hãy suy nghĩ về điều này trong một thời điểm. Thế hệ đầu tiên được hưởng lợi từ giai đoạn hy sinh và đầu tư này - nói cách khác là sống ở thời kỳ đỉnh cao trong sự nghiệp của họ khi chúng ta vượt qua năm hòa vốn đó - có thể phải đến giữa thế kỷ này mới được sinh ra. Họ là con của những đứa trẻ được sinh ra ngày hôm nay.

Điều đó khiến chúng ta gặp phải ba rủi ro trên con đường phía trước. Đầu tiên là mọi người tuyệt vọng và bỏ cuộc. Có tiền lệ nào về việc các thế hệ nhân loại kế tiếp cố ý hy sinh một số sinh kế của mình cho một tương lai mà chính họ sẽ không bao giờ trải qua không? Bằng cách tránh sử dụng nhiên liệu hóa thạch giá rẻ, giàu năng lượng, đó chính xác là ý nghĩa của con đường dẫn đến mức 0 ròng hiện nay: thu nhập tương đối yếu hơn hiện nay để cứu hành tinh. Không rõ các chính trị gia đã nói ra điều này hay chưa, vì vậy nguy cơ xảy ra phản ứng dữ dội là rất lớn.

Rủi ro thứ hai là nỗ lực xây *dựng* con đường hướng tới số 0 ròng của chúng ta bị cản trở bởi sự phản kháng chính trị và sự thờ ơ của công chúng. Ở các nước trên thế giới, chính quyền đang gây khó khăn hơn chứ không ít hơn trong việc đảm bảo phê duyệt quy hoạch cho các tuabin gió và tấm pin mặt trời mà chúng ta cần để đáp ứng nhu cầu năng lượng cuối cùng của chúng ta. Các dự án đồng và lithium đã bị cắt giảm ở Nam Mỹ và Châu Âu. Và nếu nguồn cung cấp những vật liệu này không theo kịp ngay cả khi nhu cầu của chúng ta đối với chúng tăng lên, thì bạn biết điều đó sẽ dẫn đến đâu. Vào năm 2022, lần đầu tiên, giá pin lithium-ion – mức giá mà nhờ Định luật Wright, đã giảm liên tục kể từ những năm 1990 – đã ngừng giảm và tăng. Lời giải thích: lo ngại về nguồn cung nguyên liệu thô, bao gồm cả lithium, đã khiến giá nguyên liệu tăng cao.

Chúng ta sẽ không đạt được mức 0 ròng nếu chúng ta thiếu hụt lithium hoặc đồng trong thời gian dài, điều đó có nghĩa là chúng ta cần nhiều người khéo léo hơn để nghĩ ra cách thu được những khoáng chất đó. Nhưng tại thời điểm viết bài, có quá ít người trẻ muốn học ngành khai thác mỏ đến nỗi Trường Mỏ Camborne ở Cornwall, một trong những cơ sở luyện kim nổi tiếng thế giới, đã đình chỉ tuyển sinh mới cho bằng kỹ sư khai thác mỏ. Nếu không còn ai biết cách thu được những khoáng sản mà chúng ta cần thì chúng ta còn hy vọng gì?

Rủi ro thứ ba là nền tảng địa chính trị mà Thế giới Vật chất được xây dựng trên đó sẽ tan rã. Một con chip silicon đi vòng quanh thế giới nhiều lần trước khi kết thúc trong thiết bị của bạn. Điều tương tự cũng đúng với hầu hết các nguyên tử đồng, được khai thác ở một phía của thế giới, được tinh chế ở nơi khác (thường là Trung Quốc) và sau đó được tích hợp vào một thiết bị dành cho một nơi khác hoàn toàn. Thế giới như chúng ta biết – bao gồm tất cả những vòng tròn đạo đức đã giúp giá cả giảm hàng năm – phụ thuộc vào những mối liên kết này. Trong những thời kỳ mà chuỗi cung ứng hoạt động và nguyên liệu có thể di chuyển tự do từ nơi này sang nơi khác trên thế giới, dường như mọi thứ đến từ đâu, được sản xuất ở đâu hoặc được sản xuất như thế nào hầu như không quan trọng. Chúng chỉ đơn giản xuất hiện và nạp vào một cỗ máy công nghiệp mà chúng ta đã ngừng cố gắng lập bản đồ hoặc hiểu rõ. Nhưng trong những trường hợp hiếm hoi khi chuỗi cung ứng này bị hỏng, rõ ràng nhất là khi đối mặt với chiến tranh hoặc trận chiến thương mại, mọi sự đặt cược đều đột ngột bị tắt. Thế giới Vật chất nhanh chóng trở nên hết sức quan trọng. Những vật liệu rẻ tiền, phổ biến mà chúng ta từng có thể dễ dàng tìm được từ bên kia thế giới giờ đây đã mang một chiều hướng mới, cấp bách. Và do mức độ phức tạp trong sản xuất sản phẩm ngày nay lớn hơn nhiều so với bất kỳ thế hệ nào trước đây, tác động tiềm tàng của việc các quốc gia trên thế giới lựa chọn chính sách tự cung tự cấp – cố gắng tồn tại mà không cần nhập khẩu – sẽ rất nghiêm trọng. [9]
Nhưng điều này sẽ không gây ngạc nhiên vì bây giờ bạn sẽ biết những vật liệu này quan trọng đến mức nào. Bạn sẽ biết rằng chúng đại diện cho nền tảng của cuộc sống hiện đại, và nếu không có chúng, chúng ta sẽ gặp rắc rối sâu sắc. Bạn biết rằng năng lượng dưới nhiều hình thức khác nhau hỗ trợ quá trình sản xuất của họ và khi nguyên liệu và năng lượng đột nhiên bị thiếu hụt thì mọi thứ sẽ không có xu hướng diễn ra tốt đẹp. Đôi khi tác động là tinh tế và dần dần. Việc năng suất kinh tế của các nước phát triển bắt đầu ổn định vào cùng thời điểm Mỹ và châu Âu bắt đầu cắt giảm việc sử dụng năng lượng (những năm 1970) có lẽ không phải là một sự trùng hợp ngẫu nhiên. Đôi khi tác động là nội tạng và kịch tính. Cuộc xâm lược Ukraine năm 2022 của Nga đã cắt đứt nguồn cung cấp năng lượng của một số khu vực châu Âu và đẩy giá dầu tăng cao, đã gây ra suy thoái kinh tế trên

hầu hết lục địa. Đối mặt với tình trạng thiếu khí đốt, châu Âu buộc phải suy nghĩ lại bản chất của các trung tâm công nghiệp của mình. BASF, tập đoàn hóa chất khổng lồ của Đức đi tiên phong trong quy trình Haber–Bosch, đã đóng cửa một số nhà máy sản xuất amoniac tại Ludwigshafen và bắt đầu nhập khẩu hóa chất này từ nước ngoài. Mặc dù những quyết định như thế này có thể giúp đẩy nhanh quá trình chuyển đổi khỏi sử dụng nhiên liệu hóa thạch nhưng chúng vẫn mang tính đột phá và tốn kém. Việc hệ thống năng lượng của bạn bị đoản mạch là một chuyện, còn hệ thống năng lượng của bạn bị đoản mạch lại là một chuyện hoàn toàn khác.

Tuy nhiên, năng lượng chỉ là một phần trong đó, vì cuộc khủng hoảng đã đặt ra câu hỏi về toàn bộ cấu trúc của nền kinh tế toàn cầu. Nếu cung cấp Các chuỗi không còn có thể dựa vào được nữa, thì liệu các nền kinh tế phát triển, vốn đã dành vài thập kỷ qua đã dần dần cắt giảm hoạt động sản xuất của mình, có phải đảo ngược toàn bộ quá trình đó không? Điều đó có thể thực hiện được không? Khi các nhà hoạch định chính sách cố gắng đưa ra câu trả lời, họ nhận ra rằng họ thậm chí không có một bức tranh thực tế nào về cách mọi thứ vận hành ngày nay.

Ở đây có một sự tương đồng với cuộc chiến tranh thế giới vừa qua: trong nỗ lực tìm hiểu các nguồn tài nguyên mà họ có thể sử dụng, vào những năm 1940, các nhà hoạch định chính sách tại Bộ Thương mại Hoa Kỳ đã ủy quyền cho nhà kinh tế học Simon Kuznets đưa ra một hệ thống tài khoản quốc gia. Nó đã tạo ra cái mà ngày nay chúng ta gọi là tổng sản phẩm quốc nội. Vào những năm 2020, khi cân nhắc liệu mình có thể đạt được 'chủ quyền về chất bán dẫn' hay không, bộ phận tương tự đã yêu cầu khảo sát toàn bộ chuỗi cung ứng chip silicon. Khi họ lập biểu đồ các liên kết và kết nối từ đầu mỏ đến sản xuất tấm bán dẫn đến nhà máy chế tạo và nhóm các yếu tố đầu vào thiết yếu trên đường đi, họ bắt đầu tạo ra một bản đồ nguyên thủy về góc này của Thế giới Vật chất. Có lẽ đến lúc thích hợp, những bản đồ như vậy có thể, cùng với việc phân tích dòng nguyên liệu lập biểu đồ việc sử dụng các chất của chúng ta, cung cấp một đối trọng với số liệu thống kê GDP, cho thấy sức mạnh của sự phụ thuộc và hợp tác.

10 fn1

Chúng ta thấy gì khi khảo sát những bản đồ thô sơ này của Thế giới Vật chất? Một mạng lưới các kết nối và sự phụ thuộc phức tạp đến mức dường như không thể tách rời được. Quặng sắt chảy từ Úc sang Trung Quốc thành thép, chảy sang châu Âu để biến thành hợp kim tiên tiến, được ép và cứng lại và tạo thành khung của một chiếc ô tô, được vận chuyển qua Đại Tây Dương đến New Jersey. Dòng cát góc đến các công trường xây dựng, cát silic đến các nhà máy thủy tinh và thạch anh đến các nhà máy luyện silicon. Dòng đồng và lithium từ Chile đến Trung Quốc và quay trở lại; muối và nước muối vào các nhà máy hóa chất để biến thành một loạt các hóa chất chóng mặt.
Thế giới kết nối đáng kinh ngạc xung quanh biển cả này đã cho phép chúng ta coi những nền tảng của nền văn minh là đương nhiên - mọi thứ từ vật liệu đến năng lượng. Cũng giống như cách chúng ta mở rộng quy mô khai thác đồng và sắt ở Chile và Úc, chúng ta đã mở rộng quy mô thương mại: một chiếc tàu container ngày nay có thể chở nhiều hàng hóa hơn toàn bộ đội tàu buôn của Anh vào thế kỷ 16. thế kỷ. Nhưng điều gì sẽ xảy ra với các chuỗi cung ứng điều khiển toàn cầu khi bạn không thể điều khiển toàn cầu được nữa? Điều gì sẽ xảy ra khi bạn không còn có thể chắc chắn rằng một con tàu khởi hành từ bên này thế giới sẽ đến bên kia thế giới đúng giờ - hay thực sự là như vậy? Hãy nhớ lại 'nạn đói thủy tinh' trong Thế chiến thứ nhất, khi nỗ lực chiến tranh của Anh gặp nguy hiểm do thiếu ống nhòm và bạn biết câu trả lời. Trong những trường hợp như vậy, đột nhiên *một* thứ gì đó được khai thác và tạo ra không còn là một việc vặn vẹo không liên quan nữa; nó là *tất cả mọi* thứ [11]
Bị bỏ qua dù đã nhiều năm nhưng Thế giới Vật chất vẫn là một nơi đầy ngạc nhiên. Ngày nay, chúng ta có công nghệ nano trong mỗi túi của mình chính là nhờ sự hợp tác và cạnh tranh giữa các nhà khoa học và nhà sản xuất trên khắp thế giới. Chỉ mất vài tháng để phát minh và sản xuất thuốc nhằm giải quyết đại dịch nhờ vào mạng lưới trí tuệ và khoa học vật liệu có quy mô hành tinh này. Tạo ra những điều tuyệt vời làm thay đổi cuộc sống của chúng ta hóa ra lại đơn giản hơn rất nhiều nếu bạn có nhiều người tham gia.
Thế giới Vật chất là nền tảng cho cuộc sống của chúng ta ngày nay, giúp hầu hết chúng ta thoát khỏi sự lao động vất vả và cực nhọc của tổ tiên. Trở lại năm 1801, con người phải mất trung bình 150 giờ lao

động để sản xuất ra một ha lúa mì; ngày nay, nhờ có máy cày thép, động cơ diesel và máy gặt liên hợp dẫn hướng bằng chất bán dẫn, chúng tôi chỉ mất chưa đầy 2 giờ - và chúng tôi thu hoạch được nhiều lúa mì hơn trên mỗi ha. Một thế kỷ trước, con người phải mất 230 giờ lao động để sản xuất ra một tấn đồng; ngày nay phải mất khoảng 18. Những bước nhảy vọt đáng kinh ngạc này (và phần lớn không được đánh giá cao) là do chúng ta đã triển khai một lượng lớn năng lượng, kim loại và hóa chất để công nghiệp hóa nông nghiệp và khai thác mỏ. Kết quả là chỉ một phần nhỏ trong số chúng ta hiện đang làm việc trong những ngành cung cấp đủ thức ăn và chỗ ở cho tất cả chúng ta. [12]

Là một người đã làm việc cả đời trong thế giới thanh tao, tận hưởng chiến lợi phẩm của Thế giới Vật chất mà không bao giờ bị bẩn tay, cuộc hành trình được kể lại trong cuốn sách này có phần trừng phạt. Tôi càng đi du lịch nhiều, cảm giác khó chịu càng lớn rằng tất cả chúng ta đã trở nên mất kết nối với các ngành công nghiệp chính mà tất cả chúng ta dựa vào để tồn tại. Có lẽ đây chỉ đơn giản là sự trao đổi của chủ nghĩa tư bản hiện đại. Bạn có thể mua bất cứ thứ gì bạn muốn từ bất cứ nơi nào trên thế giới với giá hời, nhưng đừng làm bất cứ điều gì bạn mong đợi để hiểu nó được tạo ra như thế nào hoặc nó đến tay bạn như thế nào. Có lẽ không có vấn đề gì khi không có một người nào trên thế giới biết cách tạo ra một cây bút chì hoặc một con chip silicon. Nhưng điều gì sẽ xảy ra nếu sự mất kết nối này đang thúc đẩy sự xa lánh mà nhiều người cảm thấy đối với chủ nghĩa tư bản? Có lẽ điều đó giúp giải thích tại sao một số người ở các nước phát triển đang quay lưng lại với việc sản xuất hàng loạt và chuyển sang sử dụng các sản phẩm thủ công, hoặc thậm chí cố gắng tự sản xuất các mặt hàng tự chế thay vì đặt hàng trực tuyến. Tất cả đều nói lên mong muốn kết nối lại với những điều cơ bản của Thế giới Vật chất. Và chúng ta nên kết nối lại, vì nơi này chứa đầy những câu chuyện sẽ mang lại cho chúng ta niềm hy vọng ngày hôm nay. Trong nhiều năm, người ta cho rằng sẽ không thể sản xuất được sắt thép ở quy mô như ngày nay. Việc khám phá lại công thức chế tạo bê tông dường như là một giấc mơ viển vông. Các nhà khoa học nghi ngờ liệu chúng ta có thể chế ngự được tia cực tím cực mạnh hay không, chứ đừng nói đến việc sử dụng nó để sản xuất hàng loạt chip silicon.

Liệu chúng ta có nhìn lại sau một hoặc hai thập kỷ nữa và tự hỏi tại sao chúng ta lại lo lắng về việc sản xuất đủ hydro để hỗ trợ mạng lưới năng lượng của thế giới hay tại sao chúng ta phải vật lộn để tạo ra nguồn năng lượng dồi dào từ những tảng đá nóng sâu dưới lòng đất? Liệu con cái chúng ta có nhìn chằm chằm vào các nhà máy nhiệt hạch hạt nhân của chúng với sự tự mãn giống như chúng ta khi chúng ta nghịch nghịch điện thoại thông minh, chạy bằng pin mà tổ tiên chúng ta chưa bao giờ thành thạo, chứa các bóng bán dẫn nhỏ đến mức chúng không thể nhìn thấy được trong kính hiển vi? Nếu có một bài học bạn nên rút ra từ chuyến đi xuyên Thế giới Vật chất của chúng ta, thì đó là nếu có đủ thời gian, công sức và sự hợp tác, những điều này thường xảy ra. Logic của định luật Wright là khi thời gian trôi qua và nhân loại tích lũy được kinh nghiệm, chúng ta sẽ sản xuất mọi thứ nhanh hơn tốt hơn. Và có một lập luận hợp lý rằng với sự trợ giúp của máy tính và trí tuệ nhân tạo – tất nhiên được cung cấp bởi các chip silicon được sản xuất tại các xưởng đúc như nơi chúng tôi đã đến thăm ở Đài Loan – chúng ta có thể đẩy nhanh những khám phá này hơn nữa.

Nhiều người trong chúng ta có thể không còn sống để chứng kiến 'năm hòa vốn' mà cuối cùng chúng ta cũng được hưởng lợi từ việc ngăn chặn biến đổi khí hậu, nhưng ít nhất chúng ta cũng nên sống để chứng kiến những đổi mới sẽ giúp loài người đạt được quá trình chuyển đổi năng lượng tiếp theo. Những thập kỷ tới có thể là một trong những thập kỷ thú vị nhất trong lịch sử kinh tế. Loại bỏ lượng khí thải carbon có nghĩa là phải hình dung lại cuộc cách mạng công nghiệp. Điều đó có nghĩa là phải suy nghĩ lại gần như mọi quy trình trong Thế giới Vật chất - từ nấu chảy kim loại đến sản xuất hóa chất đến cung cấp năng lượng. Chúng ta có thể xây dựng một mạng lưới điện sạch và bền vững hơn nhiều so với mạng lưới hiện có Hiện nay. Chúng ta có thể cung cấp những công nghệ đi tắt đón đầu cho các nước đang phát triển, để người dân ở đó không bao giờ phải chịu đựng hàng thế kỷ các nhà máy điện chạy bằng than cũng như tất cả khói bụi và ô nhiễm kèm theo. Chúng ta có thể phát minh ra loại pin mới có khả năng lưu trữ gấp nhiều lần chức năng của pin ngày nay. Chúng ta có thể tạo ra những con chip silicon thậm chí còn phức tạp hơn cả mê cung bóng bán dẫn vô hình ngày nay.

Một kỷ nguyên hoàn toàn mới đang vẫy gọi – một thế giới vật liệu nano – nơi các ống nano graphene và carbon có thể được sử dụng để nâng cao hoặc thậm chí thay thế một số vật liệu trong cuốn sách này. Cũng giống như cách chất dẻo cho phép các nhà hóa học thế kỷ 20 thiết kế ra những vật liệu hoàn toàn mới, thoát khỏi sự phụ thuộc vào các chất phân tử được đào từ lòng đất, các nhà hóa học của thế kỷ 21 sẽ có thể chế tạo ra một loại chất mới có tác dụng rất lớn. hơn nữa. Hãy tưởng tượng những dây vật liệu nano dẫn điện tốt hơn đồng, thép có thể chống ăn mòn hoàn toàn hoặc có thể thay thế cho các vật liệu quý hiếm như indium hoặc coban. Đó là một thử thách đáng sợ, đầy cảm hứng và ham chơi.

Nhưng không điều nào trong số này sẽ ngăn cản chúng ta làm những việc chúng ta luôn làm. Nhân loại ngay từ những ngày đầu tiên đã để lại dấu ấn rõ ràng trên trái đất. Chẳng ích gì khi giả vờ khác đi. Đó là một phần câu chuyện của chúng tôi. Nó đã cho phép chúng ta sống lâu hơn, cuộc sống thoải mái hơn bao giờ hết. Nó đã cho phép chúng ta lấp đầy hành tinh này với nhiều cá nhân hơn bất kỳ ai có thể tưởng tượng, với 8 tỷ bộ não và 8 tỷ hy vọng và ước mơ.

Chúng ta cũng có khả năng sống một cuộc sống bền vững hơn, sạch sẽ hơn, giảm thiểu sự tàn phá và ô nhiễm và sống hòa hợp hơn với hành tinh. Chúng ta sẽ làm như vậy không phải bằng cách trốn tránh hay gạt bỏ Thế giới Vật chất mà bằng cách đón nhận và hiểu nó. Sáu chất này đã giúp chúng ta tồn tại và phát triển. Họ đã giúp chúng tôi tạo ra phép thuật. Họ có thể làm điều đó một lần nữa.

Ghi chú

Giới thiệu

1 Dữ liệu của Hội đồng Vàng Thế giới, https://www.gold.org/goldhub/data/gold-demand-by-country .

2 Leonard Read, 'Tôi, Bút chì', 1958, https://fee.org/resources/i-pencil/ .

3 *A. McAfee, Thêm từ ít hơn: Câu chuyện đáng ngạc nhiên về cách chúng ta học cách thịnh vượng bằng cách sử dụng ít tài nguyên hơn – và điều gì sẽ xảy ra tiếp theo (Simon & Schuster UK, 2019).*

4 RW Clark, *Einstein: Cuộc đời và thời đại* (Ngôi nhà ngẫu nhiên, 1995).

1. Người đồng tính Faber

1 RA Bagnold, 'Hành trình trên sa mạc Libya 1929 và 1930', *Tạp chí Địa lý* 78/1 (tháng 7 năm 1931): 13, https://doi.org/10.2307/1784992 ; Major RA Bagnold, 'A Lost World Refound', *Scientific American* 161/5 (tháng 11 năm 1939): 261–3, https://doi.org/10.1038/scientificamerican1139-261 .

2 T. Aboud, 'Thủy tinh sa mạc Libya: Bí ẩn về nguồn gốc của nó đã được giải đáp chưa?', *Thủ tục Vật lý* 2/3 (Tháng 11 năm 2009): 1425–32.

3 *David Hockney, Kiến thức bí mật: Khám phá lại những kỹ thuật đã thất truyền của các bậc thầy cũ (Thames & Hudson, 2006).*

4 Alan Macfarlane và Gerry Martin, *Nhà tắm thủy tinh: Thủy tinh đã thay đổi thế giới như thế nào* (Hồ sơ, 2011).

5 Pliny the Elder, *Lịch sử tự nhiên* , xuyên. J. Bostock, HT Riley (Taylor và Francis, 1855), Quyển XXXVI, Chương 65.

6 Reiner Zorn, 'A Wing Giải thích', *Vật lý Tự nhiên* 18/4 (tháng 4 năm 2022): 374–5.

7 Seth C. Rasmussen, *Thủy tinh đã thay đổi thế giới như thế nào* , Tập. 3, Tóm tắt Springer về Khoa học Phân tử (Springer, 2012), https://doi.org/10.1007/978-3-642-28183-9 .

8 Roy và Kay McLeod, 'Chiến tranh và Phát triển Kinh tế: Chính phủ và Công nghiệp Quang học ở Anh, 1914–18', trong JM Winter (ed.), *Chiến tranh và Phát triển Kinh tế* (Nhà xuất bản Đại học Cambridge, 1975).

9 *Lịch sử chính thức của Bộ Bom, đạn* (fax: Nhà xuất bản Hải quân & Quân sự, 2008), Tập. XI, Phần III, tr. 42.

10 *Guy Hartcup, Cuộc chiến phát minh (Brassey's, 1988). Xem thêm Adam Hochschild, Để kết thúc mọi cuộc chiến: Câu chuyện về sự phản kháng và lòng yêu nước trong Thế chiến thứ nhất (Picador, 2011).*

11 Stephen King-Hall, *Nhật ký Biển Bắc, 1914–1918* (Những cuốn sách bị lãng quên, 2012).

12 *Lịch sử của Bộ Bom , đạn , Tập. VII, Phần 1, tr. 1.*

13 Như trên, Tập. XI, Phần 3, tr. 83.

2. Xây trên cát

1 Bài phát biểu của Đô đốc Hoa Kỳ Harry Harris, Tư lệnh Hạm đội Thái Bình Dương, trước Viện Chính sách Chiến lược Australia, ngày 31 tháng 3 năm 2015.

2 Phân tích của tác giả về dữ liệu từ cơ sở dữ liệu UN COMTRADE.

3 Cơ sở dữ liệu UN COMTRADE.

4 Anthony H. Cooper và cộng sự, 'Con người là động lực địa mạo toàn cầu quan trọng nhất của thế kỷ 21', *Anthropocene Review* 5/3 (2018): trang 222–9.

5 Emily Elhacham và cộng sự, 'Khối lượng nhân tạo toàn cầu vượt quá toàn bộ sinh khối sống', *Nature* 588/7838 (2020): trang 442–4. Trọng lượng của sinh khối có thể được tìm thấy trong Yinon Bar-On, Rob Phillips và Ron Milo, 'Sự phân bố sinh khối trên Trái đất', *Kỷ yếu của Viện Hàn lâm Khoa học Quốc gia* , ngày 19 tháng 6 năm 2018.

6 Thực hành Nước ngọt của WWF-Greater Mekong/WWF, 'Cát đang cạn kiệt', Nghiên cứu điển hình về Nước của WWF, 2018, https://www.wwf.org.uk/sites/default/files/2018-04/180419_Mekong_sediment_CS-external .pdf .

[7] Christian Jordan và cộng sự, 'Xem xét lại hoạt động khai thác cát ở đồng bằng sông Cửu Long – Quy mô thiếu hụt trầm tích địa phương hiện nay', *Báo cáo khoa học* 9, bài báo số 17823 (2019).

[8] GM Kondolf và cộng sự, 'Thay đổi ngân sách trầm tích của sông Mê Kông: Các mối đe dọa tích lũy và chiến lược quản lý cho lưu vực sông lớn', *Khoa học về môi trường tổng thể* 625 (2018): trang 114–34.

[9] Pascal Peduzzi, 'Cát, hiếm hơn người ta nghĩ: Dịch vụ cảnh báo môi trường toàn cầu của UNEP (GEAS) – tháng 3 năm 2014', Chương trình Môi trường Liên Hợp Quốc, 2014.

[10] Yang Zekun, 'Tăng cường trấn áp hoạt động khai thác cát ở Dương Tử', *China Daily* , ngày 2 tháng 3 năm 2021.

[11] Debashish Karmakar, 'Bihar: 4 cảnh sát bị thương khi Mafia cát tấn công Đảng cảnh sát ở quận Nawada', *Times of India* , ngày 2 tháng 6 năm 2021; 'Cảnh sát bị thương sau khi bị hai người đàn ông không xác định danh tính bắn ở Rajasthan's Sikar', *Times of India* , ngày 20 tháng 7 năm 2021; Avinash Kumar, 'Bihar: 18 cảnh sát được phát hiện đang bảo vệ hoạt động khai thác cát bất hợp pháp đã thay đổi, nhiều cảnh sát hơn', *Hindustan Times* , ngày 12 tháng 7 năm 2021; Vivek Trivedi, 'Một đội khác của Sở Lâm nghiệp bị Mafia Cát tấn công ở Morena của MP', *News18* , ngày 30 tháng 7 năm 2021.

[12] Pascal Peduzzi và cộng sự, *Cát và tính bền vững: 10 Khuyến nghị chiến lược để ngăn chặn khủng hoảng* (Chương trình Môi trường Liên hợp quốc, 2022).

[13] Andrew Rabeneck, 'Sự chuyển đổi của xây dựng bằng bê tông', trong *Nuts & Bolts of Construction History Vol. 2* (Picard, 2012), trang 627–36, https://structurae.net/en/literature/conference-paper/transformation-of-construction-by-concrete .

[14] Charles Kenny, 'Paving Paradise', *Chính sách đối ngoại* (blog), https://forignpolicy.com/2012/01/03/paving-paradise/ .

[15] Rocio Titiunik và cộng sự, *Nhà ở, Sức khỏe và Hạnh phúc* , Tài liệu Nghiên cứu Chính sách (Ngân hàng Thế giới, 2007).

[16] Mô tả và giải thích hay nhất mà tôi từng gặp về sự hình thành bê tông, nền tảng cho phiên bản cô đọng của tôi, là từ Mark Miodownik,

Stuff Matters *: The Strange Stories of the Marvelous Materials that Shape Our Man-made World* (Penguin, 2013)).

17 LM Seymour và cộng sự, 'Trộn nóng: Những hiểu biết cơ học về độ bền của bê tông La Mã cổ đại', *Science Advances* 1/9 (2023).

18 Để có một giải thích toàn diện hơn, một nơi tốt để bắt đầu là Robert Courland, *Hành tinh bê tông: Câu chuyện kỳ lạ và hấp dẫn về vật liệu nhân tạo phổ biến nhất trên thế giới* (Prometheus, 2011).

19 Andrew Rabeneck, 'Thomas Edison và công trình xây dựng hiện đại: Longue Durée of the Long Kiln', *Kỷ yếu của Hội nghị lịch sử xây dựng thường niên lần thứ sáu* (Queen's College, Cambridge, 2019), tr. 13.

20 Dữ liệu dựa trên số liệu thống kê về xi măng từ Cơ quan Khảo sát Địa chất Hoa Kỳ.

21 Ugo Bardi, giáo sư hóa lý tại Đại học Florence: https://cassandralegacy.blogspot.com/2019/01/what-happened-in-2015-that-changed.html .

22 Tính toán sản lượng bê tông là một thách thức khó khăn. Việc tính tổng tích lũy vẫn còn phức tạp hơn. Có số liệu thống kê có độ tin cậy vừa phải về sản xuất xi măng, đáng chú ý nhất là số liệu từ USGS mà tôi đã sử dụng ở đây, cùng với dữ liệu lịch sử từ Robert W. Lesley, 'Lịch sử ngành xi măng Portland ở Hoa Kỳ', Tạp chí của Viện *Franklin* 5 (Tháng 3 năm 1898): trang 324–36. Tuy nhiên, chuỗi dữ liệu này chỉ bao gồm dữ liệu trên toàn thế giới từ năm 1926. Để tính toán con số toàn cầu, tôi đã sử dụng tỷ lệ sản lượng của Hoa Kỳ và các nước còn lại trên thế giới là 1:1 trong giai đoạn này, tỷ lệ này nhìn chung phù hợp với tỷ lệ giữa những năm 1920 . Sau đó, tôi đã sử dụng tỷ lệ xi măng tiêu chuẩn là 1:2:3 xi măng:cát:cốt liệu để tính tổng sản lượng bê tông. Với các tỷ lệ khác có hàm lượng xi măng thấp hơn và do tỷ lệ này không tính đến trọng lượng của nước còn lại trong hỗn hợp, điều này có thể tính thấp hơn tổng khối lượng cuối cùng của bê tông. Tuy nhiên, cũng tương tự như vậy, tính toán này không tính đến việc tái chế bê tông cũ thành các tòa nhà mới.

23 William J. Mallett, 'Tình trạng của các cầu đường cao tốc tiếp tục được cải thiện', báo cáo của Cơ quan Nghiên cứu Quốc hội, ngày 19

tháng 5 năm 2020, https://crsreports.congress.gov/product/pdf/IN/IN11395 ; George Greenwood và Graeme Paton, 'Một nửa số cây cầu trên những con đường đông đúc nhất nước Anh trong "tình trạng tồi tệ"', *The Times* , ngày 3 tháng 12 năm 2020, https://www.thetimes.co.uk/article/half-of-bridges-on- nước Anh-bận rộn nhất những con đường-trong-tình trạng tồi tệ-3vpwhg6c9 .

24 Johanna Lehne và Felix Preston, 'Tạo ra sự thay đổi về bê tông: Đổi mới trong xi măng và bê tông ít carbon', Chatham House, tháng 6 năm 2018.

3. Hành trình dài nhất

1 Anton Howes, 'Thời đại phát minh: Nơi có những con rồng', https://antonhowes.substack.com/p/age-of-invention-where-be-dragons .

2 *Vaclav Smil, Tạo nên thế giới hiện đại: Vật liệu và phi vật chất hóa (Wiley, 2013).*

3 *Ernest Braun và Stuart Macdonald, Cuộc cách mạng thu nhỏ: Lịch sử và tác động của điện tử bán dẫn (Nhà xuất bản Đại học Cambridge, 1978).*

4 Có một lịch sử truyền miệng thú vị về một trong những người kéo tinh thể này tại https://computerhistory.org/blog/patricias-perfect-pull/ .

5 Braun và Macdonald, *Cuộc cách mạng thu nhỏ* .

6 Gordon Moore, 'Vai trò của Fairchild trong Công nghệ Silicon trong những ngày đầu của "Thung lũng Silicon"', *Kỷ yếu của IEEE* 86/1 (Tháng 1 năm 1998).

7 'Cái nhìn bên trong nhà máy mà thế giới hiện đại xoay quanh', *The Economist* , ngày 21 tháng 12 năm 2019.

8 *Chris Miller, Chip War: Cuộc chiến vì công nghệ quan trọng nhất thế giới (Simon & Schuster, 2022).*

9 Jeremiah Johnson và cộng sự, 'Ăn tối tại Bảng tuần hoàn: Nồng độ kim loại liên quan đến tái chế', *Khoa học & Công nghệ Môi trường* 41 (2007): trang 1759–65; Brian Rohrig, 'Điện thoại thông minh: Hóa học thông minh', Hiệp hội Hóa học Hoa Kỳ, tháng 4/tháng 5 năm 2015,

https://www.acs.org/content/acs/en/education/resources/highschool/chemmatters/past-issues/archive-2014 -2015/smartphones.html .

4. Con đường muối

1 John Julius Norwich, *A History of Venice* (ấn bản sửa đổi, Penguin, 2003).

2 Toyin Falola "'Muối là vàng": Quản lý tình trạng khan hiếm muối ở Nigeria trong Thế chiến thứ hai', *Tạp chí Nghiên cứu Châu Phi của Canada/Revue Canadienne des Études Africaines* 26/3 (1992): p. 416.

3 *Cecilia Lee-fang Chiến, Muối và Nhà nước: Bản dịch có chú thích của chuyên luận độc quyền muối Songshi (Nhà xuất bản Đại học Michigan, 2004), tr. 5.*

4 Như trên, tr. 6.

5 *Diễn văn về Muối và Sắt* , 'Chương Một: Những lập luận cơ bản, Những diễn ngôn về Muối và Sắt', http://www.8bei8.com/book/yantielun_2.html .

6 Pierre Laszlo, *Muối: Hạt sự sống* (Nhà xuất bản Đại học Columbia, 2001).

7 SAM Adshead, *Muối và nền văn minh* (Palgrave Macmillan, 1992), trang 218–30.

8 Roy Moxham, *Hàng rào vĩ đại của Ấn Độ* (Constable, 2001).

9 Mahatma Gandhi, *Các bài viết chính trị chọn lọc* , ed. D. Dalton (Hackett, 1996), trang 76–8.

5. Muối của trái đất

1 KL Wallwork, 'Ngành công nghiệp muối Trung Cheshire', *Địa lý* 44/3 (tháng 7 năm 1959), trang 171–86; Paul GE Clemens, 'Sự trỗi dậy của Liverpool, 1665–1750', *Tạp chí Lịch sử Kinh tế* 29/2 (tháng 5 năm 1976), trang 211–25.

2 JM Fells, 'Việc buôn bán muối của Anh trong thế kỷ 19', *Tạp chí kinh tế* số 11/43 (tháng 9 năm 1901), trang 421–31; Ralph Davis, 'Vận chuyển hàng hóa trong nền kinh tế cuối thế kỷ 17', *Tạp chí Lịch sử*

Kinh tế 1/9 (1956), trang 59–73; Bảng tính dữ liệu thiên niên kỷ của Ngân hàng Anh.

Bảo tàng công trình muối sư tử số 3 , Northwich.

4 Fells, 'Buôn bán muối của Anh', tr. 427.

6. Thuốc chữa cháy

1 *Harold Blakemore, Từ Thái Bình Dương đến La Paz: Công ty đường sắt Antofagasta và Bolivia, 1888–1988 (Không rõ dấu ấn, 1990).*

2 Patricio García Méndez, *Sự tái tạo của ngành diêm tiêu* (A Impresores, 2018).

3 John Mayo, 'Công ty Antofagasta Nitrate và sự bùng nổ của Chiến tranh Thái Bình Dương', *Boletín de Estudios Latinoamericanos y del Caribe* 28 (tháng 6 năm 1980), trang 3–11.

4 Thomas O'Brien, '"Rich Beyond the Dreams of Avarice": The Guggenheims in Chile', *Business History Review* 63/1 (Mùa xuân 1989), trang 122–59.

5 *Thomas Hager, Thuật giả kim không khí: Một thiên tài Do Thái, một ông trùm bất hạnh, và khám phá khoa học nuôi sống thế giới nhưng lại thúc đẩy sự trỗi dậy của Hitler (Crown, 2008).*

6 Tổ chức Lương thực và Nông nghiệp Liên Hợp Quốc, Báo cáo *về Tình trạng An ninh Lương thực và Dinh dưỡng trên Thế giới* , năm 2020 và 2022 (Liên Hợp Quốc, 2020/2022).

Lời kết: Nhiều muối

1 Có rất nhiều mô tả tuyệt vời về sự hình thành của Biển Zechstein được tìm thấy trên mạng, chẳng hạn như từ Nhóm Địa chất Rotunda, http://www.rotundageologygroup.org/2012_11_01/ZechsteinPotash và Hiệp hội Địa chất, https://www.geolsoc.org.uk/Policy-and-Media/Outreach/Plate-Tectonic-Stories/Zechstein-Reef .

7. Bạn không có đất nước

1 'Enver Tskitishvili về Azovstal – Nhà máy ngừng hoạt động một cách có thẩm quyền', Metinvest Media, ngày 19 tháng 3 năm 2022,

https://metinvest.media/en/page/enver-cktshvl-pro-azovstal-kombnat-zupinili-gramotno--ekologchno-zagrozi -nema ; Ngoài ra, tác giả còn phỏng vấn cá nhân từ Metinvest.

2 *JE Gordon, Khoa học mới về vật liệu bền: Hoặc tại sao bạn không rơi qua sàn (sửa đổi, Penguin, 1991).*

3 Stefan Pauliuk, Tao Wang và Daniel B. Müller, 'Thép trên toàn thế giới: Ước tính trữ lượng sắt đang sử dụng ở 200 quốc gia', *Tài nguyên, Bảo tồn và Tái chế* 71 (tháng 2 năm 2013): trang 22–30.

4 Chương trình Môi trường Liên Hợp Quốc, *Triển vọng Tài nguyên Toàn cầu 2019: Tài nguyên Thiên nhiên cho Tương lai Chúng ta Mong muốn* (Liên Hợp Quốc, 2020). Ngoài ra còn có cơ sở dữ liệu liên kết trên trang web UNEP, bao gồm dữ liệu cho năm 2019: https://www.resourcepanel.org/global-material-flows-database .

5 *Vaclav Smil, Năng lượng và nền văn minh: Lịch sử (Nhà xuất bản MIT, 2017) và Vẫn là thời đại đồ sắt: Sắt và thép trong thế giới hiện đại (Butterworth-Heinemann, 2016).*

6 Paul Gait, 'Định giá “Kim loại vô giá” của Jevons, Bernstein, tháng 9 năm 2018; Tao Wang, Daniel B. Müller và Seiji Hashimoto, 'Tìm kiếm sắt: Đếm trữ lượng sắt thép trong nền kinh tế Trung Quốc', *Tạp chí Sinh thái Công nghiệp* 19/5 (25 tháng 8 năm 2015): trang 877–89.

7 Jung Chang và Jon Halliday, *Mao: Câu chuyện chưa biết* (Vintage Digital, 2012).

8 Wei Li và Dennis Tao Yang, 'Bước nhảy vọt vĩ đại: Giải phẫu thảm họa kế hoạch hóa tập trung', *Tạp chí Kinh tế Chính trị* 113/4 (tháng 8 năm 2005): trang 840–77, https://doi.org/10.1086/ 430804 .

9 *Serhii Plokhy, Cánh cổng châu Âu: Lịch sử Ukraine (Penguin, 2015).*

10 *James Kynge, Trung Quốc làm rung chuyển thế giới: Sự trỗi dậy của một quốc gia đói khát (Weidenfeld & Nicolson, 2010).*

11 Số lượng lò cao từ Global Energy Monitor: https://www.gem.wiki/Main_Page ; dữ liệu về sản xuất của Trung Quốc từ USGS và Hiệp hội Thép Thế giới.

12 Stephen Kotkin, *Núi Từ Tính: Chủ nghĩa Stalin như một nền văn minh* (Nhà xuất bản Đại học California, 1997).

13 Michael Schwirtz, 'Last Stand at Azovstal – Inside the Siege that Shaped the Ukraine War', *New York Times* , 24 tháng 7 năm 2022, https://www.nytimes.com/2022/07/24/world/europe/ukraine- war-mariupol-azovstal.html .

8. Bên trong núi lửa

1 *Hãy mỉm cười, Vẫn là thời đại đồ sắt .*

2 Dữ liệu về than luyện kim từ IEA; dữ liệu về lò cao được tác giả đối chiếu từ cơ sở dữ liệu Global Energy Monitor: https://www.gem.wiki/Main_Page .

3 Daniela Comelli và cộng sự, 'Nguồn gốc thiên thạch của lưỡi dao găm sắt của Tutankhamun', *Khoa học Khí tượng & Hành tinh* 51/7 (2016): trang 1301–9.

4 *Roger Osborne, Sắt, hơi nước và tiền bạc: Sự hình thành cuộc cách mạng công nghiệp (Pimlico, 2014).*

5 *Peter Appleton, Một ngành công nghiệp bị lãng quên – Ngành công nghiệp đá phiến phèn ở Đông Bắc Yorkshire (Boroughgate, 2018).*

6 *Simon Winchester, Chính xác: Các kỹ sư chính xác đã tạo ra thế giới hiện đại như thế nào (William Collins, 2018).*

7 Vaclav Smil, 'Sự phát triển năng lượng (r) cần có thời gian', *Năng lượng Thế giới* 44 (2018): trang 10–14; Cơ sở dữ liệu dự án Maddison 2020, Đại học Groningen, https://www.rug.nl/ggdc/histocaldevelopment/maddison/releases/maddison-project-database-2020?lang=en .

8 JM Allwood và JM Cullen, *Vật liệu bền vững: Mở rộng cả hai mắt* (UIT Cambridge, 2012), http://publications.eng.cam.ac.uk/400536/ .

9 Daniel E. Sichel, 'Giá đinh kể từ năm 1695: Cơ hội dẫn đến sự thay đổi kinh tế', *Tạp chí Quan điểm Kinh tế* 36/1 (2022): trang 125–50.

10 *Robert J. Gordon, Sự trỗi dậy và sụp đổ của sự tăng trưởng của Mỹ: Tiêu chuẩn sống của Hoa Kỳ kể từ Nội chiến (Nhà xuất bản Đại học Princeton, 2017); Marc Levinson, Chiếc hộp: Công-ten-nơ vận chuyển đã khiến thế giới nhỏ hơn và nền kinh tế thế giới lớn hơn như thế nào (Nhà xuất bản Đại học Princeton, 2016).*

11 *Tom Standage, Lịch sử tóm tắt về chuyển động: Từ bánh xe đến ô tô và những gì xảy ra tiếp theo (Bloomsbury, 2021).*

12 *Steven Watts, Ông trùm nhân dân: Henry Ford và thế kỷ nước Mỹ (Vintage, 2009).*

13 Hiệp hội Thép Thế giới, *Sách Trắng về Thép* (Hiệp hội Thép Thế giới, 2012).

14 Julian M. Allwood, *Tương lai tươi sáng cho ngành thép Vương quốc Anh* (Nhà xuất bản Đại học Cambridge, 2016).

15 Katherine Felkins, HP Leigh và A. Jankovic, 'Con tàu Titanic Hoàng gia: Thất bại luyện kim có gây ra một đêm đáng nhớ không?', *JOM* 50/1 (tháng 1 năm 1998): trang 12–18; Tim Foecke, 'Luyện kim của RMS *Titanic* ', Viện Tiêu chuẩn và Công nghệ Quốc gia, 1998.

16 *Dinny McMahon, Vạn Lý Trường Thành Nợ của Trung Quốc: Những ngân hàng trong bóng tối, những thành phố ma, những khoản cho vay khổng lồ và sự kết thúc của phép lạ Trung Quốc (Little, Brown, 2018).*

17 Adam Minter, 'Sáng tạo mới nhất của Trung Quốc? The Ballpoint Pen', Bloomberg, ngày 16 tháng 1 năm 2017, https://www.bloomberg.com/opinion/articles/2017-01-16/china-s-latest-innovation-the-ballpoint-pen?sref=n6On5Ilq ; Adam Taylor, 'Cuối cùng, Trung Quốc tự sản xuất được bút bi', *Washington Post* , ngày 18 tháng 1 năm 2017, https://www.washingtonpost.com/news/worldviews/wp/2017/01/18/finally-china-manufactures -a-ballpoint-pen-all-by-itself/ .

18 Kim Browne, '"Chiến hạm ma" của Thái Bình Dương: Cướp biển kim loại, Di sản Thế chiến thứ hai và Bảo vệ Môi trường', *Tạp chí Khảo cổ học Hàng hải* 14/1 (tháng 4 năm 2019): trang 1–28.

9. Vụ nổ cuối cùng

1 M. Grant Norton, *Mười vật liệu định hình thế giới của chúng ta* (Springer, 2021).

2 https://en.wikipedia.org/wiki/HarryPageWoodward .

3 William Finnegan, 'Con gái của thợ mỏ', *New Yorker* , ngày 18 tháng 3 năm 2013, http://www.newyorker.com/magazine/2013/03/25/the-

miners-daughter .

4 *The Splash* , ABC (không ghi ngày), https://www.youtube.com/watch?v=IdXonJowDT0 .

5 David Lee, 'The Ghost of Lang Hancock', *Inside Story* , ngày 19 tháng 8 năm 2020, https://insidestory.org.au/the-ghost-of-lang-hancock/ ; *Từ điển Tiểu sử Quốc gia Úc* , https://adb.anu.edu.au/biography/hancock-langley-frederick-lang-17492 .

6 Báo cáo này dựa trên nhiều tài liệu đệ trình khác nhau được Quốc hội Úc cung cấp cho cuộc điều tra Hẻm núi Juukan, bao gồm cả tài liệu từ Rio Tinto và PKKP, tổ chức đại diện cho người dân Puutu Kunti Kurrama, cũng như các báo cáo tạm thời và báo cáo cuối cùng.

7 Câu trả lời bổ sung của Rio Tinto cho các câu hỏi, Điều tra về sự phá hủy các hang động 46.000 năm tuổi tại Hẻm núi Juukan ở vùng Pilbara thuộc Tây Úc, Đệ trình, ngày 20 tháng 8 năm 2020.

8 'Thép Thế giới qua số liệu 2022', Hiệp hội Thép Thế giới, 2022.

9 Stefan Pauliuk và cộng sự, 'Thời đại phế liệu thép', *Khoa học & Công nghệ Môi trường* 47/7 (2 tháng 4 năm 2013): trang 3448–54.

10 Allwood và Cullen, *Vật liệu bền vững* .

10. Điều tuyệt vời nhất tiếp theo

1 Richard Pence (ed.), *The Next Greatest Thing* (Hiệp hội Hợp tác xã Điện Nông thôn Quốc gia, 1984).

2 *Robert Caro, Con đường dẫn tới quyền lực: Những năm tháng của Lyndon Johnson (The Bodley Head, 2019).*

3 *Gordon, Sự thăng trầm của tăng trưởng Mỹ .*

4 Henry Sanderson, 'Thợ khai thác đồng đặt hy vọng vào ô tô điện khi Trung Quốc chùn bước', *Financial Times* , ngày 8 tháng 4 năm 2016, https://www.ft.com/content/0e091ff8-fd5a-11e5-b5f5-070dca6d0a0d ; Nicholas Snowdon và cộng sự, 'Kim loại xanh Đồng là loại dầu mới', Goldman Sachs, ngày 13 tháng 4 năm 2021.

5 Bạn có thể tìm thấy những minh họa hay về hiệu ứng điện từ này tại https://www.youtube.com/watch?v=sENgdSF8ppA&t=85s và

https://www.youtube.com/watch?v=5BeFoz3Ypo4 .

6 William D. Nordhaus, 'Các biện pháp sản lượng thực tế và tiền lương thực tế có nắm bắt được thực tế không? Lịch sử chiếu sáng gợi ý không', trong *Kinh tế học về hàng hóa mới* (Nhà xuất bản Đại học Chicago, 1996), trang 27–70, https://www.nber.org/books-and-chapters/kinh tế-new-goods /do-real-sản lượng-và-thực-lương-đo lường-nắm bắt-thực tế-lịch sử-chiếu sáng-gợi ý-không .

7 'Vận động viên đua xe đạp Olympic Vs. Máy nướng bánh mì: Anh ấy có thể cung cấp năng lượng cho nó không?', 2015, https://www.youtube.com/watch?v=S4O5voOCqAQ .

số 8 https://www.ge.com/steam-power/products/steam-turbines/nuclear-arabelle .

9 IEA, Vai trò của Khoáng chất quan trọng trong Chuyển đổi Năng lượng Sạch (IEA, 2021), trang 45–9, 58, 65–6.

10 Martin Lynch, *Khai thác mỏ trong lịch sử thế giới* (Reaktion, 2003). Đây là cuốn sách hay nhất mà tôi từng đọc về lịch sử khai thác mỏ, về đồng cũng như toàn cảnh các vật liệu khác.

11 Andrew Bloodworth, 'Lịch sử khai thác một thời và tương lai của nước Anh', trong E. Hunger, TJ Brown và G. Lucas (eds), *Kỷ yếu của Hội nghị Địa chất Công nghiệp Khai thác lần thứ 17* (Hội nghị EIG, 2014), trang 1–6 .

12 Chris Evans và Olivia Saunders, 'A World of Copper: Globalizing the Industrial Revolution, 1830–70', *Journal of Global History* 1/10 (tháng 3 năm 2015).

13 Huw Bowen, 'Copperopolis: Thời hoàng kim, suy tàn và tái sinh của Swansea', bài giảng, Chuỗi lịch sử chủ nghĩa tư bản của Viện Legatum, 2016.

14 Lynch, Khai thác mỏ trong lịch sử thế giới .

11. Cái lỗ

1 Phần lớn thông tin về Chuquicamata có được từ chuyến thăm mỏ vào cuối tháng 5 năm 2022. Có lẽ nguồn dữ liệu tốt nhất về đồng nói riêng, ngoài trụ cột thông thường của USGS, là Nhóm Nghiên cứu Đồng Quốc tế. Cuốn sách thông tin hàng năm của nó là một nơi tốt để

bắt đầu tìm hiểu thêm dữ liệu. Phần lớn dữ liệu của tôi, bao gồm số liệu về sản lượng hiện tại và lịch sử từ Chuquicamata và các mỏ lân cận, đều đến từ đó.

2 Barry Golding và Suzanne D. Golding, *Kim loại, Năng lượng và Tính bền vững: Câu chuyện về Doctor Copper và King Coal* (Springer, 2017), tr. 137ff. Tuyệt vời này cuốn sách tham khảo cũng chứa nhiều tài liệu bổ sung về lịch sử của Chuquicamata.

3 Các số liệu về sản lượng hiện tại và lịch sử của Chuquicamata và các mỏ chị em của nó là tính toán của riêng tôi dựa trên dữ liệu từ Codelco, Cochilco (các số liệu lịch sử từ những năm 1980) và, đối với các số liệu tích lũy kế thừa, một bài báo của Alejandro Faunes và cộng sự, 'Chuquicamata, Cốt lõi của dị thường Cu-Mo ở quy mô hành tinh', trong TM Porter, *Các mỏ đồng và vàng siêu xốp – Một góc nhìn toàn cầu* (PGC, 2005). Đối với một số góc độ, tại thời điểm viết bài, trong khi sản lượng lịch sử tích lũy của Chuqui chỉ ở mức dưới 45 triệu tấn thì con số tương đương của Escondida chỉ dưới 30 triệu tấn. Con số về tổng lượng đồng từng được khai thác là từ USGS.

4 Jochen Smuda và cộng sự, 'Vòng quay nguyên tố trong quá trình chuyển đổi từ môi trường kiềm sang môi trường axit trong bãi chứa chất thải đồng xốp đang hoạt động, Chuquicamata, Chile', *Tạp chí thăm dò địa hóa* 140 (tháng 5 năm 2014): trang 23–40.

5 Sandra Cortés và cộng sự, 'Mức kim loại trong nước tiểu ở cộng đồng Chile 31 năm sau khi thải chất thải của mỏ', *Tạp chí Sức khỏe và Ô nhiễm* ngày 10/6 (tháng 6 năm 2016): trang 19–27.

6 Paul R. Ehrlich, *Quả bom dân số* (Ballantine, 1989).

7 Paul Sabin, *The Bet* (Nhà xuất bản Đại học Yale, 2013).

8 Pierre Desrochers và Christine Hoffbauer, 'Nguồn gốc trí tuệ sau chiến tranh của quả bom dân số. “Hành tinh bị cướp bóc của chúng ta” của Fairfield Osborn và “Con đường sinh tồn” của William Vogt trong Retrospect', *Tạp chí Điện tử về Phát triển Bền vững* 1/3 (2009): p. 26.

9 *Andrew McAfee, Thêm từ Ít hơn: Câu chuyện đáng ngạc nhiên về cách chúng ta học cách thịnh vượng bằng cách sử dụng ít tài nguyên hơn – và Điều gì sẽ xảy ra tiếp theo (Simon & Schuster, 2019).*

[10] Julian L. Simon, 'Tài nguyên, Dân số, Môi trường: Nguồn cung quá mức của những tin xấu sai lầm', *Khoa học* , ngày 27 tháng 6 năm 1980.

[11] Ira Beaman Joralemon, *Đồng lãng mạn: Sự thu hút và truyền thuyết của nó* (D. Appleton-Century Co., 1934).

[12] David Cohen, 'Sự giàu có tự nhiên của Trái đất: Kiểm toán', *Nhà khoa học mới* , 23 tháng 5 năm 2007; Richard A. Kerr, 'Đỉnh đồng sắp tới', *Khoa học* , ngày 14 tháng 2 năm 2014.

[13] Manuel Méndez, Damir Galaz-Mandakovic và Manuel Prieto, 'Sản xuất quang cảnh khai thác mỏ trong kỷ nguyên mỏ lộ thiên: Trường hợp đồng cấp thấp, Hẻm núi Bingham, Hoa Kỳ và Chuquicamata, Chile (1903–1923)', Công nghiệp khai *thác và Xã hội* 8/4 (ngày 1 tháng 12 năm 2021).

[14] *T. LeCain, Sự hủy diệt hàng loạt: Con người và những mỏ khổng lồ đã nối dây nước Mỹ và gây sẹo cho hành tinh (Nhà xuất bản Đại học Rutgers. 2009).*

[15] Ernesto Che Guevara, *Nhật ký xe máy* , xuyên. Trung tâm Nghiên cứu Che Guevara (Chim cánh cụt, 2021).

[16] Paul Gait, 'Kim loại & Khai thác: Tại sao Giá Đồng không phải là 24.000 USD/tấn (hoặc 11 USD/Lb)? Tổng quan về tác động của “Định luật Moore trong khai thác mỏ”', Bernstein, 2018.

[17] German Flores và Alex Catalan, 'Sự chuyển đổi từ một hố lộ thiên lớn thành một hình học hang động khối “Biến thể Macroblock” mới lạ tại Mỏ Chuquicamata, Codelco Chile', *Tạp chí Cơ học Đá và Kỹ thuật Địa kỹ thuật* 11/3 (tháng 6 năm 2019): trang. 549–61; Pablo Paredes, Tomás Leaño Chlebnicek và Leopoldo Jauriat, 'Thiết kế mỏ ngầm Chuquicamata: Đơn giản hóa hệ thống xử lý quặng của thang máy 1', trong Kỷ yếu của Hội nghị chuyên đề quốc tế lần thứ tư về hang động khối *và tầng phụ* (Trung tâm địa cơ học Úc, 2018), trang 0,385–98.

[18] Marian Radetzki, 'Bảy nghìn năm phục vụ nhân loại – Lịch sử của đồng, kim loại đỏ', *Chính sách tài nguyên* 34/4 (Tháng 12 năm 2009).

[19] Tim Worstall, 'Sai lầm không ăn sáng: Tại sao Câu lạc bộ Rome đã sai về việc chúng tôi cạn kiệt nguồn lực', Viện Adam Smith, 2015.

[20] số tài nguyên từ USGS. Dự báo mức tiêu thụ hàng năm của Daniel Yergin và cộng sự, 'Tương lai của Đồng', IHS Markit/S&P Global,

2022.

21 Tính toán của tôi dựa trên dữ liệu từ Cochilco. Sản lượng đồng của Chile (nghìn tấn), 2004: 5.413; 2016: 5.553. Cấp độ đầu mỏ đồng trung bình, năm 2004: 1,1%, năm 2016: 0,65%. Dữ liệu về điểm: https://www.cochilco.cl/Presentaciones%20Ingls/Chilean%20Copper%20Mining%20Costs.pdf .

22 Jeff Doebrich, 'Đồng – Kim loại của mọi thời đại', USGS, 2009.

23 Paul Gait, 'Kim loại & Khai thác: Đồng và Nền kinh tế Xanh - Những suy nghĩ từ Hội nghị Giảm cacbon của chúng ta', Bernstein, 2019.

12. Vực sâu

1 Phần này kết hợp tài liệu từ chuyến đi tới Cơ quan đáy biển quốc tế ở Kingston, Jamaica vào năm 2018, bao gồm các cuộc phỏng vấn với Tổng thư ký Michael Lodge. Một lần nữa vào năm 2018, tôi đến Zurich để phỏng vấn Gretchen Früh-Green, nhà khoa học đầu tiên phát hiện ra Thành phố đã mất trong chuyến thám hiểm định mệnh đó vào năm 2000. Phần lớn tài liệu về Project Ultra được dựa trên cuộc phỏng vấn với Bram Murton vào tháng 7 2022.

2 Coban: http://pubs.usgs.gov/ Periodicals/mcs2022/mcs2022-cobalt.pdf ; niken: https://pubs.usgs.gov/ Periodicals/mcs2022/mcs2022-nickel .

3 S. Petersen và cộng sự, 'Tin tức từ đáy biển – Đặc điểm địa chất và tiềm năng tài nguyên của tài nguyên khoáng sản biển sâu', *Chính sách biển* 70 (tháng 8 năm 2016).

4 M. Hannington và cộng sự, 'Sự dồi dào của trầm tích sunfua khổng lồ dưới đáy biển', *Địa chất* 39/12 (ngày 1 tháng 12 năm 2011).

13. Con voi

1 *Thomas C. Barger, Out in the Blue: Letters from Arabia 1937–1940 (Selwa Pr, 2000).*

2 Daniel Yergin, *Giải thưởng: Cuộc tìm kiếm dầu mỏ, tiền bạc và quyền lực* (Simon & Schuster, 2012). Phần lớn chương này, đặc biệt là các phần về lịch sử ngành dầu mỏ, chủ yếu dựa vào tác phẩm xuất sắc này.

[3] Richard Rhodes, *Năng lượng: Lịch sử loài người* (Simon & Schuster, 2018).

[4] Vaclav Smil, *Oil: Hướng dẫn cho người mới bắt đầu* (Oneworld, 2017).

[5] https://explorer.aapg.org/story/articleid/2185/elephant-hid-in-desert .

[6] Hãy mỉm cười, *Dầu* .

[7] 'Đánh giá thống kê về năng lượng thế giới của BP năm 2022', 2022, https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-kinh tế/statistical-review-of-world-energy.html .

[8] EA Wrigley, *Năng lượng và Cách mạng Công nghiệp Anh* (Nhà xuất bản Đại học Cambridge, 2010).

[9] Cân bằng Năng lượng Thế giới của IEA, truy cập vào tháng 7 năm 2022.

[10] Maya Foa, 'Joe Biden cần dầu của Saudi nhưng không được bỏ qua hồ sơ nhân quyền của nước này', *Financial Times* , ngày 13 tháng 7 năm 2022.

[11] *Daniel Yergin, Bản đồ mới: Năng lượng, Khí hậu và Sự xung đột giữa các quốc gia (Penguin, 2020); Gregory Zuckerman, The Frackers: Câu chuyện bên trong thái quá của cuộc cách mạng năng lượng mới (Penguin, 2013).*

[12] 'Cha đẻ của fracking', *The Economist* , ngày 3 tháng 8 năm 2013, https://www.economist.com/business/2013/08/03/the-father-of-fracking .

[13] 'Biden bị Macron làm gián đoạn tại G7, nói rằng Saudi sắp đạt đến giới hạn công suất dầu', *Newsweek* , ngày 28 tháng 6 năm 2022, https://www.newsweek.com/biden-interrupted-macron-g7-told-saudis-oil-capacity- giới hạn-1719747 .

[14] John Tierney, 'Lạc quan về kinh tế - Vâng, tôi sẽ đặt cược đó', *New York Times* , ngày 28 tháng 12 năm 2010, https://www.nytimes.com/2010/12/28/science/28tierney.html .

14. Ống

1 Phần lớn chương này, đặc biệt là các phần giải thích quy trình lọc dầu, chủ yếu dựa vào cuốn sách *Tinh chế dầu mỏ bằng ngôn ngữ phi kỹ thuật vô song* của William Leffler (PennWell, 2020).

2 Anthony N. Stranges, 'Sự chuyển đổi từ than sang dầu mỏ: Nguồn gốc từ nước Đức', *Công nghệ xử lý nhiên liệu* 16/3 (tháng 6 năm 1987).

3 Rob West, 'Dầu và chiến tranh – Mười kết luận từ Thế chiến thứ hai', Thunder Said Energy, ngày 3 tháng 3 năm 2022, https://thundersaidenergy.com/2022/03/03/oil-and-war-ten-conclusions-from-wwii / ; cũng như Yergin, *Giải thưởng* .

4 Yergin, *Giải thưởng* ; Anthony Stranges, 'Công nghiệp nhiên liệu tổng hợp của Đức, 1927–1945', trong JE Lesch (ed.), The *German Chemical Industry in the Twentieth Century, vol. 18, Nhà hóa học và Hóa học,* (Springer, 2000).

5 Peter W. Becker, 'Vai trò của nhiên liệu tổng hợp trong Thế chiến thứ hai ở Đức: Ý nghĩa cho ngày nay?', *Tạp chí Đại học Hàng không* , Tháng 7–tháng 8 năm 1981.

6 'Báo cáo Kỹ thuật của Hải quân Hoa Kỳ 87-45 – Nhà máy Nhiên liệu Tổng hợp Wesseling', http://www.fischer-tropsch.org/primary_documents/gvt_reports/USNAVY/usnavy-europe_toc.htm .

7 David Edgerton, 'Kiểm soát tài nguyên: Than, quặng sắt và dầu trong Thế chiến thứ hai', trong Michael Geyer và Adam Tooze (chủ biên), Lịch sử *Cambridge về Chiến tranh thế giới thứ hai* (Nhà xuất bản Đại học Cambridge, 2015), trang 122 –48.

8 Rebecca Skloot, 'Những ngôi nhà bướm', *PittMed* , Mùa đông 2001; 'Ngộ độc khí và chì Looney - Một lịch sử ngắn, đáng buồn', *Wired* , ngày 5 tháng 1 năm 2001, https://www.wired.com/2013/01/looney-gas-and-lead-poisoning-a-short-sad- lịch sử ; William J. Kovarik, 'Cuộc tranh cãi về Ethyl: Cách các phương tiện truyền thông tin tức đặt ra chương trình nghị sự cho cuộc tranh cãi về sức khỏe cộng đồng đối với xăng có chì, 1924–1926', luận văn, Đại học Maryland, 1993, https://drum.lib.umd.edu /xử lý/1903/16750 .

15. Mọi thứ

1 Susan Freinkel, *Plastic: Câu chuyện tình yêu độc hại* (Mariner, 2011).

2 *Triển vọng Dân số Thế giới của Liên hợp quốc năm 2022* (Liên hợp quốc, 2022), https://www.un.org/development/desa/pd/content/World-Population-Prospects-2022 ; Frank Viviano, 'Hà Lan nuôi sống thế giới như thế nào', *National Geographic* , tháng 9 năm 2017, https://www.nationalgeographic.com/magazine/article/holland-agriculture-sustainable-farming .

3 https://www.producebluebook.com/2021/12/13/tomatoes-greenhouse-grown-grows/ .

4 William Alexander, 'Nông nghiệp trong nhà là một việc "không cần trí tuệ." Ngoại trừ Dấu chân Carbon', *New York Times* , ngày 21 tháng 6 năm 2022, https://www.nytimes.com/2022/06/21/opinion/environment/climate-change-greenhouses-drought-indoor-farming.html .

5 Vaclav Smil, 'CrossTalk: Dấu chân năng lượng của cà chua', *IEEE Spectrum* 58/3 (Tháng 3 năm 2021). Số liệu cập nhật xuất hiện trong Vaclav Smil, *Thế giới thực sự hoạt động như thế nào: Hướng dẫn của nhà khoa học về quá khứ, hiện tại và tương lai của chúng ta* (Penguin, 2022).

6 *Norton, Mười tài liệu .*

7 'Polythene đến tuổi', *Tạp chí ICI* , tháng 9 năm 1954.

8 E. Raymond Ellis, *Polythene Đến từ Cheshire* (ER Ellis, 2005).

9 Claudia Flavell-while, 'Dermot Manning và đồng nghiệp tại ICI – Plastic Fantastic', *Kỹ sư hóa học* , ngày 1 tháng 11 năm 2001, https://www.thechemicalengineer.com/features/cewctw-dermot-manning-and-colleagues-at-ici- nhựa-tuyệt vời/ .

10 *Norton, Mười tài liệu .*

11 Freinkel, *Nhựa* .

12 *IEA, Tương lai của Hóa dầu (IEA, 2018).*

13 *Chris DeArmitt, Nghịch lý về nhựa: Sự thật cho một tương lai tươi sáng hơn (Phantom Plastics, 2020).*

[14] *Jon Gertner, Nhà máy ý tưởng: Phòng thí nghiệm Bell và Thời đại đổi mới vĩ đại của Mỹ (Penguin, 2013).*

[15] Alice A. Horton, 'Ô nhiễm nhựa: Khi nào chúng ta biết đủ?', *Tạp chí Vật liệu Nguy hiểm* 422 (Tháng 1 năm 2022); 'Microplastic trong bụi nhà có thể thúc đẩy tình trạng kháng kháng sinh', *The Economist* , ngày 10 tháng 11 năm 2021, https://www.economist.com/science-and-technology/microplastics-in-household-dust-could-promote-antibiotic-resistance/ 21806204 .

[16] *IEA, Triển vọng Năng lượng Thế giới 2022 (IEA, 2022).*

Phần tái bút: Đỉnh dầu

[1] 'North Field: Chia sẻ trọng lượng của thế giới?', Thunder Said Energy, ngày 28 tháng 7 năm 2022, https://thundersaidenergy.com/2022/07/28/north-field-sharing-the-weight-of-the- thế giới/ .

[2] Vaclav Smil, 'Những điều chúng ta cần biết về tốc độ khử cacbon', *Substantia* 3/2 (2919), Phụ lục 1: trang 13–28.

[3] Dự báo nhu cầu từ các Kịch bản cam kết được công bố trong Triển vọng kinh tế thế giới 2022 của IEA (IEA, 2022) và từ Phiên bản BP Energy Outlook 2023 (BP, 2023).

16. Vàng trắng

[1] *Seth Fletcher, Tia chớp đóng chai: Siêu pin, Ô tô điện và Nền kinh tế lithium mới (Hill & Wang, 2011).*

[2] *IEA, Net Zero vào năm 2050 – Lộ trình cho ngành năng lượng toàn cầu (IEA, 2021).*

[3] https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2019/whittingham/facts/ .

[4] Jarod C. Kelly và cộng sự, 'Phân tích vòng đời năng lượng, khí nhà kính và nước của Lithium Carbonate và Lithium Hydroxide Monohydrat từ tài nguyên nước muối và quặng và việc sử dụng chúng trong Cathode pin Lithium Ion và pin Lithium Ion', Tài nguyên, Bảo tồn *và Tái chế* 174 (tháng 11 năm 2021), https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105762 .

[5] Jorge S. Gutiérrez và cộng sự, 'Biến đổi khí hậu và ảnh hưởng của việc khai thác lithium đến sự phong phú của chim hồng hạc ở Tam giác lithium', *Kỷ yếu của Hiệp hội Hoàng gia B: Khoa học sinh học* 289/1970 (9 tháng 3 năm 2022).

17. Thạch cuộn

[1] Stanford Energy, 'Chuỗi cung ứng bền vững cho pin | Straubel, Mikolajczak, & Urtel | Hội nghị chuyên đề StorageX', 2020, https://www.youtube.com/watch?v=FQ0yFAGELnE .

[2] 'Đánh giá Gigafactory Pin Lithium Ion', Điểm chuẩn Thông tin khoáng sản, tháng 6 năm 2022.

[3] *IEA, Vai trò của Khoáng chất quan trọng .*

[4] G. James Herrera và Frank Gottron, 'Kho dự trữ quốc gia: Bối cảnh và các vấn đề đối với Quốc hội', báo cáo 'Tập trung' của Cơ quan Nghiên cứu Quốc hội, ngày 15 tháng 6 năm 2020; Maiya Clark, 'Hồi sinh kho dự trữ quốc phòng cho kỷ nguyên cạnh tranh giữa các cường quốc', Quỹ Di sản, ngày 4 tháng 1 năm 2022.

[5] Ana Swanson, 'Biden viện dẫn Đạo luật Chiến tranh Lạnh để tăng cường cung cấp khoáng sản quan trọng', *New York Times* , ngày 31 tháng 3 năm 2022, https://www.nytimes.com/2022/03/31/business/economy/biden-minerals-defense -production-act.html ; chi phí pin: https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-cited-below-100-kwh-for-the-first-time-in-2020-while-market-average-sits-at -137-kwh/ .

18. Phi sản xuất

[1] Neil Munshi, 'Bỉ đang nhìn lại lịch sử tàn bạo ở Congo', *Financial Times* , ngày 13 tháng 11 năm 2020, https://www.ft.com/content/a17b87ec-207d-4aa7-a839-8e17153bcf51 .

[2] USGS, *Tóm tắt hàng hóa khoáng sản năm 2022* (Khảo sát Địa chất Hoa Kỳ, 2022).

[3] *John Higginson, Giai cấp công nhân đang hình thành: Chính sách lao động thuộc địa của Bỉ, Doanh nghiệp tư nhân và Công nhân khai thác mỏ châu Phi, 1907–1951 (Nhà xuất bản Đại học Wisconsin, 1989).*

4 'Quản lý tác động ở Hoboken', Umicore, ngày 17 tháng 3 năm 2021, https://www.umicore.com/en/newsroom/news/managing-impact-in-hoboken/ .

5 TE Graedel và cộng sự, *Tỷ lệ tái chế kim loại: Báo cáo hiện trạng* (Chương trình Môi trường Liên hợp quốc, 2011).

6 *IEA, Triển vọng Năng lượng Thế giới 2022 .*

Phần kết luận

1 J. Doyne Farmer và François Lafond, 'Tiến bộ công nghệ có thể dự đoán được như thế nào?', *Chính sách nghiên cứu* 45/3 (ngày 1 tháng 4 năm 2016): trang 647–65.

2 Dữ liệu được thu thập bởi John C. McCallum, https://jcmit.net/index.htm .

3 *Azeem Azhar, Hàm mũ: Trật tự và Hỗn loạn trong Thời đại Công nghệ Tăng tốc (Cornerstone Digital, 2021).*

4 Hãy mỉm cười, 'Những điều chúng ta cần biết'.

5 Dữ liệu sản xuất điện lịch sử của Vương quốc Anh: https://www.gov.uk/ Government/statistical-data-sets/histocal-electricity-data .

6 Dữ liệu từ Cơ quan Năng lượng Quốc tế.

7 Mark P. Mills, 'Bài toán khó về khoáng sản', *Các vấn đề về khoa học và công nghệ* , ngày 27 tháng 1 năm 2022, https://issues.org/environmental-kinh tế-costs-minerals-solar-wind-batteries-mills / ; dữ liệu về đồng từ Gait, 'Đồng và nền kinh tế xanh'; dự đoán về nhu cầu đồng trong tương lai từ *Tương lai của Đồng: Liệu khoảng cách cung sắp xuất hiện có làm gián đoạn quá trình chuyển đổi năng lượng không?* (Thị trường IHS/S&P Toàn cầu, 2022).

8 *Hãy mỉm cười, Thế giới thực sự vận hành như thế nào .*

9 Zoltan Pozsar, 'Chính sách chiến tranh và công nghiệp', Credit Suisse, ngày 24 tháng 8 năm 2022.

10 Diane Coyle, *GDP: Lịch sử ngắn gọn nhưng đầy tình cảm* (Nhà xuất bản Đại học Princeton, 2015); Pozsar, 'Chính sách chiến tranh và công nghiệp'.

11 Tàu container Panamax điển hình chỉ có thể chở hơn 5.000 TEU (container), tương đương khoảng 70.000 tấn, so với tổng sức tải của đội tàu buôn Anh là 68.000 tấn. Yuval Noah Harari, 'Bài học từ một năm Covid', *Financial Times* , ngày 26 tháng 2 năm 2021.

12 Hãy mỉm cười, *Thế giới thực sự vận hành như thế nào* , tr. 51; Gait, 'Tại sao giá đồng không phải là 24.000 USD/tấn'.

Thư mục

Cuốn sách này hầu như không đề cập đến bề mặt của Thế giới Vật chất, nhưng tin tốt là có rất nhiều tài liệu để đọc ngoài kia nếu bạn muốn tìm hiểu sâu hơn. Lời cảnh báo duy nhất của tôi, và tôi đang nói từ kinh nghiệm ở đây, là những thứ như thế này có thể cực kỳ gây nghiện. Trước khi kịp nhận ra, bạn đã bị mắc kẹt sâu trong hố sâu về sản xuất phèn hoặc hydrocracking hoặc bó silicon, từ đó rất khó thoát ra. Tuy nhiên, nếu bạn sẵn sàng chấp nhận rủi ro đó thì đây là một vài nơi để bắt đầu.

Nếu bạn phải chắt lọc Thế giới Vật chất và định hình nó thành hình dạng con người, bạn sẽ có được thứ gì đó giống với Vaclav Smil, nhà khoa học gốc Séc hiện đang làm việc tại Đại học Manitoba ở Canada. Nghiên cứu của ông đã cung cấp thông tin cho nhiều phần của cuốn sách này và nếu bạn tìm hiểu thêm, có thể là lịch sử phân bón, thép hay quá trình sử dụng năng lượng của con người từ thời xa xưa cho đến ngày nay, bạn sẽ tìm thấy hầu hết những điều đó ở đâu đó trong các tác phẩm của ông, nhiều trong số đó được trích dẫn dưới đây. Tuy nhiên, có lẽ nơi tốt nhất để bắt đầu là cuốn sách *Thế giới thực sự hoạt động thế nào năm 2022 của ông* . Một chủ đề khác bao trùm phần lớn cuốn sách này – cái mà chúng ta gọi là cuộc cách mạng công nghiệp thực sự là một cuộc cách mạng năng lượng – có liên quan rất nhiều đến Tony Wrigley quá cố, người có cuốn sách Năng lượng và Cách mạng Công nghiệp *Anh năm 2010* đã thay đổi tư duy về chủ đề này. Năng lượng thực sự là tất cả; Càng dấn thân vào Thế giới Vật chất, tôi càng nhận ra điều này. Một hướng dẫn sử dụng tuyệt vời về vấn đề này là *Năng lượng: Lịch sử con người* của Richard Rhodes . Nếu bạn quan tâm đến khoa học vật liệu, một nơi tốt để bắt đầu là *cuốn Khoa học mới về vật liệu mạnh của JE Gordon* . Ngoài ra còn có rất nhiều sách khoa học đại chúng xuất sắc, từ *Stuff của Ivan Amato* và *The Substance of Civilization của Stephen Sass cho đến Stuff Matters* của Mark Miodownik . *Bảy yếu tố đã thay đổi thế giới* của John Browne cũng hữu ích tương tự và nếu bạn muốn tìm hiểu sâu

hơn về các hố thỏ dành riêng cho từng loại vật liệu, sau đây là một số gợi ý khác.

Cát

Có hai cuốn sách xuất sắc về cát, *Sand: The Never-Ending Story của Michael Welland* và *The World in a Grain của Vince Beiser* . Để có lập luận thuyết phục về tầm quan trọng của thủy tinh đối với sự phát triển của con người, hãy đọc *The Glass Bathyscaphe* của Gerry Martin và Alan Macfarlane, tuy nhiên nếu bạn đang tìm kiếm một cuốn sách sơ khai mang tính khoa học hơn thì *Glass đã thay đổi thế giới như thế nào của Seth Rasmussen* rất đáng xem. Bạn có thể tìm thấy rất nhiều sách giáo khoa về khoa học và thực hành bê tông nhưng để có cái nhìn tổng quan thì *Hành tinh bê tông của Robert Courland* là cuốn sách không ai sánh kịp. Tuy nhiên, một khi bạn đã vượt qua được điều đó, bạn có thể sẽ muốn tìm hiểu thêm về thế giới xây dựng và tôi khuyên bạn nên sử dụng *Building* by Bill Addis, cuốn sách này cũng đóng vai trò như một cuốn sách dày dặn trên bàn cà phê mà bạn sẽ thấy mình đọc qua trong nhiều năm tới. Khi tôi viết chương về chip silicon, đáng ngạc nhiên là có rất ít sách về sản xuất chất bán dẫn dễ tiếp cận. *Cuốn sách The Idea Factory* của Jon Gertner rất xuất sắc trong những ngày đầu sản xuất bánh xốp ở Bell Labs, và có một cuốn sách hay xuất bản năm 1978 tên là *Cuộc cách mạng thu nhỏ* của Ernest Braun và Stuart MacDonald. Sau đó, ngay trước khi tôi gửi bản thảo cuối cùng của mình, thế giới cuối cùng đã có được cuốn sách bán dẫn mà họ luôn xứng đáng có được, dưới hình thức *Chip War tuyệt vời của Chris Miller* . Nếu hành trình dọc theo chuỗi cung ứng silicon kích thích sự thèm muốn của bạn, bạn sẽ biết phải tìm ở đâu tiếp theo.

Muối

Có hai cuốn sách hay về muối, *cuốn Salt: Grain of Life của Pierre Laszlo* và cuốn Magisterial *Salt: A World History của Mark Kurlansky* , nhưng có vô số bài báo và cuốn sách xuất sắc đi sâu vào các chi tiết cụ thể của cả muối và (chủ đề bóng tối). của chương này) hóa chất. Để tìm hiểu sâu hơn về lịch sử của natri clorua, hãy xem xét cuốn sách *Muối và nền văn minh của Samuel Adshead* . Nơi tốt nhất để bắt

đầu với câu chuyện về caliche Chile có lẽ là *The Alchemy of Air của Thomas Hager* , đây cũng là một tác phẩm xuất sắc về câu chuyện bi thảm của Fritz Haber, người có những phát minh nổi bật trong cuốn sách này. Mặc dù *Khi chúng ta ngừng hiểu thế giới* của Benjamin Labatut là một tác phẩm nửa hư cấu về nhiều khám phá khoa học khác nhau và có thể không cho bạn biết thêm nhiều điều về kỹ thuật sản xuất áp suất cao, nhưng chương đầu tiên của nó (chính xác đến 99%) là chương hay nhất. câu chuyện đầy chất thơ về cuộc đời của Haber mà bạn từng đọc.

Sắt

Các chương về sắt và đồng chủ yếu dựa vào *cuốn Khai thác trong lịch sử thế giới của Martin Lynch* , bản tường thuật cơ bản về sự phát triển của ngành thương mại này. Cuốn *sách Still the Iron Age* của Vaclav Smil nói rất hay về các chi tiết cụ thể của quá trình sản xuất thép trong khi *cuốn Iron, Steam & Money của Roger Osborne* sẽ hướng dẫn bạn qua câu chuyện về cuộc cách mạng công nghiệp ở Anh. Câu chuyện về nỗi ám ảnh của Stalin đối với sắt và thành phố nơi nó sinh ra đã được Stephen Kotkin kể nổi tiếng trong cuốn *Từ Sơn* . Phần sau của chương này, đặc biệt là các phần về tương lai của thép, được hưởng lợi rất nhiều từ cuốn sách *Vật liệu bền vững: Với cả hai mắt mở của Julian Allwood và Jonathan Cullen* . Bạn có thể tải xuống miễn phí từ trang web của Đại học Cambridge. Hãy làm như vậy ngay bây giờ. Bạn sẽ không hối tiếc đâu.

Đồng

Phần lớn phần đầu của chương về đồng, về cuộc cách mạng điện, đến từ ba cuốn sách: tập đầu tiên trong cuốn tiểu sử đầy uy quyền của Robert Caro về Lyndon B. Johnson, Con đường dẫn tới quyền lực, Mạng lưới quyền lực của Thomas Parke Hughes *và The* Next Greatest *. Thing* , cuốn sách của Richard Pence, do Hiệp hội Hợp tác xã Điện Nông thôn Quốc gia xuất bản, kể về những ngày đầu của mạng lưới điện nông thôn. Có rất nhiều tiểu sử của Thomas Edison, cuốn gần đây nhất được viết bởi Edmund Morris, nhưng để lật từng trang sách về cuộc chiến của hệ thống điện – một trận chiến được quyết định một phần bởi sự khan hiếm đồng – bạn không thể làm tốt

hơn nhiều so với *Empires of Light* của Jill Jonnes. Để biết thêm về bản thân đồng, *Kim loại, Năng lượng và Tính bền vững của Suzanne và Barry Golding: Câu chuyện về Bác sĩ Đồng và Vua Than* là một kho tàng, thậm chí còn trình bày nhiều hơn về hố lớn Chuquicamata. Vụ cá cược Malthusian v. Cornucopian giữa Paul Ehrlich và Julian Simon được kể lại trong cuốn *The Bet có tên thích hợp* của Paul Sabin. Có cả một cuốn sách đang chờ được viết về khai thác biển sâu, mặc dù tất nhiên phần lớn sẽ phụ thuộc vào việc liệu nó có trở thành hiện thực thương mại hay không.

Dầu

Một cuốn sách vượt trội hơn tất cả những cuốn khác khi nói đến câu chuyện về dầu mỏ: *The Prize của Daniel Yergin* . Nếu bạn có hứng thú với lịch sử hiện đại, chứ đừng nói đến năng lượng, hãy đi lấy một bản ngay lập tức. *The Frackers* của Greg Zuckerman là một tác phẩm xuất sắc về cuộc cách mạng đá phiến trong khi *Khí đốt tự nhiên: Nhiên liệu cho thế kỷ 21 của Vaclav Smil* cung cấp nhiều chi tiết hơn về khí mê-tan, thứ mà chúng ta sẽ dựa vào trong nhiều thập kỷ, bất kể những khó khăn địa chính trị. Cho đến nay, cuốn sách hay nhất (có lẽ là duy nhất) giải thích về lọc dầu cho những người "bình thường" là *Petroleum Refining của William Leffler. trong Ngôn ngữ phi kỹ thuật* , nếu không có nó, tôi sẽ không bao giờ có thể điều hướng bất kỳ điểm nối ống spaghetti nào. Cuốn *sách Plastic: A Toxic Love Story* của Susan Freinkel là một điểm khởi đầu hay cho câu chuyện về hóa dầu trong khi lịch sử hai tập về ICI của William Reader có nhiều chi tiết hơn bạn cần về câu chuyện nguồn gốc của nhiều chất đặc biệt này - không phải để đề cập nhiều hơn về muối. Nếu có ai muốn viết một cuốn sách về sự sụp đổ sau đó của ICI, thì bạn đã có sẵn ít nhất một độc giả ở đây.

Liti

Những thập kỷ tới chắc chắn sẽ có nhiều cuốn sách xuất sắc về lithium và hóa chất pin nhưng tại thời điểm viết bài, hai trong số những cuốn sách hay nhất là *Bottled Lightning của Seth Fletcher* và *The Powerhouse của Steve LeVine, mặc dù Volt Rush* của Henry Sanderson , xuất bản năm 2022, thậm chí còn cung cấp nhiều chi tiết

và thông tin hơn. màu sắc về hoạt động khai khoáng và vật liệu chúng ta cần để cung cấp năng lượng cho tương lai. Nếu bạn muốn biết thêm về Tesla và chuyến tàu lượn siêu tốc của nó trở nên nổi bật, bạn có thể đọc *Power Play* của Tim Higgins. Trong khi phần cuối cùng của chương lithium chỉ đề cập sơ qua về Congo, tôi không có lý do gì để giới thiệu *cuốn Bóng ma vua Leopold của Adam Hochschild* . Thời kỳ nó diễn ra trước thời kỳ buôn bán đồng và uranium của Congo nhưng không cuốn sách nào khác có thể cho bạn cảm giác rõ ràng về tình trạng bất ổn và ngược đãi đã cản trở triển vọng của quốc gia châu Phi vĩ đại một thời này.

Sau đây là những cuốn sách đã giúp cung cấp thông tin cho chuyến hành trình vào Thế giới Vật chất này. Ngoài ra còn có nhiều bài báo và tạp chí học thuật khác ngoài những bài được trích dẫn trong phần chú thích. Danh sách đầy đủ các nguồn này có tại www.edmundconway.com/material-world-bibliography .

Abraham, DS, Các yếu tố của quyền lực: Tiện ích, súng và cuộc đấu tranh vì một tương lai bền vững trong thời đại kim loại hiếm (Nhà xuất bản Đại học Yale, 2015)
Addis, B., Tòa nhà: 3.000 năm thiết kế, kỹ thuật và xây dựng (Phaidon, 2007)
Adriaanse, A. và Viện Tài nguyên Thế giới (eds), *Dòng tài nguyên: Cơ sở vật chất của các nền kinh tế công nghiệp* (Viện Tài nguyên Thế giới, 1997)
Adshead, SAM, *Muối và nền văn minh* (Palgrave Macmillan, 1992)
Aftalion, F., *Lịch sử ngành công nghiệp hóa chất quốc tế* (Tổ chức di sản hóa học, 1992)
Allen, RC, Cuộc cách mạng công nghiệp của Anh dưới góc độ toàn cầu (Nhà xuất bản Đại học Oxford, 2009)
Allwood, JM và Cullen, JM, *Vật liệu bền vững: Mở rộng cả hai mắt* (UIT Cambridge, 2012)
Amato, I., Stuff: Vật liệu tạo nên thế giới (Bard, 1998)
Azhar, A., Exponential: Trật tự và Hỗn loạn trong Thời đại Công nghệ Tăng tốc (Cornerstone Digital, 2021)
Barger, TC, Out in the Blue: Letters from Arabia 1937–1940 (Selwa Pr, 2000)

Beiser, V., Thế giới trong hạt: Câu chuyện về cát và cách nó biến đổi nền văn minh (Riverhead, 2018)
Blakemore, H., Từ Thái Bình Dương đến La Paz: Công ty Đường sắt Antofagasta và Bolivia, 1888–1988 (Không rõ dấu ấn, 1990)
Blas, J. và Farchy, J., Thế giới buôn bán: Tiền bạc, quyền lực và những thương nhân trao đổi tài nguyên của Trái đất (Cornerstone Digital, 2021)
Braun, E. và MacDonald, S., Cuộc cách mạng thu nhỏ: Lịch sử và tác động của điện tử bán dẫn (Nhà xuất bản Đại học Cambridge, 1978)
Browne, J., Bảy yếu tố đã thay đổi thế giới: Sắt, Carbon, Vàng, Bạc, Uranium, Titanium, Silicon (W&N, 2014)
Callister, WD và Rethwisch, DG, *Khoa học và Kỹ thuật Vật liệu: Giới thiệu* (Wiley, 2010)
Carlson, WB, *Tesla: Nhà phát minh của thời đại điện* (Nhà xuất bản Đại học Princeton, 2013)
Caro, RA, Con đường dẫn đến quyền lực: Những năm tháng của Lyndon Johnson (The Bodley Head, 2019)
Chang, J. và Halliday, J., *Mao: Câu chuyện chưa biết* (Vintage Digital, 2012)
Coggan, P., Thêm: Sự trỗi dậy 10.000 năm của nền kinh tế thế giới (Nhà kinh tế học, 2020)
Cohen, J.-L. và Martin, G., *Đá lỏng: Kiến trúc mới trong bê tông* (Nhà xuất bản Kiến trúc Princeton, 2006)
Copeland, DC, *Sự phụ thuộc lẫn nhau về kinh tế và chiến tranh* (Nhà xuất bản Đại học Princeton, 2014)
Courland, R., Hành tinh bê tông: Câu chuyện kỳ lạ và hấp dẫn về vật liệu nhân tạo phổ biến nhất trên thế giới (Prometheus, 2011)
Coyle, D., Thế giới không trọng lượng: Chiến lược quản lý nền kinh tế kỹ thuật số (Capstone, 1997)
Coyle, D., *GDP: Một lịch sử ngắn gọn nhưng đầy tình cảm* (Nhà xuất bản Đại học Princeton, 2015)
Crathorne, N., Eliot (Nam tước Harwood), K. và Dugdale, J., *Tennant's Stalk: Câu chuyện về những người thuê nhà ở Glen* (Macmillan, 1973)
Dartnell, L., Kiến thức: Cách xây dựng lại thế giới của chúng ta từ đầu (The Bodley Head, 2014)

Dartnell, L., Nguồn gốc: Lịch sử loài người hình thành trái đất như thế nào (Kỹ thuật số cổ điển, 2019)
Edgerton, D., Cú sốc của thời xưa: Công nghệ và lịch sử toàn cầu từ năm 1900 (Hồ sơ, 2008)
Ehrlich, PR, *Quả bom dân số* (Ballantine, 1989)
Fletcher, S., Tia sét đóng chai: Siêu pin, Ô tô điện và Nền kinh tế lithium mới (Hill & Wang, 2011)
Freinkel, S., *Plastic: Câu chuyện tình yêu độc hại* (Mariner, 2011)
Friedel, R. và Israel, PB, *Đèn điện của Edison: Nghệ thuật phát minh* (Nhà xuất bản Đại học Johns Hopkins, 2010)
Gates, B., Làm thế nào để tránh thảm họa khí hậu: Các giải pháp chúng tôi có và những đột phá chúng tôi cần (Penguin, 2021)
Gertner, J., Nhà máy ý tưởng: Phòng thí nghiệm Bell và Thời đại đổi mới vĩ đại của Mỹ (Penguin, 2013)
Vàng, B. và Vàng, SD, *Kim loại, Năng lượng và Tính bền vững* (Springer, 2017)
Gordon, JE, Khoa học mới về vật liệu bền: Hoặc tại sao bạn không rơi qua sàn (Penguin, 1991)
Gordon, RJ, Sự trỗi dậy và sụp đổ của sự tăng trưởng của Mỹ: Tiêu chuẩn sống của Hoa Kỳ kể từ Nội chiến (Nhà xuất bản Đại học Princeton, 2017)
Guevara, EC, *Nhật ký xe máy* , chuyển. Trung tâm Nghiên cứu Che Guevara (Chim cánh cụt, 2021)
Gustafson, T., *Wheel of Fortune: Cuộc chiến giành dầu mỏ và quyền lực ở Nga* (Nhà xuất bản Belknap của Nhà xuất bản Đại học Harvard, 2012)
Hager, T., Thuật giả kim không khí: Một thiên tài Do Thái, một ông trùm bất hạnh và khám phá khoa học nuôi sống thế giới nhưng lại thúc đẩy sự trỗi dậy của Hitler (Crown, 2008)
Hall, CAS và Klitgaard, K., *Năng lượng và sự giàu có của các quốc gia* (Springer, 2018)
Hartcup, G., *Cuộc chiến phát minh* (Brassey's, 1988)
Haskel, J. và Westlake, S., *Chủ nghĩa tư bản không có vốn: Sự trỗi dậy của nền kinh tế vô hình* (Nhà xuất bản Đại học Princeton, 2017)
Hecht, J., *Thành phố ánh sáng: Câu chuyện về sợi quang* (Nhà xuất bản Đại học Oxford, 1999)

Higgins, T., Trò chơi quyền lực: Elon Musk, Tesla và Người giỏi nhất thế kỷ (WH Allen, 2021)
Higginson, J., Giai cấp công nhân đang hình thành: Chính sách lao động thuộc địa của Bỉ, Doanh nghiệp tư nhân và Công nhân khai thác mỏ châu Phi, 1907–1951 (Nhà xuất bản Đại học Wisconsin, 1989)
Hochschild, A., Bóng ma của Vua Leopold: Câu chuyện về lòng tham, sự khủng bố và chủ nghĩa anh hùng ở Châu Phi thuộc địa (Picador, 2019)
Hochschild, A., Để kết thúc mọi cuộc chiến tranh: Câu chuyện về sự phản kháng và lòng yêu nước trong Thế chiến thứ nhất (Picador, 2011)
Hughes, TPP, Mạng lưới quyền lực: Điện khí hóa ở xã hội phương Tây, 1880–1930 (Nhà xuất bản Đại học Johns Hopkins, 1993)
Hyde, CK, Copper for America: Ngành công nghiệp đồng của Hoa Kỳ từ thời thuộc địa đến những năm 1990 (Nhà xuất bản Đại học Arizona, 2016)
Israel, P., Edison: Một cuộc đời phát minh (Wiley, 1998)
Johnson, S., Làm thế nào chúng ta đạt được hiện tại: Sáu phát minh đã tạo nên thế giới hiện đại (Penguin, 2015)
Jones, RAL, *Máy mềm: Công nghệ nano và Cuộc sống* (Nhà xuất bản Đại học Oxford, 2007)
Jonnes, J., Đế chế ánh sáng: Edison, Tesla, Westinghouse và Cuộc đua điện khí hóa thế giới (Random House, 2004)
Joralemon, IB, *Đồng lãng mạn: Sự thu hút và truyền thuyết của nó* (D. Appleton-Century Co, 1934)
King-Hall, S., *Nhật ký Biển Bắc, 1914–1918* (Những cuốn sách bị lãng quên, 2012)
Kotkin, S., *Núi Từ: Chủ nghĩa Stalin như một nền văn minh* (Nhà xuất bản Đại học California, 1997)
Kurlansky, M., *Salt: A World History* (Cổ điển, 2003)
Kynge, J., Trung Quốc làm rung chuyển thế giới: Sự trỗi dậy của một quốc gia đói khát (Weidenfeld & Nicolson, 2010)
Labatut, B., Khi chúng ta không còn hiểu thế giới (Pushkin Press, 2020)
Laszlo, P., *Muối: Hạt sự sống* (Nhà xuất bản Đại học Columbia, 2001)

LeCain, TJ, Sự hủy diệt hàng loạt: Con người và những mỏ khổng lồ đã nối dây nước Mỹ và gây sẹo cho hành tinh (Nhà xuất bản Đại học Rutgers, 2009)
Leffler, WL, Lọc dầu bằng ngôn ngữ phi kỹ thuật (PennWell, 2020)
LeVine, S., The Powerhouse: Bên trong việc phát minh ra pin để cứu thế giới (Penguin, 2015)
Lynch, M., *Khai thác trong lịch sử thế giới* (Reaktion, 2003)
Martin, G. và MacFarlane, A., The Glass Bathyscaphe: Glass đã thay đổi thế giới như thế nào (Hồ sơ, 2011)
Mathews, JA và Cho, Dong-sung, Tiger Technology: Sự hình thành ngành công nghiệp bán dẫn ở Đông Á (Nhà xuất bản Đại học Cambridge, 2010)
Matthews, E. (ed.), Trọng lượng của các quốc gia: Dòng chảy vật chất từ các nền kinh tế công nghiệp (Viện Tài nguyên Thế giới, 2000)
McAfee, A., Thêm từ ít hơn: Câu chuyện đáng ngạc nhiên về cách chúng ta học cách thịnh vượng bằng cách sử dụng ít tài nguyên hơn - Và điều gì xảy ra tiếp theo (Simon & Schuster, 2019)
McGrayne, SB, Prometheans trong phòng thí nghiệm: Hóa học và sự hình thành thế giới hiện đại (McGraw-Hill, 2001)
McMahon, D., Vạn Lý Trường Thành Nợ của Trung Quốc: Những ngân hàng trong bóng tối, những thành phố ma, những khoản cho vay khổng lồ và sự kết thúc của phép màu Trung Quốc (Little, Brown, 2018)
McMurray, S., Năng lượng cho thế giới: Câu chuyện của Saudi Aramco (Aramco, 2011)
Meadows, DH và cộng sự, *Giới hạn tăng trưởng* (Universe, 1972)
Miller, C., Chip War: Cuộc chiến vì công nghệ quan trọng nhất thế giới (Simon & Schuster, 2022)
Miodownik, M., Vấn đề nội dung: Những câu chuyện kỳ lạ về những vật liệu kỳ diệu hình thành nên thế giới nhân tạo của chúng ta (Penguin, 2013)
Mokyr, J., Văn hóa tăng trưởng: Nguồn gốc của nền kinh tế hiện đại (Nhà xuất bản Đại học Princeton, 2018)
Morris, E., *Edison* (Ngôi nhà ngẫu nhiên, 2019)
Moxham, R., *Hàng rào vĩ đại của Ấn Độ* (Constable, 2001)

Mumford, L., *Kỹ thuật và Văn minh* (Nhà xuất bản Đại học Chicago, 2010)
Cháu trai, R., *Nghệ thuật xử phạt: Góc nhìn từ hiện trường* (Nhà xuất bản Đại học Columbia, 2018)
Norton, MG, Mười vật liệu định hình thế giới của chúng ta (Springer, 2021)
Norwich, JJ, *Lịch sử Venice* (Chim cánh cụt, 2003)
Osborne, R., Sắt, Hơi nước & Tiền bạc: Sự hình thành cuộc Cách mạng Công nghiệp (Pimlico, 2014)
Pence, P. (ed.), *The Next Greatest Thing* (Hiệp hội Hợp tác xã Điện Nông thôn Quốc gia, 1984)
Pilkey, OH và Cooper, JAG, *Bãi biển cuối cùng* (Nhà xuất bản Đại học Duke, 2014)
Pitron, G., Cuộc chiến kim loại hiếm: Mặt tối của năng lượng sạch và công nghệ kỹ thuật số (Ấn phẩm Scribe, 2020)
Plokhy, S., Cánh cổng châu Âu: Lịch sử Ukraine (Penguin, 2015)
Pollan, M., Thế lưỡng nan của động vật ăn tạp: Việc tìm kiếm một bữa ăn hoàn hảo trong thế giới đồ ăn nhanh (Bloomsbury, 2009)
Rackham, O., Cây cối và Rừng trong Cảnh quan nước Anh (Orion, 2020)
Rasmussen, SC, *Thủy tinh đã thay đổi thế giới như thế nào* , Tập. 3, Tóm tắt của Springer về Khoa học Phân tử (Springer, 2012)
Reader, WJ, Imperial Chemical Industries: A History: Tập 1 và 2 (Nhà xuất bản Đại học Oxford, 1970)
Rhodes, R., *Năng lượng: Lịch sử loài người* (Simon & Schuster, 2018)
Ridley, M., *Cách thức hoạt động của sự đổi mới* (Bất động sản thứ tư, 2020)
Sabin, P., *The Bet* (Nhà xuất bản Đại học Yale, 2013)
Sambrook, SC, Ngành công nghiệp đạn dược quang học ở Anh 1888 đến 1923 (Routledge, 2016)
Sanderson, H., Volt Rush: Người thắng và kẻ thua trong cuộc đua đi tới xanh (Simon & Schuster, 2022)
Sass, SL, Bản chất của nền văn minh: Vật liệu và lịch sử loài người từ thời kỳ đồ đá đến thời đại silicon (Skyhorse, 2011)
Shi, C., Krivenko, PV và Roy, DM, *Xi măng và bê tông hoạt tính kiềm* (Taylor & Francis, 2006)

Shurkin, JN, *Thiên tài tan vỡ* (Palgrave Macmillan, 2008)
Smil, V., Làm giàu cho Trái đất: Fritz Haber, Carl Bosch, và Sự chuyển đổi của sản xuất lương thực thế giới (Nhà xuất bản MIT, 2000)
Smil, V., Tạo ra thế kỷ 20: Những đổi mới kỹ thuật giai đoạn 1867–1914 và tác động lâu dài của chúng (Nhà xuất bản Đại học Oxford, 2005)
Smil, V., Tạo nên thế giới hiện đại: Vật liệu và phi vật chất hóa (Wiley, 2013)
Smil, V., Khí tự nhiên: Nhiên liệu cho thế kỷ 21 (Wiley, 2015)
Smil, V., Vẫn là thời đại đồ sắt: Sắt và thép trong thế giới hiện đại (Butterworth-Heinemann, 2016)
Smil, V., Năng lượng và nền văn minh: Lịch sử (Nhà xuất bản MIT, 2017)
Smil, V., *Oil: Hướng dẫn cho người mới bắt đầu* (Oneworld, 2017)
Smil, V., Thế giới thực sự hoạt động như thế nào: Hướng dẫn của nhà khoa học về quá khứ, hiện tại và tương lai của chúng ta (Penguin, 2022)
Smith, A., *Sự giàu có của các quốc gia* (Penguin, 2000)
Standage, T., Lịch sử tóm tắt về chuyển động: Từ bánh xe đến ô tô và những gì xảy ra tiếp theo (Bloomsbury, 2021)
Thompson, H., *Rối loạn: Thời kỳ khó khăn trong thế kỷ 21* (Nhà xuất bản Đại học Oxford, 2021)
Watts, S., Ông trùm nhân dân: Henry Ford và thế kỷ nước Mỹ (Vintage, 2009)
Welland, M., *Sand: Câu chuyện không bao giờ kết thúc* (Nhà xuất bản Đại học California, 2009)
Winchester, S., Chính xác: Các kỹ sư chính xác đã tạo ra thế giới hiện đại như thế nào (William Collins, 2018)
Wrigley, EA, *Năng lượng và Cách mạng Công nghiệp Anh* (Nhà xuất bản Đại học Cambridge, 2015)
Yergin, D., Bản đồ mới: Năng lượng, Khí hậu và Sự xung đột giữa các quốc gia (Penguin, 2020)
Yergin, D., Giải thưởng: Cuộc tìm kiếm dầu mỏ, tiền bạc và quyền lực (Simon & Schuster, 2012)
Zuckerman, G., The Frackers: Câu chuyện bên trong kỳ lạ của cuộc cách mạng năng lượng mới (Penguin, 2013)

Sự nhìn nhận

Một trong những điều tuyệt vời nhất và đầy thách thức khi kể câu chuyện về Thế giới Vật chất là nơi này không phù hợp hoàn toàn với bất kỳ danh mục khoa học hoặc văn học nào đã có từ trước. Đây là câu chuyện về địa chất nhưng cũng là về kỹ thuật. Đó là về lịch sử và về kinh tế. Nó bao gồm khoa học vật liệu và hóa học, chưa kể đến vật lý và sinh học. Nói tóm lại, mỗi thứ đều có một chút, đó là lời bào chữa tốt nhất mà tôi có thể đưa ra cho lý do tại sao tôi, một nhà báo đơn thuần, lại là người cố gắng gắn kết những sợi dây này lại với nhau.
Một trong những niềm vui khi viết cuốn sách này là tôi được phép gọi điện cho một số chuyên gia hàng đầu thế giới và hỏi những câu hỏi hóc búa về cách thế giới thực sự vận hành. Cuốn sách này là sản phẩm của hàng trăm cuộc trò chuyện với các nhà khoa học, nhà môi trường, nhà hoạch định chính sách và doanh nhân, chưa kể đến chính cư dân của Thế giới Vật chất - những người thợ mỏ và kỹ sư đang làm việc để biến những vật liệu này thành các sản phẩm cứu sống và nâng cao cuộc sống. Tôi hy vọng đó là câu chuyện của họ chứ không phải của tôi - ngay cả khi tên của họ không xuất hiện trên trang bìa (hoặc, đối với những người muốn giấu tên, ở đây cũng có trong phần cảm ơn).
Những người mà tôi vô cùng biết ơn vì đã dành thời gian đưa ra lời khuyên và ý tưởng cũng như kiên nhẫn trả lời những câu hỏi ngu ngốc của tôi, bao gồm: Julian Allwood, Justin Baring, Tom Bide, Nigel Bouckley, Flo Bullough, Tom Butler, Diane Coyle, Django Davidson, Stefan Debruyne, Athene Donald, David Edgerton, Simon Evans, Andrew Fulton, Paul Gait, Ben Goldsmith, Ben Gordon, Sarah Gordon, Andy Haldane, Reiner Haus, Andrew Heald, Neil Hume, Michael Lodge, David Mapstone, Brian Menell , Chris Miller, Simon Moores, Bram Murton, Malcolm Penn, Jose Ignacio Perez, Simon Price, Andrew Rabeneck, Caspar Rawles, Matt Ridley, Vaclav Smil, Jonathan Spencer, Judy Stevenson, Ricky Tite, Frances Wall và Giles Wilkes. Xin gửi lời cảm ơn đặc biệt tới Jamie Bell, Andrew Bloodworth, Richard Davies, Richard Jones và Rob West, những

người đã đọc qua một số bản nháp và đưa ra những lời khuyên cũng như chỉnh sửa cần thiết. Nhưng nếu có bất kỳ sai sót nào còn sót lại trong văn bản - và xét đến phạm vi rộng lớn của chủ đề trong Thế giới Vật chất, tôi sẽ rất ngạc nhiên nếu không có - thì chúng là của tôi và chỉ của riêng tôi thôi.

Ý tưởng cho cuốn sách này thực sự bắt đầu từ cuộc trò chuyện với người đại diện của tôi, Jonathan Conway, người có một không hai. Chúng tôi không có quan hệ họ hàng nhưng có chung họ, một tình bạn lâu dài và bây giờ là dự án mới nhất này, mà tôi hy vọng anh ấy cũng tự hào như tôi. Tôi phải gửi lời cảm ơn to lớn đến Jamie Joseph và các đồng nghiệp tại WH Allen và Ebury vì đã giúp tôi biến những bản nháp còn non trẻ của mình thành một thứ giống như một cuốn sách. Xin cảm ơn công ty của tôi, Sky, đặc biệt là các ông chủ của tôi John Ryley và Jonathan Levy, những người đã cho tôi thời gian và sự hỗ trợ để thực hiện cuốn sách này, ngay cả trong những năm bận rộn nhất với tin tức mà bất kỳ ai trong chúng ta cũng có thể nhớ được. Cảm ơn và gửi lời xin lỗi đến các đồng nghiệp, những người đã phải chấp nhận những gì có vẻ giống như những bước đột phá ngày càng ngẫu nhiên để đề cập đến những chủ đề khó hiểu như cơ chế lọc dầu và sản xuất muối. Tôi hy vọng, nếu bạn đang đọc điều này, bạn sẽ thấy tất cả những điều ồn ào đó là gì!

Trên hết xin cảm ơn gia đình tôi. Cảm ơn Eliza, tình yêu của đời tôi, nguồn cảm hứng và hạnh phúc, là độc giả đầu tiên và sâu sắc nhất của tôi. Cảm ơn bạn các con gái của tôi, vì đã chịu đựng một người cha đã dành nhiều tháng trời chỉ viết lách thay vì chơi đùa với các con trên bãi biển hay trong vườn. Mỗi lần trở về sau chuyến đi dưới lòng đất hoặc trên biển, tôi đều mang về những thứ mà tôi sợ sẽ là món quà lưu niệm buồn thảm nhất: đá và đất, pha lê và bột lạ. Bạn xử lý chúng với sự ngạc nhiên và phấn khích đến mức nó nhắc nhở tôi nội dung thực sự của cuốn sách này: sự kỳ diệu được thể hiện trong những chất liệu tưởng chừng như đơn giản. Hóa ra đó lại là bài học truyền cảm hứng nhất.

Mục lục

Các tham chiếu trang trong chỉ mục này tương ứng với ấn bản in mà từ đó cuốn sách điện tử này được tạo ra và việc nhấp vào chúng sẽ đưa bạn đến vị trí trong sách điện tử nơi trang in tương đương sẽ bắt đầu. Để tìm một từ hoặc cụm từ cụ thể từ chỉ mục, vui lòng sử dụng tính năng tìm kiếm của trình đọc sách điện tử của bạn.

Tu viện trưởng Ernest 48 , 56
chất kết dính 345
máy móc nông nghiệp 201–2 , 441
càng đáp máy bay 225 , 229
Akhmetov, Rinat 209
Albemarle (công ty) 375
giả kim thuật 33
Alexander II, Sa hoàng 206
Alexander Đại Đế 136 , 144
Algeria: muối 133
Alibaba (công ty) 115
kiềm 154
Allende, Salvador 175 , 392
Almeria, Tây Ban Nha: nhà kính 350
mỏ phèn/mỏ phèn 125 , 220
nhôm 9 , 21 , 117 , 152 , 198 , 228 , 248 , 278 , 279–80
thêm vào thép 227
trong pin 408
và điện 257–8
và điện phân 263 *n*
tái chế 420
Amazon (công ty) 115
Mỹ *thấy* nước Mỹ
amoniac 10 , 173 , 188 , 275 , 342 , 432 , 433 , 438
Anaconda Copper (công ty) 281
Anderson, Philip 40
Anh-Mỹ (công ty) 187 , 188 , 189

Nghĩa trang Anglo-Saxon, Nhà phố 126
'Kỷ nguyên Angstrom' 91
khan 177
cực dương *nhìn thấy dưới* pin
than antraxit 219, 334
Anthropocene, thế kỷ 67, 359, 384
kháng sinh 152
thuốc chống trầm cảm 152
Antofagasta, Chi-lê 163, 169, 170, 285, 392
đường sắt 163–4, 168–9
Apple (công ty) 92, 119, 400, 403, 405
Vật liệu ứng dụng (công ty) 116, 119
Vịnh Ả Rập 315, 316
Aramco (công ty) 321, 358, 361
Argentina 384, 396
Aristote 275
ARM (công ty) 120
thạch tín 272, 273, 351
Tia chớp của Ashton, Cheshire 157
ASM Pacific (công ty) 119
ASML (công ty) 13, 93, 112–14, 119
Aspdin, Joseph 75, 80, 85
nhựa đường 8, 71, 331
aspirin 334
Sa mạc Atacama 163, 167, 169, 171, 174–5, 270, 271, 371, 375, 385, 387, 393
AT&T (công ty) 60
Đại Tây Dương 17, 135, 178, 262, 353
Xem thêm Dãy núi trung du đại dương
Trại tập trung Auschwitz 337
Úc 396
Thổ dân 235, 237–43
Giấc mơ 237–9
quặng sắt 233–5, 236–7, 238, 239–40, 243–4
mỏ spodumene (lithium nhôm silicat) 385, 412, 421, 423
Cầu Cảng Sydney 125

Nhà hát Opera Sydney 80
Xem thêm Pilbara,
Áo 119 , *xem thêm* Mỏ muối Hallein
Xem Công trình sắt thép Azovstal Mariupol

Babbage, Charles 90
Bagnold, Ralph 29 , 30
Bahrain: dầu 313
Thợ làm bánh, Laura 228
Baku, Azerbaijan: các mỏ dầu 312 , 335 , 337
Quần đảo Balearic 159
Ballard, Bob 291 , 301
bút bi 229–30
Bardeen, John 89 , 100
Đá phiến Barnett, Texas 322
Tập đoàn vàng Barrick 1 , 2–5
Barron, Gerard 299–301 , 304
BASF (công ty) 334 , 335 , 348 , 438
pin 13 , 17 , 21 , 34 , 244 , 253 , 287 , 293 , 353 , 377–80 , 397–8 , 407 , 429
cực dương 267 *n* , 327 , 332 , 380–81 *Và N* , 382 , 401 , 402 , 403 , 407 , 409 , 416
cực âm 380–81 *Và N* , 382 , 401 , 402 , 407 , 416 , 423
'lon Coca' 405 *Và N*
'thạch cuộn' 402 , 408 , 409 , 427
axit chì 378 , 379 , 381
lithium-ion 332 , 373 , 375 , 377 , 379 , 380–81 , 382–4 , 395–6 , 398 , 402–5 , 408–9 , 416 , 427 , 433
có thể sạc lại 293 , 379 , 381 , 382 , 402
tái chế 419 , 420–23
natri-ion 409
Bayer (công ty) 334
bãi biển, du lịch 68
Người Bedouin 75 , 309 , 310
sản xuất bia 218 , 219 , 220
Bêlarut: kali 180
Chuông, Alexander Graham 59–60

Phòng thí nghiệm Bell 60 , 89 , 100 , 102 *n* , 356
Điểm chuẩn khoáng sản thông minh 406
benzaldehyde 351
benzen 342 , 433
Berg, Ernie 309–10 , 313–14 , 315 , 321 , 323
Bergius, Friedrich 334–5 , 337 , 351
berili 52
Bessemer, Ngài Henry 200 , 248
Bộ chuyển đổi Bessemer 207 , 209 , 223
BHP Billiton (công ty) 237
Biden, Tổng thống Joe 17 , 119 , 320 , 321 , 325 , 330 , 411
Bihar, Ấn Độ 70
Billingham, Quận Durham: Nhà máy ICI 188 , 432
Mỏ đồng Bingham Canyon, Utah 268 , 281
ống nhòm 46 , 47 , 48 , 49–51 , 52
rối loạn lưỡng cực 376
bischofit 178–9
bitum 312
'người hút thuốc đen' *xem* miệng phun thủy nhiệt
khai thác khối 283 , 305
BMW (công ty) 407
Bolivia/Người Bolivia 169 , 170 , 265 , 392
Xem thêm Salar de Uyuni
borat 20 , 21
Borlaug, Norman 275
boron 8 , 20–21 , 372 , 376
Bosch, Carl 173 , 335
Xem thêm Quá trình Haber-Bosch
chai lọ nhựa 354 , 355 , 360
Boulby, Bắc Yorkshire 177 , 189
làm muối 125–7 , 128–9 , 131 , 134 , 144 , 155 , 177 , 190
Xem thêm Kali Cleveland
Boyle, Robert 37
Chóa phản quang Bragg 113
Brattain, Walter 89 , 100
Brazil 42 , 51 *n* , 187 , 222

nạn phá rừng 247
khai thác sắt 235 , 246–7 , 261 , 268
niobi 225
nhà máy bia 218 , 219 , 220
thợ làm gạch 219
cầu 80 , 81 , 114 , 125 , 149 , 198 , 200–1 , 203 , 210 , 225 , 229
cáp treo 225
nước muối
và làm phô mai 132 , 190
và quá trình cloralkali 151–2 , 190 , 395
và liti 372 , 375–6 , 394–5 , 421 , 423
và làm muối 130 , 131 , 144–6
và tro soda 190 , 351
lò xo 132 146–7
British Salt (công ty) 145–6 , 150 , 155 , 158 , 395
Hiệp hội Khoa học Anh 48–9
Thời đại đồ đồng 258–9
Brunner Mond (công ty) 335
Bruxelles
Cung điện Hoàng gia 413
tượng Leopold II 413 , 414 , 416 , 417
bọc bong bóng 354
Xây dựng, Heather 240
áo chống đạn 351 , 355
Burghausen, Đức 98
Burj Khalifa, Dubai 64
BYD (công ty) 401
ByteDance (công ty) 115

cadimi 52
Calama, Chi-lê 270 , 272 , 273
canxi 73 , 181
canxi cacbonat 82
canxi oxit 82
canxi silicat hydrat 73
caliche 168 , 169 , 171 , 175

Công ty Dầu Tiêu chuẩn Á Rập California 309
Trường Mỏ Camborne, Cornwall 437
Canada 42, 95, 147, 180, 330, 421
Quần đảo Canary 68, 179
chủ nghĩa tư bản 128, 129, 441
ngành công nghiệp ô tô/ô tô 9, 90, 246, 311, 398–9, 406
nhôm 248
điện 13, 15, 35, 58, 85, 269, 273, 287, 319, 332, 342, 375, 380, 381 *n*, 383, 385–6, 400, 403, 404–5, 406, 408, 409, 419, 421, 423
và thép 226–8
Xem thêm Ford, Henry
Mỏ sắt Carajás, Brazil 246–7
thu hồi và lưu trữ carbon (CCS) 82, 161, 188
carbon dioxide 9–10, 11, *xem* thu giữ cacbon; lượng khí thải carbon
lượng khí thải carbon
từ sản xuất xi măng 81, 82–5
loại bỏ/ròng số 0 269, 318, 367, 373, 430, 436–7, 442
và nhiên liệu hóa thạch 287, 324, 373, 398–9, 429–30, 434–5
từ nhà kính/nhà kính 349–50
và sản xuất sắt thép 197, 217
và sản xuất túi giấy, ống hút 359–60
và chip silicon 97
Xem thêm khí nhà kính
sợi carbon 247–8
Cát Caribe 32
cacnalit 178
Carnegie, Andrew 207, 237, 281
băng cassette 401
Cassiodorus 133
vật liệu hoạt tính catốt 398, 407, 408, 411, 412, 419
cực âm
đồng 267 *Và N*, 284, 285, 392
xem thêm bên dưới pin
CATL (Công ty TNHH Công nghệ Amperex đương đại) 13, 402, 406, 407, 408, 409, 410, 421
xút 152, 153, 190, 263 *n*

CCS *xem* thu hồi và lưu trữ carbon
xenlulo 356
Bộ lạc Celtic/Người Celt 144, 146–7, 161, 259, 266
xi măng 9, 41, 71–2, 73, 75–9, 84, 100, 115, 340
và lượng khí thải carbon 81, 82–5
Portland 75, 80, 83, 84, 85
Xem thêm bê tông
CFC *xem* clorofluorocarbon
Thời kỳ đồ đá 258
chalcopyrit 294, 304
phấn 73, 76, 81
Kẻ thách thức, HMS 291, 292, 301
Chañaral, Chi-lê 273
Anh em nhà Chance, Smethwick 48, 52, 55
Chang, Morris 108, 116
than củi 218, 219, 220, 222
Charles I của Anh 165
phô mai/làm phô mai 128–9, 131, 132, 134, 190, 353
đá phiến 233
Cheshire
cây phân bón 10
ngành muối 143, 145–51, 154–5, 157, 158–62, 177, 180, 183, 184, 206, 219, 395
Xem thêm Công nghiệp hóa chất hoàng gia
Chevron (công ty) 309
Chilê 371, 391–3, 396
sản xuất đồng 259, 261, 288, 301; *Xem thêm* Chuquicamata
và khai thác biển sâu 301
iốt 176
sản xuất liti 384, 385, 391–3, 395; *Xem thêm* Salar de Atacama
ngành công nghiệp nitrat 170–73, 174–6, 393
diêm tiêu 175–6, *xem thêm* Chiến tranh diêm tiêu
Xem thêm Antofagasta
Trung Quốc/Trung Quốc 37, 65, 95, 119, 120, 135–6, 235, 236, 396
sản xuất bút bi 229–30
sản xuất pin 406, 407, 409–10, *xem thêm* CATL

nhiệt điện than 363
bê tông 80, 85
luyện và tinh chế đồng 261, 267, 269
và khai thác biển nước sâu 297, 298
Bài giảng về muối và sắt *137*, *191*
xe điện 404
thuốc nổ 120, 168
nạn đói 205
Quan Tử *136*
thiếu iốt 137–8
ngành sắt thép 203, 205, 207, 213, 217, 218, 229, 231, 244, 247
liti 385
nhựa 359
tái chế pin 421–2
hồ muối 385
làm muối 147, 313
độc quyền muối 135, 136–8
diêm tiêu 164
và khai thác cát 69–70
sản xuất chip silicon 34, 99, 104–5, 106, 114–16
tòa nhà chọc trời 78, 79–80, 234
điện thoại thông minh 92
và Hoa Kỳ 104, 115, 205, 207, 411
Tập đoàn Công nghiệp Muối Quốc gia Trung Quốc 138
Quần đảo Chincha 165–7, 172, 275, 298–9
quá trình cloralkali 151–3, 156, 190, 395
clo/khí clo 128, 152, 153, 157, 174, 263 *n*, 390, 428, 433
chlorofluorocarbons (CFC) 318, 341 *n*
diệp lục 166, 349
cloroquin 152
crom 21, 225, 277–8
Chuquicamata, Chi-lê 265–6, 269–71, 304, 305
mỏ đồng 171, 266–7, 268, 269, 270, 271–2, 273, 274, 280, 281–3, 284, 285, 288, 294, 304, 305, 327
đập chất thải (Talabre) 272–3
Vùng Clarion-Clipperton (Thái Bình Dương) 293, 294, 298, 302

Clayton, Pat 30 , 31
Bãi biển Cleopatra, Anatolia 32
Cleveland Potash (công ty) 180–81
khai thác polyhalite 181–7
Khí hậu 82
biến đổi khí hậu 15 , 65 , 66 , 81–6 , 305 , 311
Xem thêm lượng khí thải carbon
màng bám 354
Câu lạc bộ Rome 276 , 294
Giới hạn cho sự tăng trưởng 276 , 277 , 279–80 , 286 , 321
Clydach, Wales: nhà máy lọc niken 261
than 15 , 16 , 20 , 22 , 82 , 196 , 198 , 215 , 216 , 219–22 , 228 , 268 *n* , 317 , 319 , 334 , 363 , 434
máy móc chạy bằng than 202 , 257
Xem thêm than cốc
tàu chở than 219–20
coban 15 , 17 , 21 , 149 , 253 , 411 , 412 , 415–16 , 417 , 419 , 443
trong pin 408 , 409 , 416
dưới biển 293 , 294 , 300
Cochrane, Chúa Thomas 265
Codelco (công ty) 13 , 270 , 283
than cốc/than cốc 95 , 215 , 219 , 220 , 222 , 311 , 353 , 433–4
coca kim 331–2 , 382
lò nướng 210 , 213 , 222 , 231 , 332
Colbert, Jean-Baptiste 139
Khoáng sản Compass (công ty) 158 , 159
chip máy tính 8 , 90 , 91 , 93 , 107 , 116 , 118 , 203 , 230 , 411
Intel 90 , 112
Xem thêm Chip silicon
máy tính 9 , 34 , 37–8 , 90 , 91 , 117 , 119 , 274 , 426–7
bê tông 6 , 8 , 40 , 41 , 67 , 71 , 72–4 , 75 , 77 , 78 , 79 , 80 , 377 , 425 , 429 , 442
và biến đổi khí hậu 81–6
cốt thép ('cốt thép') 81 , 198
Rô-ma 75 , 85 , 340
và nước 84

Bê tông 84
Condori, Pamela 388–9
Khổng Tử 137 , 275
Congo, Cộng hòa Dân chủ 413–14 , 415
coban 149 , 293 , 294 , 415–16
đồng 268 , 415
Mỏ Kamoa-Kakula 304
Mỏ Katanga 415–18 , 420
Liên minh Miniière du Haut-Katanga 415–18
mỏ uranium 415
Cook, Thuyền trưởng James 220
đồng 7 , 15 , 16 , 17 , 18 , 170 , 171 , 182 , 243 , 253–4 , 258 , 277–8 , 279–80 , 287–9 , 303–5 , 373 , 377 , 416 , 417 , 4 29 , 437 , 441
và đồng 258–9
cực âm 267 *Và N* , 284 , 285 , 392
'tập trung' 267
và điện 6 , 22 , 89 , 253 , 254–5 , 256–8 , 263 , 264 , 287–9
điện phân 262–3 , 267 *n* , 285
rửa trôi đống 272 , 303
và nam châm 254
khai thác 258 , 259 , *xem thêm* Chuquicamata
đỉnh 280 , 285 , 294
tái chế 420
dự trữ 285–6
tài nguyên 286
nấu chảy và tinh chế 260–61 , 267
trữ lượng dưới biển 293 , 294 , 295 , 296 , 300
dây điện thoại 60
giao dịch 259–61
trong tuabin 257
và chất thải 287 , 300 , 304
Tuổi đồng 258
'Người đồng' 266 , 280
Corning (công ty) 8 , 9 , 59 , 61
Người dồi dào 276 , 279
Cornwall: khai thác đồng và thiếc 259 , 260 , 280 , 437

Phà Corran, Scotland 42
Corran Narrows, Scotland 57
Cort, Henry 220
Mỏ vàng Cortez, Nevada 1 , 2–5 , 13 , 267 , 269 , 272
COVID-19 8 , 9 , 20 , 91 , 211 , 319 , 358
Crete: muối 133
Crookes, Ngài William 172
dưa chuột đang phát triển 346
xyanua 2 , 3
Síp 133 , 258 , 278
Czochralski, ngày 102 tháng *1 năm*
Quy trình Czochralski (CZ) 101–4 , 105 , 107 , 119 , 327

Damascus, Syria: 200 thanh kiếm
Darby, Áp-ra-ham 220
Davy, Humphry 262
Debruyne, Stefan 391
khai thác biển sâu 292–303 , 420
loài sinh vật biển sâu 301
Deere, John 202
nạn phá rừng 81 , 131 , 147 , 205 , 218 , 247 , 248 , 275 , 293 , 311 , 315
chất tẩy rửa 152 , 153 , 354
Xưởng muối Dharasana, Ấn Độ 142
diazomethane 350
diesel 331 , 345
khủng long 27 , 43
muối rửa chén 146
Ngân hàng Dogger/Doggerland 74
đôlômit 215 , 233
Donetsk, Ukraina 206
Dorador, Cristina 392–3
Dow (công ty) 155
thuốc/thuốc/dược phẩm 1 , 8 , 9 , 56 , 127 , 150–51 , 152 , 155 , 156 , 176 , 179 , 190 , 191 , 238 , 334 , 344 , 345 , 357 , 376 , 428 , 429 , 440
Dubai 64 , 65 , 66 , 74 , 266
thuốc nhuộm 218 , 219 , 220 , 334 , 345

thuốc nổ 168

Công ty Đông Ấn, Anh 165
kinh tế/nhà kinh tế học 1 , 5 , 6–7 , 10–11 , 14 , 17 , 19–20 , 36 , 52 , 56 , 82 , 120 , 204 , *218n* , 227–8 , 255 , 256 , 273–80 , 319 –20 , 335 , 365 , 367 , 420 , 423 , 424 , 428 , 438–9
Nhà kinh tế học, The 149–50 , 324
Edison, Thomas 76 , 77 , 262 , 263–4 , 279 , 288 , 377 , 378–9 , 380
Người Ai Cập cổ đại: ướp xác 312
Ehrlich, Paul 274 , 275 , 276–9 , 284 , 285 , 304 , 326
Quả bom dân số 274–5 , 276 , 277
Eiffel, Gustav 200 , 201 *n*
Tháp Eiffel, Paris 200–1
Einstein, Albert 21
Eisenhower, Dwight D. 336
xe điện (EV) 400–1
Xem thêm ô tô, điện
điện 7 , 21 , 22 , 37 , 53 , 89 , 97 , 251–3 , 255–7 , 305 , 377–8 , 431 , 435
dòng điện xoay chiều 264
và đồng 6 , 22 , 89 , 253 , 254–5 , 256–8 , 263 , 264 , 287–9
và ánh sáng 255
và động cơ 21 , 256
và vật liệu cách nhiệt bằng polyetylen 351–3
cáp quang biển 434
Xem thêm pin ; xe điện
điện phân 262–3 *Và N , 267 n* , 432
điện từ 151–2 , 254 , 262
điện hóa 284 , 303
Elkem (công ty) 96
Engels, Friedrich: Tuyên ngôn của Đảng Cộng sản 276
động cơ đốt 317–18
Sự giác ngộ, số 37
nhựa epoxy 355–6
Muối Epsom 178
Espindola, Cơ-đốc nhân 389
Esso 380

etan 315
etylen 344 , 351 , 357 , 358
EUV *xem* cực tím
Nhóm EV 119
Evans, Joe 145 , 146
Xe điện *nhìn thấy* xe điện
thuốc nổ 168 , 169 , 170 , 173 , 188
ánh sáng cực tím (EUV) 112–14 , 116 , 442
ExxonMobil 380

Chất bán dẫn Fairchild 89 , 112
Faraday, Michael 37 , 53 , 257 , 262
Fawcett, Eric 351 , 352 , 358
Ferrocarril de Antofagasta ở Bolivia (FCAB) 163–4
Ferroglobe (công ty) 95 , 97
phân bón 10 , 20 , 22 , 61 , 201 , 203 , 311 , 344 , 345
amoniac 188 , 432
Caliche 375 , 430
xanh 432 , 434
phân 166–7 , 275 , 299
từ khí tự nhiên 348–9 , 430
nitrat/nitơ 166 , 170 , 172 , 173–4 , 176 , 275 , 299 , 348–9
polyhalit 181–2 , 187
kali 179
thiếu 180
cáp quang 7 , 8 , 425
sợi thủy tinh 8 , 248 , 356
Fiji 301
Phần Lan
tháp bê tông 83
mỏ đồng 182
cá biển sâu 301
áo khoác 354
hương liệu 345
Fletcher, Seth 373
Floyd, George 414

flo 52
thông lượng 39, 56–7, 153, 190, 215, 429
Fontainebleau, Pháp: cát bạc 42, 56, 66
Ford, Henry 226–7, 281, 405, 421, 427, 428
Model Ts 227
Rừng Dean 218 *n*
Forstemann, Robert 256
Cầu Forth, Scotland 200, 201
'trầm tích hóa thạch' 68
nhiên liệu hóa thạch 6, 15, 16, 20, 22, 317, 319, 328, 399, 430
tòa nhà với 433–4
Xem thêm than; dầu; khí đốt, tự nhiên
Foxconn (Tập đoàn công nghệ Hon Hai) (công ty) 118, 119
fracking 322–5, 365
Pháp 57, 129, 174, 221–2, 414
và khai thác biển nước sâu 298, 301
và kính và dụng cụ quang học 35, 48
muối 130, 138–9, 140, 147, 154
Franz Ferdinand, Đại Công tước Áo 47, 48
Friedland, Robert 253, 304
Friedman, Milton 11
Fuding, Trung Quốc: *xem nhà máy sản xuất pin* CATL
điểm sáng 31

Gait, Paul 284
Rạn nứt Galápagos 291
Galileo Galilei 36
Gandhi, Mohandas ('Mahatma') 140–42, 147, 155
sông Hằng, sông 165
Gary, Indiana: Thép Hoa Kỳ 208
gas 198, 257, 313
hóa lỏng 364
tự nhiên 7, 10, 22, 313, 315, 318, 321–2, 348–9, 363–7, 429, 430, 434
xăng *xem* xăng dầu
GDP *xem* Tổng sản phẩm quốc nội

GEM (công ty) 421–2
General Electric (công ty) 257
General Motors (GM) 340–41, 407
máy phát điện 255, 257, 262, 263, 264, 273, 279, 284, 288, 377, 433
Genova, Ý
Cầu Giorgio 210
Cầu Morandi 81
nhà máy địa nhiệt 257
Germani 89, 100, 117, 262, 416
Người Đức/Đức 28–9, 47, 152, 173, 174, 196, 256, 259, 298, 350, 365, 414, 438
xi măng 76, 77
than 334
và thuốc nổ 173, 174
và phân bón 172–4
thủy tinh và thiết bị quang học 48–50, 51, 52, 53, 54, 55–6, 93, 381
sắt thép 225, 230, 231, 365
và dầu 333, 335–9; *Xem thêm* Wesseling
sản xuất kali 56–7, 180
muối 98, 132, 139, 147
chip silicon 96, 97–8, 103, 113
cát bạc 42
Mỏ dầu Ghawar, Ả Rập Saudi 314–17, 320, 321, 322, 323, 324, 325, 326, 329, 358, 362, 364, 366
Gibson, Reginald 351, 352, 358
Gigafactory Nevada 399–400, 403–4, 405, 406–7, 408, 422
Gilf Kebir, Ai Cập: Đá sa thạch Paleozoi 31
Glasgow 156
thủy tinh/làm thủy tinh 8, 9, 21, 31, 35, 36–7, 46–7, 51, 52–3, 54, 127, 219, 426, 429, 440
borosilicat 8–9, 11, 48
sợi thủy tinh 8
đá lửa (tinh thể chì) 53–4
và các thông lượng 39, 56, 153, 190, 215, 429
Tiếng Đức *nhìn dưới* người Đức/Đức
phát minh/chế tạo 38–41

chì borosilicat 53
Sa mạc Libya 30 , 31 , 33
và liti 376–7
và chiết suất 53–4
silic 59
và tro soda 154
soda-vôi (vương miện) 39 , 54
cửa sổ kính màu 39–40
cấu trúc của 39–40
và thuế 55 , 56
nhà kính/nhà kính 36 , 347–8 , 349–50
Liên minh Pin Toàn cầu 420–21
sự nóng lên toàn cầu 315 , 318 , 340 , 430–31 , *xem thêm* khí nhà kính
GM *xem* Động cơ chung
đá lửa 43
Goethe, Johann Wolfgang von 56
khai thác vàng/vàng 1–2 , 182 , 243 , 268 *n* , 269 , 279–80 , 416 , 419
dưới biển 293
Xem thêm Mỏ vàng Cortez
Goldman Sachs 253
Gondwana 94
Đủ tốt, John B. 381–2 , 383 , 408
Google 115
graphene 443
Trung tâm Đổi mới Kỹ thuật Graphene, Manchester 84
than chì 353 , 382 , 409 , 411 , 433 , 434
Mỏ Grasberg, New Guinea 283–4
sỏi 8 , 73 , 74 , 94 , 198
Đứt gãy Great Glen, Scotland 42–3 , 57
Biển Cát Lớn, Sahara 28–30 , 31 , 66
sao băng tấn công 27 , 30 , 43 , 59
khí nhà kính 19 , 81 , 161 , 204 , 217 , 311 , 385 , 399 , 435
nhà kính *nhìn thấy* nhà kính
Gromort, Georges 71
tổng sản phẩm quốc nội (GDP) 7 , 14 , 16 , 52 , 88 , 197 , 203 , 224 , 439
Mỏ dầu Grozny, Nga 337

Quan Trung 136
phân 166–7 , 275 , 299
Đạo luật Quần đảo Guano (1856) 299
Guérande, the, Pháp: muối 130 *n*
Guevara, Ernesto 'Che' 281
Guggenheim, Daniel 171 , 174
Guggenheim, Harry 171
Guggenheims, 281
Guinea: quặng sắt 247
thuốc súng 164
ống ngắm 46 , 47 , 48 , 50
gutta-percha 352 , 356

Haber, Fritz 173 , 174 , 334
Quy trình Haber-Bosch 173–4 , 176 , 188 , 204 , 275 , 342 , 351 , 430 , 432 , 438
Haiti: Trận động đất 2010 80
halit 146 , 155 , 161 , 178 , 181 , 191 , 312
Mỏ muối Hallein, Áo 144 , 161 , 266
Dãy Hamersley, Úc 235–7 , 238
Brockman 4 (của tôi) 238–40
Xem thêm Hẻm núi Juukan
Hancock, Lang 235–6 , 237
Haradh, Ả Rập Saudi 309–10
Harcourt, William Vernon 52–3 , 55
Hartcup, chàng trai 51
Haus, Reiner 96 , 106
Hawaii 32 , 130 *n*
Hawthorne, Nevada 410 , 412
rửa trôi đống 272 , 303
hematit 234 , 236 , 238 , 247
Herbert, Frank 136
Herodotus 29
Heywood, Chris 158–9 , 160–61
Hicks, George 169
Đường cao tốc Anh 126

Muối Himalaya (Kewra) 130 *n* , 144 , 182
Hinkley Điểm C, Somerset 257
thay khớp háng 354
Hitler, Adolf 335–6 , 337 , 339
Người Hittite: đồ kim loại 199–200 , 217
Hoboken, Antwerp: Umicore 418–19 , 434
Hockney, David 37
Hooke, Robert 36 , 37
Hoover, Tổng thống Herbert 224
Đập Hoover, Nevada 73 , 80
Hornsea One, Biển Bắc 432
Hoshine (công ty) 104
Phiến quân Houthi 363
Howes, Anton 89
Đảo Howland 299
Hoàn nước Tề, Công 136
Huáscar (tàu) 170
Hughes, John James 206
Vòng Hula 353
Huxley, Aldous: *Thế giới mới dũng cảm* 188 , 432
Hyde, James Franklin 59 , 61
các miệng phun thủy nhiệt 15–16 , 292 , 315 , 316 , 365
Xem thêm than ; dầu ; khí ga
đập thủy điện 257 , 263 , 373
hydro 152 , 157 , 161 , 166 , 173 , 246 , 335 , 343 , 348 , 349 , 350 , 354 , 431–2
hydro clorua 98 , 120–21 , 190 , 428–9 , 442
hydro hóa 335 , 336 , 337–8 , 339
thủy canh 346–7
miệng phun thủy nhiệt ('khói đen') 291 , 294 , 295 *n* , 297 , 301 , 302
hypoclorit 153

Ibiza: làm muối 130 , 133 , 376
IBM (công ty) 117–18
Ibn Saud, Vua Abdul Aziz 362
ICI *xem* Công nghiệp hóa chất hoàng gia

IG Farben (công ty) 335
Công ty Hóa chất Imperial (ICI) 151 , 155 , 184 , 187 , 188 , 335 , 351 , 352 , 353 , 357 , 358 , 426 , 432
Chế tạo nano IMS 119
Người Inca 166 , 167
Ấn Độ
sản xuất muối 139–42
diêm tiêu 165
'mafia cát' 70
indi 443
Indonesia 10 , 66 , 66 , 221 , 267 , 283 , 293
cuộc cách mạng công nghiệp 18 , 36 , 153 , 156 , 219 , 317
Ineos (công ty) 151
Inovyn (công ty) 151
cách điện, điện 351–3 , 356
Intel (công ty) 90 , 91 , 114 , 115 , 118
Chương trình khám phá đại dương quốc tế (IODP): Nhiệm vụ Atlantis Massif 292
Cơ quan quản lý đáy biển quốc tế (ISA) 296–8 , 299 , 301 , 302
Trạm vũ trụ quốc tế 59
internet, số 7 , 8 , 37 , 59 , 60 , 115 , 211
iốt 168
iốt 137–8 , 176
iPhone 274
I-ran 313 , 322 , 362 , 363 , 364 , 365
I-rắc 313
khai thác sắt/sắt 15 , 16 , 17 , 20 , 22 , 46 , 67 , 99 , 125 , 137 , 156 , 195–8 , 199 , 200 *Và N* , 201 , 203 , 205–6 , 213 , 217–21 , 243 , 278
gang 199 , 202
gang 199 , 215 , 216 *Và N* , 218 , 220 , 222–3
sắt rèn 199 , 200 , 201 *n* , 228
Xem thêm Mariupol ; Cảng Talbot ; thép ; *và dưới đây*
Thời đại đồ sắt 18 , 125 , 126 , 127 , 218
quặng sắt 184 , 198–9 , 206 , 208 , 210 , 216 , 232 , 235 , 245 , 246–7 , 261 , 268 *Và N* , 271 , 278 , 281 , 439–40
Xem thêm Dãy Hamersley ; Hẻm núi Juukan ; Pilbara

oxit sắt 44 , 73 , 130 *n* , 216
bàn là, quần áo 251–2
đá sắt 177 , 188 , 234 , 238 , 239 , 241 , 244
Irwin, Edward Wood, Chúa 141
ISA *xem* Cơ quan đáy biển quốc tế

Jackling, Daniel C. 281
Thung lũng Jadar, Serbia 386
jadarit 386
James Cook , RRS 290–91 , 292 , 298
Nhật Bản/Nhật Bản 120 , 197 , 213 , 230 , 231 , 234 , 236 , 244 , 313 , 336 , 352 , 381 , 382 , 421
công ty 58 , 101 , 266 , 383 , 400 , 401 , 404 , 406
Quận Jefferson, Texas: dầu 312
'thạch cuộn' 402 , 408 , 409 , 427
máy bay phản lực 30 , 125
động cơ phản lực/máy bay phản lực 92 , 225 , 255 , 311 , 317 , 331 , 434
Jetti (công ty) 304 , 305
Jevons, William Stanley: 'Nghịch lý Jevons' 227–8 , 245
Joralemon, Ira 279
JSR (công ty) 119
Jutland, Trận chiến (1916) 52
Hẻm núi Juukan, Úc 238–42

Kao, Ngài Charles 59 , 60 , 61
Kay, John: tàu con thoi 89
tảo bẹ 153 , 179 , 180
dầu hỏa 312 , 317 , 329 , 331 , 434
Keynes, John Maynard 5
Khashoggi, Jamal 320
Mỏ muối Khewra, Pakistan 144
nhìn thấy muối Himalaya
lọc thận 155
Kieserit 178
lò quay 76–7
Mỏ Kiruna, Thụy Điển 247
thay khớp gối 354

Komatsu (công ty): xe tải 266–7
Hàn Quốc, Nam 244
và khai thác biển sâu 298
xe điện 404
nhà sản xuất chip silicon 212
Kryptonite 386
Kryvyi Rih, Ukraina: magnetite 247
Kurlansky, Mác 133–4 *n*
Cô-oét: dầu 313
Kuznets, Simon 439
Kiev, Ukraine: Sân vận động Olympic 210

Laelianus, Hoàng đế 126
Lâm Nghiên cứu (công ty) 119
Laurasia a94
dẫn 3 , 273 , 340–42 , 418
đường cong học tập, 427–8
Leblanc, Nicolas 154 , 156
Leeuwenhoek, Antonie van 36
Leftwich, Cheshire 147 , 148
ống kính 36 , 37 , 46
Leonardo da Vinci 37
bản phác thảo máy bay trực thăng 90
Leopold II, vua Bỉ 413–14 , 416
Le Play, Frédéric 260
rau diếp, trồng 346
Công trình Leuna, Đức 337 , 338
Đá gneis Lewisian 43
LG Chem (công ty) 401
Lý Khắc Cường 229
Li-Cycle (công ty) 421
'Con tàu tự do' 229
Thư viện 152
ánh sáng, điện và 255 , 263
bóng đèn 263 , 264 , 429
than non 334

đá vôi 39 , 73 , 76 , 81 , 82 , 84 , 85 , 154 , 219
limonit 234
Linto Crystal (công ty) 119
Lipetsk, Nga: khối nhà cao tầng 83
Lippe, Đức: cát bạc 42
liti 8 , 17–19 , 22 , 52 , 170 , 188 , 189 , 243 , 244 , 372–3 , 376–7 , 411 , 437
chiết xuất và tinh chế 13 , 15 , 384–96
tái chế 419 , 420 , 421 , 424
Xem thêm pin ; Salar de Atacama
liti cacbonat 396 , 412
liti clorua 376
oxit liti coban (LCO) 408
lithium ferro-phosphate (LFP) 408
lithium hydroxit 395 , 412 , 419 , 423
Liverpool 147–8
Lochaline, Scotland: cát bạc 41 , 42 , 44–5 , 57–8 , 66 , 95 , 158
Lockheed Martin (công ty) 298
Nhà nghỉ, Michael 298 , 302
London
Bến Canary 74
bê tông 74
Cầu vượt Hammersmith 81
Công trình sắt Millwall 206
Mảnh vỡ 210
Louis XIV của Pháp 139
Louis XVI của Pháp 154
Bảo tàng Louvre: kim tự tháp 42
Lovelace, Ada 90
Lübeck, Đức 132
Lumumba, Patrice 417

Maastricht, Hà Lan: cát bạc 42
Macfarlane, Alan 37
Macron, Emmanuel 301 , 325
magiê 53 , 181 , 372 , 375 , 385 , 390
magie clorua 178–9

từ tính 234 , 247
nam châm 225 , 254 , 257
Công trình Sắt thép Magnitogorsk, Nga 207–8 , 212 , 247
Mỏ dầu Maikop, Nga 337
Malaysia 51 *n* , 65 , 118 , 231 , 352 , 356
Malé, Maldives 65
Mallorca: làm muối 130 , 133
Malthus, Thomas: Tiểu luận về nguyên tắc dân số 275–6
Người Malthus 276 , 279
mangan 15 , 196 , 411 , 419
thêm vào thép 225 , 227 , 228
trong pin 408 , 409
dưới biển 293 , 300
Mao Trạch Đông 137 , 205
Mỏ Marandoo, Úc 243
María Elena, Chile 171–2
Mariupol, Ukraina 83 , 209 , 210–11
Công trình Gang thép Azovstal 195 , 196 , 199 , 208 , 209–10 , 211 , 212–13 , 222 , 247
Nhà máy thép Ilych 196 , 209
đá cẩm thạch 145 , 146
Sao Hoả
Cồn cát Bagnold 30
limonit 234
Martin, Gerry 37
sản xuất hàng loạt 224 , 226 , 281
phân tích dòng nguyên liệu 16
thuốc *xem* thuốc
Biển Địa Trung Hải 130 , 140 , 159 , 178 , 258 , 362 , 376 , 427
Đồng bằng sông Cửu Long 68–9 , 435
thủy ngân 2 , 3 , 156 , 157 , 421
Merthyr Tydfil, xứ Wales: xưởng sắt 206
Dãy Mesabi, Minnesota 237 , 281
Công ty kim loại, The 300
sao băng 27 , 30 , 31 , 43 , 59 , 178 , 217
mêtan 315 , 346

México
liti 392
dầu 320 , 329 , 330
kính hiển vi 36 , 91
Microsoft (công ty) 115
Mid-Atlantic Ridge 290–92 , 294–6 , 298 , 302
và Thành phố đã mất 292 , 302–3
Middlewich, Cheshire 147 , 148 , 158
Midgley, Thomas 340 , 341
Đảo san hô Midway 299
Mikimoto, Kokichi 313
Milch, Nguyên soái Erhard 337–8
Miller, Chris 116
Minerali Industriali (công ty) 58
trường khai thác mỏ 259 , 437
Mỏ đồng Ministro Hales, Chile 272
gương 36–7
Mitchell, George P. 321–3 , 324
Moe, Håvard 96 , 97
Mohammed bin Salman, Hoàng tử thứ 320
Mol, Bỉ: cát bạc 42
molypden 53 , 113 , 225 , 272
Mông Cổ: Mỏ Oyu Tolgoi 304
Moore, Gordon 90 , 112
Định luật Moore 109 *Và N* , 117 , 274 , 284 , 426
Maroc 68 , 179
Morton (công ty) 144–5
Bán đảo Morvern, Scotland 43–4 , 57
động cơ điện 256 , 263 , 273 , 287
Mỏ vàng Mponeng, Nam Phi 182
Mull, Đảo 44
Thợ làm kính Murano, Venice 35 , 40
Murton, Bram 292 , 295–6 , 301
Musk, Elon 399 , 400 , *xem thêm* Tesla
Mussolini, Benito 337

Na'aman, 39
Naidu, Sarojini 142
công nghệ nano 88 , 91 , 118 , 228 , 232 , 440 , 443
Nantwich, Cheshire 147 , 148
naptha 357
Napoléon Bonaparte 139
Chiến tranh Napoléon 35
natron 39 , 56–7 , 153
Nauru 300
Nautilus (công ty) 299–300
neodymium 21 , 253
Thời kỳ đồ đá mới 126–7
làm phô mai 128–9
làm muối 127 , 128 , 129–31 , 134 , 144 , 155
neon 209 , 212
Hà Lan 42 , 65 , 66 , 74 , 119 , 120 , 147 , 347
Tia chớp của Neumann, Cheshire 157
Newcomen, Thomas 221
Newton, Isaac 37
Newyork
Bảo tàng Lịch sử Tự nhiên Mỹ 266
bê tông 74
Corning 59
điện 262 , 264
Gigafactory 399
Hudson Yards, Manhattan 210
Bang New York 132 , 144 , 148 , 157 , 399
Thời báo New York *325*
Người New York *235*
Thác Niagara: đập thủy điện 263
Nicastro, số 347 , 349
Nicholas I, Sa hoàng 148 , 158 , 206
niken 17 , 53 , 253 , 261 , 273 , 277–8 , 411 , 412 , 419
thêm vào thép 225
trong pin 408 , 409
dưới biển 293 , 294 , 300

Niemeyer, Oscar 80
Nigeria
dầu 321 , 331 , 333 , 342
muối 134–5
Nikopol, Ukraine 196
niobi 117 , 225
nitrat 168 , 169 , 170–76 , 275 , 281 , 299 , 334 , 393 , 432
amoni 241
kali 164
natri 168
tổng hợp 174 , 335
axit nitric 168
nitơ 166 , 173–4 , 176 , 179 , 181 , 275 , 334 , 348 , 349 , 351
nitroglycerin 168
Nixon, Tổng thống Richard 321
Nobel, Alfred 168
Nordhaus, William 255 , 263
Bắc Carolina, tiền điện 252
North Field (khí tự nhiên) 364–5
Northvolt (công ty) 401
Northwich, Cheshire 147 , 148 , 154–5 , 426
Thuyền nâng Anderton 155
Noyce, Robert 89 , 112
Phân NPK 179
NSG (công ty) 58
ô nhiễm hạt nhân 230
khai thác hạt nhân 303
nhà máy điện hạt nhân 257 , 376 , 431 , 434
Nudds, Đồng minh 45–6
Nvidia (công ty) 108
nylon 355

hắc thạch 30 , 31
Odisha, Ấn Độ: xưởng muối 140
O'Higgins, Bernardo 393
dầu 15 , 16 , 17–19 , 22 , 179 , 198 , 279–80 , 363–8 , 430

thùng 329–30 *n*
thô 310 , 311–16 , 317 , 318 , 319 , 320–21 , 323 , 324 , 325–6 , 328 , 329 , 434
và các giải pháp thay thế xanh 342–3
và khoan ngang 323
hydro hóa 334–5 , 337
Maya thô 329
Dầu thô Merey 329
chỉ số octan 339
máy móc chạy bằng dầu 202
đỉnh 335
và vòm muối 312–13
ngọt/chua/nhạt/nặng 329–32
Xem thêm Ả Rập Saudi
nhà máy lọc dầu 327–9 , 330–32 , 345 , 360
Xem thêm Wesseling
Mỏ muối Marston cũ, Cheshire 148
sợi quang 60–61
Ørsted, Hans Christian 262
Người Ostrogoth 133
máy chuyển đổi oxy 223

bao bì 345
nhựa 346 , 353–4 , 356
Palau 301
paladi 21
Cây cọ Jumeirah, Dubai 74
Kênh đào Panama 281
Panasonic (công ty) 400 , 401 , 402 , 404 , 405 , 407 , 408 , 409
Pangea 177 , 291
sản xuất giấy 152 , 153 , 190
Papua New Guinea 299–300
Parma, Ý 132
phân cá vẹt 32
Patton, Tướng George S. 336
ngọc trai 313

Pechmann, Hans von 350
Pedro de Valdivia, Chi-lê 175
bút chì 10–11
ớt trồng 346
kính tiềm vọng 46 , 48
Lưu vực Permian, Texas 324–5
Vịnh Ba Tư 313
Xem thêm Ả Rập Saudi
Perth , HMAS 231
Peru/Người Peru 165 , 167 , 169 , 170 , 175 , 259 , 260 , 288 , 299 , 316
xem thú cưng polyetylen terephthalat
petermen 165
hóa dầu 320 , 328 , 331 , 344 , 345 , 358 , 363 , 432
xăng/xăng 319–20 , 331 , 334 , 336 , 345
dẫn trước 340–42
chỉ số octan 339 , 340
Petty, William 276 , 439 *n*
dược phẩm *xem* thuốc
Dầu mỏ Phillips 353
Nhà máy lọc dầu Humber 331–2 , 382
Người Phê-ni-xi 39 , 56–7 , 58 , 130 , 376 , 427
phốt pho 179
quang khắc 111
quang hợp 166 , 347 , 349
Pico Sacro, Tây Ban Nha 93–4
Pilbara, Úc 233–5 , 237 , 243 , 244 , 245 , 246
Xem thêm Hẻm núi Juukan
Pilkington (công ty) 58
Pinochet, Augusto 175 , 391
đường ống 76 , 210 , 225 , 318 , 362 , 364
Planté, Gaston 378 , 379 , 382
túi nhựa 354 , 358 , 359–60
chai nhựa 354 , 355 , 360
ống nhựa 354 , 355
nhựa 20 , 33 , 152 , 328 , 331 , 344 , 345 , 350–51 , 359–60 , 443
hạt vi nhựa 359

tái chế 360
nhiệt rắn 356
nhựa nhiệt dẻo 356
Xem thêm polyeste ; polyetylen (polythene) ; polyme ; polypropylen ; nhựa vinyl
bạch kim 21
Plato 275
Pliny Già 38 , 39 , 427
Mỏ dầu Ploiesti, Romania 337
máy cày 201–2 , 223 , 441
Ba Lan
khai thác biển sâu 302 , 303
mỏ muối 144
polyeste 356 , 360
polyetylen (polythene) 350–55 , 356 , 358 , 359 , 426 , 435
polyetylen terephthalate (PET) 360
polyhalit 181–7 , 188 , 189
polyme 354–5 , 356 , 360
nốt đa kim 292–3 , 294 , 295 , 297 , 300
polypropylen 355
polysilicon 97–9 , 100–2 , 104–5 , 120–21
polystyren 355
polythene *xem* polyetylen
polyvinyl clorua (PVC) 152 , 355
Ponce Lerou, Tháng Bảy 175 , 176
Cảng Hedland, Úc 244
Port Talbot, Wales: ngành sắt thép 214–16 , 217 , 218 , 222 , 225–6 , 228 , 231–2 , 244 , 246
Xi măng Portland 75 , 80 , 83 , 84 , 85
kali 56–7 , 179–80 , 182 , 187 , 376
kali 179 , 372 , 375 , 376 , 390
kali clorua 179
kali nitrat 164
thợ gốm 219
trạm điện 95 , 98 , 198 , 210 , 257 , 262 , 263 , 264 , 288 , 443
Xem thêm nhà máy điện hạt nhân

Prat, Arturo 170 , 265
chất bảo quản 345
Hoàng tử xứ Wales , HMS 231
lăng kính, thủy tinh 36 , 37
Dự án SLOOP 303
propan 315
Vịnh Prudhoe, Alaska 320
Puutu Kunti Kurrama 238 , 239 , 240 , 241 , 242–3
PVC *xem* polyvinyl clorua
Pyrex 8 , 59

Qatar 345 , 363–5
Qualcomm (công ty) 108 , 118
Bộ xử lý lượng tử 117
thạch anh 31 , 40 , 41 , 87 , 94–7
và nồi nấu kim loại Czochralski 105–7
Tập đoàn Thạch Anh 106
thạch anh 12 , 53 , 95 , 120
vôi sống 82

Rackham, Oliver 218 *n*
hệ thống radar 352–3 , 358
hạt nhân phóng xạ 230
đường ray, tàu 198 , 201 , 225 , 234 , 244–5
Rankin, Maurice 187–8 , 189–90
Ras Laffan, Qatar 363–5
Ras Tanura, Ả Rập Saudi 361–3
Ravenscroft, George 35 , 53 , 207
Đọc, Leonard: 'Tôi, Bút Chì' 10 , 11
tái chế 245–6 , 360 , 419–23 , 424
Nhà máy thép Redcar 188
Nguyên liệu gỗ đỏ (công ty) 421
Phục hưng, 36–7
Đẩy lui , HMS 231
nhựa 345 , 420 , 433
rhodi 21
Rinehart, Gina 236

Río Grande, Chi-lê 388
Rio Tinto (công ty) 236, 237, 238, 239–43, 247, 259, 386
Roberts, Thống chế Frederick Roberts, Bá tước thứ nhất 49
robot 111, 113, 226, 274, 404
Rockefeller, John D. 335, 344, 351, 358
Rohlfs, Gerhard 28–9, 30
Rô-ma 38, 54, 125, 126, 133, 340
bê tông 75, 85, 340
khai thác đồng và thiếc 259, 284
đường 132
muối/làm muối 127, 132, 135, 136, 146–7, 155
Rommel, Nguyên soái Erwin 336
Ronbay Technology (công ty) 408
Lực lượng Không quân Hoàng gia 338, 339, 352–3
Hải quân Hoàng gia
tàu đáy đồng 259–60, 261
tàu ốp sắt 206
tàu gỗ và cột buồm 218
Hiệp hội Hoàng gia 148
cao su 50–51
Bóng bầu dục: nhà máy xi măng 76–7, 82
Runcorn, Cheshire: làm muối 151–2, 153
Nga/Liên Xô 206
và khai thác biển nước sâu 297, 298
cuộc xâm lược Ukraine *xem* Ukraina
ngành sắt thép 206, 207–8, 212
dầu khí 319, 320, 322, 324, 330
sản xuất kali 180
đường sắt 208
Khí Siberia 364, 365

SABIC (công ty) 358
Nhà máy Sabón, Tây Ban Nha 95–7
Sahara, Tây 68, 179
Salar de Atacama, Chilê 371–2, 374–5, 384, 385, 389, 390, 398, 423–4

Salar de Uyuni, Bolivia 372 , 384–5 , 410
Salar del Carmen, Chilê 393–5
muối/làm muối 12 , 15 , 17–19 , 22 , 127–31 , 143–4 , 146 , 168 *n* , 190–91 , 219 , 372 , 374–5 , 395 , 428–9
và ngành hóa chất/dược phẩm 150–51 , 152–3 , 155–6 , 191
ở Trung Quốc 135–8
quá trình cloralkali 151–3 , 156
và điện phân 263 *n*
và nhấp nháy 157
hoa bách hợp 130 Và N , 376
ở Pháp 138–9
để mài đường 160–61 , 162
Himalaya (Kewra) 130 *n* , 144
ở Ấn Độ 139–41
và dầu 312–13
tuyến đường và thương mại 131–5
mỏ dung dịch 144–5 , 147 , 150 , 158–61
bảng (natri clorua) 22 , 127 , 130 *n* , 151 , 168 , 176
thuế 138–9
vũ khí hóa 135
Xem thêm diêm tiêu
hồ muối 372 , 384 , 385
Liên minh muối, Cheshire 149–50
diêm tiêu 162 , 164–5 , 166 , 175 , 179
Chiến tranh Saltpetre/Chiến tranh Thái Bình Dương (1879–83) 168–70 , 175 , 265 , 267 , 392
Salus 155
Salzach, sông 98
Samsung (công ty) 114
Thợ làm kiếm samurai 200
cồn cát 28 , 29–30
cát 7–8 , 15 , 16 , 17–19 , 21–2 , 31–3 , 62 , 66 , 70–71 , 198 , 435
tòa nhà trên 63–4
xây dựng 73 , 74 , 85–6
'trầm tích hóa thạch' 68
và kính 30 , 35 , 38–41 , 42 , 46 , 71

thạch anh 44 , 57–8 , 87–8 , 120
và quy định 66–7 , 68 , 69
và sông 68–9
silic/bạc 41–2 , 71 , 153 , 219 , 220 ; *Xem thêm* Lochaline
Santiago de Compostela, Tây Ban Nha 93
Sanyo (công ty) 401–2
Sardinia: muối 133
Ả Rập Saudi
dầu 309–10 , 313–15 , 316–17 , 318 , 320 , 321 , 324 , 325–6 , 329
Xem thêm Ras Tanura
Tiết kiệm, Thomas 221
Schleiden, Matthias Jakob: *Das Salz* 139
Schott, Otto 48 , 52 , 54 , 93 , 154 , 376–7 , 381
Khoa học (tạp chí) 277 , 280
Scott, Ridley: *Á quân Blade* 328
biển 297
khai thác biển sâu 292–303 , 420
rong biển 153
thuốc an thần 152
SEH (chi nhánh Shin-Etsu của Hoa Kỳ) 101
Cồn cát Seif 29–30
chất bán dẫn 9 , 89 , 91 , 92 , 100 , 209 ; *nhìn thấy* Chip silicon
Bài Giảng Trên Núi 63–4
Mỏ thạch anh Serrabal, Tây Ban Nha 94–5 , 106
Shagang (công ty) 13 , 207
đá phiến 177 , 233 , 322 , 323 , 330 , 360
Thượng Hải, Trung Quốc 234 , 399
Shaw, Steve 184–6
Thép Sheffield 229
Nhà máy lọc dầu Shell, Đức 343
Sherlock, Steve 125–7 , 128–9 , 130 , 131 , 177
Quần đảo Shetland: cá tuyết muối 132
Shin-Etsu (công ty) 101 , 103 , 105
tàu/đóng tàu 210 , 290 , 291
than 220
container 51 , 440

và nhiên liệu 317 , 318 , 434
thép 228–9 , 231
VLCC 361–2 , 440
Xem thêm Hải quân Hoàng gia
Shockley, William 89
Người Shoshone, miền Tây 2 , 3 , 17 , 237
Sibelco (công ty) 105–6
Siemens quy trình 98 , 100 , 121 , 190
silica (silicon dioxide) 31 , 32 , 33 , 34 , 38–9 , 95
Xem thêm cát , silic
silicon 8 , 12 , 31 , 33 , 35 , 40 , 73 , 88–9 , 100 , 113 , 225 , 227 ; *và xem bên dưới*
cacbua silic 58
chip silicon (chất bán dẫn) 8 , 9 , 11–12 , 17 , 21 , 34 , 88 , 93–7 , 117 , 127 , 190 , 212 , 274 , 425–6 , 442
kim loại silicon 95 , 96 , 97 , 98 , 433
silic tetraclorua 59
Thung lũng Silicon, California 92
tấm silicon 12 , 88 , 89 , 93 , 106 , 101 , 103 , 105–6 , 107 , 110–14 , 116–17 , 118 , 119 , 120 , 188 , 262
bột kết 177 , 233
bạc 258 , 416 , 418 , 419
Simmons, Matt: Hoàng hôn trên sa mạc 325–6
Simon, Julian 274 , 275 , 276 , 277 , 278 , 279 , 326
Singapore 66 , 103
Sirius (công ty) 187
Skinningrove, Bắc Yorkshire 93 , 131
tòa nhà chọc trời 78 , 79–80 , 225 , 234 , 245 , 256
điện thoại thông minh 12 , 33 , 34 , 88 , 90 , 91 , 92 , 117 , 244 , 332 , 383–4
pin 353 , 381 *n* , 383 , 402–3
luyện kim 97 , 217 , 218 , 219 , 258 , 260 , 261 , 267 , 422 , 433 , 440 , 442
SMIC (công ty) 114
Mỉm cười, Vaclav 98–9
Smith, Adam: Sự giàu có của các quốc gia 428
xà phòng 152 , 153

tro soda 153–4 , 155 , 157 , 179 , 190 , 351 , 395
natri 372
natri bicarbonate 155 , 351 , 395
natri clorua 127 , 134 , 150 , 168 *Và N* , 174 , 175 , 178 , 374 , 375 ; *nhìn thấy* muối
natri hydroxit *xem* xút ăn da
natri nitrat 168
tấm pin mặt trời 15 , 104 , 190 , 257 , 288 , 319 , 373 , 399 , 409 , 427 , 436
tái chế 420
Solidia (công ty) 85
Solvay, Ernest 156
Quá trình Solvay 154 , 179
Sony (công ty) 383 , 401
Liên Xô *xem* Nga
Tàu con thoi 59
Tia lửa, Nevada 397–9
kính 36
mỏ spodumene (lithium nhôm silicat) 385 , 412 , 421 , 423
Quần đảo Trường Sa 65
Mỏ thông vân sam, Bắc Carolina 105–7
SQM (Sociedad Química y Minera de Chile) (công ty) 175–6 , 375 , 376 , 389 , 390 , 391 , 393–6
Stalin, Joseph 207–8
Standard Oil (công ty) 335 , 344 , 351
Phòng thí nghiệm viễn thông tiêu chuẩn (STL) 59 , 60 , 61
Công Ty TNHH Điện Thoại Và Cáp Tiêu Chuẩn 60
động cơ hơi nước 221 , 256 , 318
tua bin hơi nước 257
thép/nhà máy thép 6 , 7 , 9 , 12 , 18 , 20 , 34 , 125 , 156 , 196–8 , 201 , 203–6 , 209 , 214 , 222–4 , 230 , 232 , 244 , 247–8 , 426 , 429
thêm hợp kim 224–6
và công nghiệp ô tô 226–8
hàm lượng cacbon 199
'sắt khử trực tiếp' 246
xanh 245 , 246 , 247 , 432
Cầu Forth, Scotland 200

và phát thải khí nhà kính 204
nền thấp 230–31
bột 229
tái chế 245–6 , 419–20
và đóng tàu 228–9
không gỉ 21 , 225
kiếm 199–200
dụng cụ và máy móc 202
đúc chân không 229
'vani' 224 , 228
Xem thêm Mariupol
Steineke, Tối đa 310
STL *xem* Phòng thí nghiệm viễn thông tiêu chuẩn
(các) viên đá 15 , 16 , 19 , 73–4 ; *Xem thêm* sỏi
Straubel, JB 400 , 421
ống hút nhựa 359 , 360
Street House, Bắc Yorkshire: Nghĩa trang Anglo-Saxon 126
sunfat 168
sunfua, đáy biển 295 , 299
lưu huỳnh 164 , 181 , 220 , 223 , 228 , 321 , 329 , 364
Khai thác kim loại Sumitomo 407–8
chuỗi cung ứng 9 , 11–12 , 17 , 437–40
Bờ biển, Florida 81
Thiên Nga, Joseph 263
Swansea, Wales: nhà máy luyện đồng 260–61 , 262 , 263
Thụy Điển
thép bọc thép 229
Mỏ sắt Kiruna 247 , 271
Kopparberg 259
thiếu bê tông 84
kiếm 199–200 , 225
sylvit 179 , 180 , 181
Syracuse, New York 132 , 148 , 157

chất thải 270 , 272 , 293 , 300
Đài Nam, Đài Loan 107–8

Đài Loan 34 , 59 , 65 , 107 , 115 , 116 , 119 , 120 , 148
Công ty Sản xuất Chất bán dẫn Đài Loan (TSMC) 13 , 93 , 108–10 , 112 , 114–15 , 116 , 119 , 120 , 128 , 212
Tata Chemicals (công ty) 155 , 357 , 358
TDK (công ty) 402
Mòng két, Gordon 102 *n*
các mảng kiến tạo 42–3 , 178 , 291
Tees, sông 188 , 189
Teesside 10 , 155 , 187 , 188 , 189 , 328 , 358
tektites 31
kính thiên văn 36 , 48 , 49
Cuộc chiến mười xu *xem* Chiến tranh diêm tiêu
Tenabo, Núi, Nevada 2 , 3 , 13
TenCent (công ty) 115
Tennessee: điện 251 , 255
Tesla, Nikola/Tesla (công ty) 58 , 264 , 399 , 403 , 407 , 421 , 427
Gigafactory Nevada 399–400 , 403–4 , 405 , 406–7 , 408 , 422
Texas
fracking 322–4
Gigafactory 399
dầu khí 321 , 322 , 330 , 335
Lưu vực Permi 324–5 , 365
năng lượng gió 431
Dụng cụ Texas 108 , 115 , 118
Theophilus Presbyter 200 *n*
nhựa nhiệt dẻo 356
Nhà máy thép ThyssenKrupp 207
Thiên Tân, Trung Quốc 78–9
Goldin Finance 117 ('Gậy đi bộ') 79 , 80
Tierney, John 325–6
TikTok 115
thiếc 21 , 219 , 259 , 277–8 , 416
và đồng 258–9
Titanic , đánh chìm tàu 228-9
Titusville, Pennsylvania: dầu 312
Tokyo 65 , 234

Tokyo Electron (công ty) 119
cà chua, đang phát triển 345–8 , 349–50
Xé, Corrado 390
Vũ khí Townshend, Cheshire 149
đồ chơi bằng nhựa 354
xe lửa
hệ thống phanh 41–2
Xem thêm đường ray, tàu hỏa
máy biến áp 225 , 254 , 288 , 429 , 436
bóng bán dẫn 89 , 90 , 91 , 93 , 99–100 , 109 *Và N* , 112 , 429
triti 376
Trump, Donald 204 , 205 , 411
Trumpf (công ty) 93 , 113
Tskitishvili, Enver 195 , 210 , 211 , 212 , 213
TSMC *xem* Công ty Sản xuất Chất bán dẫn Đài Loan
dư thừa 226
vonfram 53 , 277 , 278
Tupperware 354
tua-bin 257 , 435–6
Xem thêm tua bin gió
Thổ Nhĩ Kỳ 47 , 95 , 217 , 225 , 258
boron 20
crom 225
Tàn tích đồ đá mới 75
cát 32
Kho báu của Tutankhamen
dao găm 217
bọ thủy tinh 217
vòng cổ 27–8 , 30 , 217
TWINSCAN NXE:3600D 112–13
Cầu Tyne 125

U Thant 276
thang đo Udden-Wentworth 32–3 , 95
Ukraina
Trung đoàn Azov 211 , 212

xi măng 83
ngành than 208
Đức xâm lược (1941) 196
ngành sắt thép 206 , 208–9 , 247 ; *Xem thêm* Mariupol
sản xuất neon 209
Cuộc xâm lược của Nga (2022) 19 , 20 , 161 , 180 , 195 , 210 , 225 , 292 , 319 , 350 , 365 , 438
Umicore (công ty) 418–19 , 421 , 422–3 , 434
Công ước Liên Hiệp Quốc về Luật Biển 297
Liên minh Miniière du Haut-Katanga 416–18
Chương trình Môi trường Liên Hợp Quốc 70
nước Mỹ
trục 224
và Trung Quốc 104 , 115 , 205 , 207 , 411
Nội chiến 135
khai thác đồng 261 , 268 , 284 , 303
và khai thác biển sâu 298
điện 251–2 , 255 , 256 , 262 , 263 , 264
Cơ quan Bảo vệ Môi trường (EPA) 3
Cơ quan quản lý đường cao tốc liên bang 80–81
Cục Quản lý Thực phẩm và Dược phẩm 354
Khảo sát địa chất 286
fracking 322–5 , 365
xâm lược Okinawa (1945) 213
ngành sắt thép 207 , 208 , 224 , 237 , 244–5
công nghiệp dầu mỏ 312–13 , 320–21 , 330 , 335 , 339–42
và Dự án SLOOP 303
mỏ muối/buôn bán muối 132 , 144–5 , 148 , 155–6 , 157
và Ả Rập Saudi 320–21
khoáng sản dự trữ 410–12
Dự trữ xăng dầu chiến lược 161
Chiến tranh giành độc lập 135
Xem thêm Texas ; Utah
uranium 53 , 243 , 257 , 415 , 416 , 434
Thép Mỹ 208 , 237 , 246
Utah

mỏ đồng 268
Hồ Muối Lớn 372

Vale (công ty) 247 , 261
Vali 152
Vườn ươm ở Thung lũng, Thung lũng Lea 347–8
vanadi 53 , 225 , 227
vancomycin 152
Veeco (công ty) 119
Venezuela: dầu 321 , 329 , 330
Venice 40–41
Thợ làm kính Murano 35 , 40
buôn bán muối 132–4
máy quay phim 383 , 401
Việt Nam 68
vinyl 355
Vitruvius 340
VLCC (tàu chở dầu thô rất lớn) 361–2
Volkswagen (công ty) 407
Volta, Alessandro 377–8

Wacker (công ty) 13 , 97–8 , 205
Wald, George 276
Xứ Wales
nhà máy luyện đồng 260–61
ngành sắt thép *xem* Cảng Talbot
nhà sản xuất chip silicon 212
Walkley, Brant 83
Walraven, Veronique 46
Chiến tranh Thái Bình Dương *xem* Chiến tranh diêm tiêu
Warmingham, Cheshire 143 , 145–6 , 149–51
máy làm mềm nước 146
Watson-Watt, Ngài Robert 353
Watt, James: động cơ hơi nước 221
Thợ dệt, Neil 101 , 103–4
Thợ Dệt, Sông 155 , 357
Webb, Brad 240

WeChat (công ty) 115
Nhà máy lọc dầu Wesseling, Cologne 327 , 330 , 332–3 , 334–5 , 337 , 338 , 342–3 , 344 , 431–2 , 434
Westinghouse, George 262 , 263 , 264 , 288
Cá voi lưng trắng, Mount, Úc 234 , 237
cá voi, tinh trùng 311 , 312
Whan-O (công ty) 353
lúa mì 275 , 348 , 441
Whitby, Bắc Yorkshire 1887, 188 , 189
Mỏ polyhalit thợ rừng 187–8
Whittingham, Stan 380 , 381 , 383
Wickham, Henry 51 *n*
Mỏ muối Wieliczka, Krakow, Ba Lan 144
Wilkinson, John 221
Sân quần vợt Wimbledon 187
tua bin gió 15 , 257 , 273 , 319 , 373 , 427 , 432 , 435 , 436
ngoài khơi 288 , 427 , 433 , 435
lưỡi tái chế 420
thuế cửa sổ 54–5
Winington, Cheshire: Phòng thí nghiệm ICI 357–8
Mỏ Winsford, Cheshire 158–9 , 160–61 , 181
gỗ 218 , 222 , 429
thiếu hụt 218 *Và N* , 219
Woodward, Harry Trang 235
Diễn đàn Kinh tế Thế giới (2015) 229
Chiến tranh thế giới lần thứ nhất 46–52 , 56 , 152 , 170 , 173 , 174 , 180 , 336 , 440
Chiến tranh thế giới thứ hai 57 , 134–5 , 195–6 , 211 , 225 , 229 , 299 , 333 , 336–9 , 352–3 , 410 , 439
Wotsits 146
Wright, Frank Lloyd 80
Wright, Theodore: Định luật Wright 427–8 , 429 , 437 , 442

Tập Cận Bình 119
Khu tự trị Duy Ngô Nhĩ Tân Cương, Trung Quốc 104

Sông Dương Tử 69–70

Yemen 320 , 363
Yoshino, Akira 382 , 383

Zambia: coban 294
Biển Zechstein 177 , 178–9 , 180 , 181 , 182
Zeiss, Carl 48 , 52 , 56 , 93 , 113 , 114 , 381
Tăng, Robin 409
kẽm 17 , 219 , 377 , 415
dưới biển 295

ĐÂY CHỈ LÀ SỰ BẮT ĐẦU

Tìm chúng tôi trực tuyến và tham gia cuộc trò chuyện
Theo dõi chúng tôi trên Twitter twitter.com/penguinukbooks
Thích chúng tôi trên Facebook facebook.com/penguinbooks
Chia sẻ tình yêu trên Instagram instagram.com/penguinukbooks
Xem các tác giả của chúng tôi trên YouTube
youtube.com/penguinbooks
Ghim sách Penguin vào Pinterest của bạn
pinterest.com/penguinukbooks
Nghe clip sách nói tại soundcloud.com/penguin-books

Tìm hiểu thêm về tác giả và khám phá
bài đọc tiếp theo của bạn tại penguin.co.uk

EBURY

Vương quốc Anh | Mỹ | Canada | Ireland | Úc
New Zealand | Ấn Độ | Nam Phi

Ebury là một phần của nhóm các công ty Penguin Random House có địa chỉ tại Global.penguinrandomhouse.com .

Được xuất bản lần đầu bởi WH Allen vào năm 2023

Bản quyền © Ed Conway, 2023

Quyền nhân thân của tác giả đã được khẳng định

Thiết kế bìa bởi Keenan

ISBN: 978-0-753-55918-5

Sách điện tử này là tài liệu có bản quyền và không được sao chép, sao chép, chuyển giao, phân phối, cho thuê, cấp phép hoặc trình diễn hoặc sử dụng công khai dưới bất kỳ hình thức nào trừ khi được nhà xuất bản cho phép cụ thể bằng văn bản, như được cho phép theo các điều khoản và điều kiện mà nó được mua hoặc được luật bản quyền hiện hành cho phép nghiêm ngặt. Bất kỳ sự phân phối hoặc sử dụng trái phép văn bản này có thể là hành vi vi phạm trực tiếp quyền của tác giả và nhà xuất bản và những người chịu trách nhiệm có thể phải chịu trách nhiệm pháp lý trước pháp luật.

Chú thích cuối trang

1: Người đồng tính Faber

fn1 Làm thế nào mà nước Anh lại thống trị thương mại cao su toàn cầu về cơ bản lại là câu chuyện về trộm cắp công nghiệp. Cho đến cuối thế kỷ 19, loại cao su được trồng thành công nhất, *Hevea brasiliensis* , có nguồn gốc từ Nam Mỹ. Nhưng vào năm 1876, Henry Wickham đã buôn lậu hàng chục nghìn hạt giống cây cao su đến Kew Gardens ở London. Chỉ một phần nhỏ trong số chúng nảy mầm nhưng những cây con thành công đó sau đó được vận chuyển đến các thuộc địa của Anh ở châu Á. Trong những năm tiếp theo, Malaya (nay là Malaysia) đã vượt qua Brazil để trở thành nước sản xuất cao su lớn nhất thế giới. Vụ 'trộm cao su' vẫn là nguyên nhân gây bức xúc ở Brazil hiện nay. Khi điều đó xảy ra, vụ trộm sẽ không thể xảy ra nếu không có kính, vì khi những cây con mỏng manh đó cuối cùng được chuyển đến châu Á, chúng chỉ sống sót nhờ được vận chuyển trong 'hộp Wardian' - một nhà kính di động làm bằng gỗ và thủy tinh.

3: Hành trình dài nhất

fn1 Một vấn đề khác với germanium là nó hơi khan hiếm, ít nhất là so với silicon. Trở lại năm 1947, sản lượng toàn cầu hàng năm chỉ là 6 kg.

fn2 Quá trình này, có vẻ như là Thời đại Không gian, thực ra được phát hiện vào năm 1916 bởi một kỹ sư người Ba Lan vô danh đang làm việc trong một nhà máy ở Berlin. Sau một ngày dài thí nghiệm, Jan Czochralski đang ngồi ở bàn viết các kết quả, thỉnh thoảng đổ đầy bút máy vào lọ mực. Trong một lúc lơ đãng, anh vô tình nhúng cây bút của mình không phải vào mực mà vào một chiếc nồi nấu thiếc nóng chảy gần đó, đã nguội đi sau một trong những thí nghiệm. Nhận ra sai lầm của mình, anh rút cây bút ra khỏi kim loại lỏng và ngạc nhiên nhận ra rằng ngòi bút dường như đã mọc ra một sợi kim loại dài và mỏng. Khi ông đến để kiểm tra sợi thiếc mỏng, ông nhận thấy một điều thậm chí còn đáng kinh ngạc hơn: nó hoàn hảo, theo đúng nghĩa đen. Kỹ thuật Czochralski đã bị lãng quên trong nhiều thập kỷ. Jan sau đó quay trở lại Ba Lan nhưng vào năm 1945, ông bị buộc tội - có vẻ như

là sai - vì cộng tác với người Đức. Khi các kỹ sư ở Mỹ đang nghiên cứu những bóng bán dẫn đầu tiên, Czochralski đã bị cảnh sát Ba Lan truy lùng. Năm 1954, một cựu kỹ sư của Bell Labs tên là Gordon Teal đã khám phá lại kỹ thuật của mình và chứng minh rằng bằng cách kéo từ từ một tinh thể silicon ra khỏi bể chứa chất liệu nóng chảy, bạn có thể tạo ra một tinh thể duy nhất có thể cắt thành những tấm wafer hoàn hảo. Thời đại silicon đã bắt đầu. Nhưng đã quá muộn đối với Czochralski. Anh ta đã chết vì một cơn đau tim sau một trong những cuộc đột kích của cảnh sát Ba Lan vào năm trước. Ông được chôn cất trong một ngôi mộ không tên.

fn3 Câu hỏi liệu định luật Moore có thực sự thực hiện được hứa hẹn của nó hay không và liệu nó có tồn tại lâu hơn nữa hay không, là một cuộc tranh luận sôi nổi và gây tranh cãi trong cộng đồng bán dẫn, càng trở nên phức tạp hơn bởi thực tế là có nhiều cách khác nhau để giải thích định luật 'luật' thực sự có nghĩa là. Nếu bạn đang nói về kích thước vật lý của bóng bán dẫn, chúng tiếp tục co lại, nhưng tốc độ co lại dường như đã chậm lại kể từ những năm 1990. Nếu bạn đang nói về mật độ bóng bán dẫn, hay nói cách khác là bạn có thể lắp bao nhiêu bóng bán dẫn vào một khu vực nhất định của con chip, một số người sẽ lập luận rằng bằng cách xếp chồng các bóng bán dẫn lên nhau, các nhà sản xuất chip đã tuân thủ luật pháp. Mặt khác, nếu bạn đang nói về tốc độ bộ xử lý, tốc độ cải thiện chắc chắn đã chậm lại trong những thập kỷ gần đây. Thay vì tập trung hoàn toàn vào tốc độ, ngày nay người ta nhấn mạnh nhiều vào việc hạn chế mức tiêu thụ điện năng cũng như tăng tốc độ của bộ xử lý. Xem Bản cập nhật *lộ trình quốc tế dành cho thiết bị và hệ thống năm 2021* của IEEE để biết thêm.

4: Tuyến đường muối

fn1 Mặc dù *hoa bách hợp* là loại muối đắt nhất nhưng nó không phải là loại muối tinh khiết nhất. Ngược lại, các vảy được đánh bắt từ bể muối có canxi và magie cùng với natri clorua. Trong phần lớn lịch sử, muối trắng thực sự tinh khiết là một mặt hàng quý giá, nhưng một trong những điều tò mò về khẩu vị hiện đại là chúng ta thường trả giá cao cho một thứ thực sự không tinh khiết, cho dù đó là muối xám của Guérande (màu xám từ vùng đất sét), muối núi lửa đen từ Hawaii

(màu đen từ than củi) hoặc muối Himalayan hồng (màu hồng từ oxit sắt).

fn2 Theo nhà sử học Mark Kurlansky: 'Giữa thế kỷ 14 và 16, thời kỳ Venice là cảng hàng đầu về ngũ cốc và gia vị, từ 30 đến 50% trọng tải hàng nhập khẩu vào Venice là muối. Tất cả muối đều phải thông qua các cơ quan chính phủ. Camera Salis đã cấp giấy phép cho các thương gia biết không chỉ họ có thể xuất khẩu bao nhiêu muối mà còn biết xuất khẩu ở đâu và với giá bao nhiêu. Cơ quan quản lý muối cũng duy trì các tòa nhà công cộng nguy nga của Venice và hệ thống thủy lực phức tạp giúp đô thị này không bị cuốn trôi. Diện mạo vĩ đại và được yêu mến của Venice, nhiều bức tượng và đồ trang trí ở đây đều được cơ quan quản lý muối tài trợ.' Mark Kurlansky, *Muối: Lịch sử thế giới* (Cổ điển, 2008).

6: Thuốc chữa cháy

fn1 Định nghĩa kỹ thuật về muối cũng bao quát như định nghĩa kỹ thuật về cát. Trong khi cát là bất kỳ loại hạt rời nào có kích thước nhất định, thì muối là bất kỳ hợp chất hóa học nào được tạo ra khi axit phản ứng với bazơ, nghĩa là có rất nhiều hợp chất. Và mặc dù ngày nay từ này chủ yếu có nghĩa là natri clorua, nhưng trong phần lớn lịch sử, muối là bất kỳ chất kết tinh màu trắng nào có vị thơm hoặc mặn.

7: Bạn Không Có Đất Nước

fn1 Một số hướng dẫn cổ xưa về cách chế tạo sắt và thép khá thú vị. Hãy xem xét điều sau đây từ một văn bản thế kỷ 11 về việc tôi luyện sắt, nói cách khác là tăng độ dẻo dai của nó: 'Hãy bắt một con dê đen ba tuổi và trói nó trong ba ngày trong nhà mà không có thức ăn; vào ngày thứ tư, cho anh ta ăn dương xỉ và không có gì khác… đặt anh ta vào một cái thùng đục lỗ ở đáy, bên dưới có lỗ đặt một bình khỏe mạnh khác để đựng nước tiểu của anh ta. Theo cách này trong hai hoặc ba đêm, thu thập đủ lượng này, lấy xô ra và ủ dụng cụ của bạn trong nước tiểu này. Dụng cụ bằng sắt cũng được tôi luyện trong nước tiểu của một cậu bé tóc đỏ cứng hơn so với trong nước đơn giản.” Văn bản từ Theophilus Presbyter (trích trong JE Gordon, *Khoa*

học mới về vật liệu bền: Hoặc tại sao bạn không rơi qua sàn (Penguin, 1991).

fn2 Tuy nhiên, điều thú vị là quyết định sử dụng sắt rèn của Eiffel còn có một lợi thế ngoài chi phí: sắt rèn thường chậm bị gỉ hơn nhiều so với thép, vì vậy nó có khả năng chống ăn mòn cao hơn so với sắt rèn của Scotland. Điều đáng nói là, tại thời điểm viết bài, các phương tiện truyền thông Pháp đang bày tỏ lo ngại về sự ăn mòn trên các dầm sắt của Tháp Eiffel - người ta cho rằng hậu quả của việc sơn kém trong nhiều năm.

8: Bên trong núi lửa

fn1 Tỷ lệ điển hình là 1,4 tấn quặng sắt và 0,8 tấn than cho mỗi tấn gang.

fn2 Liệu có bao giờ thiếu gỗ thật hay không vẫn còn là vấn đề gây tranh cãi. Các nhà kinh tế cho rằng có những dấu hiệu thuyết phục về sự thiếu hụt dữ liệu. Tuy nhiên, các nhà sử học lâm nghiệp, nổi bật nhất là Oliver Rackham, lại có quan điểm khác. Họ nói rằng mặc dù chắc chắn có tình trạng thiếu hụt ở phần lớn Trung Âu, nơi cây cối bị chặt để sử dụng làm nhiên liệu (và để cung cấp thêm không gian cho nông nghiệp), nhưng tập tục trồng và trồng lại cây của người Anh cổ xưa có nghĩa là ở Anh chưa bao giờ xảy ra tình trạng thiếu hụt nghiêm trọng. hoặc xứ Wales. Những khu rừng dành nhiều nhất cho đồ sắt, chẳng hạn như Rừng Dean, duy trì nguồn cung ổn định.

10: Điều tuyệt vời nhất tiếp theo

fn1 Cuộc cách mạng điện phân cũng tạo ra đủ loại khám phá và sản phẩm khác. Nhờ điện phân mà nhôm đã trở thành sản phẩm được sản xuất hàng loạt và muối đó có thể biến thành xút và clo, từ đó có thể dùng để tạo ra vô số sản phẩm khác.

11: Cái lỗ

fn1 Lý do chúng được gọi là 'cực âm', giống như điện cực trong pin, xuất phát từ thực tế là giai đoạn cuối cùng trong quá trình sản xuất chúng liên quan đến điện phân. Một khối kim loại khá tinh khiết (khoảng 95%) được nhúng vào bể điện phân và một dòng điện chạy

qua nó. Các nguyên tử đồng di chuyển từ khối nấu chảy (cực dương trong quá trình điện phân) sang điện cực khác, cực âm. Cuối cùng, bạn thu được đồng thậm chí còn tinh khiết hơn – nguyên chất khoảng 99,99%. Đây là quá trình họ thực hiện ở nhà máy lọc dầu Chuquicamata trên quy mô lớn.

fn2 Ở đây, dựa trên cấp độ trung bình của các kim loại này, là số liệu ước tính của tôi (dựa trên dữ liệu năm 2021 từ USGS và Hội đồng vàng thế giới) về lượng quặng được lấy ra khỏi lòng đất để theo đuổi các kim loại sau: vàng: 2.200 triệu tấn; sắt: 2.600 triệu tấn; đồng: 3.500 triệu tấn. Tuy nhiên, lượng đất được di chuyển lớn hơn nhiều, do những điều trên không tính đến đá thải, đây hoàn toàn là một vấn đề khác. Những con số này vẫn còn nhỏ hơn than đá (7.800 triệu tấn năm 2019) và dầu mỏ (4.400 triệu tấn).

12: Vực sâu

fn1 Ngược lại với những gì tôi viết ở trên, trong bất kỳ trường hợp nào, đừng cố gắng cắt bỏ một miệng phun thủy nhiệt bốc khói trực tiếp. Bỏ qua việc con dao của bạn có sống sót khi gặp phải khói 360°C hay không, đây là những môi trường năng động, không thể đoán trước, giàu đa dạng sinh học và hoạt động núi lửa. Một lần nữa, tất cả những điều này đều diễn ra ở độ sâu hàng nghìn mét dưới mặt nước, vì vậy khả năng bạn có thể cắt vào bất kỳ miệng phun thủy nhiệt nào là khá nhỏ.

14: Ống

fn1 Cách gọi chua ngọt không phải là truyền thống cổ xưa duy nhất còn tồn tại. Định nghĩa về những gì tạo nên một thùng dầu cũng có từ những ngày đầu khi dầu được chở ra thị trường bằng xe ngựa trong những chiếc thùng cũ thường dùng để đựng rượu vang, dưa chua, táo hoặc đinh. Những thùng này thường chứa khoảng 46 đến 50 gallon, nhưng sau khi cho phép bị đổ và rò rỉ trong những hành trình gập ghềnh này, các nhà tinh chế đã trả tiền cho các nhà sản xuất trên cơ sở rằng một thùng chứa 42 gallon dầu thô. Và biện pháp đó đã bị mắc kẹt.

fn2 Xăng pha chì không phải là món quà duy nhất của Midgley dành cho môi trường. Ông cũng tiếp tục phát minh ra chlorofluorocarbons (CFC) trong bình xịt và chất làm lạnh, chất này sau đó được phát hiện là đã đốt cháy một lỗ trên tầng ozone.

16: Vàng trắng

fn1 Trên thực tế, có một giả thuyết khác – nhưng hơi kỳ quặc – cho rằng pin đầu tiên trên thế giới trên thực tế đã có niên đại vài thiên niên kỷ trước thời Lưỡng Hà cổ đại. Vào những năm 1930, các nhà khảo cổ học đã phát hiện ra một bộ bình đất sét chứa một ống trụ bằng đồng mà một số người đưa ra giả thuyết có thể được sử dụng để mạ điện đồ trang sức hoặc thực sự là để giữ điện tích.
fn2 Bạn có thể nghĩ rằng pin trong điện thoại thông minh ở đâu đó trên hoặc gần người bạn là một vật trơ. Rốt cuộc, nó không rung hay kêu như động cơ xăng. Nhưng đừng để bị lừa; nó đang thay đổi hình dạng một chút ngay cả khi bạn đọc nó. Khi các ion lithium đó di chuyển qua cực âm, chúng làm thể tích của cực dương tăng lên khoảng 13%. Bạn không nhận thấy điều này khi bạn sạc điện thoại thông minh hoặc ô tô điện nhưng nó đang diễn ra, ở bên dưới bề mặt: xung điện hóa nhẹ nhàng này trong các thiết bị hàng ngày của chúng ta.

17: Bánh cuộn thạch

fn1 Nhân tiện, tôi không khuyên bạn nên mổ xẻ pin. *Đừng bao giờ* làm điều này: chúng thực sự là chất nổ có độ nổ cao. Tôi thật may mắn khi được nhìn thấy bộ phận bên trong của một cục pin không hoạt động trước khi nó được lắp ráp lần cuối.
fn2 Thuật ngữ kỹ thuật cho loại pin 'Ion Coke' này là 4680 cell - cái tên là số liệu thống kê quan trọng về hình dạng của hình trụ: đường kính 46mm và chiều cao 80mm. Các tế bào trong những chiếc Tesla đời đầu là 18650 (đường kính 18mm và chiều cao 65mm) trong khi những tế bào được sản xuất ở Gigafactory Nevada là 2170 tế bào - cao hơn và béo hơn một chút so với những phiên bản đầu tiên.

Phần kết luận

fn1 Thực tế là, nỗ lực của Kuznets nhằm tạo ra thước đo thu nhập quốc dân bản thân nó là tiếng vang của nỗ lực trước đó. Vào thế kỷ XVII, một nhà khoa học người Anh, William Petty, đã biên soạn những ước tính về dữ liệu kinh tế quan trọng cho Anh và xứ Wales. Một lần nữa, mục tiêu là đo lường khả năng tiến hành chiến tranh của đất nước, trong trường hợp này là Chiến tranh Anh-Hà Lan lần thứ hai năm 1665–7.