

A MATÉRIA DE TUDO

Doze Experiências Que Mudaram o Nosso Mundo



Autor: Suzie Sheehy

Edição e Preparação Digital: Gullan Greyl

Edição original: The Matter of Everything, 2022.

Edição portuguesa concluída em 31-01-2024



Livroteca Gullan Greyl

Sinopse

Em *A Matéria de Tudo*, Suzie Sheehy conduz-nos pela história das experiências que abriram a matéria e transformaram o mundo moderno. Dos tubos de raios catódicos aos aceleradores de partículas, da descoberta do elétron ao bóson de Higgs, a autora mostra como a física avançou não apenas através de grandes teorias, mas através de instrumentos construídos com engenho, persistência e curiosidade.

Ao longo de doze experiências decisivas, o livro revela como aquilo que parecia invisível — partículas, núcleos, quanta, neutrinos, quarks e campos — se tornou observável graças à criatividade dos físicos experimentais. E dessas descobertas nasceram tecnologias que hoje atravessam a nossa vida quotidiana: raios X, eletrónica, medicina de diagnóstico, computadores, comunicações, aceleradores, sensores e novas formas de investigar o Universo.

A Matéria de Tudo é uma viagem ao coração invisível da realidade: a história de como a humanidade aprendeu a desmontar a matéria, construir máquinas quase impossíveis e descobrir, no interior do átomo, não apenas os fundamentos do cosmos, mas também as bases do mundo em que hoje vivemos.

Esta edição foi preparada para formato digital, com intervenção ao nível da organização, revisão e uniformização do texto, de forma a assegurar clareza, consistência e legibilidade em ambiente de leitura eletrónica.

Foram realizadas correções pontuais sempre que necessário, respeitando integralmente o conteúdo e a estrutura da obra original.

O objetivo desta preparação é preservar a fidelidade ao texto, garantindo simultaneamente uma experiência de leitura fluida e acessível.

Gullan Greyl

*Não se trata de saber mais,
mas de ver melhor*

Índice

Introdução	1
PARTE UM.....	8
Desmantelar a Física Clássica	8
CAPÍTULO 1.....	9
O Tubo de Raios Catódicos: Os Raios X e o Eletrão	9
CAPÍTULO 2.....	38
A Experiência da Folha de Ouro: A Estrutura do Átomo	38
CAPÍTULO 3.....	65
O Efeito Fotoelétrico: O Quantum de Luz	65
PARTE DOIS.....	104
A Matéria para Além dos Átomos	104
CAPÍTULO 4.....	105
A Câmara de Neveiro: Os Raios Cósmicos e Um Chuveiro	105
de Novas Partículas	105
CAPÍTULO 5.....	143
Os Primeiros Aceleradores de Partículas: Partindo do Átomo.....	143
CAPÍTULO 6.....	183
Ciclotrão: A Produção Artificial de Radioatividade.....	183
CAPÍTULO 7	215
A Radiação do Sincrotrão: Uma Luz Inesperada.....	215
PARTE TRÊS.....	243
O Modelo Padrão e Mais Além.....	243
CAPÍTULO 8.....	244
A Física de Partículas Expande-Se: As Estranhas Ressonâncias.....	244
CAPÍTULO 9.....	282
Megadetectores: Descobrimos o Neutrino Esquivo.....	282
CAPÍTULO 10.....	312
Aceleradores Lineares: A Descoberta dos Quarks.....	312
CAPÍTULO 11.....	344
O Tevatrão: Uma Terceira Geração de Matéria	344
CAPÍTULO 12.....	385
O Grande Colisionador de Hadrões: O Bóson de Higgs e Mais Além	385
CAPÍTULO 13.....	421
Experiências Futuras.....	421
Agradecimentos.....	440

A MATÉRIA DE TUDO

*Doze Experiências Que
Mudaram o Nosso Mundo*

Suzie Sheehy

Introdução

Há alguns anos, sentada em frente ao ecrã de um portátil, fiquei a pensar numa pergunta aparentemente fácil que me fora colocada por quatro professores de Física de Partículas da Universidade de Oxford. Não retive os seus nomes, não porque estivesse nervosa, mas porque esta minha entrevista de doutoramento decorreria através de uma ligação de internet instável a partir de um quarto de motel no interior da Austrália. Eles tinham-me perguntado: «O que a fascina na física de partículas?»

Era decerto uma rasteira: as entrevistas de admissão em Oxford são famosas pela sua dificuldade. Naquele momento, decidi que o melhor era ser honesta. Contei-lhes o meu deslumbramento pela maneira como a física parece ser capaz de descrever tudo o que existe: das mais ínfimas partículas subatómicas aos átomos que constituem os nossos corpos e chegando às maiores escalas do Universo, bem como a forma como tudo isto está interligado.

A física de partículas, disse, era a base de tudo.

Cinco anos antes, estudava engenharia civil na Universidade de Melbourne. Nunca me tinha ocorrido que a física pudesse ser uma opção: embora gostasse da disciplina, só a encarava como uma etapa para uma carreira na engenharia. Porém, tudo mudou ao fim de um ano na universidade, quando os meus colegas e eu fomos convidados para o grande evento anual da Associação de Estudantes de Física: um acampamento de observação astronómica.

Numa sexta-feira à tarde saímos de Melbourne e, duas horas depois, chegámos a Leon Mow Dark Sky Site. A acidentada estrada de terra batida levou-nos até perto de uma construção com telhado de chapa onde descarregámos a cerveja e os telescópios. Depois, armámos as tendas perto de uma grande clareira. Conforme a luz ia desaparecendo, a temperatura descia e o som das cigarras enchia o ar. Para manter a visão noturna, usei um elástico do cabelo para fixar um pedaço de celofane vermelho na luz da minha lanterna. Enfiei-me no saco-cama, grata pela sua dupla função de fonte de calor e de barreira aos insetos. Inalei o aroma familiar dos eucaliptos. Depois olhei para cima.

«Ah está um!», gritou o homem ao meu lado, enquanto um meteoro riscava o céu. À medida que os meus olhos se habituavam à escuridão, revelava-se a verdadeira maravilha

do céu escuro daquele local. As conversas reduziram-se a sussurros e depois fez-se silêncio. Vénus desapareceu lentamente no horizonte e os outros planetas ficaram visíveis. Ao longo dessa noite, descobri o ritmo lento, mas em permanente transformação, do céu noturno. Graças aos telescópios dos meus amigos, avistei os magníficos anéis de Saturno, que conhecia de fotos, mas que me pareciam agora uma novidade singular observados através das lentes; as estrelas que se formavam em nebulosas repletas de poeira cintilante; e os agregados globulares, brilhando com milhões de estrelas, em órbita da nossa galáxia, a cem mil anos-luz de distância.

A imagem mais espetacular era a da faixa resplandecente de estrelas e poeira, o arco reluzente da nossa galáxia, a Via Láctea. Quando estamos no Hemisfério Sul, olhamos em direção ao centro da nossa galáxia em forma de disco. Encontramo-nos a cerca de dois terços da distância ao centro, na órbita da nossa estrela, também ela em movimento no seio da Via Láctea. A nossa galáxia percorre o espaço, integrada no seu grupo local de galáxias, a cerca de 600 quilómetros por segundo. Existem milhares de milhões de galáxias como a Via Láctea, além de estrelas e nebulosas, buracos negros e quasares, matéria resultante da transformação da energia ao longo de vastas extensões de espaço e de tempo.

Foi naquele instante que compreendi verdadeiramente a minha pequenez, a minha efemeridade e a dificuldade de descrever com palavras a grandeza do que via. As estrelas e os planetas não estavam *lá em cima*, nem eu estava *cá em baixo*: tudo fazia parte de um gigantesco sistema físico chamado Universo. Eu também fazia parte dele. Embora eu já o soubesse, até então nunca sentira realmente o meu lugar no Universo.

De súbito, nada mais tinha importância. Eu queria saber mais sobre gravidade, partículas, matéria escura e relatividade; sobre estrelas, átomos, luz e energia. Queria sobretudo saber de que modo tudo estava interligado e de que modo eu estava interligada com tudo. Queria saber se havia, de facto, uma teoria de tudo. Tinha o sentimento profundo de que tudo isto era importante, que era importante para a minha pessoa humana, e que aspirar a esse conhecimento era um objetivo tão grandioso que, mesmo que eu apenas conseguisse alcançar uma pequena porção dele, não teria desperdiçado o intervalo de tempo que me coubera viver como ser consciente. Resolvi dedicar a minha vida à física.

A meta da física é compreender a maneira como se comporta o Universo e tudo o que nele se encontra. Um dos caminhos para essa finalidade consiste em formular perguntas.

Conforme aprofundava o meu estudo da física, a pergunta que parecia estar no cerne de tudo era esta: «O que é a matéria, e como interage ela para criar tudo o que nos rodeia — incluindo nós próprios?» Creio que se tratava de uma tentativa de compreender o significado da minha existência. Em vez de estudar filosofia, adotei uma abordagem mais indireta: dediquei-me a tentar compreender o Universo inteiro.

Ao longo de milénios, os humanos formularam perguntas sobre a natureza da matéria, mas apenas nos últimos 120 anos essa curiosidade foi recompensada com respostas. Hoje, o nosso entendimento dos componentes ínfimos da natureza e das forças que os regulam é descrito pela física de partículas, um dos empreendimentos mais emocionantes, sofisticados e criativos em que a humanidade se aventurou. Hoje dispomos de um conhecimento profundo da matéria física do Universo e do modo como tudo se coordena. Descobrimos, há apenas algumas gerações, que a realidade possui uma riqueza e uma complexidade inimagináveis. Destronada a ideia de serem os átomos os constituintes mais pequenos do nosso mundo, descobrimos partículas fundamentais que não desempenham qualquer papel na matéria vulgar, mas que se revelam necessárias de acordo com a matemática que — de uma maneira algo milagrosa — descreve a nossa realidade. Em poucas décadas percebemos como se ajustavam todas as peças, da explosão de energia que deu início ao Universo até às medições mais precisas da natureza.

A nossa imagem dos constituintes mais pequenos da natureza conheceu uma variação rápida ao longo dos últimos 120 anos: da radioatividade e do eletrão ao núcleo atómico e ao campo da física nuclear, em conjunto com o desenvolvimento da mecânica quântica (que descreve a natureza à escala mais ínfima). Algures durante o século XX, este estudo passou a ser conhecido por «física das altas energias», conforme iam sendo descobertas novas partículas e o foco da atenção se afastava do núcleo atómico. Atualmente, o estudo da totalidade das numerosas partículas e da maneira como se formaram, se comportam e se transformam é designado simplesmente por física das partículas.

O Modelo Padrão da física de partículas classifica todas as partículas conhecidas na natureza e as forças pelas quais elas interagem. Foi desenvolvido por numerosos físicos ao longo de décadas e a nossa versão atual surgiu na década de 1970. Esta teoria é um triunfo absoluto: matematicamente elegante e incrivelmente exata, é de uma concisão admirável. Quando era estudante, fiquei impressionada pela maneira como o Modelo Padrão parecia descrever o funcionamento da natureza a um nível fundamental.

O Modelo Padrão explica-nos que toda a matéria que dá forma à nossa existência quotidiana é composta por apenas três partículas. Somos constituídos por dois tipos de quark, chamados «cima» e «baixo», que compõem os nossos prótons e neutrões. Estes dois tipos de quark, juntamente com os eletrões, constituem os átomos, cuja coesão é assegurada por forças: as forças eletromagnéticas e as forças nucleares fraca e forte. E é tudo. Nós e tudo o que nos rodeia somos isto¹. E, contudo, apesar de sermos compostos por nada mais do que quarks e eletrões, nós, humanos, conseguimos perceber que a natureza é *muito mais* do que isto.

O nosso triunfo ao nível do conhecimento não resultou apenas de avanços conceptuais e teóricos. O estereótipo do génio solitário, sentado à secretária, perdido em reflexões, é extremamente incorreto. Ao longo de mais de um século, perguntas como «o que há dentro do átomo?», «qual é a natureza da luz?» e «como evoluiu o nosso Universo?» foram abordadas pelos físicos numa perspetiva inteiramente prática. A razão pela qual podemos hoje dizer que sabemos todas estas coisas, que pensamos que os nossos modelos teóricos representam a realidade, não está na matemática atraente que desenvolvemos, mas sim nas experiências que realizámos.

Na infância, a muitos de nós foi ensinado que o mundo é composto por prótons, neutrões e eletrões, mas pouco foi explicado acerca do *modo* como aprendemos a conhecer a matéria e as forças, ou seja, tudo. Um próton é um milhão de milhões de vezes mais pequeno do que um grão de areia e está longe de ser óbvia a forma como manipulamos a matéria a escalas tão minúsculas. Eis a arte da física experimental: da semente de uma ideia germina a nossa curiosidade até se transformar num instrumento real para o estudo da física que, por sua vez, conduz à obtenção de novos conhecimentos. Naquela noite, no local de observação astronómica, a percepção de que gostava mais da física quando a experienciava em primeira mão fez-me querer ser uma física experimental.

Enquanto os físicos teóricos se deleitam com as possibilidades matemáticas, as experiências conduzem-nos a essa assustadora fronteira de vulnerabilidade a que chamamos mundo real. Esta é a diferença entre a teoria e a experiência. Enquanto as ideias de um físico teórico devem ter em consideração os resultados das experiências, o trabalho de um físico experimental possui mais matizes. Não se limita a verificar a validade das ideias dos físicos teóricos: formula perguntas próprias e concebe e constrói instrumentos com os quais possa verificar essas ideias.

O experimentalista deve compreender e conseguir utilizar a teoria, mas não pode ser constrangido por ela. Deve permanecer aberto à descoberta do inesperado e do desconhecido. Precisa também de compreender muitas outras coisas: o seu conhecimento prático vai da eletrônica à química, da soldadura ao manuseamento do nitrogénio líquido. Deve também saber conjugar estas aptidões para conseguir manipular a matéria que lhe é invisível. A verdade é que a experiência é uma tarefa árdua, que implica muitas falsas partidas e muitos fracassos. É necessário um determinado tipo de curiosidade e de personalidade para querer seguir este caminho. E, contudo, ao longo da história foram muitos os que tiveram a paixão e a perseverança necessárias para isso.

Ao longo do último século, as experiências realizadas pelos cientistas na física de partículas começaram com dispositivos que cabiam numa sala e podiam ser controlados por apenas uma pessoa. Hoje utilizam as maiores máquinas à superfície da Terra. A Era da «Grande Ciência», que começou na década de 1950, conduziu a experiências que envolvem a colaboração de mais de uma centena de países e de dezenas de milhares de cientistas. Construímos colisionadores de partículas subterrâneos, compostos por muitos quilómetros de equipamento eletromagnético de elevada precisão, utilizados em projetos que duram mais de 25 anos e custam milhares de milhões de dólares. Atingimos um estágio em que nenhum país consegue, a título individual, alcançar estas proezas.

Em simultâneo, as nossas vidas quotidianas sofreram uma transformação igualmente acentuada. Em 1900, a maior parte dos domicílios estava a 20 anos de ter eletricidade, os cavalos eram o principal meio de transporte e a longevidade média no Reino Unido ou nos Estados Unidos da América era inferior a 50 anos. Hoje vivemos mais tempo, em parte porque, quando adoecemos, o hospital dispõe de equipamentos de ressonância magnética, de tomografia computadorizada e de tomografia por emissão de positrões que permitem diagnosticar as doenças, bem como de uma diversidade de medicamentos, vacinas e aparelhos de alta tecnologia para tratamento. Para comunicar, temos computadores, a World Wide Web e *smartphones*, responsáveis pela criação de indústrias e de modos de trabalho completamente novos. Os próprios objetos que nos rodeiam foram concebidos, ampliados e potenciados com recurso a novas tecnologias, desde os pneus dos automóveis até às pedras preciosas da joalheria.

Quando pensamos nas ideias e tecnologias que moldam o mundo moderno, raramente as associamos à trajetória paralela da física experimental, mas elas estão intimamente

relacionadas. Todos os exemplos referidos resultaram de experiências pensadas para conhecer melhor a matéria e as forças da natureza — e são apenas uma pequena amostra. No intervalo de apenas duas gerações, aprendemos a controlar átomos individuais para construir dispositivos computacionais tão pequenos que só com dificuldade o microscópio consegue visualizá-los; a aproveitar a natureza instável da matéria para diagnosticar e tratar doenças; e a examinar o interior das pirâmides da Antiguidade usando partículas de energia elevada vindas do espaço. Tudo isto é possível graças à nossa capacidade de manipular a matéria à escala dos átomos e das partículas, um conhecimento que resultou de investigação movida pela curiosidade.

Escolhi ser física experimental no domínio da física dos aceleradores: especializei-me na invenção de equipamento real que manipula a matéria a uma escala minúscula. Os físicos de aceleradores estão sempre a descobrir novos processos de criar feixes que aumentem o nosso conhecimento sobre a física de partículas. Porém, o nosso trabalho contribui de modo crescente para outros sectores da sociedade. Estudantes, amigos e plateias continuam a mostrar surpresa quando lhes revelo que o hospital mais próximo das suas moradas alberga quase de certeza um acelerador de partículas, que os seus *smartphones* se baseiam na mecânica quântica e que só conseguem navegar na internet devido à física de partículas. Construimos aceleradores de partículas para estudar vírus, chocolate e pergaminhos antigos. A nossa compreensão pormenorizada da geologia e da história antiga do nosso planeta resulta da investigação em física de partículas.

A investigação, impulsionada pela curiosidade, leva-nos além dos limites do que sabemos e do que esperamos, conduzindo-nos a ideias, fronteiras e soluções que alteram o curso da história. Através da busca de novos saberes, reduzimos o intervalo entre aquilo que sabemos ser possível e aquilo que cremos ser impossível. É assim que a curiosidade nos conduz a inovações verdadeiramente revolucionárias. A física, e em particular a física de partículas, proporciona talvez os exemplos mais marcantes deste fenómeno. Então, como é que uma série de experiências de física originou todas estas facetas do mundo moderno?

Como é evidente, houve milhares de experiências, que contribuíram de algum modo para o nosso conhecimento. Neste livro, guiarei o leitor através de 12 experiências cruciais que representaram uma viragem — uma descoberta — que hoje temos como essencial para a nossa compreensão do mundo em que vivemos. Começaremos com experiências conduzidas por alguns indivíduos em pequenos laboratórios em Inglaterra e na Alemanha no final do

século XIX — experiências que anunciavam a falência da física clássica, alertando para a existência de entidades menores do que os átomos. A seguir veremos como algumas experiências em Chicago contribuíram para validar as ideias emergentes da mecânica quântica, levando físicos de todo o mundo a subir aos céus em balões e a escalar montanhas em busca de novas partículas. Cada experiência recorda-me o misto de frustração e alegria que tão bem conheço do meu laboratório, essa vivência tão humana da prática científica. Contudo, com o meu olhar retrospectivo, vejo o que esses primeiros investigadores não podiam prever: o futuro das suas descobertas e invenções.

As experiências seguintes transportam-nos para a competição entre os Estados Unidos, a Alemanha e o Reino Unido para construir o primeiro acelerador de partículas e separar o átomo nos seus constituintes. Destas experiências resultou a criação de elementos radioativos artificiais na Califórnia e uma feliz descoberta accidental, por cientistas oriundos da investigação industrial, que produziu um novo instrumento de investigação e uma nova percepção da astronomia. Por último, acompanhamos a história de equipas e nações que se uniram para realizar as grandes experiências que criaram a própria estrutura da minha carreira: de laboratórios norte-americanos como os de Brookhaven e Berkeley, passando pelo colisionador linear de Stanford e pelo Fermilab, até à Organização Europeia para a Pesquisa Nuclear (CERN, na sigla francesa).

Consideradas em conjunto, estas experiências corporizam o espírito inquisitivo que deriva da curiosidade humana. Ao longo de um século, elas transformaram as nossas vidas em quase todos os aspetos, da computação à medicina, da energia às comunicações, e da arte à arqueologia. No seu âmago, a física terá sempre a ver com a compreensão do nosso lugar no Universo. Estou ciente desta verdade desde que contemplei os céus com um olhar novo. Esta viagem ilustra o modo como a física conduziu a uma boa parte da tecnologia moderna que hoje tomamos por adquirida, e a resultados práticos que nunca teríamos sequer imaginado. Diz-nos que trabalhar em física nos mostra a importância da curiosidade e o poder que todos temos de realizar descobertas capazes de mudar o mundo.

¹ Terá reparado que não incluí a gravidade, embora faça parte da nossa experiência diária. A gravidade não está incluída no Modelo Padrão e é incrivelmente fraca quando comparada com as outras três forças. A razão deste facto, assim como o modo de conjugar estas teorias, constitui um dos grandes desafios da física no século XXI.

PARTE UM

Desmantelar a Física Clássica

«A imaginação é a faculdade que propicia a descoberta. É ela que penetra nos mundos invisíveis que nos cercam, os mundos da ciência. É ela que sente e descobre o ser, a realidade que não vemos, que não existe para os nossos sentidos.»

*Ada Lovelace, numa carta
a Lorde Byron, janeiro de 1841*

CAPÍTULO 1

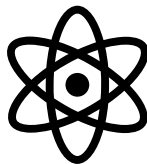
O Tubo de Raios Catódicos: Os Raios X e o Eletrão

A nossa história principia num laboratório em Würzburg, na Alemanha, em 1895. Não se assemelhava aos espaços brancos e limpos onde trabalham os cientistas atuais; tinha um belo soalho de madeira e grandes janelas que davam para o parque e os vinhedos em frente. O físico Wilhelm Röntgen fechou as persianas e dedicou-se ao seu trabalho. Numa comprida mesa de madeira, pousou um tubo de vidro do tamanho de uma pequena garrafa de vinho, do qual extraíra a maior parte do ar mediante uma bomba de vácuo¹. De dois elétrodos de metal partiam fios, um da extremidade do tubo (o cátodo negativo), e o outro de um ponto aproximadamente a meio dele (o ânodo positivo). Quando se aplicava eletricidade com tensão elétrica elevada, observava-se uma cintilação no interior do tubo: os chamados «raios catódicos», que deram nome ao tubo. Até aí, tudo acontecera de acordo com o esperado. Só que, pelo canto do olho, Röntgen reparou no brilho que vinha de um pequeno ecrã no outro lado do laboratório.

Aproximou-se para ver melhor. O ecrã revestido a fósforo emitia uma luz esverdeada. Quando desligava o tubo de raios catódicos, a luz desaparecia. Quando voltava a ligá-lo, ela regressava. Seria

uma ilusão ótica, um reflexo da luz que provinha do tubo de raios catódicos? Cobriu o tubo com um cartão preto, mas a luz no ecrã persistia. Nunca observara nada de parecido, mas pensou que podia ser importante.

Aquele momento mudou a física para sempre. Partindo de uma observação casual, as experiências com os tubos de raios catódicos transportaram o domínio da física para um território completamente novo e começaram a derrubar algumas ideias sobre o mundo natural que eram aceites havia milénios. Ao longo do tempo, o tubo de raios catódicos conduziria a tecnologias que mudaram a forma como as pessoas viviam, trabalhavam e comunicavam. Tudo começou aqui, no brilho de um ecrã e na curiosidade de um indivíduo.



Wilhelm Röntgen, tal como muitos cientistas de todo o mundo no fim do século XIX, acreditava que as descobertas da física estavam quase esgotadas. O Universo era formado por matéria que consistia em «átomos». Sabia-se que havia diferentes tipos de átomos, correspondentes a diferentes elementos químicos. Das árvores aos metais, da água à pele: toda a complexidade do mundo material que os rodeava diferia em dureza, cor e textura porque era formada por átomos diferentes, que eles equiparavam a minúsculas peças esféricas de Lego. Dispondo das instruções corretas, era possível

pegar num determinado conjunto de átomos e criar tudo o que se quisesse.

Sabiam também que havia forças que mediavam todas as interações. A gravidade mantinha as estrelas na nossa galáxia e o nosso planeta na órbita do Sol. Até as forças misteriosas da eletricidade e do magnetismo tinham acabado por ficar reunidas em apenas uma força: o eletromagnetismo. O Universo era previsível: se conhecermos todos os pormenores do seu funcionamento interno e pusermos os objetos em movimento, os movimentos de toda a matéria podem ser antecipados com precisão.

Só faltava esclarecer os pormenores, tais como o modo de funcionamento do tubo de raios catódicos, uma das poucas coisas que não conseguiam explicar bem. Claro que havia teorias, entre as quais a de que o brilho lá dentro se devia às ondulações de um hipotético éter, o meio pelo qual se pensava que a luz viajava, do mesmo modo que o som se transmite através do ar. Porém, na sua investigação dos pormenores do tubo de raios catódicos, Röntgen foi confrontado com uma complicação. Não apenas havia algo de inexplicado a acontecer dentro do tubo, como ele descobrira um efeito estranho que se manifestava também no exterior dele.

Röntgen fora uma criança sem nada de extraordinário. Filho de um comerciante de tecidos, adorava explorar a natureza do campo e da floresta². A sua única aptidão invulgar era saber construir objetos mecânicos³ e esta capacidade precoce revelou-se útil para o seu posterior trabalho experimental. Em adulto, tinha o cabelo

escuro espetado sobre a testa, «como se estivesse permanentemente eletrizado pelo seu entusiasmo»⁴.

Röntgen era um homem tímido que dava aulas num tom de voz inaudível. Rigoroso com os alunos, ficava incomodado com a ideia de ter assistentes no seu laboratório. Mas adorava a ciência, e costumava citar o grande engenheiro Werner von Siemens, que dissera: «A vida intelectual dá-nos por vezes a mais pura e elevada alegria que o ser humano consegue experimentar.»

E agora descobrira algo nunca visto. Quando observou o estranho brilho no ecrã, presumiu que não se tratasse do mesmo tipo de «raios» que causara o brilho no tubo de raios catódicos, visto que esse efeito parecia restrito ao interior do tubo. Ele tinha descoberto um novo tipo de raios invisíveis que parecia capaz de percorrer distâncias mais longas. Dedicou-se de imediato a aprofundar o estudo, empregando todo o seu tempo e toda a sua energia no laboratório. Mais tarde, quando lhe perguntaram o que pensara nessa altura, respondeu: «Eu não pensava, eu investigava.» Dispunha de um conjunto de tubos semelhantes no laboratório⁵ que podia utilizar com o ecrã fosforescente e organizava as experiências de forma metódica e minuciosa para compreender a natureza dos novos raios. Intercalou diferentes materiais entre o tubo e o ecrã: experimentou com papel, madeira e até borracha endurecida. Os raios atravessavam todos eles, quase não diminuindo de intensidade. Quando direccionou os raios para a grossa porta de madeira do laboratório adjacente, descobriu que conseguia detetá-los no outro lado. Só quando colocou uma folha

de alumínio em frente do tubo é que verificou que os raios pareciam ter certa dificuldade em atravessá-la.

Passou sete intensas semanas no laboratório, sendo ocasionalmente lembrado pela mulher, Anna Bertha, de que precisava de se alimentar. De resto, trabalhou quase sozinho e manteve em segredo a sua investigação. Nada contou aos seus assistentes, nem muito menos aos colegas estrangeiros. Sabia que, se falasse prematuramente da sua descoberta, centenas de outros cientistas que desenvolviam experiências semelhantes nos seus laboratórios iriam conseguir chegar a uma conclusão antes dele. O único registo de referência ao seu trabalho foi a menção a um bom amigo, a quem disse apenas: «Descobri uma coisa interessante, mas não sei se as minhas observações serão corretas.»⁶

A seguir, interpôs uma mão no trajeto dos raios e descreveu: «Quando ponho a mão entre o tubo de descarga e o ecrã, consigo ver a sombra mais escura dos ossos no interior da imagem-sombra ligeiramente menos escura da própria mão...» Isto deu-lhe uma ideia. Utilizou os raios para obter uma imagem da mão de Bertha numa chapa fotográfica, que confirmou a sua suspeita: os raios atravessavam com facilidade a carne e a pele, mas o mesmo não sucedia com o osso ou o metal. Os ossos da mão da mulher e a sua aliança pareciam escuros, quando comparados com a carne que vemos a olho nu. A capacidade de bloqueio dos novos raios dependia da densidade do objeto. Segundo a lenda, quando Bertha viu os ossos da sua mão, exclamou «Assisti à minha morte!» e nunca mais quis entrar no laboratório do marido.

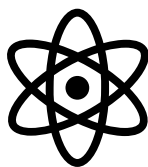
No seu livro de apontamentos, Röntgen precisava de dar um nome aos novos raios. Em ciência, costumamos designar aquilo que desconhecemos com uma letra, como o «X». Por isso, Röntgen propôs aquela que é talvez a melhor designação não intencional da história da física: chamou à sua descoberta «raios X».

Satisfeito com o conhecimento que tinha acerca do comportamento dos raios X, Röntgen precisava de tomar uma decisão: deveria registrar a patente da ideia, publicar os seus achados, ou realizar mais trabalho antes de anunciar a sua descoberta? Havia ainda muitas questões que queria esclarecer, tais como o modo como os raios X se relacionavam com a luz e com a matéria, qual a sua composição e como se haviam formado. Concluiu que não podia adiar mais o anúncio da descoberta, visto que a probabilidade de mais alguém vir também a descobrir os raios X era demasiado alta. Se publicasse a notícia da descoberta antes de pedir o registo da patente, nunca veria quaisquer proveitos financeiros caso ela tivesse aplicação em medicina. Mas Röntgen era um físico, não um médico, pelo que não sabia se os médicos se interessariam pela sua ideia. Resolveu que a melhor maneira de ser útil era publicar a descoberta e comunicá-la à comunidade médica.

Vencendo a sua timidez habitual, em 23 de janeiro de 1896, Röntgen montou o equipamento de raios X sobre uma grande mesa no anfiteatro da Sociedade de Física Médica de Würzburg, que ficava a uma curta distância do seu laboratório. O grande público soubera da descoberta pelos artigos da imprensa e apareceu tanta gente que havia pessoas em pé nas coxias. Röntgen proferiu a primeira palestra sobre os resultados da sua investigação. Mostrou à

audiência a forma como os raios X conseguiam atravessar a madeira e a borracha, mas não o metal. Mostrou-lhes a fotografia da mão de Bertha e falou da ideia de usar as imagens de raios X para observar o interior do corpo humano. Para ter êxito na sua exposição, iria mostrar como era fácil obter essas imagens.

De pé em frente da audiência, convidou o presidente da sociedade, um anatomista proeminente, a colocar a sua mão na trajetória dos raios X. Röntgen ligou o tubo de raios catódicos e tirou uma fotografia de raios X da mão do homem. Os médicos na audiência estavam espantados. Perceberam logo o valor da descoberta e o presidente ficou tão impressionado que pediu à audiência que desse três vivas a Röntgen. Propôs até que os novos raios fossem batizados em sua honra⁷.



A novidade deste fenómeno alastrou como um fogo florestal, inspirando admiração, medo e até poemas em todo o mundo. Enquanto os livros de Jules Verne sobre uma viagem ao centro da Terra captavam a imaginação do público, Röntgen descobria de súbito um processo de examinar o interior do corpo humano. Surgiram alguns equívocos curiosos, como o de que os raios X conseguiam atravessar a roupa das mulheres (ninguém pareceu preocupado com a perspectiva de conseguirem atravessar a roupa dos homens). Os empresários da época começaram a vender roupa interior à prova de raios X, presumivelmente apenas para mulheres.

Os «óculos de raios X» foram banidos de uma série de teatros de ópera, embora de facto não existissem. Os filósofos temiam que os raios X pudessem revelar o íntimo mais profundo das pessoas.

Centenas de cientistas em todo o mundo dispunham já de tubos de raios catódicos, pois era um equipamento comum nos laboratórios de física. Por isso, começaram por confirmar a descoberta de Röntgen e depois puseram os seus tubos a funcionar, tudo num lapso de meses. Em 1896, um ano após a sua descoberta, os raios X eram utilizados para detetar fraturas ósseas e estilhaços nos corpos dos soldados que combatiam na guerra entre a Itália e a Abissínia e a Royal Infirmary de Glasgow criara já a primeira unidade hospitalar de raios X do mundo.

Noutras áreas da sociedade, os homens de negócios capitalizavam as potencialidades dos raios X para outros fins. Na época era popular o «pedoscópio», que recolhia imagens de raios X dos pés dos clientes enquanto eles experimentavam sapatos, uma prática depois interrompida quando surgiram provas de que os raios X podiam causar lesões na pele ou nos tecidos — um assunto a que regressaremos mais adiante. O próprio Röntgen propôs outra aplicação, quando obteve uma imagem de peças de metal que estavam dentro de uma caixa opaca, o que demonstrava o potencial dos raios X na indústria. Estas primeiras «radiografias» estão na génese dos *scanners* hoje utilizados na segurança dos aeroportos.

Uma vez que decidiu não registar a patente da sua descoberta, o que criaria obstáculos à aplicação na medicina, Röntgen não tirou qualquer proveito financeiro dela. Sabiamente, deixou a

responsabilidade de desenvolver as técnicas à profissão médica, alegando estar demasiado ocupado com outras pesquisas, mas sempre pronto a ajudar quando lhe pediam.

Röntgen poderá parecer uma pessoa estranha: um «gênio solitário» que, do nada, fez uma «descoberta accidental». Afinal, qualquer pessoa que estivesse perto de um ecrã com revestimento de fósforo poderia ter tropeçado na mesma descoberta. Porém, se prestarmos mais atenção, havia outros fatores em jogo. Ele tinha acesso a uma vasta rede de especialistas a nível mundial, dispunha de muitos anos de prática experimental e cultivava uma postura de paciência e humildade mesmo envolto no maior júbilo. Quando reparou no ecrã brilhante, tinha o saber necessário para perceber a importância da observação, bem como a curiosidade para aprofundar a investigação.

Apesar de toda a propaganda, ninguém sabia de facto o que *eram* os raios X. Röntgen mostrara que eles não exibiam exatamente as mesmas propriedades de reflexão ou de refração que a luz visível, ou que a luz ultravioleta e infravermelha, que estão fora do espectro visível. Não havia uma noção clara do modo como os raios X eram criados pelos raios catódicos, nem do modo como interagiam com outros materiais, tais como o ecrã de fósforo. A sua descoberta suscitara uma série de novas questões acerca da composição da matéria e da luz, bem como acerca da maneira como interagiam. A resposta a estas questões exigia experiências adicionais com o tubo de raios catódicos, que continuou a desempenhar um papel central nas descobertas que se sucederam. No início de 1897, em Cambridge, na Inglaterra, Joseph John («J.

J.») Thomson, o fundador e diretor do mais proeminente laboratório de física do mundo, dedicou-se ao esclarecimento de uma controvérsia que durava havia 20 anos. Em vez de se focar nos raios X no exterior do tubo, queria determinar a composição dos raios catódicos que brilhavam dentro do tubo.

Thomson partiu de uma hipótese pouco popular. Ele pensava que os raios catódicos eram um tipo de corpúsculo, ou partícula. Isto punha-o em discordância com Röntgen que, tal como os seus colegas alemães, acreditava que os raios catódicos eram imateriais, ou seja, uma forma de luz⁸. Thomson utilizava os tubos disponíveis no laboratório para estudar o comportamento da eletricidade nos meios gasosos, mas concebeu um novo conjunto de experiências para responder à pergunta: qual é a natureza dos raios catódicos?

Thomson era o filho tímido de um livreiro de Manchester, que aos 11 anos anunciou a sua intenção de se dedicar à investigação. Desconhece-se de onde veio este desejo precoce. O seu pai faleceu quando ele tinha apenas 16 anos e não lhe deixou dinheiro para custear os estudos. Não havendo bolsas de estudo em física, Thomson frequentou o Trinity College de Cambridge, onde estudou matemática. Aqui, o seu sereno sentido de humor — expresso com frequência num sorriso juvenil —, combinado com uma inabalável autoconfiança intelectual, intimidavam muitos dos colegas, que o tratavam quase com reverência⁹.

Com apenas 27 anos, Thomson foi nomeado professor e diretor do Laboratório Cavendish da Universidade de Cambridge. Era um homem bastante baixo, com um bigode desgrenhado, o cabelo

preto com risco ao meio e aparência pouco cuidada. Posteriormente, um velho amigo recordou a maneira como Thomson trazia por vezes o laço pendurado numa orelha enquanto dava as suas voltas a pé, sem se aperceber de nada. A sua vida doméstica era pacata, mas, quando se tratava de especulações acerca da natureza da matéria e do Universo, era um autêntico revolucionário.

Thomson encetou as investigações começando por repetir as experiências dos seus predecessores. Em primeiro lugar, queria comprovar que os raios catódicos e a carga elétrica de que eram portadores não podiam ser separados. Recorreu a um íman para desviar a trajetória dos raios catódicos, forçando-os a incidir num eletroscópio, um aparelho que mede a quantidade de carga elétrica. Este registou uma carga elétrica negativa surpreendentemente grande¹⁰, confirmando a sua suposição de que os raios eram de facto portadores de carga elétrica.

A seguir, recriou uma experiência em que tentou curvar os raios com um campo elétrico, recorrendo a uma diferença de potencial entre duas placas que o seu assistente montou dentro de um tubo de vácuo construído à medida. Os raios, caso fossem as partículas que ele supunha, seriam desviados pela diferença de potencial. Por outro lado, se os raios fossem compostos por luz, viajariam em linha reta e não se desviariam, tal como a luz de uma lanterna atravessa sem obstáculos uma diferença de potencial.

Thomson esperava que o desvio dos raios catódicos fosse tanto menor quanto menor fosse a diferença de potencial. Heinrich Hertz,

o físico alemão que descobrira as ondas eletromagnéticas, tinha realizado a mesma experiência antes de Thomson, verificando que, embora os raios fossem desviados por uma diferença de potencial elevada, não pareciam ser afetados quando o valor desta era pequeno. Quando Thomson realizou a mesma experiência no seu laboratório, sentiu-se frustrado ao obter os mesmos resultados que Hertz. Era como se os raios catódicos agissem como se fossem partículas perante uma diferença de potencial elevada e como se fossem luz para uma diferença de potencial reduzida. Tratava-se de um grande desafio à hipótese corpuscular de Thomson.

Thomson realizou experiências com o seu dispositivo, tentando compreender o que observava. Começou por mudar o tipo de gás no tubo, mas o resultado não se alterou. A seguir, extraiu uma parte do gás, para ficar mais perto do vácuo, e verificou uma mudança no resultado: tal como esperava, registou desvios diminutos para uma diferença de potencial pequena, e desvios consideráveis para uma diferença de potencial elevada. Para excluir qualquer dúvida, deixou entrar algum gás no tubo e confirmou que os desvios diminutos voltavam a desaparecer. A pequena porção de gás presente no tubo adquiria carga elétrica e anulava o efeito de uma diferença de potencial pequena, mas não o de uma grande. Em consequência, na presença de gás, os raios catódicos não reagiam a uma pequena diferença de potencial. Esta era a causa dos resultados de Hertz e das frustrações de Thomson. Conforme este escreveria mais tarde nas suas memórias: «Os instrumentos sensíveis que usamos nos laboratórios de física podem, até que a sua tecnologia venha a ser aperfeiçoada, conduzir a um resultado num dia e ao resultado oposto no dia seguinte, exemplificando a

verdade do ditado segundo o qual a lei da constância da natureza nunca se aprendeu num laboratório de física.»¹¹

Todos estes resultados permitiram a Thomson concluir que «o trajeto dos raios é independente da natureza do gás»¹². Por outras palavras, demonstrara que não se deviam ao gás no interior do tubo. Nem eram apenas correntes de moléculas gasosas carregadas, como defendiam outros. Eram algo de mais fundamental. Isto conduziu-o ao seu argumento central: que todos estes resultados eram expectáveis se os raios fossem, de facto, um tipo de partícula com carga negativa.

Só faltava mostrar que tipo de partícula eram: átomos, moléculas ou outra coisa. Para tal, Thomson utilizou campos elétricos e magnéticos para determinar a carga e a massa, em particular a razão das duas, « e/m ». Obteve um número muito superior ao que esperava. Tratava-se de um resultado intrigante e que não correspondia a qualquer átomo ou molécula conhecidos, os quais, pelo que se sabia, eram os constituintes mais pequenos da natureza. Thomson tinha duas explicações possíveis: ou as partículas eram «pesadas», como os átomos, com uma carga elétrica negativa extremamente grande, ou eram partículas leves, com uma carga elétrica negativa padrão. Nenhuma das opções era atraente. Se as partículas fossem átomos com carga elétrica elevada, seria preciso repensar todo o conceito de carga. Por outro lado, se as partículas fossem muito leves, isso significaria que o átomo não era, afinal, uma partícula fundamental indivisível.

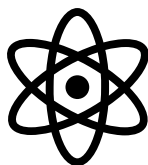
Thomson experimentou com todas as variáveis de que se lembrou: utilizou gases diversos no tubo, usou elétrodos feitos de metais diferentes e fez variar o grau de vácuo no tubo. Cada versão da experiência produzia o mesmo tipo de nova partícula, com a mesma razão elevada entre carga e massa. Nas especulações sobre a natureza dessa partícula, recorreu aos seus conhecimentos das experiências de química, às observações do espectro da luz das estrelas e até às configurações dos magnetos. De modo lento, mas seguro, afastou-se da ideia de que as partículas eram átomos com carga elevada. Estava pronto a anunciar as suas conclusões.

Na sexta-feira, 30 de abril de 1897, cerca de um ano após o anúncio da descoberta de Röntgen, Thomson vestiu um *smoking* para aparecer em frente da multidão que enchia a Royal Institution de Londres para mais um «Friday Evening Discourse» e recriou o conjunto das suas experiências. Estas palestras públicas decorriam todas as noites de sexta-feira e atraíam um numeroso público de londrinos abastados¹³ — naquela época, as descobertas científicas mais recentes eram consideradas alta cultura. No clímax da palestra, anunciou que os misteriosos raios catódicos eram, na realidade, um tipo de partícula com carga negativa, cerca de duas mil vezes mais leve do que o hidrogénio, o mais leve dos átomos. Thomson tinha descoberto o eletrão, a primeira partícula *subatômica*¹⁴.

Que triunfo intelectual! Thomson mergulhara no resplendor misterioso dos raios catódicos e emergira com um novo entendimento da natureza da matéria. Em outubro do mesmo ano, daria outro passo em frente: não só os raios catódicos eram

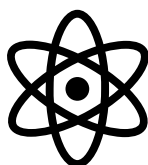
compostos por partículas minúsculas, mas também estas eram um componente até então desconhecido da matéria, o que destruía a ideia dos átomos como a menor entidade indivisível. Ainda não tinha a certeza de onde provinham os eletrões, mas era muito provável que se encontrassem no interior dos átomos. Em face das provas, o próprio Röntgen e os seus colegas alemães tiveram de aceitar que Thomson tinha razão. Os dois homens, Röntgen e Thomson, usando o mesmo equipamento, tinham descoberto dois aspetos inteiramente novos da natureza, nunca antes detetados.

Podemos agora juntar as suas ideias para explicar o que acontecia dentro do tubo de raios catódicos. Na presença de uma diferença de potencial elétrico elevada, o cátodo emite eletrões a alta velocidade que são atraídos pelo ânodo com carga positiva. Porém, alguns dos eletrões, em vez de atingirem o ânodo, passam por ele velozmente e colidem com o gás e a parede de vidro. A energia transferida durante este processo gera luz — o brilho que intrigara cientistas durante décadas. Este processo chama-se «*Bremsstrahlung*», que se traduz como «radiação de travagem», visto que os eletrões são travados pela parede de vidro. Se os eletrões perderem energia suficiente, podem criar raios X: uma forma de luz com energia elevada — radiação eletromagnética —, capaz de penetrar nas mãos (e noutras partes do corpo).



Ao contrário dos raios X, a utilidade da descoberta de Thomson não era evidente na época. Thomson interrogava-se abertamente sobre o interesse que uma entidade tão pequena e insignificante como um eletrão poderia suscitar fora da física. No início de 1900, na festa anual do Laboratório Cavendish, onde realizara a descoberta, fez-se um brinde irónico: «Ao eletrão, que nunca seja útil a ninguém!»¹⁵ Porém, 20 anos após a sua descoberta, Thomson proferiu outra palestra de sexta-feira na Royal Institution, desta vez sobre «As aplicações industriais dos eletrões», e um olhar retrospectivo dá-nos a ver que esta descoberta e o nosso entendimento dela foram a base de todo o domínio da eletrónica.

Como aconteceu isso? À primeira vista, a resposta parece clara, visto que a eletrónica — tal como o nome sugere — depende do movimento dos eletrões. Mas que teve a descoberta de Thomson a ver com isso? A sua pesquisa foi necessária, ou a eletrónica teria surgido independentemente dela? Para compreender a relação entre a curiosidade de Thomson e a revolução eletrónica, precisamos de contextualizar o seu trabalho.



No Museu da Ciência, em Londres, há uma exposição permanente intitulada «Construir o Mundo Moderno». Numa pequena e insignificante vitrina no meio do corredor vemos um conjunto de objetos de vidro com modestas placas informativas. Um destes objetos é um dos tubos de raios catódicos utilizados por

J.J. Thomson na descoberta do eletrão. Na mesma vitrina encontramos uma das primeiras lâmpadas, e no lado oposto dois objetos de aspeto estranho chamados válvulas de Fleming, que se parecem com lâmpadas com três «pernas» semelhantes a alfinetes. Esta vitrina contém uma história em miniatura da invenção da eletrónica.

Perto dela vemos um ecrã dedicado a outro inventor famoso, Thomas Edison. Em 1880, enquanto os cientistas como Thomson estudavam o tubo de raios catódicos nos seus laboratórios, Edison e os seus assistentes tinham deparado com uma tecnologia semelhante quando tentavam construir lâmpadas elétricas. Na época, Edison tinha 30 anos, mais nove do que Thomson, e a sua abordagem seguia linhas muito diferentes das dos cientistas experimentais, pois era impulsionado por outros motivos, nomeadamente obter proveito económico dos seus inventos. Em vez de explorar os pormenores da física das lâmpadas, a equipa de Edison limitava-se a experimentar a maior variedade de materiais e configurações possível, recorrendo a uma espécie de tática de «força bruta». A maior parte dos tipos de filamento ardia quase de imediato, mas um membro da equipa, o inventor afro-americano Lewis Latimer, desenvolveu um método de construir lâmpadas com um filamento de carbono que durava cerca de 15 horas¹⁶.

No entanto, havia um problema: o vidro da superfície da lâmpada enegrecia com o uso, quase como se as partículas de carbono fossem «transportadas» do filamento para o vidro. Mesmo aumentando o vácuo o mais possível dentro das lâmpadas, os filamentos continuavam a arder. Sabemos agora que isto acontece

devido à vaporização do filamento, mas Edison desconhecia-o na altura. Numa tentativa de resolver o problema, Edison tentou intercetar as partículas de carbono no seu voo, posicionando um elétrodo suplementar na lâmpada, o que o conduziu à descoberta acidental de que aquilo gerava uma corrente elétrica, fluindo apenas num sentido. Não tinha solucionado o problema do enegrecimento, mas aquele dispositivo parecia controlar o fluxo da eletricidade, tal como uma válvula controla o fluxo da água. Chamou-lhe «efeito de Edison». Não se interessava pelo *modo* como o dispositivo controlava o fluxo da corrente elétrica; sabia apenas que exercia esse controlo. Edison pensou em registar a patente da «lâmpada de efeito de Edison», mas depois desistiu da ideia, pois não conseguiu encontrar-lhe uma utilização prática. Continuou a trabalhar em lâmpadas, fazendo pequenos melhoramentos e conseguindo prolongar a duração do filamento de carbono até 600 horas, o que deu viabilidade comercial às lâmpadas. Quanto à «lâmpada de efeito de Edison», quando alguém lhe perguntava como funcionava, ele respondia que não tinha tempo para aprofundar a parte «estética» do seu trabalho¹⁷.

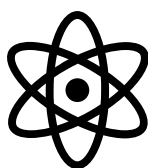
Alguém que tinha tempo para a estética — os princípios subjacentes ao trabalho — era J. J. Thomson. Em 1899, apenas dois anos após a descoberta do eletrão, Thomson mostrou que, tal como os tubos dos raios catódicos, também os filamentos das lâmpadas emitiam eletrões. O aquecimento a que Edison sujeitava os filamentos provocava a libertação de eletrões, de acordo com um processo a que agora chamamos «emissão termiónica». Um processo bem diferente da vaporização do filamento e que se revelou crucial para a decifração do efeito de Edison. O invento

aparentemente inútil de Edison continuou à espera durante quase duas décadas até o trabalho de Thomson revelar por fim o modo como o elétrodo adicional causava o fluxo da corrente. Quando o elétrodo tinha carga positiva atraía o fluxo de eletrões através do vácuo e fechava o circuito, mas, quando tinha carga negativa, repelia os eletrões e interrompia a corrente. Com este entendimento pleno, a «válvula» de Edison encontrou aplicações num mundo em evolução rápida.

A próxima etapa da nossa história passa-se em 1904, com o trabalho de um consultor da Wireless Telegraph Company de Marconi, que desenvolvia a rádio e as telecomunicações¹⁸. Para fazer funcionar um telefone, o físico britânico John Ambrose Fleming precisava de converter uma corrente alternada fraca em corrente contínua. Em 1899, Fleming observara o efeito de Edison, quando era consultor da Edison and Swan United Electric Light Company¹⁹, e deduziu que a válvula de Edison fazia precisamente essa conversão. Os sinais minúsculos das transmissões rádio eram suficientes para ligar e desligar a corrente da válvula. De súbito compreendeu a ligação e, mais tarde, escreveria: «Com satisfação [...] percebi que tínhamos encontrado uma solução neste tipo peculiar de lâmpada elétrica.»

O conhecimento sobre o tubo de raios catódicos combinou-se com a lâmpada de filamento para a invenção do primeiro «díodo termiónico» ou «válvula de Fleming», ou seja, o primeiro dispositivo *eletrónico*. Enquanto os dispositivos elétricos se baseiam no fluxo de eletrões através de cabos, a *eletrónica* tem por base o movimento de eletrões no vácuo, que pode ser controlado rápida e

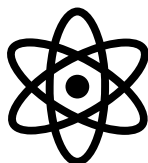
facilmente sem o movimento mecânico dos dispositivos elétricos precedentes. O invento de Fleming causou uma revolução tecnológica. Alguns anos depois, um inventor americano adicionou um terceiro elétrodo ao díodo termiônico, guiado pelas teorias de Thomson em todas as fases²⁰. Em 1911, o «tríodo» foi utilizado como amplificador e, pouco depois, as correntes de eletrões nos tubos de vácuo foram usadas como osciladores, como moduladores de sinais elétricos e muito mais. Estes dispositivos puramente eletrónicos conduziram à rádio e às telecomunicações de longa distância, ao radar e aos primeiros computadores. Nasceria a indústria da eletrónica.



É relevante aprofundar um pouco as duas abordagens diferentes em jogo nesta história. Por um lado, a de Thomson, impulsionada pela curiosidade, parecia decerto ser a chave para compreender o funcionamento dos tubos de vácuo, mas ele não tinha planos para criar nada mais além de conhecimento. Por outro lado, o método por tentativas de Edison conduziu ao sucesso empresarial, mas ele não estava interessado em desenvolver um entendimento aprofundado do como e do porquê destas tecnologias. De certo modo, Fleming conseguiu combinar as duas abordagens e criar uma tecnologia sofisticada. Todos os atores foram sem dúvida indispensáveis para o nascimento da indústria eletrónica, mas ele não teria sido possível sem os cientistas que realizaram as

experiências com o tubo de raios catódicos sem intuito comercial algum.

A particularidade da procura de conhecimento e compreensão mediante o processo científico reside em que, ao contrário de inventar um novo produto através de tentativas, costuma ter um efeito cumulativo; com o tempo, dá origem a um número crescente de aplicações práticas. Isto foi verdade para o eletrão e também para os raios X, visto que os dois estão relacionados. Com o nascimento da indústria eletrónica, foi possível construir tubos específicos para a produção de raios X, o que criou um mercado próspero para estes tubos em utilizações na medicina e na indústria. Exemplos destes tubos encontram-se na exposição do Museu da Ciência de Londres, próximo do tubo de raios catódicos de J. J. Thomson e das primeiras válvulas de Fleming.



O resto da história dos raios X encontramos-lo no referido museu uns passos mais adiante, sob a forma de uma grande máquina usada em medicina, que existe graças à indústria da eletrónica e aos raios X, uma tecnologia salvadora de vidas conhecida por tomografia computadorizada.

Antes da década de 1970, se um doente precisasse de um exame ao cérebro, os médicos realizavam um procedimento chamado «pneumoencefalografia». Abriam um buraco na base da coluna

vertebral ou diretamente no crânio e extraíam a maior parte do fluido cerebrospinal do doente. De seguida, bombeavam ar ou hélio de maneira a criar uma bolha entre o cérebro e o crânio. O doente era amarrado a um assento que rodava em todas as direções e colocado em diversas posições (ou seja, de cabeça para baixo e de lado), a fim de obrigar a bolha de ar a deslocar-se no cérebro e na coluna, enquanto era feito um raio-X em cada posição. O pobre doente era forçado a suportar terríveis dores, náuseas e cefaleias, amiúde sem anestesia. O objetivo de tudo isto era apenas a obtenção de um contraste suficiente na imagem de raios X que permitisse discernir a diferença entre o cérebro e o (entretanto drenado) fluido cerebral. Após esta experiência de tortura, os médicos examinavam as radiografias, esperando conseguir perceber se a forma do cérebro parecia ligeiramente distorcida devido a lesões ou massas no seu interior. Era um procedimento brutal, mas foi a única opção entre 1919 e o fim dos anos 1970.

Nessa época, os raios X produziam apenas imagens bidimensionais. Se pensarmos no corpo como uma caixa cheia de líquido onde se encontra uma série de objetos (ossos, órgãos e músculos), seria muito difícil visualizar um objeto no meio da caixa com raios X, pois seria obscurecido por tudo o que estivesse em frente e atrás dele. Os médicos tinham dificuldade em compreender estruturas tridimensionais representadas a duas dimensões. Era necessária uma inovação que permitisse obter uma imagem tridimensional fidedigna.

Nos anos 1960, Godfrey Hounsfield, um funcionário da EMI (Electric and Musical Industries), uma grande empresa britânica

que também negociava com eletrónica e outros equipamentos, andava em busca de sectores onde os computadores pudessem ser úteis e propôs uma nova maneira de os utilizar para obter um dispositivo médico de raios X mais eficaz. Teve a ideia de fazer rodar a fonte e o detetor em torno do paciente de modo a tirar uma série de imagens de raios X que pudessem ser reconstruídas digitalmente pelo computador. Tal possibilitava a formação de uma imagem tridimensional completa do interior de um corpo. Chamaram-lhe «tomografia computadorizada», ou TC²¹.

Para que a sua ideia se tornasse realidade, começou por construir um *scanner* cerebral experimental. Para o testar, ia aos matadouros locais e trazia cérebros de vacas, dos quais obtinha imagens²². Numa entrevista, descreveu, com um desprendimento muito britânico, que era «deveras complicado transportar [os cérebros] por Londres, dentro de sacos de papel para experimentar a máquina»²³.

Os seus primeiros testes mostraram, com uma clareza surpreendente, uma visão tridimensional completa do interior do tecido orgânico. O *scanner* de TC mostrava inclusive diferenças minúsculas nos tecidos, algo que Röntgen não julgara possível: os tecidos, nos seus primitivos raios X, eram transparentes, mas a combinação de muitas imagens tornava-os visíveis. Foi preciso o poder dos computadores, um dispositivo rotativo e alguma matemática sofisticada, mas a técnica funcionou. Em 1971, o *scanner* cerebral foi ensaiado no Hospital Atkinson Morley, em Londres. Consistia numa marquesa móvel com um *design* especial onde o doente se deitava, com a cabeça posicionada numa abertura

circular onde estava alojado o equipamento de *scanning* — na realidade, não muito diferente do aspeto que tem hoje.

A primeira pessoa a sujeitar-se a um *scanning* em 1971 foi uma mulher que se suspeitava sofrer de um tumor no lobo frontal esquerdo. A tomografia confirmou o prognóstico e a mulher foi submetida a uma cirurgia bem-sucedida. Apenas então Hounsfield e a sua equipa «deram saltos de alegria, quais futebolistas festejando um golo»²⁴. Finalmente, Hounsfield percebera as implicações do seu trabalho: o seu invento pusera termo à angústia dos raios X cranianos tradicionais.

Hounsfield não se ficou pelo *scanner* cerebral, que foi apresentado ao mundo em 1972. Prosseguiu construindo uma máquina que podia revelar também o funcionamento interno do resto do corpo humano. Em 1973, os primeiros aparelhos de TC foram instalados em hospitais nos Estados Unidos e em 1980 três milhões de exames de TC haviam sido realizados a nível mundial. Ao longo do tempo, os aparelhos de TC tornaram-se tão comuns que, em 2005, eram realizados 68 milhões de exames anuais.

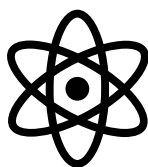
Desde então, novas ideias conduziram à imagiologia em tempo real, combinações com outras técnicas de imagiologia (que conheceremos mais adiante) e a utilização da TC como técnica de primeira linha nos departamentos de urgência. Enquanto na década de 1970 captar uma imagem demorava uma hora, as máquinas de hoje conseguem-na em menos de um segundo. Existem atualmente técnicas de TC que ajudam os médicos a «navegar» no coração a três dimensões durante a inserção de *stents*, melhorando a taxa de

sucesso do procedimento. Além disso, as estruturas internas visualizadas por TC podem ser impressas em impressoras 3D para auxiliar os médicos a compreender o que está de facto a acontecer no interior do doente e a planear cirurgias e implantes, sem precisarem de fazer uma só incisão na pele. O melhoramento da tecnologia e das funcionalidades prossegue, centrado no aumento da velocidade de *scanning*, na redução da dose de radiação e na obtenção de imagens tridimensionais cada vez mais pormenorizadas.

A viagem entre a descoberta dos raios X e os modernos aparelhos de TC levou mais de 70 anos a chegar a bom porto. Exigiu a conjugação de uma série de invenções, progressos nas técnicas matemáticas e o aparecimento dos computadores. Encontramos esta tecnologia, sob alguma forma, em quase todos os hospitais do mundo. Se perguntássemos aos médicos do tempo de Röntgen como poderiam melhorar o seu conhecimento do interior do corpo humano, eles talvez respondessem que a solução estava num bisturi mais afiado. Foi o desejo de Röntgen e Thomson de compreenderem melhor uma área aparentemente obscura da física que possibilitou que as suas descobertas desembocassem num instrumento inteiramente novo, que pôde então ser aperfeiçoado por Hounsfield e outros para revolucionar a medicina.

Como é evidente, a medicina não foi a única área da sociedade a beneficiar dos raios X. Se pensarmos bem, eles estão por toda a parte. Preste atenção às máquinas de raios X do aeroporto que examinam a sua bagagem da próxima vez que viajar de avião: as suas origens estão também num laboratório em Würzburg. Além

das aplicações na segurança, o nosso mundo material e físico assenta no conhecimento dos raios X. As empresas que produzem objetos, dos *pipelines* aos aviões, das pontes às escadas, recorrem hoje aos raios X para se certificarem da qualidade dos seus produtos. Se houver uma fissura ou uma bolha de ar, os raios X detetam-nas, tal como o fizeram nas experiências originais de Röntgen. Esta técnica de «testagem não destrutiva» é uma parte escondida do mundo artificial de criação humana que nos rodeia, mas é também a razão pela qual as tubagens raramente rebentam e os aviões não costumam despenhar-se. A testagem não destrutiva é uma indústria de 13 mil milhões de dólares em permanente crescimento, e os raios X constituem cerca de 30 por cento do mercado.



A eletrónica precisou de meio século e os raios X de quase um século para que todo o potencial de ambos se desenvolvesse, mas a história que contei neste capítulo é apenas um instantâneo. A história completa estende-se por séculos de acumulação gradual de conhecimento e tecnologia, desde o primeiro laboratório de vácuo criado por Evangelista Torricelli em 1643 até à invenção da primeira bomba de vácuo por Otto von Guericke em 1654. Foram necessários experientes sopradores de vidro para criar os aparelhos, precisos e frágeis, com juntas bem seladas, capazes de conservar o vácuo. Foi necessário equipamento que criasse diferenças de potencial suficientemente elevadas para extrair os eletrões dos cátodos

metálicos. Na realidade, todo o processo estendeu-se por numerosas gerações, mesmo que lhe pareça que os avanços aconteceram num abrir e fechar de olhos.

É simplesmente impressionante o modo como as experiências com os tubos de raios catódicos realizadas entre 1895 e 1897 expandiram a nossa visão do espectro eletromagnético, destruíram a ideia de que os átomos eram as partículas mais pequenas da natureza e conduziram à descoberta da primeira partícula *subatômica*. Nesse momento, qualquer tentativa de previsão das consequências das experiências teria falhado por completo na estimativa do seu impacto no nosso conhecimento da física. Porém, o fracasso dessa previsão teria sido ainda maior no que respeita ao impacto na sociedade.

A outra característica comum às descobertas de Röntgen e Thomson foi a sua rápida adoção pela tecnologia. Ambas as ideias foram fundamentais para as inovações da eletrónica e do equipamento médico salvador de vidas que surgiram nas décadas seguintes. No entanto, os conceitos fundamentais em que se baseiam essas tecnologias não provieram da indústria. Nasceram nas mentes inquisitivas que realizaram experiências numa tentativa de aumentar o conhecimento comum. Hoje, muitas pessoas associam a expressão «tubo de raios catódicos» a televisões antigas, mas é muito mais do que isso. Representa o poder que a investigação impulsionada pela curiosidade tem para produzir inovações extraordinárias.

As experiências com os tubos de raios catódicos invalidaram a ideia de que quase tudo na física estava feito. Com o nascimento da física *subatômica*, abriram-se novos panoramas aos cientistas curiosos. As próximas experiências cruciais seriam realizadas por um dos estudantes de Thomson, quando os físicos começaram a perguntar: que mais haverá dentro do átomo?

¹ Habitualmente designado por tubo de raios catódicos. Tecnicamente, o que aqui descrevo é um tubo de Crookes-Hittord, mas todos estes tubos são semelhantes. Estas experiências devem ser realizadas num meio onde reine quase o vácuo, pois, caso contrário, os raios catódicos colidem com as moléculas gasosas e dispersam-se ou perdem-se. A distância medida entre colisões chama-se «percurso livre médio» e aplica-se a todas as moléculas, átomos e outras partículas em deslocação através de um gás. O percurso livre médio de um raio catódico no ar é minúsculo, por isso os tubos apenas funcionam sob vácuo.

² Nobel Lectures, Physics 1901-1921, Amesterdão, Elsevier, 1967.

³ Ver Otto Glasser, *Wilhelm Röntgen and the Early History of the Roentgen*, São Francisco, Norman Publishing, 1993. Interrogamo-nos se haveria aqui a influência de um ramo distante da sua árvore genealógica que se notabilizara na construção de requintadas peças de mobiliário. Para mais sobre este tema, ver Wolfram Koeppe, *Extravagant Inventions: The Princely Furniture of the Roentgens*, New Haven, CT, Yale University Press, 2012.

⁴ Glasser, *Röntgen*.

⁵ Um deles fora-lhe ofertado por um físico ucraniano chamado Ivan Puluj, que em 1889 reportara que as chapas fotográficas ficavam negras quando eram expostas aos raios catódicos. Röntgen e Puluj haviam trabalhado juntos em Estrasburgo, e Röntgen costumava assistir às palestras de Puluj. Este desenvolveu um tubo de raios catódicos especial chamado «lâmpada de Puluj», que durante algum tempo foi produzido em massa. Puluj utilizou-o para obter imagens dos esqueletos de um rato e de um feto humano. Terá Puluj descoberto os raios X antes de Röntgen? Talvez não, porque Puluj não percebeu que os raios que via eram totalmente diferentes dos que estavam dentro do tubo e esta foi a percepção crucial que levou à atribuição da descoberta a Röntgen.

⁶ Glasser, *Röntgen*.

⁷ A princípio, a designação «raios de Röntgen» foi adotada, em particular na Alemanha. mas o mesmo não aconteceu no resto do mundo, onde a designação mais apelativa de «raios X» persistiu. Porém, o nome do cientista ficou imortalizado numa unidade de radiação conhecida por «röntgen», e em alguns estabelecimentos de saúde poderá encontrar um departamento de «röntgenlogia» em vez de «raios X».

⁸ Nesta época verificava-se uma divisão geográfica no pensamento sobre a natureza dos raios catódicos. Muitos cientistas alemães pensavam que se tratava de um tipo de luz, ao passo que numerosos cientistas britânicos se inclinavam para a ideia de serem composto por determinado tipo de partículas.

⁹ Lorde Rayleigh (J.W. Strutt), *The Life of Sir J. J. Thomson OM*, Cambridge, Cambridge University Press, 1943, p. 9.

¹⁰ J. J. Thomson, «XL. Cathode Rays», *Philosophical Magazine Series 5*, vol. 44, 1897, pp. 293-316.

¹¹ J. J. Thomson, *Recollections and Reflections*, Londres, G. Bell, 1936.

¹² Thomson, «XL. Cathode Rays».

¹³ Albermarle Street, em Londres, onde se localiza a Royal Institution, tornou-se a primeira rua do mundo de sentido único para conseguir acomodar o tráfego das numerosas carruagens dos visitantes das «Friday Evening Discourses».

¹⁴ A existência do eletrão foi aceite tanto pela escola de pensamento «corpúscular» como pela da «luz-éter», porque já fora identificado como a unidade de eletricidade, e na segunda teoria era considerado uma perturbação no éter.

¹⁵ Proceedings of the Royal Institution of Great Britain, vol. 35, 1951, p. 251.

¹⁶ Lewis H. Latimer, «Process of manufacturing carbons», *US Patent* 252, 386, registada em 19 de fevereiro de 1881.

¹⁷ P. A. Redhead, «The birth of electronics: Thermionic emission and vacuum», *Journal of Vacuum Science and Technology*, vol. 16, 1998.

¹⁸ Entretanto, Marconi tinha concebido e construído um transmissor de rádio que realizou as primeiras emissões de rádio transatlânticas em dezembro de 1901. Por acordo com a companhia de Marconi, o crédito foi para este, apesar de a invenção pertencer à Fleming. Mais tarde, Fleming declarou que Marconi fora pouco generoso para com ele.

¹⁹ A companhia foi fundada após uma batalha jurídica sobre o design da lâmpada. Produziam lâmpadas cujo *design* era integralmente o de Swan, com a exceção do filamento.

²⁰ O tríodo foi inventado por Lee De Forest em 1906 para um dispositivo chamado *audios*, um amplificador de áudio primitivo. Ver Lee De Forest, «The Audion: a new receiver for wireless telegraphy», *Transactions of the American Institute of Electrical and Electronic Engineers*, vol. 25, 1906, pp. 735-63.

²¹ Logo no princípio da década de 1920, algumas pessoas pensaram em deslocar a fonte e o detetor de raios X para obter muitas imagens sob diferentes ângulos. Os objetos no meio do equipamento ficavam focados, enquanto o material no exterior ficava desfocado e podia ser ignorado. A esta ideia chamaram «tomografia» e perto de dez pessoas, todas elas trabalhando de maneira independente, produziram uma série de patentes relacionadas com a ideia entre 1921 e 1934. Embora todos tivessem justificação para reivindicar a invenção, a primeira verdadeira versão funcional deveu-se ao alemão Gustave Grossman no fim da década de 1930, através da sua empresa Siemens-Reiniger-Veifa GmbH. Porém, o método permaneceu fastidioso e difícil de utilizar e continuava a não mostrar com clareza as diferenças de densidade entre os vários tipos de tecido no interior do corpo.

²² Nem todos os cérebros de vacas serviam. O método de abate nos matadouros da época danificava-os, pelo que ele tinha de se deslocar aos matadouros judaicos *kosher*, onde os cérebros dos animais ficavam menos danificados e podiam ser usados nas experiências de TC.

²³ S. Bates *et al.*, *Godfrey Hounsfield: Intuitive Genius of CT*, Londres, British Institute of Radiology, 2012.

²⁴ *Ibid.*

CAPÍTULO 2

A Experiência da Folha de Ouro: A Estrutura do Átomo

Ernest Rutherford encontrava-se havia poucos meses em Montreal quando recebeu o convite para um debate na Sociedade de Física local. O ano era 1900 e o tema «a existência de corpos mais pequenos do que os átomos». Rutherford estava desejoso de participar e escreveu ao seu antigo orientador, J. J. Thomson, que esperava demolir os argumentos do seu opositor, Frederick Soddy, um químico formado em Oxford que era seis anos mais novo do que ele. Soddy interessara-se sempre pelos problemas na fronteira entre a física e a química, mas em Rutherford encontraria um físico que abalou os próprios fundamentos da química¹. O debate desencadearia uma das mais espantosas séries de descobertas em ciência e conduziria não apenas os cientistas, mas também artistas, filósofos e historiadores, a repensarem os seus pressupostos sobre o mundo à sua volta.

Soddy falou primeiro. Era um homem alto, de ar grave, com cabelo louro e olhos azuis. Sendo o mais novo de sete irmãos nascidos no sul de Inglaterra, conseguiu superar um problema de fala na infância e transformou o seu antigo quarto de brincar num laboratório de química onde podia realizar experiências, que por

vezes quase incendiaram a casa. Tinha dois valores muito firmes: verdade e beleza².

Soddy estava ali para defender o átomo. Pensava que o eletrão descoberto por Thomson e outros devia ser diferente da «matéria» que ele e os restantes químicos conheciam. «Os químicos conservarão uma crença e uma reverência pelos átomos como identidades que continuam a ver como concretas e permanentes, se não mesmo imutáveis, e seguramente não sujeitas a transmutações», afirmou. Lançou um desafio a Rutherford: «Talvez o professor Rutherford seja capaz de nos convencer de que a matéria que ele conhece é, de facto, a mesma matéria que nós conhecemos.»³

Rutherford defendeu a sua posição com energia. Os eletrões, segundo ele, faziam parte da matéria comum. Descreveu o trabalho de Thomson e dos seus predecessores, pessoas como Heinrich Hertz e Philipp Lenard na Alemanha, Jean Perrin em França e William Crookes em Inglaterra. Reexaminou as experiências de Thomson que tinham conduzido à descoberta do eletrão e explicou que, como os eletrões pareciam provir da matéria, deviam fazer parte do átomo. Rutherford explicou os novos resultados experimentais tão bem que convenceu a audiência da Universidade McGill, formada por estudantes e professores, de que podiam abandonar a sua convicção, longamente mantida, de que os átomos eram os menores componentes imutáveis da matéria. Conquanto Rutherford possa ter vencido o debate, permaneciam muitas questões sobre o que se passava no interior da matéria. Químicos e físicos continuavam divididos.

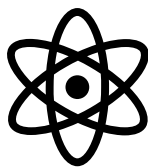
Rutherford — Ern para os amigos — era físico, mas em nada correspondia ao estereótipo do físico introvertido. Alto e atlético, tinha uma voz tão forte que perturbava o funcionamento do equipamento delicado do seu laboratório. Frustrados, os seus alunos viriam a construir um sinal luminoso que colocaram sobre os dispositivos experimentais e onde se lia: «Fale baixo, por favor.» De acordo com o escritor Richard P. Brennan, Rutherford tinha «a convicção profunda de que praguejar perto do equipamento tinha bons efeitos na experiência e, se pensarmos nos resultados por ele obtidos, talvez tivesse razão»⁴.

Quando Rutherford chegou à Universidade McGill, parecia jovem demais para ocupar um lugar de professor de Física. A sua carreira fora impulsionada pela forte recomendação de Thomson, seu ex-orientador. Poucos anos antes, Rutherford transferira-se da Nova Zelândia natal para Inglaterra e embarcara na vaga crescente de novas descobertas no domínio da radiação, mergulhando nela com o entusiasmo de uma mente jovem e brilhante decidida a mostrar o seu valor. Não tardou a distinguir-se em Cambridge como um estudante fantástico, mostrando ser capaz de conduzir uma investigação com autonomia enquanto o seu orientador estava ocupado (embora, para sermos justos, não nos podemos esquecer de que se tratava da descoberta do eletrão).

A descoberta da radioatividade acontecera de maneira algo accidental em 1896, quando o físico francês Henri Becquerel estudava a emissão de luz por cristais de urânio. Em 1898, Marie Curie descobriu a radiação emitida pelo elemento tório, e, em equipa com o marido, Pierre, que se lhe juntou à investigação,

anunciou a descoberta do polônio⁵ e do rádio, que deu o seu nome à radioatividade, tudo isso num ano espantoso. Durante os seus estudos de pós-graduação em Cambridge, Rutherford associara-se ao empreendimento e demonstrara que existiam pelo menos dois tipos distintos de radiação: a radiação alfa, que podia ser travada com uma folha de papel, e a radiação beta, que o era apenas por um tabique de madeira⁶. As radiações alfa, beta e, alguns anos depois, gama foram designadas com as três primeiras letras do alfabeto grego. A princípio, a sua natureza era desconhecida, mas pouco tardou até Becquerel identificar a radiação beta como elétrons em 1899 e Rutherford compreender que a radiação alfa consistia em átomos de hélio que haviam perdido dois elétrons — ficando com dupla carga elétrica positiva — em 1907. Embora se desconhecesse na época, a radiação gama consiste em luz com energia elevada, semelhante aos raios X. As descobertas de Rutherford no âmbito da radioatividade chamaram por certo a atenção de Thomson.

Com o seu novo cargo docente na Universidade McGill, a sua primeira equipa de investigação e um laboratório próprio, Rutherford queria aprofundar ainda mais o conhecimento do fenómeno da radioatividade. O Canadá proporcionava uma atmosfera bastante diversa da de Cambridge, mas que o libertava dos constrangimentos sociais de uma venerável universidade inglesa para fazer o que lhe apetecesse. Colocou a fasquia bem alto: queria compreender a estrutura do átomo.



Após aquele primeiro debate em 1900, nasceram um interesse e uma colaboração genuínos entre Soddy e Rutherford, bem como uma curiosidade crescente e recíproca em relação ao trabalho que desenvolviam. Soddy estava tão determinado em saber mais sobre radiação que frequentou um curso avançado lecionado por Rutherford, em que aprendeu mais sobre os raios X e as radiações do urânio e do tório e realizou trabalhos práticos com um eletrómetro. Uma vez que era químico, ficou muito impressionado com este instrumento, que permitia detetar porções minúsculas de tório com base na radiação que emitia. Era um método muito mais sensível do que a simples pesagem dos materiais a que recorriam os químicos. Com efeito, o método eléctrico conseguia detetar uma quantidade de material 10^{12} (1 000 000 000 000) vezes menor do que a melhor balança analítica.

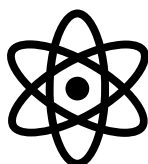
Entretanto, Rutherford acolheu o primeiro estudante de pós-graduação: uma mulher chamada Harriet Brooks. As estudantes de pós-graduação eram extremamente raras nessa época, embora os êxitos de Marie Curie tenham talvez contribuído para alguma mudança. Brooks, terceira dos nove filhos da família, era oriunda de uma pequena cidade no Ontário ocidental. O pai era caixeiro-viajante no sector das farinhas e não costumava haver muita comida para distribuir pelas crianças às refeições. Infelizmente, sabe-se muito pouco acerca da maneira como descobriu o seu amor pela física, bem como sobre a sua personalidade ou o seu

comportamento: tratava-se de coisas sobre as quais simplesmente não se escrevia⁷. O que parece claro é que ela percebeu o que os estudos superiores lhe podiam dar: capacidade de sair da casa da família e de se tornar independente. Ao fim de quatro anos em McGill licenciou-se com distinção e obteve uma série de bolsas de estudo em matemática e alemão, que aliviaram a necessidade de receber ajuda da família. Tratando-se de uma estudante tão brilhante, era natural que Rutherford — sem preconceitos de género — a convidasse para trabalhar consigo.

Em conjunto, Brooks e Rutherford investigaram o elemento tório, revelando que ele emitia uma «emanação» misteriosa, uma espécie de gás que nunca fora observado. Isto era bastante estranho mas descobriram também que a emanação parecia tornar radioativos os objetos próximos. Ou seja, quando a emanação entrava em contato com um objeto, parecia afetá-lo ao ponto de se gerar uma emissão espontânea de radiação alfa, beta ou gama, tal como sucedia com materiais radioativos naturais como o rádio e o polónio.

Brooks ganhou uma bolsa pelo seu projeto de doutoramento com Rutherford e usou-a em 1902 para custear a sua viagem do Canadá para Inglaterra, onde foi trabalhar com J. J. Thomson, tornando-se a primeira mulher a estudar no Laboratório Cavendish. Inspirado pelos resultados de Brooks, Rutherford começou a pensar que precisava de uma pessoa conhecedora das técnicas químicas para o ajudar a compreender o que se passava. Assim, convidou Soddy, que abandonou de imediato a investigação que estava a desenvolver para colaborar com ele⁸.

Soddy prosseguiu o trabalho de Brooks com recurso a métodos químicos, procurando verificar se a emissão de tório reagia com diferentes agentes químicos, mas sem êxito. Descobriu que a temperatura não afetava o resultado da experiência, tal como o facto de decorrer em ambiente de dióxido de carbono em vez de ar. Parecia que a emissão consistia num certo tipo de gás inerte. Tinha a certeza de que não era tório, mas que era criado por este elemento. Por fim, percebeu: o tório *transformava-se no gás*. De modo espontâneo, os átomos de tório mudavam de forma. Não era propriamente concretização do sonho dos alquimistas de transformar chumbo em ouro, mas era um facto: os átomos sofriam mudanças. Soddy estava «ali especado, como que aturdido pela importância colossal do resultado» e exclamou: «Rutherford, isto é uma transmutação!»⁹



Sabemos hoje que Rutherford e Soddy observavam o decaimento dos elementos radioativos, que se transformam noutros elementos pela emissão de partículas alfa e beta, dando origem a substâncias estáveis. Há muito que a natureza fazia graciosamente a sua alquimia. Soddy, que poucos anos antes defendia a imutabilidade dos átomos químicos, encontrara provas que refutavam por completo a sua mundivisão.

A sua investigação determinaria que o decaimento radioativo segue uma lei exponencial. Há um período, conhecido por «meia-

vida», que corresponde ao intervalo de tempo necessário para que os átomos de um pedaço de material radioativo se transformem noutro tipo de átomos. Se partirmos de uma centena de átomos de oxigénio-15 (um tipo de oxigénio radioativo cuja massa atómica é 15 vezes maior do que a de um átomo de hidrogénio), passados apenas dois minutos restarão apenas 50 átomos. Os outros 50 transformaram-se em nitrogénio-15. Decorridos mais dois minutos, há apenas 25 átomos (metade de 50). Após mais dois minutos, são só 12,5 átomos, e assim por diante. (Tecnicamente não é possível ter meio átomo, mas o tempo de «meia-vida» de dois minutos continua igual.) A matéria deixara de ser a substância estável e imutável que sempre parecera.

As ideias de Rutherford e Soddy eram radicais pelos padrões do início do século XX, o que suscitou reações contraditórias na comunidade científica. Em Londres, a principal figura da física britânica, Lorde Kelvin (William Thomson), recusou-se liminarmente a aceitar a desintegração dos átomos. Os químicos, que acreditavam na indestrutibilidade da matéria, contestaram com vigor as implicações da pesquisa. Em McGill, as excentricidades e as teorias da radioatividade de Rutherford começavam também a perturbar os outros professores. Os seus colegas pensavam que as suas ideias pouco ortodoxas sobre a matéria poderiam atrair o descrédito sobre a universidade: os membros da Sociedade de Física onde decorrera o debate entre ele e Soddy eram extremamente críticos e aconselharam-no a adiar a publicação e a ser mais cauteloso¹⁰. A certa altura, os professores seus colegas convocaram-no para uma reunião e avisaram-no sem rodeios de

que devia moderar as suas opiniões. Rutherford saiu porta fora, mal conseguindo disfarçar a sua fúria.

Rutherford não aguentaria muito mais tempo. Em 1904, enquanto passeava no *campus*, encontrou o professor de Geologia Frank Dawson Adams. Sem qualquer preâmbulo, perguntou a Adams qual era a idade estimada da Terra. Adams arriscou o número de cem milhões de anos, baseado em vários métodos de estimativa correntes. Rutherford enfiou a mão no bolso, retirou dele uma pedra negra, e disse: «Adams, não tenho qualquer dúvida de que este pedaço de pecheblenda tem 700 milhões de anos» e foi-se embora.

Rutherford compreendera que a matéria em contínuo decaimento radioativo na natureza podia ser utilizada para estimar a idade da Terra. As rochas continham uma pequena quantidade de átomos radioativos, que haviam sido estudados por Soddy e por ele próprio. Se se conhecesse a taxa de decaimento de um átomo em outro, podia contabilizar-se o número de átomos não-decaídos, compará-lo com o número de partículas «filhas» e calcular a duração de existência do objeto. Rutherford propôs a ideia de «datação radiométrica». As suas primeiras estimativas baseavam-se no urânio-238, em que 238 é o número de massa atômica. Os elementos com número de massa diferente chamam-se isótopos e podem ter propriedades radioativas diferentes, embora sejam o mesmo elemento químico (Soddy descobriu os isótopos, tendo criado o termo em 1913). O urânio-238 tem uma meia-vida de 4,51 mil milhões de anos e sofre um decaimento lento através de uma série de etapas intermédias até originar o chumbo-206, que é

estável, Com as estimativas aproximadas das meias-vidas obtidas no laboratório, Rutherford comparou as quantidades de urânio e de chumbo numa amostra de pecheblenda e descobriu que era muito mais antiga do que a alegada idade da Terra.

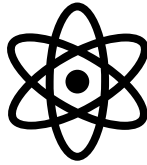
Porém, uma coisa era impressionar professores de Geologia, outra, convencer os físicos e os químicos de que ele tinha razão quanto à transmutação dos átomos. Rutherford deslocou-se a Inglaterra, onde em 20 de maio de 1904 deu uma palestra na Royal Institution, apresentando as suas descobertas sobre a radioatividade. Na audiência, avistou Lorde Kelvin. Este já se debatia com a ideia da desintegração dos átomos, e Rutherford antecipava que a última parte da palestra, em que planeava falar sobre a idade da Terra, seria especialmente dura para ele. Kelvin era considerado a autoridade na idade do nosso planeta, baseada num cálculo que realizara sobre a taxa de arrefecimento da Terra¹¹. Rutherford lembraria: «Para meu alívio, Kelvin adormeceu rapidamente, porém, quando eu cheguei ao ponto quente, vi o velhote endireitar-se na cadeira, abrir os olhos e deitar-me uma mirada nefasta! Tive então uma inspiração súbita: disse que Lorde Kelvin tinha circunscrito a idade da Terra, desde que nenhuma nova fonte [de energia] fosse descoberta. “Ora essa afirmação profética encontra eco naquilo que hoje nos ocupa: o rádio!” Pasmai: o velhote sorriu-me!»¹²

À medida que as provas chegavam de outros laboratórios, confirmavam a ideia de que muitos elementos eram instáveis e tinham meias-vidas. Num encontro da British Association for the Advancement of Science, Lorde Kelvin abandonou publicamente a

sua posição anterior contrária à radioatividade e foi obrigado a pagar uma aposta que fizera com outro físico, Lorde Rayleigh. A restante comunidade foi lentamente aceitando que a radioatividade acontecia de facto da maneira sugerida por Rutherford e Soddy.

Quando Rutherford recebeu o prémio Nobel da Química, em 1908, comentou que testemunhara muitas transformações no laboratório, mas nenhuma delas tão rápida como a sua própria e súbita transformação de físico em químico. Soddy também viria a ganhar o Nobel em 1921, pelo seu contributo para a radioquímica, sob proposta de Rutherford. Quanto a Harriet Brooks, estava em Cambridge quando Soddy e Rutherford descobriram a transmutação em 1902, mas J. J. Thomson estava demasiado ocupado para reparar no trabalho dela. Brooks regressou ao Canadá em 1903 e continuou a realizar investigação de excelência em radioatividade até ficar noiva, em 1905. Nessa data, a faculdade onde ela lecionava informou-a de que teria de abandonar o cargo caso se casasse¹³. Brooks rompeu o noivado e continuou a trabalhar. Em 1907, depois de conhecer e de trabalhar com Madame Curie em Paris, Brooks enfrentou uma escolha difícil. Outro professor canadiano, um antigo demonstrador do laboratório, começou a expressar interesse romântico por ela numa série de cartas. Brooks tinha 31 anos e a pressão social para se casar e ter filhos era enorme. Rutherford — então em Manchester — tentou contratá-la de maneira a garantir-lhe a independência financeira. Numa carta de recomendação confirmava que Brooks era a mais proeminente física da radioatividade a seguir a Curie. Por fim, Brooks optou por aceitar a proposta de casamento e regressou ao Canadá, onde deu à luz três filhos. A sua carreira na física terminou. Apenas na década

de 1980 o seu trabalho foi reconhecido como essencial para a descoberta, por Rutherford e Soddy, de que os elementos se desintegram e se transformam noutros elementos¹⁴.



Para muitas pessoas, o Nobel seria o apogeu da carreira, mas para Rutherford viria a ser apenas a primeira etapa. Ainda não tinha obtido resposta à sua pergunta inicial: qual é a estrutura do átomo? A sua capacidade para dar largas à imaginação e materializá-la em experiências simples, mas significativas, granjeara-lhe fama. Em 1907 regressou ao Reino Unido para chefiar o departamento de Física da Universidade de Manchester. A sua próxima descoberta obrigaria os físicos e os químicos a uma nova mudança na forma de pensar, baseada numa das mais simples e mais famosas investigações da física: a experiência da folha de ouro.

Apesar dos numerosos avanços alcançados por Rutherford, experiências que concebeu em 1908 eram ainda muito primitivas. Ninguém melhor do que ele descreveu a sua abordagem: «Como não há dinheiro, temos de pensar.» Os estudantes e o pessoal da equipa de investigação de Rutherford eram conhecidos por utilizar objetos como latas, caixas de tabaco e lacre, combinados com trabalho árduo. Regozijavam-se nas suas tentativas de descobrir formas de testar a natureza com métodos astutos, mas pouco sofisticados. Um dos seus alunos, o físico australiano Mark Oliphant, escreveria mais tarde: «Ele estava cheio de ideias, mas eram

sempre ideias simples. Gostava de usar palavras para descrever o que se passava.»¹⁵ O mesmo sucedia com a sua visão do átomo.

Rutherford descreveu a sua ideia de átomo na viragem do século XX como «um sujeito bonito e rígido, de cor vermelha ou cinzenta, conforme o gosto». É fácil imaginar que os minúsculos átomos que compõem os nossos alimentos, os nossos corpos e o nosso planeta são como pequenas bolas de bilhar, uma imagem que nos foi transmitida com frequência na escola¹⁶. Em 1908, apesar de já terem passado dez anos desde que Thomson descobrira o eletrão, os físicos continuavam no escuro em relação à estrutura interna do átomo. Mas Rutherford começava a suspeitar que a composição do átomo e a radioatividade estavam intimamente ligadas.

A visão de Thomson, e de muitos outros, equiparava o átomo a uma esfera com carga positiva, onde estavam incrustados os eletrões com carga negativa: o chamado «modelo do pudim de passas». Havia outras ideias, tais como o modelo «saturniano», proposto pelo físico japonês Hantaro Nagaoka, de uma «massa atratora central rodeada por anéis de eletrões em rotação», mas não existiam provas de que este modelo estivesse de modo algum correto¹⁷. Rutherford tinha enorme respeito por Thomson, mas começava a duvidar do seu antigo orientador.

O domínio de Rutherford crescia, tal como as suas responsabilidades. Coordenava agora um departamento em Manchester, alojado num imponente edifício moderno com gabinetes e laboratórios construídos à medida. Rutherford reservou um dos laboratórios para si, tornando-o o seu laboratório pessoal.

Tal como muitos outros, tinha soalho de madeira maciça e paredes revestidas a azulejos: amarelo-mostarda perto do chão, um friso vermelho-escuro à altura das bancadas, e de cor creme estendendo-se até ao teto. Talvez austero, mas com funções eminentemente práticas. Aqui, Rutherford tentava descobrir como era, de facto, o interior do átomo. Ou melhor, tentavam o seu pessoal e os seus alunos.

Como diretor do laboratório, Rutherford estava demasiado ocupado para realizar pessoalmente a maior parte das experiências, mesmo que o desejasse. Em vez disso, o seu trabalho consistia em reunir um conjunto de pessoas que conseguissem trabalhar em equipa para os objetivos do laboratório, e remeter-se a visitas regulares para observar os resultados, contribuir com sugestões e manter a motivação. Numa dessas visitas, Rutherford conheceu Ernest «Ernie» Marsden, um estudante de 20 anos, natural de Lancashire, cheio de energia e entusiasmo. Rutherford era tão alto que fazia que Marsden e toda a gente parecessem minúsculos. Filho de um tecelão, Marsden adorava música e literatura, bem como ciência, e escolhera estudar física por influência dos seus professores da escola secundária. Dotado de um riso contagiante, a sua companhia era muito apreciada pelos colegas¹⁸. Marsden precisava de um projeto de investigação para a sua tese de licenciatura. Rutherford lançou-lhe uma ideia.

Durante a sua estada no Canadá, Rutherford observara que, quando as partículas alfa atravessavam uma folha metálica, criavam uma imagem difusa numa chapa fotográfica. Se a folha de metal fosse removida, a imagem na chapa tornava-se nítida. Era

como se as partículas alfa fossem espalhadas, talvez desviadas pelos átomos do metal, mas ele não compreendia porquê. Tratava-se de um efeito minúsculo, que passaria despercebido a muitas pessoas. Rutherford convenceu Marsden a realizar experiências para aprofundar o estudo desse efeito.

Para o orientar, Rutherford colocou-o sob a supervisão de Hans Geiger, um físico de origem alemã, com mais seis anos e meio do que Marsden. Geiger tinha nascido em Neustadt, no estado da Renânia-Palatinado, uma bela região vinhateira. Sentia-se fascinado pelo mundo natural e tinha prazer e orgulho em conceber experiências. Concluía o doutoramento havia pouco tempo e mudara-se para Manchester aquando da chegada de Rutherford. Mais tarde, ficaria famoso pela invenção do contador de Geiger. Rutherford abriu as portas do seu laboratório pessoal aos dois jovens para realizarem as suas experiências.

Os membros da equipa de Rutherford já tinham estudado o modo como os eletrões se dispersavam ao atravessar metais. Eles descobriram que os eletrões sofriam uma série de colisões com os átomos de metal e que alguns deles eram defletidos na direção da origem. Agora, a questão estava em saber como se comportariam as partículas alfa numa experiência semelhante. As partículas alfa (ou núcleos de hélio, como hoje as designamos) são cerca de sete mil vezes mais pesadas do que os eletrões, e essa categoria de peso-pesado significa que é necessária uma força considerável para as fazer mudar de trajetória durante a sua viagem. A intuição diz-nos que as partículas deveriam atravessar sem problemas a folha de metal. Porém, o facto de Rutherford ter observado que elas

geravam uma imagem difusa quando eram disparadas contra a folha de metal era muito intrigante. As perguntas eram claras: se as partículas alfa fossem disparadas, uma a uma, contra o metal, de que maneira a espessura deste afetaria a maneira como se dispersavam ou eram defletidas?

Para Marsden foi uma boa formação ajudar a montar a experiência, que era deveras característica do laboratório de Rutherford. Este tipo de experiências consumia um número infindável de horas, uma vez que era preciso observar um ecrã ao microscópio e contabilizar os pequenos clarões gerados pelas partículas alfa. Requeria tempo e determinação, pelo que Geiger e Marsden entregaram-se ao trabalho.

A experiência baseava-se numa variante do tubo de vácuo. Em vez de construírem um tubo de raios catódicos, que produzia eletrões, queriam utilizar partículas alfa. Numa extremidade do tubo instalaram uma potente fonte radioativa de partículas alfa, constituída pelo elemento rádio, e fecharam a outra extremidade com uma rede de mica, um material fino que as partículas alfa conseguiam atravessar. Posicionaram o tubo num ângulo de 45 graus em relação a uma chapa grossa de metal e, nos 45 graus do ângulo de reflexão, colocaram um ecrã detetor de sulfureto de zinco, o qual emitia um clarão quando era atingido por uma partícula alfa. Tiveram o cuidado de interpor uma chapa de chumbo entre o tubo emissor de partículas alfa e o detetor, para impedir que partículas extraviadas atingissem diretamente o detetor, perturbando os resultados. O dispositivo estava concebido de maneira a detetar apenas as partículas alfa que eram defletidas pelo

metal. A seguir, Geiger e Marsden prepararam-se para observar os clarões no ecrã.

Em primeiro lugar, observaram o que acontecia quando as partículas alfa atingiam a superfície de uma chapa espessa de metal. Tal como sucedia com os eletrões, eram poucas as partículas alfa defletidas. Para chapas metálicas espessas, as partículas alfa comportavam-se de uma maneira geral como os eletrões. No interior do metal, esperava-se um pequeno número de deflexões das partículas alfa por cada átomo singular. Uma chapa grossa de metal contém numerosas camadas de átomos e, embora as partículas alfa fossem sete mil vezes mais pesadas do que os eletrões, o resultado confirmou a previsão: até mesmo projéteis pesados como as partículas alfa podiam ser defletidos, após um número suficiente de colisões. O tipo de metal faria diferença? A resposta parecia ser positiva. Os metais compostos por elementos mais pesados, como o ouro, defletiam mais partículas alfa do que os mais leves, como o alumínio.

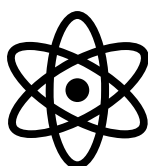
A seguir, Geiger e Marsden verificaram se a espessura do metal influenciava os resultados. Eles supunham que, se a folha de metal fosse suficientemente fina, seria atravessada em linha reta pelas partículas alfa, embora pudessem dispersar-se um pouco, tal como Rutherford tinha observado. Escolheram o ouro para esta parte da experiência, porque podia obter-se com facilidade sob a forma de finas lâminas. Foram variando gradualmente a espessura da folha de ouro e contabilizaram o número de «cintilações» que observavam no ecrã. Consoante diminuía a espessura da folha, parecia que as partículas alfa começavam a atravessá-la em linha

reta, tal como se esperava. Mas foi então que repararam em algo de estranho: por muito fina que fosse a folha de ouro, o ecrã de sulfureto de zinco continuava ocasionalmente a iluminar-se. Cerca de uma em cada oito mil partículas alfa era defletida pela folha e incidia no ecrã. Não se tratava de uma pequena «cotovelada» a alterar um pouco a trajetória da partícula alfa; era um efeito maciço que defletia por completo as partículas alfa e as lançava contra o ecrã, como se fossem refletidas pela folha. Mas como podia isso acontecer? Nada do que conheciam a respeito do interior dos átomos de ouro podia causar este efeito. Parecia desafiar todas as leis da física conhecidas. Como podia uma pesada partícula alfa ser defletida por eletrões minúsculos, ou pela carga positiva difusa do átomo?

Geiger e Marsden deram a notícia a Rutherford. Mais tarde, este escrevê-la-ia como «o acontecimento mais incrível a que jamais assistira na minha vida. Foi quase tão incrível como se disparasse um projétil de 37,5 centímetros contra uma folha de papel e ele voltasse para trás e me atingisse». Ao saber dos resultados, Rutherford teve de pensar em todas as explicações plausíveis e excluí-las uma a uma. Se o modelo do pudim de passas estivesse correto, o desvio das partículas alfa teria de ser pequeno, mas não fora isso o que Geiger e Marsden tinham observado. Precisavam de perceber a causa da deflexão das partículas alfa, que parecia ser uma força poderosa presente nos átomos de ouro. Havia várias hipóteses a considerar: a experiência enfermava de erros; as partículas alfa podiam ter sido absorvidas pelos átomos e depois reemitidas; ou talvez toda a carga positiva do átomo pudesse estar concentrada numa zona central do mesmo.

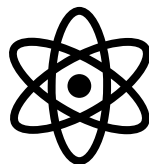
A experiência foi conduzida em 1907-1908 e publicada em 1909, mas a teoria de Rutherford sobre o significado que ela tinha para o átomo só ficou concluída em 1911. Durante este período Rutherford recolheu-se e fez cálculos, chegando mesmo a frequentar um curso de Matemática para ter a certeza de que não se enganava. Chegava sempre à conclusão de que havia apenas uma explicação compatível com os dados: os átomos *deviam* ser sobretudo espaço vazio com um núcleo denso e minúsculo.

Se Rutherford queria derrubar o modelo aceite para o átomo, tinha de demonstrar de forma inequívoca que o novo modelo estava correto. Ao longo dos anos seguintes, auxiliados pelo contador inventado por Geiger para medir radiação, Marsden e Geiger realizaram um outro conjunto de experiências, graças às quais todas as peças se encaixaram. Só depois é que Rutherford anunciou ao mundo a sua nova teoria. O átomo não era um pudim de passas crivado de eletrões negativos: tinha no cerne um minúsculo núcleo de carga positiva, suficientemente denso para conseguir desviar partículas alfa quando elas se aproximavam. Os eletrões também integravam os átomos, mas orbitavam o núcleo a uma distância enorme. Se o átomo fosse do tamanho de uma catedral e os eletrões estivessem nas paredes, o núcleo seria do tamanho de uma mosca. O espaço entre eles estava vazio.



As experiências de Geiger e Marsden mudaram por completo a visão dos átomos e também a do Universo. Longe da sua imagem de entidades sólidas, consagrada ao longo de milénios, os átomos eram formados sobretudo por espaço vazio. É difícil sobrestimar a surpresa causada por este resultado. Tal como Arthur Eddington escreveu em 1928:

Quando comparamos o Universo, tal como agora se supõe que seja, com o que habitualmente concebíamos, a mudança mais espantosa não é o rearranjo do espaço e do tempo por Einstein, mas antes a dissolução de tudo o que víamos como sólido em minúsculas partículas flutuando no vazio. Trata-se de um choque abrupto para os que pensam que as coisas são mais ou menos o que parecem. A revelação pela física moderna do vazio do interior do átomo é mais perturbadora do que a revelação pela astronomia do vazio imenso do espaço interestelar.¹⁹



Compreender o aspeto do interior de um átomo poderia parecer apenas um pormenor interessante. Porém, esta descoberta e compreensão dos mecanismos do decaimento e da transmutação radioativos dominaram a ciência, a tecnologia e até a política durante décadas. O facto de os átomos serem compostos por um núcleo minúsculo, denso e com carga positiva, rodeado por eletrões com carga negativa, deu origem a todo o domínio da «física nuclear».

Estas experiências tão simples foram a fonte de onde brotou uma quantidade enorme de conhecimento. Rutherford estava tão empolgado que, numa ocasião, o químico C. P. Snow, um dos colaboradores de Rutherford em Cambridge que viria a tornar-se um escritor famoso, relembra que Rutherford mal conseguia conter o entusiasmo e foi aos gritos que anunciou num encontro da British Association: «Vivemos na grande Era da ciência!», enquanto a audiência permanecia num silêncio atônito.

O seu entusiasmo era bem fundado: ele percebera o potencial que advinha do conhecimento do núcleo atômico e do modo como funciona a radioatividade. Hoje, muitas pessoas associam as palavras «nuclear» e «radioatividade» com as tecnologias da energia nuclear e do armamento nuclear que emergiram décadas após estas descobertas. O poder libertado pela investigação do núcleo e pela natureza invisível da radioatividade pode por vezes suscitar medo. Porém, se a radioatividade não existisse, se todos os elementos fossem estáveis, se o núcleo não fosse maravilhosamente complexo, tanto nós quanto o nosso planeta e tudo o que nele existe não estaríamos aqui. A radioatividade existe porque o átomo tem uma estrutura, e a descoberta dessa estrutura conduziu-nos a um entendimento mais profundo e mais fundamental da natureza da matéria, que perseguíamos havia milénios.

A radioatividade é um processo natural. É a manifestação da ideia de que tudo nas nossas vidas, incluindo a própria matéria, se encontra em permanente mudança. Esta mudança é tremendamente lenta nalguns casos, pelo que dizemos que alguns

átomos são «estáveis», o que significa que ainda não observamos o seu decaimento, visto que as suas meias-vidas são muito superiores à idade do Universo. Porém, outros átomos são decididamente instáveis. Possuem meias-vidas que vão desde milhares de milhões de anos até dias ou minutos e, por essa razão, são muito mais interessantes — e amiúde úteis.

Estes elementos radioativos encontram-se na natureza em rochas, no ar, em quase toda a parte. O granito da sua banca de cozinha pode conter urânio, tório e os respetivos produtos de decaimento radioativo. Alguns elementos como o potássio (cujo símbolo químico é K) possuem isótopos, quer estáveis quer instáveis que diferem na sua massa atômica, porque os seus núcleos contêm um número variável de neutrões, que pode ser superior ou inferior ao de protões. Os isótopos do mesmo elemento podem apresentar propriedades radioativas diferentes. Por exemplo, a maior parte do potássio é composta pelo isótopo estável K-39, mas 0,0012 por cento corresponde ao isótopo K-40, com um neutrão suplementar, que emite sobretudo radiação beta (eletrões) com uma meia-vida de 1,3 mil milhões de anos. Isto significa que até as bananas são, tecnicamente, radioativas. Porém, a dose de radiação é minúscula, e seria preciso comer cinco milhões de bananas de uma só vez para sentir os seus efeitos negativos. Inevitavelmente, também os nossos corpos contêm estes isótopos. Todos somos radioativos.

Hoje, dependemos de elementos radioativos existentes na natureza para numerosas tecnologias, desde os detetores de fumo (onde as partículas alfa de uma fonte de amerício geram uma

pequena corrente, que é interrompida se o fumo dispersar as partículas alfa) até às fontes radioativas que fazemos descer a furos profundos no solo para analisar a composição da rocha circundante. Esta técnica, conhecida por *borehole logging*, estimula a emissão de raios gama pelos elementos das rochas e permite que o operador avalie, sem precisar de escavar muito, se existem minerais preciosos, petróleo, gás ou outras mercadorias valiosas escondidas a profundidades superiores. Outras fontes radioativas têm vindo a ser usadas há muitos anos no tratamento do cancro, e para esterilizar o correio, em particular desde as tentativas de envenenamento por antraz ocorridas em 2001. O correio dirigido ao governo dos Estados Unidos passou a ser esterilizado por meio de radiação²⁰.

Hoje, a aplicação da radioatividade natural em outras áreas da sociedade tornou-se uma parte tão integrante do nosso mundo que é fácil esquecer que não existia antes das descobertas de Rutherford, Soddy, Brooks, Geiger e Marsden. Basta-nos visitar um museu situado a curta distância do velho laboratório de Rutherford, o Museu de Manchester, para termos uma prova disso. Não encontramos ali nenhum equipamento antigo de física, mas sim um grande número de fósseis (incluindo um enorme esqueleto de *T.rex* chamado *Stan*). Existe a reprodução do vasto sistema radicular de uma árvore do período Carbónico Superior, cuja idade se situa entre 290 milhões e 323 milhões de anos. Há um plesiossauro descoberto no norte de Yorkshire por um grupo de estudantes universitários: os seus ossos fossilizados com 180 milhões de anos estão ordenados no pavimento, no interior de uma enorme vitrina. É fácil supor que sempre dispusemos de técnicas para determinar a idade

absoluta de fósseis, rochas e artefactos antigos, mas, tal como a conversa de Rutherford com o geólogo Adams nos recorda, isso é falso. A principal razão pela qual conhecemos objetivamente a idade de quase todos os objetos históricos sobre os quais não há registo escrito reside no nosso conhecimento da radioatividade.

Após a descoberta do núcleo, por Rutherford, os físicos precisaram de tempo para compreender a física nuclear suficientemente bem e perceber a razão da diferença entre as meias-vidas dos diferentes átomos. Entretanto, a descoberta na natureza de numerosos átomos instáveis com meias-vidas distintas proporcionou uma grande variedade de instrumentos e técnicas de datação não apenas de fósseis mas de quase tudo. É impossível mencionar tudo o que sabemos devido às técnicas de datação radiométrica, mas consideremos apenas os exemplos que se seguem.

Sabemos que o Sudário de Turim é uma falsificação medieval²¹ e conseguimos datar os Manuscritos do Mar Morto. Sabemos que o *Homo sapiens* migrou de África não de uma vez só, mas ao longo de múltiplos períodos²², e sabemos como se espalhou pelo globo porque conseguimos datar os despojos humanos, tais como os que foram descobertos numa caverna no Oregon, com 14 300 anos²³. Em arqueologia, conseguimos situar os objetos numa escala temporal não apenas local, mas também compará-los em diversos países e até continentes, o que nos permite construir uma história do mundo pré-histórico. Conseguimos datar gelo com 1,5 milhões de anos²⁴ e perceber como era o clima antigo a partir das amostras desse gelo. É também graças à datação radiométrica que sabemos

quando os dinossauros habitaram a Terra e a data do asteroide que parece ter sido a causa da sua extinção há 65 milhões de anos²⁵. Recuando ainda mais, conseguimos identificar os primeiros vestígios de fósseis que correspondiam a animais: uma espécie de esponja marinha primitiva, descoberta em rochas com 665 milhões de anos na formação de Trezona, na Austrália do Sul²⁶.

Este conhecimento constitui uma porção muito rica do contexto cultural e histórico das nossas vidas e da nossa espécie. Podemos juntar todas estas histórias de uma maneira exata não só porque sabemos comparar estratos rochosos e esqueletos, mas também porque há um decaimento espontâneo de átomos noutros átomos: porque Rutherford, a sua equipa e outros cientistas depois dele desenvolveram e aperfeiçoaram estes métodos. A tentativa de compreender os objetos mais pequenos da natureza pode ter parecido uma parte obscura da física na época, mas transformou-se no alicerce de grande parte do nosso entendimento da cultura, da arte, da geologia e do nosso lugar na história do mundo.

Uma vez mais, foram experiências simples, conduzidas por alguns indivíduos, que desembocaram numa descoberta revolucionária: havia um núcleo minúsculo no próprio cerne da matéria. Esta descoberta suscitou também uma profusão de perguntas a que era necessário responder. O que dava coesão ao núcleo? Como se mantinham os eletrões no átomo? As primeiras respostas a estas perguntas chegariam com o despontar da mecânica quântica, que nasceu de experiências que estudavam a natureza da luz e as suas interações com a matéria. Ao longo do tempo, a física transformou-se num domínio de complexidade

crescente e as experiências simples de que Rutherford tanto gostava deixariam de revelar os segredos do átomo. As próprias substâncias radioativas disponíveis na natureza revelaram não ser suficientemente poderosas ou flexíveis e viriam a tornar-se a limitação, em vez do instrumento de descoberta. O progresso tecnológico e teórico começou a ficar muito ligado à experimentação. Os físicos principiaram a estabelecer ligações surpreendentes entre aspetos aparentemente díspares da natureza. Agora, a nossa história leva-nos à primeira dessas surpresas, na qual as interações da luz com a matéria conduziram os físicos a uma visão nova e inesperada do mundo ao seu nível mais fundamental.

¹ Após os seus estudos em Oxford, Soddy emigrara para o Canadá na esperança de conseguir um lugar de professor em Toronto, mas sem sucesso, pelo que acabou como demonstrador de química na Universidade McGill.

² Muriel Howorth, *Pioneer Research on the Atom: The Life Story of Frederick Soddy*, Londres, New World Publications, 1958.

³ Ibid.

⁴ Richard P. Brennan, *Heisenberg Probably Slept Here: The Lives, Times and Ideas of the Great Physicists of the 20th Century*, Hoboken, N. J., J. Wiley, 1997.

⁵ Assim chamado em homenagem à Polónia, o país natal de Marie Curie.

⁶ Ernest Rutherford, «Uranium radiation and the electrical conduction produced by it», *Philosophical Magazine*, vol. 57, 1899, pp. 109-63.

⁷ M. F. Rayner-Canham e G. W. Rayner-Canham, *Harriet Brooks: Pioneer Nuclear Scientist*, Montreal, McGill-Queen's University Press, 1992.

⁸ T. J. Trenn, *The Self Splitting Atom: A History of the Rutherford-Soddy Collaboration*, Londres, Taylor and Francis, 1977.

⁹ Howorth, *Pioneer Research*.

¹⁰ A. S. Eve, *Rutherford: Being the Life and Letters of the Rt. Hon. Lord Rutherford*, Cambridge, Cambridge University Press, 1939, p. 88.

¹¹ Ibid.

¹² Ibid., p. 118.

¹³ Esta tradição, conhecida por «barreira» matrimonial, aplicava-se às mulheres na maior parte das profissões e apenas terminou no Canadá na década de 1950, tendo permanecido nos Estados Unidos e noutros países ocidentais até meados dos anos 1970.

¹⁴ Rayner-Canham, *Harriet Brooks*.

¹⁵ John Campbell, *Rutherford: Scientist Supreme*, Washington DC, AAS Publications, 1999,

¹⁶ Até hoje, os físicos admitem associar mentalmente os átomos e as partículas a pequenas bolas coloridas, uma imagem tão incorreta que muitos desejariam que nunca lhes tivesse sido ensinada quando eram pequenos.

-
- ¹⁷ H. Nagaoka, «Kinetics of a system of particles illustrating the line and the band spectrum and the phenomena of radioactivity», *Philosophical Magazine*, vol. 7(41), 1904.
- ¹⁸ C. A. Fleming, «Ernest Marsden 1889-1970», *Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society*, vol. 17, 1971, pp. 462-96.
- ¹⁹ Arthur Eddington, *The Nature of the Physical World*, Londres, Macmillan, 1928.
- ²⁰ United States Environmental Protection Agency, «Mail irradiation». Disponível online em <https://www.epa.gov/radtown/mail-irradiation>. Acedido em 29 de março de 2021.
- ²¹ P. E. Damon et al., «Radiocarbon dating the Shroud of Turin», *Nature*, vol. 337, 1989, pp. 611-15. <https://doi.org/10.1038/337611ao>.
- ²² C. J. Bae, K. Doouka e M. D. Petraglia, «On the origin of modern humans: Asian perspectives», *Science*, vol. 358 6368, 2017.10.1126/science.aai9067.
- ²³ Sarah Zielinski, «Showing their age: Dating the fossils and artifacts that mark the great human migration», *Smithsonian Magazine*, julho de 2008. Disponível em <https://www.smithsonianmag.com/history/showing-their-age-62874/>. Acedido em 29 de março de 2021.
- ²⁴ C. Buizert et al., «Radiometric 81Kr dating identifies 120,000-year-old ice at Taylor Glacier, Antarctica», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 111, 2014, pp. 6876-81. <https://doi.org/10.1073/pnas.1320329111>.
- ²⁵ A hipótese do asteroide foi originariamente proposta pelo físico Luis Alvarez (ver Capítulo 8) e pelo seu filho. Desde então tem-se debatido se a causa não terá sido antes vulcânica, mas a modelação de ambos os cenários em 2020 confirmou a maior probabilidade do modelo do asteroide. Ver Chiarenza et al., «Asteroid impact and not volcanism caused the end-Cretaceous dinosaur extinction event», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 117, 2020, pp. 17 084-93. <https://doi.org/10.1073/pnas.2006087117>.
- ²⁶ Adam C. Maloof et al., «Possible animal-body fossils in pre-Marinoan limestones from South Australia», *Nature Geoscience*, 3, 2010, pp. 653-9. <https://doi.org/10.1038%2Fng934>.

CAPÍTULO 3

O Efeito Fotoelétrico:

O Quantum de Luz

O que é a luz? O debate sobre a natureza da luz está aceso desde o século XVII. A princípio, supunha-se que a luz se comportava como uma partícula¹, um objeto que viajava velozmente em linha reta pelo hipotético éter — esta era a ideia defendida por Isaac Newton. No lado oposto estava o físico neerlandês Christiaan Huygens, uma figura de proa na Revolução Científica, que descobrira Titã, uma das luas de Saturno, e estabelecera a formulação matemática da teoria ondulatória da luz no seu «Tratado da Luz» de 1690. Huygens advogava a ideia de que a luz era uma onda que vibrava através do éter (o qual, como viria a verificar-se, não existia²). Embora o grande prestígio de Newton levasse à prevalência da teoria corpuscular durante muito tempo, as experiências, como sempre, têm mais valor do que a fama científica e deram a vitória a um modelo: a teoria ondulatória.

A experiência principal que resolveu a disputa a favor da teoria ondulatória foi realizada em Inglaterra por Thomas Young, em 1801. A versão moderna da experiência é muito fácil de recriar, razão pela qual é realizada por numerosos estudantes de física. Numa ponta do dispositivo experimental está um ponteiro laser, que é direcionado para uma chapa de metal negro com duas

pequenas fendas. Estas fendas dão à experiência o seu nome: a «experiência da fenda dupla». Atrás das fendas há um ecrã para visualização. A pergunta é: o que veremos no ecrã? A nossa intuição remete-nos para uma experiência análoga. Imagine uma vedação de ripas verticais, onde faltam duas delas: a vedação bloqueia a luz solar, lançando uma sombra no pavimento, mas há duas faixas brilhantes que aparecem nos intervalos onde falta a vedação. Muitas pessoas pensam que a luz laser produzirá duas linhas vermelhas brilhantes no ecrã, com a fenda dupla a ser o equivalente às duas ripas ausentes, e o resto do ecrã ficará na sombra. Embora tal seja o que esperaríamos, não é o que acontece. Em vez disso, surge um conjunto de *frangas de interferência*: faixas de luz e de sombra espalhadas por todo o ecrã³.

Esta *interferência* é uma propriedade exclusiva das ondas. Por exemplo, podemos obter um padrão semelhante com as ondas da água. Se estiver à beira de um lago de águas calmas e segurar em cada mão uma bola insuflável à distância de um metro, mergulhe as bolas na água movendo-as para cima e para baixo em sincronia, de modo a criar duas ondas: verá a formação de um padrão⁴. Quando as cristas das duas ondas se encontram, causam uma interferência «construtiva»; pelo contrário, quando as cristas e os vales se sobrepõem, causam uma interferência «destrutiva» e as ondas cancelam-se mutuamente. O resultado é um bonito padrão em forma de leque, alternando entre áreas com cristas e áreas com cavas, que alastra pelo lago a partir de si.

Os efeitos de interferência da luz manifestam-se também na nossa vida quotidiana, mas de maneiras mais subtis do que as

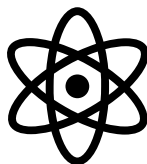
sombras. A eles devemos as cores espetaculares das bolas de sabão, a iridescência das asas das borboletas ou as cores do arco-íris que vemos quando observamos o verso de um CD ou de um DVD. A interferência parece um pouco mais complexa nestas situações, porque elas envolvem a luz branca (que é composta por numerosas cores, ao contrário do ponteiro laser monocolor). E, como os padrões de interferência dependem da cor, estes cenários produzem padrões coloridos em vez de manchas brilhantes ou escuras.

A experiência da dupla fenda de Young mostra esta interferência em ação: em certas posições do ecrã, a sobreposição de luz produz uma outra luz ainda mais brilhante, enquanto, noutras zonas, a mesma sobreposição produz sombra. Medindo a distância entre os pontos brilhantes no ecrã e conhecendo o comprimento de onda da luz do ponteiro laser, podemos usar a teoria ondulatória da luz para prever o que iremos observar. Logo que os cientistas do século XIX combinaram este conhecimento com as provas de existência de *difração* e de *refração* da luz, bem como de *interferência*, todas elas propriedades das ondas, e não das partículas, o debate ficou resolvido: a luz é uma onda.

Ao longo do século XIX, a teoria ondulatória clássica da luz fortaleceu-se ainda mais, prevendo todo o comportamento conhecido da luz que se observava no laboratório. Com base nela, pudemos construir e aperfeiçoar microscópios e telescópios, espelhos e lentes. Conseguimos explicar como acontece o arco-íris, por que é azul o céu, e muitos outros fenómenos. A teoria clássica aguentou-se bem, mesmo depois de o físico escocês James Clerk

Maxwell a ter relacionado com a sua teoria do eletromagnetismo, que nos deu uma definição mais perfeita da natureza das ondas de luz. De modo mais preciso, podemos afirmar que a luz é uma onda eletromagnética que se desloca a uma velocidade próxima de 300 milhões de metros por segundo, e que designamos por c . A onda tem dois componentes, um elétrico e outro magnético, que oscilam perpendicularmente um ao outro. Na alvorada de 1900, a natureza da luz deixara de ser uma questão.

Foi então que uma série de experiências começou a lançar sérias dúvidas sobre a teoria ondulatória. Essas experiências mostravam que a luz nem sempre se comportava como uma onda — porque, por vezes, a luz parecia agir como uma *partícula*. Os problemas da teoria clássica continuaram a crescer quando os cientistas se interrogaram sobre o modo como a teoria ondulatória interagia com outras áreas da física. As questões que haviam anteriormente sido varridas para debaixo do tapete ressurgiram em força. Por que deveriam luz e *matéria* ser tratadas de maneira diferente? Da reflexão dos físicos emergiu uma ideia radical: nem a luz nem a matéria eram exatamente aquilo que se pensava que fossem. Assim teve início uma revolução total na física e a aurora da peculiar mas maravilhosa teoria da *mecânica quântica*.



Pensemos nos destinos a que a nossa viagem nos conduziu desde a descoberta dos raios X no laboratório de Röntgen, em 1896. Os

eletrões e a experiência da folha de ouro mostraram aos físicos que os átomos não eram as entidades mais pequenas na natureza, visto que os minúsculos eletrões, portadores de carga elétrica negativa, se encontram dentro dos átomos. Os átomos revelaram não ser as entidades estáveis e eternas sonhadas pelos químicos: pelo contrário, os físicos mostraram que os átomos podem mudar, transmutar-se em diversos elementos através da emissão de radiação, sofrendo alterações sucessivas até alcançarem um ponto de estabilidade. Os átomos já não eram esferas de matéria sólida: ao invés, consistiam sobretudo em espaço vazio. Todas estas revelações prenunciavam as descobertas fundamentais que se seguiriam e que alteraram por completo a face da física. Temos até um nome diferente para a física que emergiu após a viragem do século XX. Chamamos-lhe *física moderna*, em oposição à *física clássica*, como se tudo o que aconteceu antes de 1900 fosse insignificante.

O problema surgiu em 1887, quando Heinrich Hertz foi mais além da sua anterior descoberta das ondas eletromagnéticas ao verificar acidentalmente que a luz podia criar faíscas. De modo mais concreto, Hertz descobriu que, se se fizer incidir luz ultravioleta numa superfície metálica, esta liberta eletrões. Esta conexão entre luz e eletricidade designa-se por *efeito fotoelétrico* e tornou-se um tema popular de investigação⁵, com muitos físicos, tais como Wilhelm Hallwachs e Philipp Lenard na Alemanha, Augusto Righi em Itália, J. J. Thomson em Inglaterra e Aleksandr Stoletov na Rússia, a tentarem compreender o seu mecanismo.

De acordo com a teoria ondulatória, a luz transporta uma certa quantidade de energia, que é proporcional ao *quadrado da sua amplitude* (o tamanho da onda, ou o brilho ou a intensidade da luz). Os físicos que estudavam o efeito fotoelétrico suspeitavam que os elétrons do metal estavam presos aos átomos, razão pela qual cada elétron precisava de receber alguma energia para ser expulso do átomo. Ultrapassada esta barreira de energia inicial, se continuássemos a fazer incidir luz no elétron chegaria uma altura em que ele sairia disparado do átomo, sendo então portador da energia correspondente à que absorvera da luz (subtraída da energia necessária para escapar do metal). A partir daí, três previsões eram possíveis. Primeira: quanto maior fosse a intensidade da luz, maior seria a velocidade de deslocamento dos elétrons. Pensava-se que, quanto mais intensa fosse a luz incidente no metal, *maior* seria a energia do elétron e mais depressa se afastaria do metal. Parecia razoável. Segunda: se a luz fosse suficientemente fraca, haveria uma pequena espera, enquanto a energia necessária à fuga do elétron se acumulava lentamente, até o elétron sair do metal com uma velocidade baixa. Terceira: como os elétrons precisam de se agitar e de absorver energia para se libertarem, a temperatura do metal deveria influenciar o resultado.

Em 1902, Philipp Lenard, um físico nascido na Hungria e que trabalhava na Alemanha⁶, descobriu que havia um problema com a primeira previsão: não encontrou correlação entre a velocidade dos elétrons libertados e a intensidade da luz. Lenard chegou a aventar a hipótese de a ideia estar simplesmente errada, ou seja, no efeito fotoelétrico a energia da luz não era transformada em energia do elétron. Em vez disso, a luz seria apenas um ativador, que

«ordenava» aos átomos que libertassem elétrons⁷. Esta hipótese «ativadora» parecia improvável, mas não havia outra explicação convincente. Do outro lado do mundo, um físico experimental estava na mesma corrida. Robert Millikan, professor associado da Universidade de Chicago, queria deixar uma marca no domínio da física, mas dispunha de pouco equipamento e ninguém no seu laboratório estava interessado no que ele fazia.

Millikan descobriu o amor pela física depois de o seu professor de Grego no Oberlin College, em Ohio, lhe ter pedido que desse um curso sobre essa disciplina. Como não tinha conhecimentos, passou um verão a estudar física sozinho, fazendo todos os exercícios que conseguiu encontrar em manuais escolares. Viria a doutorar-se na Universidade de Colúmbia e passou depois um ano a estudar na Alemanha antes de ocupar um cargo docente na Universidade de Chicago. Millikan era bem conhecido pela sua agenda incrivelmente rigorosa: trabalhava 12 horas por dia, seis horas a lecionar e as outras seis a investigar.

O acaso ditou que o ano que ele passou na Alemanha fosse 1895-96, quando foram realizadas as grandes descobertas dos raios X e da radioatividade, que o ajudaram a formular novas ideias para a sua investigação. Mas, em Chicago, apesar da sua agenda intensa e do seu otimismo incansável, sentia uma nítida falta de progresso na investigação devido ao seu isolamento. Millikan sabia que Lenard obtinha resultados na Alemanha, rodeado por outros especialistas, enquanto ele trabalhava de uma forma quase inteiramente independente.

Tal como todos os laboratórios da época, o seu parecia muito diferente dos atuais. Afinal, estava-se no princípio do século XX: a iluminação elétrica era coisa nova e não muito eficiente, pelo que o laboratório se parecia mais com uma fábrica sombria do que com os espaços brancos e iluminados de hoje. A maior parte das casas na área de Chicago continuava a ser iluminada por candeeiros a gás ou por velas, visto que a eletricidade só chegaria dentro de 20 anos. Como é evidente, não havia computadores. Todos os cálculos eram realizados com réguas de cálculo, lápis e papel, e não havia uma empresa à qual Millikan pudesse encomendar a construção do equipamento científico, o que significava que tudo tinha de ser feito internamente. Por estas razões, era necessária muita dedicação para embarcar num projeto de investigação experimental nessa época, mas era isso mesmo que Millikan queria fazer.

Só precisava de um bom desafio em que trabalhar. Para isso, teria de ler todos os artigos de investigação recentes, o que lhe foi útil porque era também responsável pela organização da série de seminários semanais do seu departamento. Certa semana, numa tentativa de animar os debates, trouxe consigo e apresentou um artigo de uma investigação que o impressionara muito, e que é já nosso conhecido: o artigo de J. J. Thomson de 1897 sobre a descoberta do eletrão. Millikan ficou tão inspirado pelo trabalho de Thomson que resolveu que aquele seria o novo e empolgante tema da sua investigação. Queria estudar as descargas elétricas num vácuo elevado, mas não existiam bombas de vácuo no laboratório capazes de executar essa tarefa.

Naquela época, as bombas de vácuo eram sobretudo de mercúrio: dispositivos complexos, mas frágeis, compostos por tubos e balões de vidro interligados, que eram manufaturados por sopradores de vidro. O mercúrio líquido era empurrado no tubo e, nesse movimento, removia algumas moléculas de ar. Se esse movimento fosse repetido um número de vezes suficientes, acabaria por remover ar na quantidade necessária para se obter um vácuo satisfatório. Mas Millikan tinha de começar do zero. Ao longo de três esgotantes anos, foi somando fracassos sucessivos até conseguir criar um dispositivo mais eficiente. À bomba de mercúrio normal acrescentou um tubo que continha carvão imerso em ar líquido. Em 1903, conseguira remover ar em quantidade suficiente para que dentro do dispositivo reinasse uma pressão mil milhões de vezes inferior à atmosférica⁸ - um nível de vácuo muito respeitável mesmo pelos padrões atuais. Estava preparado para realizar algumas medições.

Enquanto Millikan se debatia com as bombas de vácuo, saiu um novo livro de J. J. Thomson⁹ que previa que as emissões fotoelétricas deviam depender consideravelmente da temperatura, tal como todos os físicos experimentais haviam estabelecido até à data¹⁰. De acordo com a visão clássica, a uma temperatura mais elevada os eletrões no metal deviam possuir mais energia, e libertavam-se do metal muito mais facilmente e com uma velocidade superior à que se observaria com um metal a baixa temperatura.

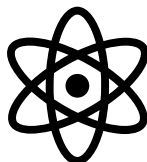
Munido com o seu dispositivo de alto vácuo, a replicação destes resultados parecia um bom ponto de partida para Millikan. Fez

incidir luz num elétrodo de metal, cuja temperatura estava controlada dentro do dispositivo de vidro. Para medir a velocidade dos eletrões, tal como haviam feito outros experimentalistas antes dele, aplicou uma diferença de potencial elétrico que os eletrões libertados teriam de defrontar; os eletrões com maiores velocidades precisariam de uma diferença de potencial mais alta para serem travados. Porém, quando Millikan realizou a experiência com o seu sistema de vácuo, percebeu que os resultados eram *completamente independentes* da temperatura. Millikan interrogou-se sobre o erro que estava a cometer.

Millikan dividiu o problema em etapas e recorreu à ajuda de alguns dos seus estudantes de pós-graduação. Trabalhavam numa pequena sala, saltando por cima de tabuleiros com ácido sulfúrico e cloreto de cálcio que haviam espalhado no pavimento para desumidificar o ar e impedir a acumulação de água nos elétrodo durante a realização das experiências. Foram precisos três ou quatro dias a soprar continuamente ar limpo através do dispositivo até conseguirem obter uma medição fiável, e durante semanas viram-se a braços com um problema de isolamento: havia ar a entrar no sistema de vácuo, o que os forçava a recomeçar a experiência. Apesar das contrariedades, Millikan conseguiu elevar a temperatura de um elétrodo de alumínio de 15 °C para 300 °C e mediu a corrente elétrica emitida. Mais uma vez, não encontrou qualquer dependência da temperatura. O seu trabalho minucioso prosseguiu ao longo dos anos, durante os quais a equipa construiu um complexo dispositivo de vácuo com uma roda móvel à qual prenderam 11 discos metálicos diferentes: cobre, níquel, ferro, zinco, prata, magnésio, chumbo, antimónio, ouro, alumínio e

bronze. A roda assentava em rolamentos de ágata e estava dentro de um cilindro de vidro com oito centímetros de diâmetro, existindo uma estreita fonte de luz — mais pequena do que cada disco — que incidia no interior do tubo. Depois fixaram uma tira de ferro no rebordo da roda de modo que, quando deslocavam cuidadosamente um grande íman nas proximidades do tubo, faziam rodar as amostras de metal, posicionando uma após outra na trajetória da fonte de luz sem que fosse preciso abrir o sistema e expô-lo ao ar¹¹. O que descobriram foi que *todos os resultados* eram independentes da temperatura, pelo menos até 100 °C, o valor mais elevado que ousavam testar com a sua versão do equipamento com 11 discos. Mais tarde, Millikan escreveu que até então «fora escasso o seu êxito como físico experimental!»¹².

Todavia, os resultados de Millikan foram, na verdade, um êxito. Por serem diferentes dos obtidos pelos predecessores, ele havia desenvolvido a mais esquiva e preciosa das situações científicas: uma lacuna no conhecimento. Millikan poderá ter sentido que a sua falta de resultados positivos seria indicativa de algo mais do que um mero erro experimental. Afinal, ele passara *anos* a certificar-se de que os seus dispositivos experimentais funcionavam de modo fiável. Então, qual seria a explicação alternativa? Se os resultados estivessem corretos e o efeito fotoelétrico não dependesse realmente da temperatura, então a física clássica revelava-se incapaz de explicar o fenómeno.



Em 1905, quando trabalhava em Berna, Albert Einstein debruçou-se sobre o efeito fotoelétrico e produziu um avanço teórico que ajudou a guiar as experiências de Millikan. Em Zurique, Einstein tinha estudado física, preenchendo os fins de tarde a trabalhar com a sua noiva, Mileva Maric, física nascida na Sérvia e a única mulher no seu curso¹³. Após o exame final, não tendo conseguido um lugar como assistente de Física na universidade, Einstein partiu para Winterthur, 20 quilómetros a norte, onde arranjou um emprego mal remunerado como professor. Certo dia, em 1901, escreveu a Mileva dizendo que se sentia «cheio de felicidade e alegria»¹⁴. Seria de esperar que se sentisse feliz, pois Mileva acabava de o informar que ia ser pai. Mas a razão do seu empolgamento era outra: acabava de saber dos resultados experimentais de Lenard sobre o efeito fotoelétrico, os quais mostravam que os eletrões podiam ser produzidos por luz ultravioleta.

Einstein considerava estranho que a maior parte das áreas da física se centrassem em partículas: os átomos, os eletrões e as vibrações de moléculas individuais que causavam o calor, tudo isso se baseava no movimento de objetos individuais, *discretos*. As próprias ondas de água consistiam em pequenos objetos — moléculas de água — em movimento coletivo, enquanto as ondas sonoras eram ondas de pressão no seio de moléculas de gás. Porém, as ondas luminosas eram consideradas um fenómeno *contínuo*. Porquê?

Einstein estava ciente do trabalho recente do seu colega mais velho, o físico alemão Max Planck, adepto da física teórica profunda

e fundamental. Quando era jovem, Planck preferia a física à música, apesar de o seu professor de Física o ter avisado de que «quase tudo já foi descoberto, restando apenas preencher algumas lacunas». Planck propusera recentemente uma ideia nova e fascinante, numa tentativa de unificar diferentes áreas da física, combinando a vibração mecânica (calor) e o eletromagnetismo (luz). Ele começara por reconhecer que havia, sem dúvida, uma relação entre o calor e a luz: os objetos emitem luz de cor diferente a temperaturas diferentes; é por isso que o carvão em brasa tem um brilho vermelho enquanto a luz do Sol é mais amarela ou branca.

Por «luz» não se entenda apenas o espectro visível. As frequências da luz ou, mais propriamente, da *radiação eletromagnética*, estendem-se dos raios X e dos raios gama até ao infravermelho e às ondas de rádio. Porém, por uma questão de simplicidade, falarei apenas em *luz*. Então, por que brilham os objetos com uma determinada cor? O que impede o carvão em brasa de ter um brilho roxo ou o planeta Júpiter de brilhar nos raios X¹⁵? Mais uma vez, a física clássica não dá respostas.

Os físicos do passado haviam tentado determinar a luz que seria emitida por uma espécie de objeto quente simplificado chamado *corpo negro*, uma entidade imaginária proposta em 1859 para os ajudar a compreender o modo de irradiação do calor. Um corpo negro é o objeto que se forma se se considerar uma caixa — ou uma cavidade — e se mantiver a temperatura constante. Ao longo do tempo, emitiria um tipo de luz específico chamado *radiação do corpo negro*¹⁶. O interessante na radiação do corpo negro é que,

seja qual for o seu tamanho — pode ser tão pequeno como uma ervilha ou tão grande como um planeta —, desde que absorva e emita radiação livremente, o espectro da luz que gera, ou seja, a quantidade de luz de cada cor emitida por um corpo negro, tem o mesmo padrão. É isto que o torna único. As experiências que tentam replicar corpos negros radiantes mostram que a quantidade de luz emitida começa por aumentar com a frequência, atinge um máximo para uma certa cor e depois diminui novamente a uma frequência elevada. O máximo depende apenas da temperatura do objeto. É algo que se pode observar numa forja, onde os metais começam por emitir um brilho vermelho, depois laranja e por fim branco, consoante vão ficando mais quentes, com o valor máximo do espectro desviando-se do vermelho para o azul.

Quando se recorria à física clássica para calcular a luz emitida por um corpo negro obtinha-se uma equação que não correspondia de modo algum aos resultados das experiências. Estes cálculos pioneiros, realizados pelo físico britânico Lorde Rayleigh, previam que a quantidade de luz emitida pelo extremo inferior (mais vermelho) do espectro seria baixa, mas que, quando se avançava pelo amarelo e pelo verde até ao azul, ao violeta e ao ultravioleta, essa quantidade crescia cada vez mais, atingindo um máximo com os muito energéticos raios X ou até com os raios gama, cuja frequência é ainda mais elevada. Quando a frequência duplicava, a quantidade de luz emitida deveria quadruplicar. Mas isto estava claramente errado: quando olhamos para o mundo vemos que não é inteiramente azul e violeta¹⁷, nem nos assa com raios X de energia elevada. Aquela previsão revelava-se também impossível, visto que, adicionando a quantidade total de energia da luz irradiada em

todas as frequências, o somatório seria *infinito*. Se tal fosse verdadeiro, toda a matéria, incluindo a mais fria, emitiria radiação de forma tão intensa que toda a energia desapareceria num relâmpago de luz de alta frequência. Esta situação era tão problemática para a física teórica que se tornou conhecida por «catástrofe ultravioleta».

Planck não podia aceitar esta situação. Quando se dedicou a estudar o problema, por volta de 1900¹⁸, percebeu que nos cálculos pioneiros do espectro da radiação emitida se havia partido de certos pressupostos acerca do comportamento da energia no seio do corpo negro. Presumia-se que a energia era partilhada entre os átomos (os «ressoadores») no interior da caixa de todas as formas possíveis, existindo por isso um número infinito de maneiras de se distribuir¹⁹. Porém, isto significava que, quando se adicionava toda a energia emitida, *todos* estes estados possíveis contribuíam e tinham de ser adicionados, razão pela qual o somatório da energia era infinito. Planck sabia que podia recorrer a um truque matemático para contornar o problema, mas isso não lhe agradava.

Se a energia apenas pudesse ser absorvida ou emitida em porções, ou seja, se a energia tivesse uma quantidade mínima, então o número de maneiras pelas quais podia ser partilhada já não seria infinito²⁰. É tal como o número restrito de modos pelos quais se pode dividir um grupo de dez pessoas: eu posso ter cinco pessoas no meu grupo e o leitor também pode ter cinco, ou eu posso ter dez e o leitor nenhuma, ou talvez quatro para mim e seis para si, mas não faz sentido afirmar que se tem 2,32 e 7,68 pessoas nos grupos. Isso porque as pessoas são objetos discretos, descontínuos.

Planck abordou o problema como se a energia existisse em pacotes discretos, o que, do ponto de vista matemático, o ajudou a contornar as dificuldades. Para formular esse artifício, Planck introduziu a menor porção de energia que podia ser transportada, a que chamou *quantum* de energia. Além disso, para que a matemática estivesse certa, teve de definir que a energia só podia existir em múltiplos inteiros desta quantidade básica. O tamanho desta quantidade de energia era minúsculo e estava relacionado com a frequência da luz mediante uma nova constante física inventada por Planck: h , com o valor aproximado de $6 \times 10^{-34} \text{ J s}$ ²¹. Não via outra opção que pudesse produzir o resultado correto, mas como «era preciso providenciar uma explicação teórica, a qualquer preço»²², ele cometeu aquilo a que chamou um «ato de desespero» para solucionar o problema.

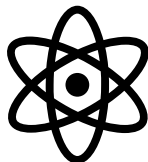
Na realidade, Planck não acreditava que a energia se apresentava em pequenos pacotes, mas percebeu que o seu truque matemático funcionava. Este método produziu uma equação em que a quantidade de luz emitida por um corpo negro começava por aumentar, atingia um máximo para determinada cor e depois diminuía novamente a frequências mais elevadas. A sua equação era essencialmente compatível com os dados experimentais. Todavia, embora o método funcionasse, os resultados não provocaram uma revolução entre os físicos. A nova lei da radiação foi prontamente aceite, ainda que o facto de Planck ter recorrido à ideia deveras estranha da quantização da energia tenha sido ignorado pela maioria deles²³.

No entanto, Einstein levou a sério a ideia de Planck. Aceitou que a energia existia de facto em pequenos pacotes e foi ainda mais longe. Ele propôs que a própria luz era composta, não por ondas, mas pelos mesmos pequenos feixes de energia: os *quanta*. Ao ampliar a ideia além do que Planck tencionara, Einstein afirmou que a própria luz era discreta; a luz é composta por aquilo a que agora chamamos *fótons*. A seguir, propôs uma teoria que conseguia explicar o misterioso efeito fotoelétrico.

A sua teoria dizia que um fóton transmitia toda a sua energia a um só eletrão no metal. A energia do fóton era apenas a frequência (cor) multiplicada pela constante proposta por Planck, h . Ele previu que, se alguém fizesse uma experiência onde a frequência da luz fosse variando e se medisse a energia dos fotoeletrões, a sua representação gráfica seria uma linha reta, cujo declive corresponderia a h . Quanto mais intensa fosse a luz, *maior* seria o número de eletrões emitidos, mas a energia destes dependeria apenas da *frequência* da luz. A teoria fazia também uma segunda previsão: abaixo de determinada frequência, dita de corte, não importava quão grande fosse a intensidade da luz: não haveria libertação de eletrões, porque a energia proveniente da luz não seria suficientemente elevada para que os eletrões escapassem do metal. Esqueçam a temperatura, era o que ele estava a dizer: concentrem-se na frequência.

Quando publicou o seu artigo em 1905, ainda ninguém realizara uma investigação aprofundada da relação entre energia e frequência que demonstrasse a incorreção da teoria de Einstein. Porém, em Chicago, vivia um físico experimental frustrado, mas

bem preparado e ambicioso, que dispunha — agora — do equipamento para a realizar.



Robert Millikan não acreditava na teoria de Einstein, o que não surpreende, se pensarmos que, de uma maneira geral, a teoria não foi muito bem recebida. O próprio Max Planck não a levou muito a sério, apesar de ser o criador da ideia de *quantum* e o diretor da revista que aceitou publicar o artigo de Einstein. Era evidente que Planck considerava a ideia de Einstein um pouco rebuscada e comentaria depois numa carta de recomendação: «Por vezes, como por exemplo na hipótese dos *quanta* de luz, pode ter ido demasiado longe na sua especulação, mas não devemos recriminá-lo por isso.»²⁴ Para Millikan, contudo, não era apenas uma ideia curiosa. Na realidade, ele pensava que a teoria de Einstein tinha de estar errada, porque a luz era obviamente uma *onda* e não uma *partícula*. Acreditava que a hipótese de a luz ser composta por *quanta* era uma «hipótese ousada, para não dizer... irrefletida». Ela contradizia provas inequívocas, como a da experiência da fenda dupla, que já referimos, de que a luz era um fenómeno ondulatório. Como é que podia ser composta por partículas?

Agora, Einstein fizera uma previsão clara que podia ser comparada com os resultados experimentais, e Millikan viu nisso uma oportunidade para firmar a sua reputação como físico. Em

1907, de volta ao laboratório e com um vigor renovado, Millikan estava apostado em desacreditar Einstein.

Nesta altura, Millikan e a sua equipa mostravam-se extremamente meticolosos, para eliminar qualquer fonte de eventuais erros no equipamento. Continuavam a utilizar o mesmo sistema básico — uma fonte de luz, uma superfície metálica e um dispositivo de contagem dos eletrões —, mas este tornara-se muito mais sofisticado. Trocaram a fonte de luz do tipo centelhador — em que os elétrodos sujeitos a uma tensão elevada provocam descargas no gás que geram luz, incluindo na gama ultravioleta — por outras fontes, mais estáveis, visto que as faíscas criavam oscilações elétricas e introduziam erros. Millikan descobriu também que, para obter resultados fidedignos, a superfície metálica devia estar muito bem limpa, pois, caso contrário, podiam estar a medir o efeito fotoelétrico não do metal puro, mas de algum óxido metálico acumulado na sua superfície. Por fim, em 1909²⁵, a equipa de Millikan concebeu um sistema que incluía uma faca afiada que girava dentro do sistema de vácuo e raspava a superfície do metal antes de ela ser exposta à luz. De cada vez que faziam incidir a luz na superfície metálica, mediam a energia dos eletrões emitidos mediante a aplicação de um campo elétrico suficientemente forte para os travar.

Desde o princípio do projeto até ao momento em que Millikan publicou os resultados finais decorreram 12 anos. Nesse intervalo, numerosos estudantes-investigadores chegaram, trabalharam e doutoraram-se no seu laboratório. Em 1909 e 1912, Millikan desenvolveu duas séries de experiências cruciais, tendo publicado

os resultados apenas em 1916. As primeiras experiências de Millikan em 1903 já tinham confirmado que o efeito fotoelétrico não dependia da temperatura. Depois de Einstein ter feito as suas previsões, Millikan regressou ao problema, convicto de que seria capaz de mostrar que ideias tão absurdas como a dos *quanta* de luz eram desnecessárias e que bastava um simples ajuste da teoria ondulatória clássica para explicar os dados experimentais. A persistência que mostrou em provar que Einstein estava errado talvez se avizinha da obsessão e podemos perguntar por que precisou de tanto tempo para obter resultados. A razão não podia ser mais humana: os resultados obtidos por Millikan causavam-lhe frustração e ensombravam-no, porque ele tentava refutar Einstein, mas as experiências mostravam que não estava a conseguir isso.

Com efeito, Millikan descobriu que quase todas as previsões de Einstein eram confirmadas pelos resultados experimentais. A energia dos eletrões libertados era diretamente proporcional à frequência da luz incidente, tal como Einstein afirmara. Ele demonstrou que, abaixo de uma certa frequência de corte, não conseguia contabilizar eletrões alguns, tal como aconteceria se a luz fosse composta por *quanta*. Chegou a medir a constante de Planck, h , com um erro de 0,5 por cento, de longe a melhor medição até essa data. Millikan encontrara as melhores provas de que a teoria que ele pretendia refutar estava, na realidade, correta.

No final do seu artigo de 1916, Millikan deixava claro que, embora aceitasse os resultados experimentais, continuava a não acreditar nas implicações daquilo que descobrira. Seria natural que, mesmo com Millikan a debater-se com a nova teoria, os seus

resultados levassem todos os outros físicos a aceitar sem reservas a visão de Einstein de que a luz era composta por *quanta*, mas tal não aconteceu. Millikan confirmou que as previsões feitas pela teoria de Einstein estavam corretas, mas nunca ninguém observara uma partícula de luz, pelo que muitos cientistas não hesitaram em simplesmente ignorar o conceito de luz como partícula e considerar que o efeito fotoelétrico não fora decifrado.

Estes cientistas procuravam fugir a uma ideia aparentemente feia e contraintuitiva: se considerarmos quer os resultados de Millikan, que mostram que a luz se comporta como uma corrente de partículas, quer as provas, acumuladas ao longo dos séculos, de que a luz se comporta como uma onda, a conclusão inevitável era que a luz tem uma natureza corpuscular e uma natureza ondulatória.

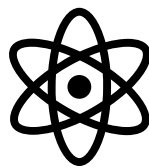
Na época, o físico britânico-australiano William Henry Bragg gracejava, dizendo que os teóricos do *quantum* «descrevem a luz como uma onda às segundas, terças e quartas-feiras e como uma partícula às quintas, sextas e sábados». Porém, seja qual for a maneira como a descrevamos, temos de aceitar a realidade tal como ela se nos apresenta. Por vezes, é possível ter uma imagem mental intuitiva da natureza tão forte que nos leva a ficar presos num quadro mental em que algo tem de ser ou A (uma onda) ou B (uma partícula). Mas, neste caso, em algumas situações podemos usar A, a teoria ondulatória, e noutras, B, a teoria corpuscular. Nenhuma delas está errada, e aquela que se aplica depende do modo como escolhemos realizar as nossas experiências.

Um aspeto a clarificar é a forma como funciona a experiência da fenda dupla de Young, dada a natureza corpuscular da luz. Se realizarmos a experiência de Young com apenas um fóton de cada vez, que acontecerá? Mesmo nessa situação, cada fóton singular comporta-se como uma onda e, se aguardarmos que um número suficiente de fótons construa um padrão no ecrã, veremos o mesmo padrão de interferência que no caso de usarmos o mais poderoso ponteiro laser. De algum modo, cada fóton singular parece atravessar *ambas* as fendas. Isto é aceitável se considerarmos que a luz é uma onda, mas confuso se pensarmos nela como uma partícula.

Os pormenores da filosofia da mecânica quântica dariam para escrever um outro livro, mas o que interessa é o modo como a natureza de facto se comporta, exatamente o que os experimentalistas procuram compreender. É essa a razão pela qual a ciência é, em última instância, uma disciplina experimental, porque não importa se um modelo teórico tem grande qualidade, tal como não importam os «factos» que julgamos conhecer: em última análise, procuramos sempre descrever algo que acontece na natureza, e que apenas pode ser examinado mediante a realização de experiências. Embora a descrição feita por Einstein da luz como uma partícula fosse uma teoria fascinante, foi Robert Millikan quem reuniu laboriosamente as provas de que a natureza se comporta de facto dessa maneira apesar de pouca gente ter ouvido falar dele.

A explicação do efeito fotoelétrico foi tão importante que valeu a Einstein o prémio Nobel em 1921 — o que não aconteceu com as suas famosas teorias da relatividade. Dois anos depois, em 1923,

Robert Millikan²⁶ recebeu também o prêmio Nobel. No seu discurso de aceitação, alterou um pouco os antecedentes da história, ao afirmar que o seu objetivo fora a verificação da teoria de Einstein e, em simultâneo, a medição da constante de Planck. Na realidade, tanto Millikan como a restante comunidade da física tinham precisado de todo esse tempo para aceitar o que os seus resultados realmente demonstravam.



Hoje, a mecânica quântica é a nossa melhor descrição da realidade às escalas mais pequenas, estando longe de ser apenas uma filosofia obscura. A teoria que viria a emergir e que descreve integralmente a natureza corpuscular e ondulatória da luz é hoje conhecida por eletrodinâmica quântica (ou QED, sigla do inglês Quantum Electrodynamics) e foram precisos 40 anos após as experiências de Millikan para se tornar uma realidade. A QED integra quer a mecânica quântica quer a teoria da relatividade restrita de Einstein e adiante regressaremos a ela com mais pormenor. Para já, o importante a reter acerca da QED é que pode ser utilizada para calcular grandezas na natureza com uma precisão superior a uma parte em um *milhar de milhões*. Atualmente, os cientistas de muitos domínios e as indústrias de alta tecnologia usam a mecânica quântica, sob uma ou outra forma, todos os dias, e todos aplicamos os seus resultados nas nossas vidas quotidianas, ainda que não tenhamos consciência disso. Não possuir uma resposta para a razão de a natureza se comportar desta forma (e

não conhecemos de facto essa razão) não significa que não possamos aprender e usar a teoria.

A ideia que Millikan estudava — e que agora compreendemos em função de luz que transmite energia aos eletrões quer no vácuo quer no seio de materiais — não é apenas algo que aconteceu uma vez numa experiência de laboratório e caiu no esquecimento assim que foi entendida. Muito pelo contrário.

Millikan trabalhou sentado à sua secretária, com papel e lápis, e nos dias quentes terá aberto a janela para fazer circular o ar. Hoje, trabalhamos com computadores portáteis e usamos um controlo remoto para ligar o ar condicionado. Dentro desse controlo remoto há um LED (díodo emissor de luz) que envia um sinal binário em luz invisível (infravermelha). Quando se prime o botão, os fotões saem do controlo remoto e atingem o fotodíodo instalado no ar condicionado e — tal como nas experiências de Millikan — estes fotões libertam eletrões, transmitindo-lhes energia cinética. O fotodíodo é formado por um material chamado *semicondutor*, que pode ser utilizado em duas camadas. A junção assim formada permite que a eletricidade flua mais facilmente num sentido do que no outro, pelo que os fotodíodos deixam a eletricidade fluir quando a luz incide neles²⁷. O ar condicionado reage ao sinal elétrico que recebe, interpretando o padrão binário e obedecendo à nossa ordem. Esse padrão binário é diferente na TV e no ar condicionado, razão pela qual não há confusão entre os dois. Para alguém no tempo de Millikan, tudo isto teria parecido pura magia.

As propriedades dos materiais semicondutores, combinadas com a física do efeito fotoelétrico, possibilitaram o desenvolvimento de uma grande variedade de componentes elétricos a partir de meados da década de 1940, os quais são agora produzidos em quantidades maciças a nível global. As células solares (ou *fotovoltaicas*) são um tipo de fotodíodo que converte os fótons do Sol em corrente elétrica com a eficácia suficiente para abastecer casas e empresas. Elas possibilitaram empreendimentos humanos fenomenais, tais como as comunicações por satélite e a exploração espacial, mas não são a única aplicação. Grande parte das adaptações tecnológicas aparentemente simples que nos rodeiam resultam dos pequenos fotodíodos.

Todos aqueles sensores que ligam as luzes quando entramos numa sala, que dispensam sabonete e desinfetante para as mãos, que nos abrem portas: todos eles usam sensores de proximidade, que fazem a luz infravermelha ser refletida por um objeto (nós) e reenviada ao fotodíodo. Quanto mais perto estiver o objeto, maior será a quantidade de luz refletida, a qual cria uma corrente elétrica. E essa mesma tecnologia é utilizada em muitos sistemas de segurança.

Os dispositivos baseados no efeito fotoelétrico são muito úteis porque produzem uma corrente que é proporcional à quantidade de luz que neles incide — desde que a frequência seja suficiente para produzir elétrons, mais luz produz mais elétrons e, por conseguinte, mais corrente. Isso significa que a produção é linear e compatível com todos os componentes elétricos e eletrônicos. Por exemplo, os atuais relógios desportivos com GPS usam fotodíodos em monitores

da frequência cardíaca baseados na luz, os quais medem continuamente a pulsação do seu portador. Há uma luz verde que incide na pele e, em cada ciclo cardíaco, a quantidade de luz refletida pelo sangue que flui nos tecidos subcutâneos vai variando. O fotodíodo deteta as variações da luz e um algoritmo calcula e apresenta a frequência cardíaca²⁸. O seu *smartphone* deteta se há luz ou trevas no exterior e ajusta de modo automático o brilho do ecrã, de acordo com a quantidade de luz que nele incide. A mesma tecnologia é utilizada para mudar automaticamente os painéis de instrumentos dos automóveis do modo diurno para o noturno e controla a abertura do diafragma e a velocidade do obturador nas modernas câmaras digitais.

As aplicações indiretas dos fotodíodos são provavelmente ainda mais numerosas. Todas as medições baseadas no laser os utilizam, o que significa que quase todas as estradas e edifícios que nos rodeiam terão precisado deles nos processos de levantamento e alinhamento topográficos. Os fotodíodos são também usados na deteção de sinais produzidos pela luz em redes de comunicações que usam fibras óticas; se dispõe de banda larga com fibra, essa rede recorre a fotodíodos para converter sinais luminosos em impulsos elétricos que nos transmitem informação do mundo inteiro. Os nossos velocímetros e odómetros utilizam-nos, bem assim como os sistemas de análise que garantem o funcionamento regular dos motores dos veículos elétricos. Os fotodíodos são utilizados para controlar as posições, as velocidades e as operações de numerosos processos automatizados nas fábricas. Portanto, a menos que o fabrico tenha sido puramente artesanal, os fotodíodos foram usados na produção da maior parte dos objetos que possui.

Tudo isto comprova que dominamos o efeito fotoelétrico, e tal não seria possível sem o conhecimento subjacente da sua física essencial que brotou de experiências pioneiras. A investigação de Millikan — juntamente com a experiência da fenda dupla e com os dados sobre a radiação do corpo negro — deu aos físicos um alicerce sólido sobre o qual puderam construir a sua nova visão da realidade baseada na mecânica quântica. Quando a mecânica quântica se implantou, as suas aplicações depressa foram além da explicação da luz. A mecânica quântica é a teoria que descreve também toda a matéria.

Após os contributos de Einstein e Planck, muitos outros físicos participaram no desenvolvimento da mecânica quântica. Com cada novo problema que surgia na física, a mecânica quântica evoluía e procurava uma maneira de o solucionar. Quando se tratou da natureza da matéria, isso foi essencial. O modelo atómico de Rutherford — com o núcleo minúsculo e o eletrão em órbita que mencionei no Capítulo 2 — parecia indefensável quando os físicos se aperceberam de que seria instável: os eletrões deveriam emitir radiação, descrevendo uma luminosa espiral até se despenharem no núcleo. Porém, Niels Bohr, um jovem físico teórico dinamarquês, resolveu esse problema ao introduzir a ideia de *quantização* para explicar o modo como os eletrões se distribuem no espaço em redor do núcleo. Os eletrões apenas podem ter determinados valores de energia — a sua energia está também quantizada —, o que significa que as distâncias entre as suas órbitas e o núcleo dependem dos seus valores de energia²⁹. Os eletrões podem saltar entre os níveis de energia, subindo de nível quando absorvem energia ou descendo quando emitem radiação sob a forma de luz (um fóton). Porém, não

podem permanecer entre dois níveis. Existe também um valor mínimo de energia para um elétron, que corresponde à menor distância a que se pode encontrar do núcleo.

Seria apenas em 1923 que um aristocrata francês, o filho mais novo do duque de Broglie, retomou a questão formulada por Einstein: por que razão a física tratava de forma diferente a *luz* e a *matéria*? Na sua tese de doutoramento, Louis de Broglie salientou que a física quântica parecia aceitar que a luz agia como se fosse formada por partículas, mas, nesse caso, seria o recíproco verdadeiro? Poderiam as partículas de matéria agir como ondas? A resposta, está comprovado, é positiva. Qualquer partícula ou pedaço de matéria, seja maciça como um próton ou desprovida de massa como um fóton, possui também uma natureza ondulatória. A relação entre a energia e a frequência da onda é $E = h f$ em que h é (uma vez mais) a constante de Planck. A teoria que emergiu, a mecânica quântica ondulatória, conseguia descrever todos os novos tipos de comportamento de átomos e partículas. Até nos explicava que as partículas subatômicas não são entidades sólidas, mas apenas detêm uma certa probabilidade de serem encontradas num certo estado ou local num determinado instante.

A ideia de que a matéria é formada por ondas parece difícil de aceitar. Quando nos deitamos, o nosso corpo não cai através da cama; se alguém nos bate, sentimos dor; se acidentalmente tentamos atravessar uma porta de vidro, percebemos com algum embaraço que é impossível. Tudo isto nos leva a acreditar que o nosso corpo é um objeto sólido e que a matéria que o compõe é uma superfície contínua, ininterrupta. Porém, na realidade, somos

feitos de quase nada. Mesmo com a visão primitiva em que a matéria é formada por partículas sólidas — e o núcleo e os elétrons possuem dimensões precisas —, o volume efetivo de matéria em cada átomo é tão pequeno que, se reuníssemos a matéria de todos os humanos da Terra e a concentrássemos, ela caberia num espaço equivalente a um cubo de açúcar. Agora podemos perceber que nem é sequer tão simples, porque a «matéria» não é perfeitamente sólida. Com o advento da mecânica quântica, tudo mudou.

Estas novas ideias causaram controvérsia não apenas na física, mas na sociedade em geral. Os seus efeitos na imaginação do público foram intensamente experienciados pelo artista Wassily Kandinsky, que escreveu:

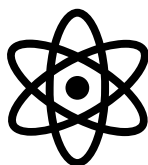
Para a minha alma, o desmoronar do átomo foi como o desmoronar do próprio mundo. De repente, as muralhas mais fortes ruíram. Tudo se tornou incerto, vacilante e débil. Não teria ficado surpreso se uma pedra se dissolvesse no ar à minha frente, tornando-se invisível. A ciência parecia ter sido destruída.³⁰

A matéria não é certa nem determinística, mas está associada a probabilidades e ondas. A solidez da matéria é apenas uma consequência das interações entre entidades de carácter ondulatório. Neste momento, a repulsão entre diversas ondas de elétrons mantém-nos a pairar ligeiramente sobre a superfície nos lugares onde estamos sentados ou de pé. Tanto quanto sabemos, tudo o que acontece no mundo, e nos nossos corpos e nas nossas mentes, decorre destas interações em pequena escala. Assim se abre toda uma nova perspectiva relativamente aos nossos congéneres humanos.

Se o leitor sente que isto perturba a sua imagem da realidade, saiba que não está sozinho. Limita-se a experienciar o que Millikan, Kandinsky, Planck, Rutherford, Bohr e o próprio Einstein sentiram dificuldade em aceitar. Não temos consciência da natureza corpuscular e ondulatória da matéria, porque não conseguimos interagir com a matéria de maneira a detetar essa natureza da forma habitual. A nossa escala é humana, não quântica. Não detetamos as qualidades ondulatórias dos objetos quotidianos porque os seus comprimentos de onda são tão pequenos que não conseguimos medi-los. O *comprimento de onda de De Broglie* é inversamente proporcional à quantidade de movimento de um objeto — a sua massa multiplicada pela sua velocidade —, pelo que quando um objeto tem a massa e a energia de uma bola de críquete lançada a 160 km/h, o seu comprimento de onda reduz-se para apenas um milésimo milionésimo de um milésimo milionésimo de um milésimo milionésimo de um micrómetro (que escrevemos como um zero, vírgula, seguida por 33 zeros e um 1, ou, em notação científica, 1×10^{-34} metro). Quando chegamos à escala das pessoas, os comprimentos de onda são ainda mais pequenos: um objeto semelhante a Usain Bolt que corra os cem metros tem um comprimento de onda 200 vezes inferior ao da bola de críquete, isto é, cerca de $5 \times 10^{-37} \text{m}$ ³¹. Estes comprimentos de onda são demasiado pequenos para detetarmos algum comportamento ondulatório curioso, pelo que podemos recorrer à física clássica para descrever o seu movimento de maneira aproximada e não ficamos mal. Porém, quando passamos para a escala dos objetos muito pequenos, tais como os átomos e as partículas, não podemos fazer isso. Nesta escala, *todas* as experiências realizadas desde a descoberta da mecânica quântica nos dizem que ela está correta.

E a natureza ondulatória das partículas, já terá ela sido observada? Claro que sim. Em 1925, pouco depois do trabalho de, De Broglie, os físicos norte-americanos Clinton Davisson e Lester Germer, da Western Electric (posteriormente Bell Labs), realizaram a primeira experiência em que fizeram ressaltar elétrons (com um comprimento de onda da ordem de um nanômetro) numa estrutura cristalina de níquel, tendo mostrado que os elétrons formavam padrões de interferência semelhantes aos de ondas luminosas. Uma molécula com poucos nanômetros de largura tem um comprimento de onda de, De Broglie inferior a 1 picômetro (um milionésimo de um nanômetro) e também ela gera interferência. Há uma espécie de competição entre os físicos para saber quem encontra o maior objeto a gerar interferência numa experiência da fenda dupla. O recorde atual pertence a Sandra Eibenberger, que conduziu uma experiência magistral no âmbito do seu doutoramento em 2013, em Viena, em que observou interferência em moléculas gigantes com 800 átomos, os quais contêm mais de dez mil partículas subatômicas individuais³². Nesta escala, o comprimento de onda da molécula está perto de 500 femtômetros, cerca de dez mil vezes menor do que a própria molécula. Os investigadores interrogam-se agora se será possível criar padrões de interferência com objetos biológicos vivos, tais como vírus ou bactérias, o que lhes permitiria formular perguntas fascinantes sobre se a consciência anula a natureza ondulatória da experiência, ou se os organismos vivos também podem estar em dois lugares em simultâneo durante a sua viagem pelo dispositivo da fenda dupla. Eles estimam em dez anos o tempo necessário para obter resultados dessas experiências.

Um aspeto crucial da dualidade onda-partícula, o qual causa por vezes perplexidade aos próprios físicos, é saber se um eletrão *individual* pode interferir consigo próprio, tal como sucede com os fotões individuais na experiência da fenda dupla. Claro que a resposta é afirmativa. Na década de 1970, quando essas experiências foram conduzidas, todos pensavam que já tinham sido realizadas. Uma equipa italiana chefiada por Giulio Pozzi, em Bolonha, e uma equipa japonesa chefiada por Akira Tonomura³³, em Hitachi (as duas experiências decorreram de modo independente), nem sequer publicaram os seus achados numa revista de física, preferindo uma revista de educação³⁴. Como já haviam aceitado que as partículas se comportavam como ondas pensavam que não estavam a mostrar nada de novo. Acontece que foi apenas na década de 1970 que as equipas puderam dispor do equipamento que lhes possibilitava realizar a experiência, um dispositivo cujo funcionamento se baseia na dualidade onda-partícula, e que é mais comum do que se pensa: um microscópio eletrónico.



Os microscópios eletrónicos foram inventados na década de 1930, mas atualmente é possível adquirir um deles por cerca de 2-3 milhões de dólares num fornecedor de alta tecnologia. Serão muito comuns? É difícil responder, mas estimo que existam centenas de milhares em laboratórios, empresas e institutos de investigação de todo o mundo. No *campus* do meu laboratório de

física na Universidade de Melbourne, o instituto de biologia Bio21 dispõe de vários destes aparelhos.

Este edifício contém espaços de trabalho povoados por cientistas de bata branca. Com as suas prateleiras cheias de balões de Erlenmeyer e tubos de ensaio, as suas pias e os seus exaustores, o contraste não podia ser maior com o laboratório do microscópio eletrónico. O microscópio eletrónico é um aparelho cilíndrico de metal com alguns metros de altura, dotado de prateleiras eletrónicas, que ocupa uma sala exclusiva. Através de uma janela, que permite aos utilizadores observar a operação do microscópio, vemos um feixe verde que revolteia num ecrã fluorescente. Há um computador cuja missão é controlar o aparelho e permitir que os utilizadores vejam as imagens, tal como num microscópio ótico normal.

Os numerosos investigadores que utilizam estes microscópios têm um objetivo comum: observar objetos minúsculos e o modo como interagem à escala atómica. Infelizmente, isso ultrapassa a capacidade dos microscópios óticos habituais, que apenas conseguem fazer medições até um certo limite — conhecido por *resolução* —, de cerca de 200 nanómetros, ou uma ampliação de cerca de 2000 vezes. Para as moléculas biológicas e até alguns componentes eletrónicos ainda mais pequenos, um microscópio ótico produz uma imagem indistinta, visto que é apenas possível ver objetos que sejam do mesmo tamanho ou maiores do que o comprimento de onda da luz que é utilizada.

Utilizando um microscópio eletrónico, os investigadores aproveitam o facto de as partículas também terem um comprimento de onda – o comprimento de onda de, De Broglie — e, quanto maior for a energia do eletrão, menor será o seu comprimento de onda. Tal permite que os microscópios eletrónicos funcionem com comprimentos de onda da ordem do picómetro, conseguindo discernir objetos da ordem do nanómetro — um *milésimo milionésimo* de um metro — ou mesmo menores. A capacidade de observar a esta escala fez crescer em flecha as aplicações da «nanotecnologia» desde o fim dos anos 1980, permitindo a cientistas e engenheiros o estudo e a construção, átomo a átomo, de estruturas e compostos para os fins mais diversos, desde o fabrico de têxteis e alimentos até à criação de medicamentos. A mecânica quântica e a dualidade onda-partícula são importantes não apenas para os microscópios ou para os físicos que estudam os átomos: elas têm igualmente implicações diretas e poderosas na química e na biologia. A mecânica quântica exerce uma influência imediata no modo como as moléculas se formam, interagem e estabelecem ligações: eis o móbil da investigação em química quântica. Na biologia, muitos processos fundamentais à vida pertencem ao âmbito da mecânica quântica. O novo domínio da biologia quântica começa agora a examinar os múltiplos falhanços da física clássica no esclarecimento desses processos, dos quais um número notável — desde a fotossíntese até ao modo como as aves se orientam nas suas migrações — é explicável apenas pela mecânica quântica.

Mencionei antes que alguns componentes eletrónicos baseados em semicondutores utilizam o efeito fotoelétrico, mas na realidade

tal desmerece a importância da mecânica quântica na eletrônica. *Todos* os aparelhos eletrônicos modernos fazem uso do nosso conhecimento da mecânica quântica. A evolução dos computadores, desde a alvorada dos tubos de vácuo, que vimos no início do livro, até aos transístores e aos *chips* que se encontram em todos os telefones, computadores, automóveis e eletrodomésticos modernos, baseia-se em efeitos quânticos. Em concreto, estes dispositivos dependem do modo como os eletrões do silício, comportando-se como ondas, podem assumir apenas certos valores de energia, assim criando «níveis de energia» — de forma semelhante aos eletrões nos átomos —, mas, quando juntamos muitos átomos numa formação cristalina, os níveis permitidos³⁵ podem alterar-se. Visto que compreendemos agora a física subjacente, conseguimos manipular as propriedades do silício de maneira muito precisa, usando técnicas que conheceremos mais adiante. A natureza quântica da luz e da matéria possibilitaram-nos também criar lasers, relógios atômicos (cruciais para os nossos sistemas de navegação por GPS) e muitas outras tecnologias de que dependemos no dia a dia. O nosso mundo seria irreconhecível sem as aplicações desta teoria.

É provável que as tecnologias futuras se baseiem inteiramente na mecânica quântica. A utilidade da computação quântica está em crescimento rápido, razão pela qual na cave do departamento de Física da Universidade de Melbourne encontramos também um grande microscópio eletrónico. Este é utilizado para obter imagens de finas camadas de diamante no silício, nas quais os físicos implantam iões de hélio, segundo um processo chamado «dopagem». Os físicos recorrem a estas técnicas para criar

dispositivos quânticos que podem ser usados como base para os computadores quânticos. O microscópio eletrónico, uma tecnologia que resultou dos primeiros avanços da mecânica quântica, está a ser utilizado na produção da próxima geração de tecnologia de base quântica, dando continuidade ao ciclo de retroação entre investigação e tecnologia.

Neste capítulo, vimos de que forma a acumulação de problemas que a física clássica não conseguia solucionar acabou por conduzir a uma descrição inteiramente nova da natureza a escalas muito pequenas: a mecânica quântica. Numa etapa desse caminho, Robert Millikan e a sua equipa passaram 12 anos frustrantes no laboratório a aperfeiçoar os seus métodos para obter a primeira informação crucial sobre os pormenores do efeito fotoelétrico e viriam a demonstrar que a hipótese ousada de Einstein estava correta. Millikan não inventou a mecânica quântica, mas as suas experiências foram decisivas para determinar que a teoria da mecânica quântica refletia genuinamente a realidade da natureza. É desta maneira que o conhecimento progride. Não existem momentos de inspiração súbita. Pelo contrário, o progresso acontece de modo difícil e vagaroso. São longos os períodos que passamos a estudar pormenores, à procura de um ponto de apoio em qualquer recanto deste Universo onde vivemos. Até que por fim se faz luz e uma nova imagem da natureza começa a ganhar forma na nossa mente. Hoje celebramos a mecânica quântica como um triunfo teórico e conceptual, triunfo esse que não se questiona. Porém, a verdade é que sem a experimentação nunca teríamos descoberto que ela descreve de facto o comportamento do mundo que nos rodeia. Nunca teríamos sido capazes de a utilizar — no

sentido prático — como hoje fazemos. Destas experiências obscuras e complexas brotou o nosso entendimento do mundo subatômico. Esse conhecimento desempenhou um papel de monta na criação de aparelhos eletrónicos, computadores, painéis solares e instrumentos com capacidade de visualizar objetos em escalas inatingíveis pelos microscópios óticos — tudo isto decorrente das estranhas consequências do mundo subatômico não se comportar de acordo com a física clássica.

Até aqui, vimos de que maneira um conjunto de experiências abalou a física clássica, destronou a ideia de o átomo ser a mais pequena unidade da matéria e conduziu a uma visão totalmente nova da física, em que os átomos — que consistem sobretudo em espaço vazio — mudam ao longo do tempo, a luz se comporta como uma partícula e as partículas se comportam como ondas. Os raios X e o eletrão, a radioatividade e o núcleo atómico, e agora a mecânica quântica, mudaram o nosso mundo para sempre. Mas havia mais surpresas reservadas. Tendo dedicado os últimos capítulos a explorar as profundezas da matéria, chegou a altura de erguermos o olhar para o alto. A nossa atenção volta-se para as surpresas da natureza que literalmente se precipitaram do céu sobre os cientistas.

¹ Na época utilizava-se a palavra «corpúsculo», tornando Newton um protagonista do «corpuscularismo».

² A ideia do éter persistiu até ao século XIX. Em 1887, a experiência de Michelson-Morley mostrou que o éter luminífero não existia. O embaraço que essa demonstração causou na física facilitou a aceitação da relatividade restrita de Einstein.

³ A difração acontece de facto no caso da vedação, mas a luz que passa pelos espaços sem ripas predomina sobre o efeito diminuto da difração. Este efeito aumenta quando a «fenda» é semelhante ao comprimento de onda da luz, o qual é da ordem de poucas centenas de nanómetros.

⁴ Ou se não tiver tempo — ou se o lago estiver congelado —, estão disponíveis belas versões online, incluindo esta versão da Veritasium. Disponível em https://www.youtube.com/watch?v=ILuv6hY_6zsdo.

⁵ Na época descreviam o efeito em função da carga elétrica, visto que os eletrões só seriam descobertos após uma década.

⁶ Lenard venceu o prémio Nobel em 1905 pelo seu contributo para o conhecimento do efeito fotoelétrico. Ele era abertamente antisemita e descreveu o trabalho de Einstein sobre a relatividade como uma «fraude judaica». Mais tarde, foi chefe da «Física Ariana», no regime hitleriano.

⁷ B. R. Wheaton, «Philipp Lenard and the Photoelectric Effect, 1889-1911», *Historical Studies in the Physical Sciences*, vol. 9, 1978, pp. 299-322.

⁸ O nível de vácuo que conseguiu era um milionésimo de milímetro de mercúrio, aproximadamente 10^{-6} milibar na unidade de hoje, o que se situa no intervalo atual de «vácuo elevado», uma proeza extraordinária alcançada com tubos de vidro!

⁹ J. J. Thomson, *Conduction of Electricity Through Gases*, Cambridge, Cambridge University Press, 1903.

¹⁰ R. A. Millikan e G. Winchester, «The influence of temperature upon photo-electric effects in a very high vacuum», *Philosophical Magazine*, vol. 14, 1907, pp. 188-210. <https://doi.org/10.1080/14786440709463670>.

¹¹ Ibid.

¹² R. A. Millikan, *The Autobiography of R. A. Millikan*, Englewood Cliffs, Prentice-Hall, Inc., 1950.

¹³ Existem algumas provas de que as obras principais de Einstein se devem, pelo menos em parte, ao labor de Mileva. Ver Pauline Gagnon, «The forgotten life of Einstein's first wife», *Scientific American*, 2016. Disponível online em <https://blogs.scientificamerican.com/guest-blog/the-forgotten-life-of-einsteins-first-wife/>.

¹⁴ G. Holton, «Of love, physics and other passions: The letters of Albert and Mileva» (parte 2), *Physics Today*, vol. 47, 1994, p. 37.

¹⁵ Os objetos astrofísicos podem emitir raios X. A astronomia dos raios X é apenas mais uma forma de observar o Universo num intervalo de frequências diferentes, que vai dos raios X até aos raios gama. Procure na internet imagens do observatório Chandra de raios X: são espetaculares!

¹⁶ É um objeto teórico, embora possa ser reproduzido experimentalmente de forma aproximada.

¹⁷ Somos muito menos sensíveis à luz violeta do que à azul. Por isso, mesmo que a parte violeta do espectro fosse mais brilhante, os nossos olhos continuariam a ver o azul como o mais brilhante.

¹⁸ Alguns físicos costumam dizer que Planck começou a procurar a radiação do corpo negro porque as autoridades alemãs lhe pediram que descobrisse uma maneira de melhorar a eficiência das lâmpadas de iluminação, mas há muita fantasia nessa história.

¹⁹ Planck considerou que a luz emitida pelo corpo negro se devia às vibrações dos chamados ressoadores — cargas elétricas oscilantes —, que produzem radiação eletromagnética. Cada ressoador podia vibrar a qualquer frequência. Isto derivava da visão da termofísica dada pela mecânica estatística.

²⁰ Para uma explanação longa, mas perspicaz, do artigo crucial de Planck, ver A. P. Lightman, *The Discoveries: Great Breakthroughs in Twentieth-Century Science*, Nova Iorque, Pantheon, 2005.

²¹ h tem o valor de $6,626 \times 10^{-34}$ joule segundo (ou $\text{m}^2 \text{kg/s}$ em unidades SI). O aspeto-chave está em ser um número muito pequeno. O joule segundo é a unidade de ação — energia multiplicada pelo tempo — que representa a energia de uma onda, dividida pela frequência da onda em Hz (s^{-1}).

²² A. Hermann, *The Genesis of Quantum Theory*, Cambridge, MA, MIT Press, 1971.

²³ Helge Kragh, «Max Planck: The reluctant revolutionary», *Physics World*, vol. 13(12), 2000. Disponível online em <https://doi.org/10.1080/14786440709463670>.

²⁴ Abraham Pais, *Subtle is the Lord: The Science and Life of Albert Einstein*, Oxford, Oxford University Press, 2005, p. 382. [Trad. portuguesa: *Subtil é o Senhor — Vida e pensamento de Albert Einstein*, Lisboa, Gradiva, 1999.]

²⁵ Em 1909-10 abandonara temporariamente o efeito fotoelétrico para embarcar numa grandiosa série de experiências que também lhe granjeariam fama. As suas ideias eram deveras engenhosas e, caso o leitor tenha aprendido alguma física, é por essa razão que o nome Millikan lhe soa familiar. Millikan sabia que os eletrões eram partículas graças ao trabalho de J. J. Thomson em 1897, mas aperfeiçoou um método mais preciso de medir a carga elétrica do eletrão. Este seu trabalho contribuiu para eliminar todas as dúvidas de que o eletrão era também aquilo que viajava pelos cabos sob a forma de eletricidade. Ainda hoje, os estudantes universitários costumam recriar a famosa experiência da «gota de óleo». Porém, para mim, mais notáveis ainda são as suas experiências sobre o efeito fotoelétrico, menos conhecidas, mas muito mais laboriosas.

²⁶ Há pouco tempo, o Caltech eliminou o nome de Millikan de edifícios, distinções académicas e património por causa de uma ideia que ele parecia ter dificuldade em aceitar: a igualdade racial. «Millikan emprestou o seu nome e o seu prestígio a um movimento

eugénico moralmente censurável que já fora desacreditado pela ciência na sua época.» Ver <https://www.caltech.edu/about/news/caltech-to-remove-the-names-of-robert-a-millikan-and-five-other-eugenics-proponents>.

²⁷ Os díodos emissores de luz (ou LED, sigla para o inglês *light emitting diodes*) recorrem ao processo inverso, usando a eletricidade para produzir luz.

²⁸ Este método chama-se fotopletismografia (PPG, sigla para o inglês *photoplethysmography*) e é também utilizado nos oxímetros de pulso.

²⁹ Tecnicamente, estas orbitais são o local onde o eletrão se encontra durante cerca de 90 por cento do tempo: a posição do eletrão é incerta, devido ao princípio de incerteza de Heisenberg.

³⁰ V. Kandinsky, «Reminiscences» (1913), em V. Kandinsky, *Kandinsky: Complete Writings on Art*. Coordenação de Kenneth C. Lindsay e Peter Vergo. 2 vols. Boston, G. K. Hall and Co, Londres, Faber and Faber, 1982, p. 370.

³¹ Para os humanos, o que significa ter um comprimento de onda? Nada de especial; qualquer objeto com massa e energia tem um comprimento de onda; quando caminhamos, o nosso comprimento de onda é da ordem de 10^{-37} m, um valor tão pequeno que é impossível de medir. Peço desculpa por desapontar os leitores.

³² Está descrito online em <https://medium.com/the-physics-arxiv-blog/physicists-smashrecord-for-wave-particle-duality-462c39db8e7b>, que remete para Sandra Eibenberger *et al.*, «Matter-wave interference with particles selected from a molecular library with masses exceeding 10000 amu», *Physical Chemistry Chemical Physics*, vol. 15, 2013, pp. 14 696-700. <https://doi.org/10.1039/C3CP51500A>.

³³ A. Tonomura *et al.*, «Demonstration of single-electron buildup of an interference pattern», *American Journal of Physics*, vol. 57, 1989. <https://doi.org/10.1007/s00016-011-0079-0>.

³⁴ R. Rosa, «The Merli-Missiroli-Pozzi two-slit electron-interference experiment», *Physics in Perspective*, vol. 14, 2012, pp. 178-95. <https://doi.org/10.1119/1.16104>.

³⁵ Para uma explicação pormenorizada mas acessível dos níveis de energia — ou, mais precisamente, das bandas de energia — nos sólidos, ver Chad Orzek, «Why do solids have energy bands?», *Forbes*, 2015. Disponível online em <https://www.forbes.com/sites/chadorzel/2015/07/13/xwhy-do-solids-have-energy-bands/H2acb0b9d1080>.

PARTE DOIS

A Matéria para Além dos Átomos

«Embora a nossa sede de conhecimento possa ser insaciável em virtude da imensidão do desconhecido, a própria atividade deixa na sua esteira um tesouro crescente de saber que é retido na memória e guardado por cada civilização como uma parte essencial do seu mundo.»

*Hannah Arendt,
A Vida do Espírito, 1973*

CAPÍTULO 4

A Câmara de Nevoeiro: Os Raios Cósmicos e Um Chuveiro de Novas Partículas

Na colina acima do letreiro de Hollywood ergue-se um majestoso edifício de pedra branca do qual se avista Los Angeles. Não se trata de uma mansão, mas de um museu público: o Observatório Griffith. Os visitantes assistem aos espetáculos do planetário e observam o céu noturno com telescópios, descobrindo o lugar que ocupam no cosmos. No interior das paredes frescas de mármore há uma série de objetos em exposição, um dos quais — dentro de uma vitrina de acrílico com um metro quadrado de área — contém a chave para a próxima etapa da nossa viagem. Discreto, passa despercebido no meio de pedaços de meteorito, rochas lunares e uma fotografia gigante do céu noturno. Porém, os visitantes curiosos são recompensados com uma experiência hipnotizante: minúsculos rastos de condensação formam-se esporadicamente sobre o fundo negro, ao ritmo aproximado de 20 por segundo. Aparecem de forma repentina, descem graciosamente durante meio segundo e desaparecem.

Este dispositivo chama-se *câmara de nevoeiro* e é um tipo primitivo de detetor de partículas que permite aos humanos visualizarem partículas que passam no intervalo de um centésimo

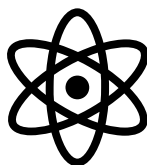
milionésimo de segundo. Dentro dela observamos linhas curtas, com a espessura de um lápis, formadas por partículas alfa (núcleos de hélio), e linhas finas, claras, semelhantes a teias de aranha, que são essencialmente eletrões (radiação beta) ou raios gama. Estas entidades são menores do que os átomos, objetos naturais que não nos é possível ver, tocar ou detetar de outro modo com os nossos sentidos. Porém, temos aqui um aparelho que nos permite vê-los. Ainda que não possamos perceber estas partículas de modo direto — são demasiado pequenas para tal —, as câmaras de nevoeiro permitem-nos observar o efeito por elas criado.

Esta versão específica que está no Observatório Griffith, conhecida por câmara de nevoeiro de difusão, é uma criação de 1936 do físico norte-americano Alexander Langsdorf, que aperfeiçoou o invento original do início do século XX. Trata-se de uma ideia simples, mas que mudou o nosso entendimento dos constituintes fundamentais da natureza. No interior da câmara isolada, um vapor de álcool parte do topo e cai sobre uma chapa metálica fria que está na base. Conforme cai e arrefece, passa a um estado chamado sobressaturação, em que a mais pequena perturbação provoca a formação de gotículas no vapor. Quando partículas com carga elétrica atravessam o vapor acontece uma ionização, da qual resulta energia suficiente para se formar um minúsculo vestígio de nuvem, semelhante ao rasto branco que vemos sair da retaguarda de um avião a jato.

Neste capítulo acompanharemos a câmara de nevoeiro, desde os seus humildes primórdios até ao seu auge no início da década de 1930, quando facultou uma série de descobertas notáveis — tais

como as de novas partículas, completamente inesperadas, que alteraram a nossa visão da matéria. Na realidade, estas novas partículas não faziam parte dos átomos. Veremos a maneira como este detetor de partículas transportou os físicos experimentais das suas caves até ao cume das montanhas, rasgando novos horizontes e lançando os teóricos numa corrida para os alcançarem. Veremos também de que modo as novas descobertas sobre a matéria geraram métodos completamente novos de observar o interior de pirâmides e vulcões, e produziram novas revelações sobre o nosso planeta.

Esta nova Era de descoberta nasceu de uma pergunta aparentemente simples, a mesma que os visitantes do Observatório Griffith costumam formular quando prestam atenção à chuva incessante de rastos de partículas que cruzam a câmara de nevoeiro: de onde vêm todas essas partículas?



No início do século XX, esta era basicamente a pergunta dos cientistas. Ou, na sua linguagem própria, queriam descobrir a proveniência da radiação adicional detetada pelos seus instrumentos. Em laboratórios de Berlim, Viena e Cambridge estudava-se a radiação recorrendo a um aparelho simples e bastante rudimentar chamado eletroscópio. Uma propriedade fácil de prever era a chamada lei do quadrado inverso, pela qual, se o experimentador duplicar a distância a que se encontra de uma fonte

de radiação, o nível detetado será quatro vezes menor. Pelo menos, era isso que se supunha que acontecesse, mas alguns cientistas sagazes verificaram que os instrumentos pareciam detetar uma radiação adicional. Por que havia mais radiação do que a esperada? Sem uma resposta, era escassa a esperança de compreenderem o que acontecia nas experiências laboratoriais.

A resposta parecia simples: a radiação provinha dos minerais da Terra. Na investigação que a levou à descoberta do rádio e do polónio — ambos utilizados como fontes de radiação no laboratório — Marie Curie passou anos a trabalhar num barracão, onde moía e refinava toneladas de um mineral chamado pecheblenda. Os dois novos elementos eram uma mercadoria valiosa para os cientistas que estudavam as propriedades da radiação e provinham da própria Terra. Logicamente, deviam ter sido estes mesmos minerais os responsáveis pela incómoda radiação de fundo. A resposta parecia inequívoca, tal como o modo de a verificar. Se a radiação viesse da Terra, só deveria existir na alta atmosfera em quantidade reduzida. Eles supunham que, a cerca de 300 metros de altitude, a radiação adicional acabaria por desaparecer.

Para um jovem físico aventureiro, este era o desafio perfeito. Precisava apenas de altitude e de um instrumento que detetasse a radiação. No início do século XX havia apenas uma forma de atingir altitudes elevadas, caso não se fosse um alpinista: uma viagem num balão de ar quente. Foram pelo menos três os investigadores que se elevaram nos céus, a bordo de balões, em busca da radiação de fundo, levando consigo simples eletroscópios para os seus estudos¹, mas nenhum deles foi bem-sucedido. O movimento do

balão sacudia os eletroscópios e a variação de pressão abria fendas por onde entrava ar e causava problemas de isolamento elétrico.

Os eletroscópios eram populares porque qualquer pessoa os pode construir com poucos meios. Precisa-se apenas de uma vareta de metal fixa no interior de um recipiente fechado, como uma garrafa, de modo a garantir o isolamento elétrico. À extremidade da vareta são presas duas folhas finas de ouro. Quando um objeto com carga elétrica — como uma vareta de vidro que se friccionou em pelagem — contata o topo da vareta de metal, a carga transfere-se para as folhas de ouro, que se afastam uma da outra devido à repulsão elétrica, formando um «V» invertido. As folhas ficariam nessa posição para sempre se o isolamento do aparelho fosse perfeito. Para medir a radiação basta carregar o eletroscópio e aproximar dele uma amostra radioativa. Esta ioniza algum do ar no interior e faz com que as folhas percam a sua carga e regressem lentamente à posição inicial. A taxa de descida das folhas é proporcional à quantidade de radiação a que o aparelho foi exposto. Trata-se de um dispositivo concebido para a bancada estável do laboratório e não para ser usado em altitude a bordo de um balão.

Após este fracasso e a confusão crescente, o padre jesuíta e físico Theodor Wulf compreendeu que a solução passava por tornar o eletroscópio mais robusto. Em 1909, Wulf modificou o aparelho, substituindo as folhas de ouro por filamentos revestidos de platina. Esta opção revelou-se mais fiável. Wulf deslocou-se a Paris para testar o instrumento em duas altitudes diferentes. Primeiro, no solo, junto à Torre Eiffel, mediu o nível de radiação. Depois, subiu à torre e, a 300 metros de altura, onde se esperaria que a radiação

cessasse, descobriu que persistia. Outros adotaram o seu método, mas os resultados obtidos continuavam a causar perplexidade. O físico italiano Domenico Pacini resolveu experimentar, não a uma altitude mais elevada, mas mais baixa, e levou o eletroscópio de Wulf para debaixo de água, onde esperava medir mais radiação, já que estaria rodeado pelos minerais terrestres. Porém, o que mediu foi o oposto. O eletroscópio aperfeiçoado parecia funcionar, mas os resultados não eram os expectáveis. Alguns cientistas começavam a suspeitar que, afinal, a radiação não provinha dos minerais da Terra.

Entre eles, encontrava-se Victor Hess, um físico austríaco de 20 anos, que viu uma oportunidade de se evidenciar. Contratou um piloto de balões, vestiu um sobretudo de lã e descolou de um campo nos arredores de Viena. O balão subiu a mais de 5300 metros, uma altitude superior à do acampamento de base do Everest. Hess fixara ao balão dois novos eletroscópios de Wulf, especialmente preparados para suportar as variações de temperatura e pressão. Apesar do ar rarefeito e da temperatura rondar os 20 °C negativos, conseguiu fazer medições consistentes, tendo depois descido ao solo.

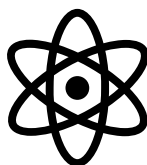
Não tendo sido a primeira pessoa a atingir aquela altitude nem a tentar medir os níveis de radiação na atmosfera, Hess foi o primeiro a fazê-lo suficientemente bem para obter um resultado fiável. De regresso ao solo, Hess analisou os seus registos. Conforme subia, a quantidade de radiação começava por descer um pouco, mas depois crescia sem parar até se tornar claro que, para valores elevados de altitude, havia muito mais radiação do que para valores

baixos. A radiação não podia ser oriunda da Terra — tinha de vir do exterior da atmosfera. Mas de onde? Hess realizou outra subida em balão durante um eclipse solar, que permitiu eliminar o Sol da lista das possíveis fontes de radiação. Estava perante uma fonte de radiação completamente nova. Hess, Wulf, Pacini e outros físicos perceberam assim que a radiação não se encontrava nos minerais, nem no laboratório. Havia radiação proveniente do espaço.

A radiação descoberta por Hess, chamada *raios cósmicos*², solucionou o mistério do excesso de radiação que intrigava os físicos havia mais de 15 anos. Porém, isso mudou por completo as ideias acerca da origem da radiação. Quando falo em radiação neste contexto, devo esclarecer que me refiro a radiação *ionizante*, a qual possui energia suficiente para libertar os eletrões dos átomos. Esta compreende os três tipos de radiação que os cientistas então conheciam: a radiação alfa (núcleos de hélio), a radiação beta (eletrões) e a radiação gama (luz de energia elevada). Algures no espaço, interações violentas e enérgicas geravam uma radiação suficientemente poderosa para percorrer distâncias vastas, atravessar a atmosfera terrestre e chegar ao solo terrestre. Mas vinda de onde? Como se formara essa radiação? Seria de um tipo novo ou já conhecido? Teria alguma interação com a atmosfera ou limitava-se a atravessá-la? Hess descobrira os raios cósmicos, mas pouco sabia acerca deles. Era necessário um instrumento que permitisse investigar a radiação, tanto a dos raios cósmicos quanto a registada nos laboratórios terrestres.

Na realidade, Hess e os seus colegas queriam um meio de *ver* a radiação, algo particularmente difícil uma vez que ela é, na sua

grande maioria, invisível. Porém, eles sabiam que a física tornara visíveis outras partes da natureza graças a instrumentos engenhosos. Por exemplo, as profundezas do espaço não puderam ser vistas antes de o telescópio ter conseguido captar a sua luz débil, ampliando a nossa visão do Universo e do nosso lugar nele. Os mecanismos da biologia foram igualmente invisíveis até ao aparecimento dos primeiros microscópios, que revelaram um mundo fervilhante de microrganismos, conduzindo a um enorme progresso no conhecimento sobre a transmissão da doença e sobre a formação da própria vida. No princípio do século XX, os físicos encontravam-se numa encruzilhada semelhante, a precisar de melhorar a sua capacidade de visualizar a radiação.



Charles «C.T.R.» Wilson era um tímido e baixinho físico escocês que havia iniciado a sua carreira científica na altura em que a radiação fora descoberta. As suas raízes desempenharam um papel importante no desenvolvimento das suas ideias, sobretudo porque a Escócia é praticamente o local ideal para estudar nuvens. Em 1894, com 25 anos, Wilson deslocou-se a Fort William para subir à montanha mais alta das Ilhas Britânicas, Ben Nevis.

Durante 355 dias por ano, o característico cume achatado de Ben Nevis encontra-se envolto numa neblina traiçoeira, mas à espera de Wilson estava uma espécie de milagre: um período de bom tempo sem precedentes. Wilson escalou a montanha com facilidade

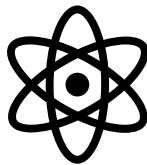
e lá permaneceu durante duas semanas como voluntário na estação meteorológica. Embora trabalhasse no Laboratório Cavendish, em Cambridge, o seu primeiro amor não fora a física, mas sim a meteorologia. Posicionado no cume, a maior parte das nuvens estava abaixo dele, e deste ponto privilegiado pôde observar os efeitos da luz que dançava nas nuvens, vendo os anéis coloridos conhecidos por «glórias», que se formavam nas sombras da montanha. Estava fascinado por estes efeitos e queria reproduzi-los e estudá-los no laboratório. Por conseguinte, a sua primeira tarefa seria descobrir como fazer nuvens.

De regresso a Cambridge, concebeu uma montagem experimental justamente para esse fim. Era composta por uma proveta invertida no interior de um grande frasco de vidro cheio de água e de uma série de válvulas e tubos de vidro ligados a um segundo frasco mantido sob vácuo. Para manipular a câmara, Wilson puxava um fio que removia uma pequena rolha, o que permitia que o ar na proveta se expandisse, causando um abaixamento súbito da pressão e da temperatura³. Quem abre uma garrafa de refrigerante e vê a neblina que se gera e ouve o som sibilante que a acompanha assiste a um processo idêntico. À medida que se expande e a pressão desce, o ar fica sobressaturado. Se as condições forem corretas, a humidade do ar condensar-se-á sobre partículas de poeira, formando gotículas finas que geram uma nuvem. Wilson reproduziu com êxito esse processo no laboratório e estava prestes a dedicar-se a recriar os efeitos de luz que observara no cume de Ben Nevis quando encontrou uma coisa que não procurava: quando utilizava ar isento de poeira na sua experiência, a nuvem de gotículas continuava a formar-se.

Como era isso possível? Para que se formassem nuvens era necessária uma perturbação que induzisse o aparecimento de gotículas; em linguagem técnica, era preciso que existissem *núcleos de condensação*. Até esse momento, esses núcleos eram a poeira. Porém, com ar livre de poeira, qual poderia ser a causa das gotículas? Com base nas suas experiências anteriores, Wilson conseguia perceber que o causador da perturbação era um objeto pequeno, talvez do tamanho das moléculas ou dos átomos do ar. Esta observação conduziu-o a uma ideia sugestiva: a de que as gotículas que compunham a nuvem podiam ter-se formado a partir dos iões no interior da câmara. A ser verdade, ele teria descoberto uma maneira de visualizar e contabilizar os átomos ou as moléculas do ar.

Wilson não estava interessado em observar radiação. Em 1895, a radiação era uma descoberta demasiado recente para ser bem conhecida. Wilson seguiu a hipótese de serem os iões do ar os responsáveis pela formação das nuvens. Reconstituiu a sua experiência com um dispositivo mais complexo, de maneira a obter uma expansão ainda mais rápida. Quando a sua nova montagem experimental ficou pronta, Wilson pegou num tubo de raios X primitivo e apontou-o à câmara. Descobriu que, nas condições corretas, os raios X produziam um grande número de gotículas, amplificando o efeito que observara antes. A presença de cargas elétricas provocava a formação de nuvens. A sua suspeita confirmava-se: os raios X criavam iões no ar, os quais, por sua vez, criavam núcleos de condensação.

Este era o trabalho de Wilson, enquanto outros físicos embarcavam com eletroscópios em balões de ar quente e tentavam resolver o mistério da radiação cósmica. Ele não ignorava os avanços no conhecimento da radiação — afinal, todos os dias se cruzava com Ernest Rutherford e J. J. Thomson. Em 1901, o seu interesse aumentou o suficiente para que fizesse um desvio de rumo e procurasse a radiação de fundo com um eletroscópio, que instalou à noite dentro do túnel da ferrovia caledoniana. Tal como os outros, ele tentava detetar a radiação adicional oriunda dos minerais da Terra, mas não registou uma diferença apreciável entre a quantidade detetada dentro do túnel e a que medira no laboratório⁴. Por isso, voltou a concentrar a atenção no trabalho mais promissor, deixando aos outros o estudo da radiação misteriosa.



A aparente falta de interesse de Wilson pela radiação e a sua experiência singular sobre a formação de nuvens fazia dele um excêntrico no Laboratório Cavendish. Passava os dias na tarefa meticulosa e complexa de soprar peças de vidro que muitas vezes se quebravam. Os estudantes e o pessoal sentiam empatia por Wilson, visto que todos eles tinham de aprender a soprar vidro no chamado «laboratório de formação», um laboratório especial onde os estudantes-investigadores aprendiam a arte intrincada de construir dispositivos, tais como os eletrómetros, antes de encetar um programa de replicação de experiências anteriormente

realizadas. Mais tarde, muitos deles recordariam com afeto o som que Wilson fazia ao soprar vidro, que fora como que uma banda sonora para o período em que tinham trabalhado no Cavendish.

Atualmente, uma oficina científica de sopragem de vidro é uma raridade, pelo que se torna difícil termos a noção de tudo o que envolvia a realização de uma experiência como a da câmara de nevoeiro, antes do *design* assistido por computador e das fresadoras que usamos nas experiências modernas. Foram precisos anos para dominar as técnicas necessárias, mas a perseverança e a calma características de Wilson conduziram-no à criação daquilo a que Rutherford chamava «o mais original e maravilhoso instrumento na história da ciência»⁵.

Construir um componente de vidro era um processo artesanal que envolvia o aquecimento do vidro à temperatura correta. Numa das mãos, Wilson segurava um maçarico. De modo a gerar o calor suficiente para fundir o vidro da forma necessária, Wilson abria um pouco o gás, fazendo o maçarico emitir um silvo inconfundível: o som pelo qual seria depois recordado. Exatamente no momento certo, usava a boca para soprar ar por um tubo, de maneira a expandir o recipiente de vidro com a intensidade apropriada, ao mesmo tempo que modelava o vidro amolecido com facas e outras ferramentas⁶.

Era um processo quente e fisicamente exigente, mas, em poucos minutos, a habilidade de Wilson conseguia transformar o vidro num balão, numa ampola ou num condensador de serpentina. Os principais componentes das suas câmaras de nevoeiro eram

cilindros que tinham de se ajustar perfeitamente uns aos outros, o que costumava exigir horas a esmerilar o vidro depois de arrefecido. O processo mais traiçoeiro era de longe a montagem dos vários componentes, quando cada nova peça adicionada ameaçava destruir o conjunto. Com grande frequência, toda a montagem experimental acabava estilhaçada no chão. Wilson, ao contrário de Rutherford, nunca praguejava quando isso acontecia. Limitava-se a murmurar «Que aborrecido» e recomeçava.

Hoje, as primeiras câmaras de nevoeiro de Wilson estão preservadas no museu do New Cavendish Laboratory em Cambridge e, à primeira vista, parecem bastante primitivas. Por terem uma natureza simples, transmitem a impressão de que as descobertas seriam fáceis naquele tempo e que qualquer físico de qualidade mediana poderia chegar a revelações surpreendentes sobre o Universo. Porém, assim que nos apercebemos do grau de perícia e de paciência exigido para produzir os indispensáveis utensílios de vidro no início do século XX, concluimos que Wilson e os seus colegas investigadores eram deveras extraordinários. Da utilização do seu novo e poderoso instrumento resultaram descobertas que mudariam para sempre a nossa visão da matéria.

Quando Wilson desenvolveu a sua câmara, estava longe de ser evidente que o dispositivo permitia estudar a radiação de uma forma quantitativa rigorosa, mesmo se parecia reagir aos raios X. Só depois de Rutherford ter determinado a natureza das radiações alfa e beta é que Wilson regressou à câmara de nevoeiro em 1910, desta feita com energia renovada e um objetivo ambicioso.

Planeava transformá-la num instrumento que permitisse observar partículas com carga elétrica.

Em 1911, 15 anos depois de inventar a câmara de nevoeiro, Wilson tornou-se a primeira pessoa a ver e a fotografar o movimento de partículas alfa e beta. Tinha aperfeiçoado o dispositivo de modo que as partículas carregadas criassem rastos brancos que pudessem ser iluminados e fotografados. Wilson descreveu estes rastos, produzidos por eletrões na câmara, como «pequenas espiras e fiapos de nuvens⁷». Ele mostrou uma fotografia dos rastos de partículas alfa ao físico australiano-britânico W. H. Bragg, que fora o primeiro a prever que uma destas partículas começaria por abrandar gradualmente até se imobilizar de súbito, interagindo com mais intensidade no final do seu trajeto, e que produziria um rasto nebuloso cuja opacidade e cuja espessura aumentariam à medida que a partícula desacelerasse e acabasse por parar. Wilson e Bragg descobriram que «a semelhança entre a fotografia e a imagem idealizada por Bragg era assombrosa»⁸.

Investigadores do mundo inteiro adotaram a câmara de nevoeiro de uma forma lenta mas progressiva, introduzindo-lhe adaptações para que se tornasse ainda mais útil. No fim da década de 1920, a maior parte das câmaras de nevoeiro era colocada entre os polos de um grande magneto, que curvava a trajetória das partículas carregadas. Uma partícula positiva curvava-se num sentido, enquanto uma partícula negativa o fazia no sentido oposto. Uma partícula extremamente energética curvava-se menos do que outra com pouca energia. Realizando medições cuidadosas das fotografias, os investigadores conseguiam determinar a carga

elétrica e a energia das partículas. Na câmara de nevoeiro do laboratório descobriram qual a aparência de diversas partículas e puderam determinar as suas propriedades.

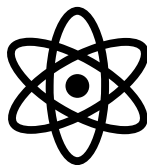
As ideias sobre a interação das partículas que haviam sido obtidas através de experiências exaustivas ao longo dos anos estavam agora patentes aos olhos dos físicos. Chegara o momento de aplicar esta nova técnica à interpretação da natureza dos raios cósmicos. No Caltech, em Pasadena, Robert Millikan — que se mudara de Chicago para aí em 1921, após as suas experiências do efeito fotoelétrico (Capítulo 3) — aconselhou o seu ex-aluno de pós-graduação Carl Anderson a usar uma câmara de nevoeiro para prosseguir uma investigação intrigante sobre os raios cósmicos. Em 1929, o cientista russo Dmitri Skobeltsyn descobriu alguns rastros numa câmara de nevoeiro que quase não se curvavam⁹, o que indicava que possuíam uma enorme energia, superior a 5000 MeV, mil vezes superior à das fontes radioativas usadas no laboratório. Não eram apenas muito energéticas: surgiam também em grupos surpreendentes, com dois, três ou mais raios que pareciam oriundos de um ponto no exterior da câmara. Os resultados sugeriam que a câmara de nevoeiro podia conseguir revelar algo novo e empolgante acerca dos raios cósmicos.

Anderson, filho de imigrantes suecos, resolvera, quando ainda frequentava a escola secundária em Los Angeles, que ia ser engenheiro eletrotécnico, embora não tivesse ninguém na família com formação nas áreas técnicas. Um professor aconselhou-o a ingressar no Caltech, onde perceberia que a física não se resume a roldanas e alavancas. Decidiu mudar de especialização e nunca se

arrependeu¹⁰. Anderson já utilizara uma câmara de nevoeiro durante a sua licenciatura com Millikan, e descobrira que, usando vapor de álcool em vez de vapor de água, obtinha rastos muito mais brilhantes e fáceis de fotografar. Principiou a construir uma nova câmara de nevoeiro para esse trabalho.

Anderson encontrou um gerador elétrico no departamento de Aeronáutica e concebeu o resto em torno dele. Não tinha dinheiro para maquinaria sofisticada — estava-se no início da Grande Depressão —, pelo que a sua montagem experimental era uma coisa bizarra, mas funcionava. A câmara de nevoeiro estava no centro do dispositivo, rodeada por tubos de cobre que conduziam a eletricidade para criar um grande eletromagneto. Os tubos eram ocos, percorridos por água de arrefecimento que impedia o magneto de fundir. Juntamente com as varas de ferro necessárias para direcionar o campo magnético, a montagem era do tamanho de um automóvel pequeno e pesava cerca de duas toneladas. A câmara propriamente dita era visível por um orifício numa das extremidades do magneto, onde uma máquina fotografava os rastos. Para a manusear, Anderson precisava de criar, de forma repetida, uma expansão muito rápida do vapor de álcool no interior, algo que ele conseguia com um êmbolo móvel, que causava um forte estrondo de cada vez que se movia. Todo o *campus* do Caltech terá ouvido os sucessivos estrondos que vinham do telhado do edifício, onde decorria a experiência. Felizmente para os outros ocupantes, Anderson realizava a experiência apenas à noite, porque ela exigia uma potência de 425 kW — que era uma fração substancial do consumo de eletricidade de todo o *campus*.

Examinando os dados fotográficos, Anderson descobriu que cerca de 15 das 1300 fotografias pareciam mostrar rastos que correspondiam a partículas com carga positiva. Porém, os rastos eram demasiado longos para a partícula mais leve com carga positiva conhecida, que era o próton. Que partícula, aparentemente nova, seria esta? Nas fotografias, as partículas tinham carga unitária positiva e massa semelhante à do elétron. A princípio chamou-lhes apenas partículas «positivas facilmente desviadas», mas, quando acabou de escrever o artigo para publicação, havia chegado a uma conclusão de uma ousadia surpreendente. Acreditava ter descoberto um novíssimo tipo de partícula fundamental, a que chamou «positrão»¹¹.



Aquilo que Anderson não sabia era que, alguns anos antes, em 1928, o físico britânico Paul Dirac previra, por pura intuição matemática, que os positrões deviam existir. Dirac combinou a teoria da mecânica quântica, que descreve objetos muito pequenos, com a teoria da relatividade restrita de Einstein, que descreve objetos que se deslocam a velocidades muito elevadas, na esperança de saber mais sobre o átomo. Dirac era um homem de poucas palavras, mas o seu trabalho conseguiu unificar duas das mais debatidas teorias da física. A equação que formulou, conhecida por equação de Dirac, é por muitos considerada uma das mais belas de toda a física. Não intencionalmente, tinha um poder preditivo. Tal como a raiz quadrada de 4 pode ser +2 ou -2, a equação de

Dirac previa a existência de partículas idênticas ao elétron — ou seja, com a mesma massa —, mas com carga elétrica oposta. Devido às suas implicações estranhas, Dirac não tinha a certeza de quais seriam as manifestações físicas da teoria, mas ela parecia prever que todos os tipos conhecidos de partículas deviam ter uma versão oposta, que se tornou conhecida por antimatéria¹².

Acontece que Dirac era amigo de Patrick Blackett, um dos experimentalistas do Laboratório Cavendish que se encontrava a desenvolver a técnica da câmara de nevoeiro com o físico de origem italiana Giuseppe Occhialini. Quando Dirac propôs a sua nova teoria, partilhou-a com Blackett e, em conjunto, deduziram que, se um positrão surgisse no campo magnético de uma câmara de nevoeiro, deixaria um rasto que, sendo idêntico ao de um elétron, se curvaria no sentido oposto. Quase três anos antes do trabalho de Anderson, eles analisaram as fotografias que Blackett fizera das experiências com fontes radioativas na câmara de nevoeiro, no laboratório. Dirac pensava que existiam indícios abundantes da existência dos positrões, mas Blackett considerava que esses indícios eram demasiado vagos para serem publicados. Argumentava que talvez houvesse elétrons provenientes do exterior, cujas colisões acidentais os assemelhavam a positrões. Não havia forma de discernir a diferença entre estes elétrons caprichosos e os verdadeiros positrões sem refazer as experiências¹³.

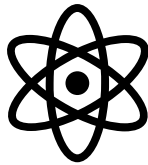
A cautela de Blackett poderá ter decorrido do facto de a ideia de Dirac não ter sido propriamente bem recebida. Algumas das sumidades científicas daquele tempo não estavam convencidas — para usarmos um eufemismo — de que o nosso Universo pudesse

consistir em dois tipos de matéria: uma matéria «normal» e uma «antimatéria» simétrica. O físico austríaco Wolfgang Pauli, um dos pioneiros da teoria quântica, chamou-lhe «disparate» e Niels Bohr (ver Capítulo 2) estava «completamente cético»¹⁴. Werner Heisenberg, um físico teórico alemão a quem se deve uma boa parte da mecânica quântica, incluindo o princípio da incerteza, afirmou em 1928 que «o capítulo mais triste da física moderna é, e continuará a ser, a teoria de Dirac»¹⁵. Blackett resolveu fazer alguns cálculos para determinar se tinham ou não provas da extraordinária teoria de Dirac, mas enquanto continuava a refletir no problema, chegou-lhe a notícia de que Anderson descobrira o positrão.

Anderson estava demasiado ocupado com a sua experiência para ler os artigos de Dirac. Talvez a sua concentração se justificasse em pleno, dado que lhe permitira antecipar-se a Blackett e Occhialini na descoberta do positrão. No entanto, os seus resultados foram acesamente debatidos pela comunidade de físicos, porque umas quantas fotografias não pareciam constituir prova suficiente em favor de tão extraordinária teoria. Com isto em mente, a equipa de Cambridge compreendeu que tinha uma vantagem. Em vez de colecionar milhares de fotografias na esperança de que um punhado delas pudesse mostrar algo de interessante, tal como Anderson fizera, Blackett e Occhialini tinham descoberto uma maneira de obter uma taxa de sucesso de cerca de 80 por cento na captura das partículas relevantes que atravessavam a câmara. Para isso, haviam desenvolvido um método elétrico de «disparo» da câmara, instalando contadores Geiger acima e abaixo do dispositivo. Se ambos os contadores detetassem uma partícula ao mesmo tempo, a câmara seria fotografada. Em 1932, os dois cientistas dispunham

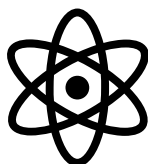
quer do método quer do imperativo de prosseguir o trabalho de Anderson com experiências próprias.

Blackett e Occhialini não demoraram a confirmar a existência dos positrões, e com as suas observações ricas em informação foram também capazes de aprofundar o estudo dos pormenores. O que observaram foram numerosas ocorrências em que eletrões e positrões eram detetados em simultâneo nas fotografias. Com efeito, parecia haver números iguais de eletrões e positrões nas fotografias: a matéria normal e a antimatéria eram criadas em quantidades iguais. Blackett e Occhialini conseguiram observar este processo em marcha quando raios gama de energia elevada (presentes nos raios cósmicos) penetraram na câmara e criaram um eletrão e um positrão em simultâneo, num processo conhecido por *produção de pares*. Este foi o primeiro registo da transformação de fotões (raios gama) em matéria (eletrões e positrões), um processo previsto pela combinação da mecânica quântica com a relatividade de Einstein. A existência destas interações revelava uma segunda e fascinante consequência da equação de Dirac de que só então os físicos teóricos começavam a aperceber-se: a antimatéria e a matéria podem *aniquilar-se* mutuamente quando entram em contacto, transformando a sua massa em energia, que é emitida como luz. Noutros termos, a massa pode ser convertida em energia e vice-versa. Eles reuniram tantas fotografias de positrões e de produção de pares que o mundo científico não pôde continuar a resistir às conclusões da teoria de Dirac. Por muito estranha que parecesse, a antimatéria era real.



Em vez de reescrever a história e atribuir os factos a um golpe da sua intuição, Anderson insistia que «a descoberta do positrão fora totalmente accidental»¹⁶. Era uma daquelas descobertas que estava pronta para acontecer e que teria acontecido em algum lugar num momento próximo, caso não tivesse sido ele o primeiro a fazê-la. Em conjunto com Victor Hess, Anderson recebeu o prémio Nobel da Física em 1936, aos 31 anos, uma das pessoas mais jovens a quem tal aconteceu. Charles Wilson recebera o prémio em 1927 pela invenção da câmara de nevoeiro e Dirac em 1933¹⁷.

À primeira tentativa, Anderson alcançara um progresso notável servindo-se da câmara de nevoeiro para estudar os raios cósmicos. Mas o caminho não acabara. A descoberta do positrão sugeria que a investigação dos raios cósmicos poderia ser utilizada na descoberta de partículas ainda desconhecidas, e que a natureza era mais rica e mais abundante do que se supunha.



A experiência do positrão mostrara aquilo que era possível detetar ao nível do solo, mas ainda se sabia pouco acerca dos raios cósmicos propriamente ditos. Anderson encetou nova aventura em 1935 com a câmara de nevoeiro, desta feita com o seu estudante

de pós-graduação Seth Neddermeyer. Para estudar os raios cósmicos a altitudes elevadas, Anderson e Neddermeyer dirigiram-se ao Pike's Peak, no Colorado. O seu plano implicava trabalhar a 4300 metros de altitude, onde o teor de oxigénio na atmosfera é apenas 60 por cento do que se verifica ao nível do mar, o que os expunha ao risco do mal das alturas. O clima em Pike's Peak é também hostil. Neva durante a maior parte do ano e, quando se levanta vento, o que é frequente, pode soprar a 160 km/h. Para piorar a situação, Anderson e Neddermeyer quase não tinham dinheiro.

Conseguiram juntar o suficiente (400 dólares) para comprar uma carrinha de caixa aberta, carregaram o enorme aparelho e partiram para Pike's Peak. Tudo correu bem até começarem a subir a montanha. Com todo o peso e o baixo teor de oxigénio na atmosfera, a velha carrinha não conseguiu alcançar o cume. Tiveram de pedir ajuda a um reboque. Por fim, quando conseguiram chegar ao topo, descobriram que não havia eletricidade suficiente para ligarem o dispositivo. Então, compraram outro veículo e usaram o motor como gerador.

Depois de tudo estar a funcionar, os dois físicos captaram imagens durante seis longas semanas. A seguir, foi preciso revelar as fotografias a partir dos negativos para conseguirem perceber o que haviam captado. Na montanha fria e escura analisaram as imagens em busca de eletrões, positrões, prótons e partículas alfa. Desta feita, continuavam a encontrar os rastos de partículas que se assemelhavam muito a eletrões, mas pareciam ser 400 vezes mais pesadas e apresentavam versões com carga positiva ou negativa.

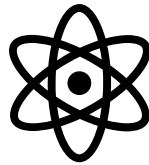
Eles sabiam que estas partículas não eram prótons — pois eram demasiado leves —, nem os recém-descobertos pósitrons. Havia apenas uma conclusão: tinham descoberto um novo tipo de partícula.

Hoje chamamos a estas partículas «muões». Têm exatamente as mesmas propriedades que os eletrões (ou pósitrons, no caso dos antimuões), mas a sua massa é superior. Têm também um tempo de vida limitado, pois decaem em 2,3 milionésimos de segundo transformando-se em eletrões¹⁸. Quando os raios cósmicos de energia elevada atingem a atmosfera, as suas colisões criam chuvas de novas partículas, muitas das quais são muões. Em cada minuto de cada dia cerca de dez mil muões bombardeiam cada metro quadrado da superfície da Terra (por minuto, vários muões atravessam as nossas cabeças). Porém, não conseguimos vê-los, senti-los ou de algum modo detetá-los sem o equipamento especializado. O seu número é maior a altitudes elevadas do que ao nível do solo.

Ao contrário dos eletrões, dos prótons e de outras partículas observadas, não parecia haver uma razão prática para a existência de muões. São partículas fundamentais, ou seja, não são compostas por outras partículas, mas não entram na composição da matéria normal que nos rodeia. Ao ouvir falar do muão, um físico da época perguntou «Quem mandou vir isso?»¹⁹ A sua justificação era, e continua a ser, um perfeito mistério. Só então os físicos começavam a conhecer a profundidade e complexidade do mundo subatômico.

Uma ideia acerca da identidade do muão ilustra em que ponto estava o conhecimento teórico em 1935. Um jovem teórico japonês chamado Hideki Yukawa propusera no ano anterior que a força que mantinha a coesão do núcleo — a força nuclear forte — se devia a uma partícula cuja massa seria cerca de 200 vezes a do elétron. A esta partícula hipotética chamou *mesão*, da palavra grega para «intermédio», porque previa que a sua massa devia estar entre a do elétron e a do próton²⁰. A princípio, alguns físicos pensaram que o muão era o mesão de Yukawa, mas depressa perceberam que isso era impossível, visto que o mesão tinha de interagir fortemente com a matéria. O muão, por outro lado, parecia atravessar sem problema folhas de chumbo e de outros materiais.

Conseguir as melhores condições e os melhores dados implicava experiências muito aventureiras que desafiavam as fronteiras da tecnologia. Posteriormente, a experiência da câmara de nevoeiro de Anderson seria instalada a bordo de um *B-29* da Marinha dos EUA para o estudo dos raios cósmicos a altitudes elevadas²¹. Contudo, houve problemas técnicos tão complicados que a experiência não produziu resultados úteis. Foi ficando claro que as partículas que compõem a matéria da nossa vida quotidiana são apenas uma parte do mundo escondido que nos cerca. Há muito, muito mais que está para além disso. A descoberta da radiação tinha alterado a visão da matéria, de uma substância estática para outra em contínua mudança. Agora, os raios cósmicos começavam a destruir a ideia de que os átomos eram o único tipo de matéria existente. O muão era apenas o começo.



A detecção dos raios cósmicos a altitudes elevadas, antes de eles interagirem com a atmosfera da Terra, tornou-se cada vez mais importante à medida que crescia o conhecimento acerca desses raios e das novas partículas. Como mostrava o ensaio no *B-29*, era necessário um detetor de um tipo mais robusto do que a câmara de nevoeiro para as experiências a grande altitude. Outros físicos empenharam-se no desenvolvimento de um género complementar de detetor. Ao contrário dos complexos êmbolos e câmaras fotográficas envolvidos nas câmaras de nevoeiro, as *emulsões nucleares* eram detetores passivos, sem partes móveis. Na sua essência, eram um tipo especial de chapa fotográfica, com cristais de halogeneto de prata suspensos em gelatina, sensíveis à passagem de partículas carregadas. As emulsões nucleares eram mais robustas do que as câmaras de nevoeiro e de manuseamento muito mais fácil — ficavam sem supervisão a acumular dados ao longo de meses, e não havia problemas na sua utilização a grande altitude.

O método de utilização destas emulsões no estudo dos raios cósmicos foi desenvolvido pela física austríaca Marietta Blau enquanto trabalhava, sem remuneração, no prestigioso Instituto do Rádio em Viena. Em 1919, concluíra o seu doutoramento em Viena, sob a orientação de Franz Exner e Stephan Meyer, ambos conhecidos por apoiarem mulheres cientistas²². Encetara uma carreira promissora na Universidade de Frankfurt, lecionando

radiologia a estudantes de medicina e publicando a sua investigação sobre emulsões fotográficas para raios X e luz visível. Em 1923, após regressar a Viena para cuidar da sua mãe doente, aceitou um cargo não remunerado no Instituto, pois não conseguiu arranjar outro, e sustentava-se com bolsas de estudo e dando algumas aulas.

A investigação de Blau em Viena combinava o que aprendera em Frankfurt com o seu conhecimento sobre o domínio emergente da ciência nuclear e demonstrava que as emulsões fotográficas podiam ser utilizadas para estudar os raios cósmicos. Ela trabalhou com o fabricante de emulsões Ilford para produzir variedades extremamente densas, que facilitavam o registo dos trajetos das partículas. Com a sua ex-aluna Hertha Wembacher, realizou uma experiência durante quatro meses na estação de investigação de Hafelekar, nos Alpes austríacos. O seu trabalho produziu uma nova e notável descoberta: a das «estrelas de desintegração», vestígios da colisão dos raios cósmicos com núcleos pesados no seio da emulsão. Da explosão dos núcleos resultavam estes padrões esteliformes de trajetos de partículas.

Infelizmente, o seu trabalho seria interrompido em breve. Blau era judia e, na iminência da *Anschluss* pelos nazis em 1938, fugiu da Áustria e refugiou-se junto da química pioneira Ellen Gladisch, em Oslo. Mais tarde, mudou-se para o México e depois para os Estados Unidos, com o auxílio de Einstein. Entretanto, a sua colaboradora Wembacher, membro do partido nazi, continuou a publicar os resultados do trabalho de ambas, mas omitindo qualquer referência a Blau.

Do lado oposto do mundo, a técnica de Blau foi adotada por outra mulher, Bibha Chowdhuri, uma investigadora indiana que tinha concluído um mestrado em Física em 1934. Tratou-se de um feito raro para uma mulher em qualquer parte do mundo, incluindo a Índia. Quando Chowdhuri pediu a integração no grupo de investigadores de D. M. Bose, recebeu a resposta de que não havia projetos adequados a mulheres. Ela não desistiu e, entre 1939 e 1942, Chowdhuri e Bose realizaram estudos dos raios cósmicos em que as emulsões fotográficas ficavam expostas durante meses a altitudes elevadas em Darjeeling, Sandakhpu e noutros locais. As emulsões tinham de ser meticulosamente desenvolvidas e processadas, o que podia significar meses de trabalho com um microscópio. Chowdhuri e Bose descobriram indícios de duas novas partículas subatômicas com massas cerca de 200 e 300 vezes a do eletrão. Já conhecemos a primeira delas, o muão, mas a segunda é nova na nossa história: o pião. Existem três tipos de piões (positivo, negativo e neutro), a que regressaremos com mais pormenores em próximos capítulos, conforme formos apresentando as novas partículas e as forças pelas quais interagem.

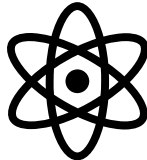
Apesar de ser a primeira a identificar a partícula, os contributos de Chowdhuri não foram reconhecidos pela comunidade científica. Em 1947, o físico britânico Cecil Powell (com Giuseppe Occhialini) utilizou o mesmo método, embora com emulsões de qualidade superior, para mostrar a existência do pião. Em 1950, o comité Nobel atribuiu a Powell o prémio da Física pelo «seu desenvolvimento do método fotográfico de estudo dos processos nucleares e pelas suas descobertas relativas aos mesões conseguidas com este método»²³, mas Chowdhuri nem sequer foi

nomeada para o Nobel. A razão pela qual a experiência de Chowdhuri não foi considerada pelo Comité Nobel como a descoberta central do pião parece dever-se ao facto de a qualidade das emulsões por ela utilizadas não ser suficiente para uma descoberta totalmente inequívoca, uma situação causada pela escassez de materiais durante a Segunda Guerra Mundial²⁴. Porém, basta uma rápida pesquisa para perceber que Powell refere o trabalho de Chowdhuri num dos seus artigos principais²⁵ e reconhece a precedência da sua investigação num livro sobre as partículas elementares²⁶.

Blau foi proposta para o Nobel da Física algumas vezes pela sua invenção da técnica da emulsão fotográfica, que a comunidade — incluindo Powell — reconhecia como essencial para o avanço do conhecimento sobre os raios cósmicos a altitudes elevadas. A invenção de Blau, produzida em grandes quantidades pelas empresas Ilford e Kodak, conduziu ao uso generalizado de emulsões fotográficas e foi essencial para a descoberta do pião por Powell. Contudo, os relatórios preconceituosos sobre os seus contributos numa avaliação manifestamente negativa por um membro do Comité Nobel²⁷ levaram a que Blau fosse também ignorada.

Blau, Chowdhuri e outras mulheres cientistas não são anomalias. Ao longo da história, são tantos os exemplos de trabalho científico de mulheres não reconhecido ou ignorado que este efeito tem uma designação própria: o Efeito Matilda. Proposta em 1993 pela historiadora Margaret Rossiter²⁸, deriva do nome da sufragista americana Matilda J. Gage, que, no final do século XIX, descreveu pela primeira vez este fenómeno que rodeia as mulheres

inovadoras. Rossiter esperava que, ao nomear o efeito, pudesse animar os historiadores, os sociólogos e — desejava-se — os próprios cientistas a evocarem mais histórias de mulheres que a ciência sistematicamente esqueceu e darem a conhecer um maior número delas.



Equipas de físicos em todo o mundo continuaram a estudar os raios cósmicos com câmaras de nevoeiro e emulsões fotográficas ao longo das duas décadas seguintes, revelando progressivamente as suas propriedades. Sabe-se que os raios cósmicos têm origens extraterrestres, mas ainda hoje, quase um século depois, a sua formação é mal compreendida. A informação do Telescópio Espacial Fermi indicia que poderão ter-se formado em supernovas e alcançado energias elevadas nos campos gravitacionais em redor de buracos negros. Independentemente do modo como se formaram, sabemos que consistem sobretudo de prótons de energia muito elevada. Estes prótons entram disparados na atmosfera terrestre e colidem com átomos do ar, produzindo uma avalanche de outras partículas: os múons e pósitrons são as partículas «secundárias». Quase todos os prótons e muitas das partículas secundárias interagem com o ar ou sofrem decaimento (os múons têm um tempo de vida de 2,2 microssegundos²⁹) antes de chegarem ao solo. Essa é a razão pela qual os primeiros investigadores detetaram menos raios cósmicos ao nível do solo.

Os raios cósmicos são de tal maneira energéticos que conseguem desintegrar átomos. Se isso acontecer no local certo, como sucedeu com Marietta Blau, os cientistas conseguem observar os fragmentos resultantes das colisões e aprender mais acerca da natureza do átomo e de outras partículas. Sabemos hoje que muitos raios cósmicos percorreram anos-luz no Universo, trazendo consigo informação sobre o que existirá em sistemas astronômicos como estrelas de neutrões, supernovas, quasares e buracos negros.

Na Terra, não nos apercebemos da chuva de raios cósmicos, embora cerca de cem deles atravessem os nossos corpos em cada segundo. Um trilião de raios cósmicos atinge a Terra a cada segundo, com uma potência superior a mil milhões de watts. Se de algum modo se conseguisse captar essa potência e acumulá-la em kW (kilowatt — uma máquina de lavar roupa consome cerca de 1 kW num ciclo de uma hora), ficar-se-ia com 3,6 mil milhões de kW em cada hora ou cerca de 32.000 TWh (terawatts-hora) por ano — cerca de 50 por cento superior ao consumo de energia elétrica de todo o planeta em 2018.

Novas partículas e novas forças foram sendo descobertas, mas uma atitude permanecia invariável: os autores dessas descobertas quase nunca acreditavam que elas tivessem uma utilização prática. Tal como J. J. Thomson não conseguira ver uma utilidade para o eletrão, foi preciso muito tempo para se compreender o valor dos raios cósmicos. Agora, mais de um século após a descoberta dos raios cósmicos e quase 80 anos depois da descoberta do muão, os progressos tecnológicos conduziram a um entendimento do modo

como os raios cósmicos interagem com a Terra e a aplicações concretas quer dos positrões quer dos muões.

Os raios cósmicos podem dizer-nos mais sobre a história da vida na Terra. O seu efeito sobre o nitrogénio atmosférico cria um isótopo radioativo do carbono, chamado carbono-14. Este combina-se com o oxigénio para formar dióxido de carbono, que as plantas absorvem pela fotossíntese. Ao consumirem as plantas, os animais e as pessoas absorvem sobretudo o carbono-12 normal, juntamente com uma pequena porção de carbono-14. Na década de 1940, Willard Libby comparou as quantidades de carbono-14 e de carbono-12 em amostras de madeira, osso e outros materiais orgânicos e conseguiu calcular o tempo decorrido desde a morte do animal ou da planta, visto que o carbono-14 decai com uma meia-vida de 5730 anos. A datação por radiocarbono, que veremos com mais pormenor no próximo capítulo, teve um impacto profundo em arqueologia, ao possibilitar a criação de uma cronologia global em que os acontecimentos em diferentes regiões e continentes eram posicionados. Em consequência, dispomos agora de uma pré-história não apenas de determinadas regiões, mas do mundo inteiro.

A interação dos raios cósmicos pode também dizer-nos alguma coisa acerca da história do clima terrestre e das suas alterações ao longo do tempo geológico, em particular para discernir a influência do Sol. A nossa estrela não é a fonte dos raios cósmicos de alta energia — sabemos isso há mais de um século, desde que Victor Hess realizou um voo de balão durante um eclipse solar —, mas influencia a maneira como muitos raios cósmicos alcançam a Terra.

Sabemos hoje que o Sol está permanentemente a expelir material, através do chamado vento solar, criando a *heliosfera*, uma gigantesca bolha no espaço que rodeia os planetas do sistema solar. Quando a atividade do Sol diminui, a heliosfera enfraquece e permite que um maior número de raios cósmicos penetre no sistema solar e que colida com átomos da atmosfera da Terra.

Quando os prótons dos raios cósmicos chocam com o oxigênio da atmosfera podem originar dois isótopos do berílio: o berílio-7 e o berílio-10, que acabam por se depositar na Terra. O berílio-10 tem uma meia-vida de 1,4 milhões de anos e decai em boro-10, e o berílio-7 decai em apenas 53 dias em lítio-7. Estes isótopos acumulam-se em camadas de gelo na Antártida e na Gronelândia, e a perfuração desse gelo para obter amostras constitui um método fidedigno para a sua datação. Para cada estrato de gelo, a razão entre os dois isótopos determina há quanto tempo se formaram na atmosfera, e a quantidade de berílio-10 informa-nos sobre o grau de atividade da heliosfera e, portanto, do Sol. Utilizando este método, os raios cósmicos podem esclarecer se a atividade solar está efetivamente relacionada com as alterações climáticas na Terra.

Das partículas descobertas no estudo dos raios cósmicos resultaram aplicações quotidianas extraordinárias. Os positrões, emitidos naturalmente em alguns processos de decaimento radioativo, são utilizados na deteção e no estudo de doenças mediante a técnica da tomografia por emissão de positrões (PET sigla do inglês Positron Emission Tomography). Existem máquinas que realizam estes exames médicos profundos em numerosos

hospitais centrais, e ficaremos a saber mais acerca desta aplicação num capítulo posterior.

A partícula mais inesperada a encontrar uma aplicação é o muão. Os muões têm uma particularidade única: penetram em objetos densos e percorrem distâncias longas — uma parede de chumbo ou algumas centenas de metros de rocha não constituem obstáculo para os muões. Conforme a tecnologia se ia desenvolvendo, os físicos perceberam que, para obterem detetores eficientes, podiam utilizar os muões dos raios cósmicos como se fossem um enorme aparelho de raios X. Visto que os muões conseguem atravessar objetos maciços, dispõem de poderes que estão vedados aos raios X.

A primeira utilização dos muões aconteceu, não nos Estados Unidos ou na Europa, onde foram descobertos e estudados, mas, de modo algo surpreendente, na Austrália. Na década de 1950, um físico chamado E.P. George utilizou os muões dos raios cósmicos para medir a densidade da rocha sobre um novo túnel para o gigantesco sistema de energia hidroelétrica australiano, o Snowy Hydro. Usando um contador Geiger, conseguiu detetar muões dos raios cósmicos no túnel e na superfície, e depois usou o resultado para medir a profundidade e a densidade do solo intermédio. Porém, o contador Geiger que usou não indicava a direção de onde provinham os muões, pelo que não foi possível obter qualquer tipo de imagem.

Na década de 1960, Luis Alvarez colaborou com arqueólogos e recorreram aos muões para gerar imagens do interior das

pirâmides, o que viria a conduzir, em 2010, ao projeto «ScanPyramids» da Universidade do Cairo e do Heritage Innovation Preservation Institute, de França. Embora os arqueólogos pensassem que já sabiam tudo acerca da grande pirâmide de Khufu em Gizé, em 2017 a equipa do ScanPyramids instalou detetores de muões em redor da pirâmide, bem como no interior da Câmara da Rainha, e chegou a uma conclusão surpreendente: havia uma câmara escondida, sem ligação a nenhuma outra, dentro da estrutura. Foi a primeira nova câmara a ser descoberta desde o século XIX³⁰. Estes achados representaram um progresso no conhecimento da estrutura interna da pirâmide e um passo em frente no entendimento completo da sua construção.

Comparados com os eletrões ou com os raios X, os muões não interagem muito à medida que atravessam a matéria, por isso têm menos tendência para se dispersarem e costumam deslocar-se através dos objetos em linhas retas. Esta ausência de dispersão confere-lhes uma vantagem surpreendente. Colocando detetores em ambas as extremidades de um objeto e correlacionando a posição do muão antes e depois da sua travessia desse mesmo objeto obtém-se imagens com uma resolução surpreendentemente boa, mesmo se não houver muitos muões. Isto sucede porque os muões se deslocam em linha reta, enquanto os raios X descrevem trajetórias mais irregulares. As primeiras imagens conseguidas desta maneira resultaram de investigações nos Estados Unidos, e os novos e melhores dispositivos de deteção permitem-nos observar o interior de grandes volumes fechados, mediante uma técnica conhecida por tomografia de muões ou «muografia», que funciona com um aparelho de raios X 3D, mas a uma escala enorme.

Na década de 2000, a pesquisa e a aplicação nesta área aumentaram de modo impressionante.

Em 2006, uma equipa japonesa chefiada pelo professor Hiroyuki Tanaka, da Universidade de Tóquio, foi a primeira a recorrer aos muões para obter uma imagem da estrutura interna de um vulcão, o monte Asama, no Japão. Os geólogos são adeptos particularmente fervorosos da muografia, e outros vulcões, incluindo o Etna e o Vesúvio, têm sido submetidos a esta técnica de imagiologia, que permite mapear os canais de lava e antecipar erupções. Hoje, conseguem conduzir estes estudos de imagiologia ao longo do tempo, o que lhes possibilita observar o movimento do magma.

Com o amadurecimento tecnológico, a comercialização da muografia tornou-se uma realidade, frequentemente acompanhada pela fundação de empresas derivadas dos laboratórios onde a investigação fora realizada. Estas empresas descobriram numerosas e fascinantes aplicações da imagiologia com recurso aos muões, que produziram visualizações 3D de tudo o que se possa imaginar, desde navios contentores até infraestruturas críticas como as centrais geradoras de eletricidade.

Os sistemas de deteção de muões encontram-se também no mercado para os serviços de segurança nacionais e para aplicações de mineração, na identificação de depósitos minerais densos, de grutas e túneis, ou de outras estruturas terrestres. Os muões podem ser utilizados em geofísica, no mapeamento de aquíferos e na exploração de minérios. No que concerne à segurança das

instalações nucleares, uma das primeiras equipas a viajar para o Japão após o tsunami de 2010 utilizou a muografia para analisar o estado do cerne do reator Daichi de Fukushima e localizar o combustível nuclear, a fim de prevenir os riscos durante o processo de limpeza e de resolução do acidente. Nenhuma outra técnica permite obter uma imagem. Outros grupos investigam a utilização da mesma técnica na inspeção de instalações de armazenamento de resíduos nucleares.

Estamos apenas a começar a compreender todos os benefícios dos invisíveis muões que todos os dias chegam à Terra. No futuro, eles poderão ser utilizados para monitorizar os sistemas mais diversos, desde a integridade estrutural das pontes até aos movimentos internos da Terra³¹. Embora os físicos atuais já não utilizem câmaras de nevoeiro, estes detetores estão na génese de uma investigação notável sobre a natureza dos raios cósmicos e permitiram a descoberta de uma variedade de novas partículas. A câmara de nevoeiro começou como um dispositivo curioso que pretendia recriar os efeitos da luz nas nuvens e acabou por ser o instrumento de que os físicos precisavam para visualizar o mundo invisível das partículas. Pela primeira vez, os físicos puderam ver as partículas que atravessavam os detetores e conseguiram obter fotos que mostravam partículas que apareciam e desapareciam.

Antes da câmara de nevoeiro, os físicos pensavam que as únicas partículas eram *subatómicas* — existentes dentro do átomo —, mas agora sabiam que havia outras que não faziam parte da matéria que nos rodeia. O desafio que enfrentavam era o de perceber se

existiam ainda mais partículas na natureza, e como todas elas se encaixavam na realidade.

O problema principal dos físicos residia no facto de não conseguirem controlar aquilo que observavam. Dependiam de fontes naturais de partículas para todas as experiências, desde as substâncias radioativas até aos muões dos raios cósmicos. Porém, para penetrar mais profundamente no átomo e compreender as novas partículas descobertas nos raios cósmicos, precisavam de desenvolver técnicas de manipulação da matéria à escala mais ínfima. Precisavam de simular os raios cósmicos no laboratório.

¹ Franz Linze realizou 12 voos em balão durante o seu doutoramento. Antes de Victor Hess, também Alfred Gockel e Karl Bergwitz haviam utilizado balões de ar quente.

² Não confundir com a radiação cósmica de fundo na região das micro-ondas, descoberta por Penzias e Wilson em 1965, que é a débil radiação eletromagnética remanescente de um estágio inicial da formação do Universo.

³ C.T.R. Wilson, «XI. Condensation of water vapour in the presence of dust-free air and other gases», *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A*, vol. 189, 1897, pp. 265-307. <https://doi.org/10.1098/rsta.1897.0011>.

⁴ C.T.R. Wilson, «On the ionization of atmospheric air», *Proceedings of the Royal Society*, vol. 68, 1901. <https://doi.org/10.1098/rspl.1901.0032>.

⁵ Sue Bowler, «C. TR. Wilson, A great Scottish physicist: His life, work and legacy» (comunicação em conferência), *Royal Society of Edinburgh*, 2012.

⁶ Num laboratório moderno de sopragem de vidro, o material usado é o pyrex — o mesmo material que tem na sua cozinha —, largamente disponível e produzido segundo uma receita padrão. Por isso, hoje, os técnicos de sopragem de vidro, pessoas com dons técnicos raros, conseguem montar sem falhas peças originárias do Japão, dos Estados Unidos ou da Europa. Porém, Wilson terá utilizado vidro de soda, muito mais frágil e difícil de modelar.

⁷ C.T.R. Wilson, palestra Nobel, 12 de dezembro de 1927.

⁸ Ibid.

⁹ G. Zatsepin e G. Khristiansen, «Dmitri V. Skobeltsyn», *Physics Today*, vol. 45(5), 1992. <https://doi.org/10.1098/rspl.1901.0032>.

¹⁰ Harriet Lyle, entrevista com Carl Anderson, janeiro de 1979. Disponível em http://resolver.caltech.edu/CaltechOH:OH_Anderson_C. Acesso em 6 de abril de 2021.

¹¹ C. D. Anderson, «The Positive Electron», *Physical Review*, vol. 43, 1933, p. 491. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.43.491>.

¹² Dirac não inventou o termo «antimatéria», que foi cunhado por Arthur Schuster em 1898 (A. Schuster, «Potential matter: A holiday dream», *Nature*, vol. 58, 1898). No entanto, a sua ideia foi puramente especulativa e invocava a antigravidade, ao contrário da moderna ideia de antimatéria.

¹³ John Hendry, *Cambridge Physics in the Thirties*, Londres, Adam Hilger, 1984.

-
- ¹⁴ E. Cowan, «The picture that was not reversed», *Engineering and Science*, vol. 46(2), 1982, pp. 6-28. Disponível online em: <https://resolver.caltech.edu/CaltechES:46.2.Cowan>. Último acesso em 18 de janeiro de 2022.
- ¹⁵ Werner Heisenberg, carta a Wolfgang Pauli, 31 de julho de 1928. Em W. Pauli, *Scientific Correspondence*, vol. 1, Berlim, Springer Verlag, 1979.
- ¹⁶ A. Pais, *Inward Bound*, Oxford, Oxford University Press, 1986, p: 352:
- ¹⁷ Blackett teve de esperar até 1948, depois de realizar outra descoberta crucial, enquanto Occhialini nunca o receberia.
- ¹⁸ Estas partículas são verdadeiramente fundamentais, não sendo compostas por elétrons. Há também duas partículas «fantasmas», chamadas neutrinos, que se libertam neste decaimento, e que só foram descobertas muito tempo depois. Iremos conhecê-las no Capítulo 9.
- ¹⁹ Foi o físico húngaro-americano I. I. Rabi.
- ²⁰ Como veremos, posteriormente o nome «mesão» foi dado a partículas subatômicas instáveis, compostas por um quark e um antiquark, mas esse conhecimento ainda pertencia a um futuro distante.
- ²¹ Lyle, entrevista a Anderson.
- ²² Ruth Lewin Sime, «Marietta Blau: Pioneer of photographic nuclear emulsions», *Physics in Perspective*, vol. 15, pp. 3-32. <https://doi.org/10.1007/s00016-012-0097-6>.
- ²³ Ver <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1950/summary/> <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1950/summary/>.
- ²⁴ Rajinder Singh e Suprakash C. Roy, *A Jewel Unearthed: Bibha Chowdhuri*, Düren, Shaker Verlag, 2018.
- ²⁵ C.M.G. Lattes *et al.*, «Processes involving charged mesons», *Nature*, vol. 159, 1947. <https://doi.org/10.1038/159694a0>.
- ²⁶ Singh e Roy, *A Jewel Unearthed*, p. 11. Contudo, é curioso verificar que a palestra Nobel de Powell não contém uma única referência quer ao trabalho de Blau, quer ao de Chowdhuri.
- ²⁷ Sime, «Marietta Blau».
- ²⁸ M. W. Rossiter, «The Matthew Matilda effect», *Social Studies in Science*, vol. 23(2); 1993: <https://doi.org/10.1177/030631293023002004>.
- ²⁹ Os muões decaem em elétrons e neutrinos. Ver Capítulo 9.
- ³⁰ Ver <http://www.scanpyramids.org/index-en.html> e o artigo sobre a descoberta, K. Morishima *et al.*, «Discovery of a big void in Khufu's Pyramid by observation of cosmic-ray muons», *Nature*, vol. 552, 2017, pp. 386-90. <https://doi.org/10.1038/nature24647>.
- ³¹ Se quiser propor uma nova maneira de utilização desta técnica, pode contribuir para financiar uma nova indústria através da parceria «Muographix», que faz um convite expresso aos empreendedores que queiram aceder à tecnologia de deteção.

CAPÍTULO 5

Os Primeiros Aceleradores de Partículas: Partindo do Átomo

Charles Bennett comprara o violino por 80 dólares numa feira em Rochester, Nova Iorque. Quando olhou para dentro do orifício em forma de «f», laboriosamente talhado no tampo superior, viu uma etiqueta amarela inconfundível onde se lia Stradivarius. Como esta, são muitas as histórias de achados notáveis em feiras: antiguidades baratas que afinal valem centenas de milhares de dólares. Curiosamente, Bennett não pensou em mandar fazer uma avaliação profissional do violino. Talvez porque todos os especialistas qualificados se encontravam na Europa e o processo fosse demasiado dispendioso para a bolsa modesta de um estudante de pós-graduação em 1977. Porém, Bennett depressa compreendeu que, para descobrir o verdadeiro valor do violino, teria de o destruir. E ficou num impasse. Podia não ser um *virtuose*, mas não estava disposto a inutilizar o instrumento. Regressou ao seu doutoramento em física.

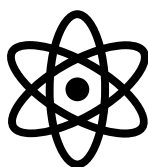
Para saber se era um Stradivarius genuíno, teria de verificar a idade do instrumento, e Bennett conhecia os raios cósmicos e a técnica de datação pelo carbono devido à sua formação em física. Stradivari costumava utilizar uma combinação de espruce, salgueiro e ácer. Se Bennett partisse do pressuposto de que as árvores

havam sido cortadas pouco antes da construção do instrumento, poderia recorrer à datação pelo carbono para comparar a quantidade de carbono-12 estável com a de carbono-14 radioativo remanescente na madeira, e verificar se o violino era de facto uma preciosidade do início do século XVIII. Quando discutiu o caso com o seu orientador, Harry Gove, na Universidade Rochester, os dois calcularam que para cada milhão de milhões (10^{12}) de átomos de carbono-12 haveria apenas um átomo de carbono-14. Uma amostra contendo um grama de carbono apenas decairia, acompanhada pela emissão de um eletrão, aproximadamente a cada cinco segundos. Pensaram em extrair pequenas lascas do violino, preservando o instrumento, para tentarem fazer uma medição, mas a taxa de contagem seria demasiado baixa. Para que o método funcionasse, precisavam de cortar um grande pedaço de madeira.

Poucas semanas depois, alguns colegas — que ignoravam o enigma do violino — vieram visitar Gove e pretendiam utilizar o seu laboratório de física nuclear para uma experiência de medição da quantidade de carbono-14 numa pequena amostra. Os dois colegas — Albert Litherland e Ken Purser — tinham trabalhado com Gove em experiências de física nuclear no início da carreira. Embora de maneira independente, ambos haviam tido a ideia de utilizar um acelerador na datação pelo carbono. Um mês antes, uma conversa com Gove durante uma conferência desencadeara a visita: Gove dispunha do equipamento experimental e do saber necessário a uma boa exploração das ideias deles. O acelerador de partículas da Universidade Rochester, junto ao qual todos os aparelhos pareciam minúsculos, conseguia extrair pequenas amostras de material e criar feixes com os átomos constituintes. Gove nunca tentara

separar os diferentes isótopos de carbono, mas percebeu que, se a experiência proposta fosse bem-sucedida, poderia abrir um caminho para datar o violino sem o destruir. Gove concordou com a experiência na condição de que Bennett integrasse a equipa.

Para ficarmos a saber se Bennett ficou rico, precisamos de compreender de que modo funcionava o acelerador de partículas em causa. Até aqui, todas as experiências que vimos foram realizadas com equipamento bastante simples e com substâncias radioativas existentes na natureza. Neste capítulo, começaremos a entender a razão da necessidade de um equipamento mastodôntico para conhecer os componentes mais pequenos da natureza. Em meados dos anos 1970, quando Bennett e Gove se confrontaram com o dilema do violino, estas máquinas eram os equipamentos de eleição dos físicos nucleares havia décadas, sendo utilizados em numerosas áreas da ciência e da indústria de maneiras completamente inesperadas. Porém, isso aconteceria muitos anos depois de terem sido inventadas. Regressando ao Laboratório Cavendish de Cambridge nos anos 1920, a viagem até aos aceleradores de partículas começou com uma das questões mais importantes sobre a natureza da matéria: o que há no interior do núcleo atómico?



Rutherford herdara a direção do Cavendish de J.J. Thomson em 1919 e, desde então, o sentimento geral no laboratório era o de

que a experimentação seguia a rotina habitual. Dissimulada, porém, havia uma corrente de frustração. Já em 1911, Rutherford descrevera a existência do núcleo e dedicara-se ao estudo do novo cerne da matéria, esperando obter resultados rápidos. Rutherford estava bastante acostumado a ver o seu nome nas parangonas da imprensa à medida que as suas proezas se sucediam. Mas agora havia quase uma década que não fazia uma grande descoberta.

A experiência de Geiger e Marsden, que descobrira o núcleo atômico, transformou Rutherford no especialista mundial no tema do átomo. No início dos anos 1920, Rutherford podia juntar o seu conhecimento ao dos químicos, que tinham identificado 90 tipos diferentes de átomos, com alguma dificuldade, baseados nas respectivas massas. Ao longo do tempo, ficou a saber-se que os valores das massas atômicas de todos os elementos pareciam ser múltiplos diretos da massa do elemento mais leve, o hidrogénio. O hélio era quatro vezes mais pesado do que o hidrogénio, o lítio, seis, o carbono, 12, e o oxigénio, 16. Isto não podia ser uma mera coincidência. Além disso, toda essa massa não provinha dos eletrões, que eram minúsculos e leves. O núcleo era, por certo, a chave para o entendimento da verdadeira natureza da matéria. O padrão das massas sugeria que o próprio núcleo seria formado por componentes.

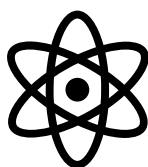
A única coisa de que Rutherford tinha a certeza era que havia protões dentro do núcleo. Durante a Primeira Guerra Mundial, realizara uma experiência na qual disparara partículas alfa contra nitrogénio gasoso e obtivera núcleos de hidrogénio. Em 1917 conseguira mostrar que todos os átomos pareciam conter núcleos

de hidrogénio — partículas com carga positiva, hoje conhecidas por *protões*. O problema estava em que o núcleo atómico para os elementos mais pesados do que o hidrogénio não podia ser composto *apenas* por protões. Estes, com a sua carga positiva, iriam repelir-se mutuamente, pelo que a pergunta era: o que impede que o núcleo se desintegre perante tamanha força «repulsiva»? Era possível, pensou Rutherford, que uma partícula neutra pudesse de algum modo garantir a coesão do núcleo. Em resultado, um átomo como o de hélio, com o quádruplo da massa do hidrogénio mas uma carga eléctrica máxima de dois (depois de expulsar os seus dois eletrões), não poderia conter quatro protões, tal como ele supunha. Apenas poderia conter dois protões e duas outras partículas desconhecidas, com a mesma massa do protão, mas sem carga eléctrica. Chamaram-lhe neutrão. Rutherford e a sua equipa procuraram o neutrão, mas os anos passaram sem que eles o encontrassem.

Imagine-se como se sentiria um ego do tamanho do de Rutherford neste momento. Ele era um camponês da Nova Zelândia que conquistara o prémio Nobel em 1908, fora armado cavaleiro em 1914 e era agora diretor do laboratório de física mais proeminente do mundo. Era quase uma questão de orgulho ser ele a responder à próxima grande pergunta. Naquela altura, os raios cósmicos tinham sido descobertos, ao contrário do muão e do positrão. Rutherford estava totalmente concentrado no núcleo atómico e sentia que havia apenas uma forma de progredir: era preciso abrir o núcleo e descobrir o que ele continha. Não chegava extrair protões. Era preciso desintegrá-lo por completo.

Os utensílios ao dispor de Rutherford eram os mesmos de sempre: uma fonte de partículas alfa, um alvo e um ecrã fosforescente. As partículas eram emitidas por uma fonte de rádio ou polónio, encerrada num tubo de metal com uma fenda na extremidade que o tornava uma espécie de pistola de partículas alfa. Embora isso permitisse controlar a direção das partículas, a maior parte delas colidia com as paredes do tubo e perdia-se, deixando poucas para trabalhar.

Contudo, os diligentes estudantes e investigadores do Cavendish continuavam a desenvolver uma série incansável de experiências, na esperança de que o núcleo desvendasse os seus segredos. Fizeram as partículas alfa atravessar diversos gases, dispararam-nas contra folhas e chapas metálicas e bombardearam com elas praticamente tudo aquilo a que deitaram a mão, na expectativa de observarem uma reação. Alguns elementos leves exibiam o mesmo resultado que o nitrogénio — libertando alguns prótons —, mas os elementos mais pesados não produziam resultados. Não se encontrou nenhum neutrão, e nada de surpreendente ou espetacular emergiu. O núcleo permanecia um enigma.



Os investigadores do Cavendish defrontavam-se com uma quantidade insuficiente de partículas alfa. Não havia maneira de controlar os parâmetros experimentais, visto que as partículas alfa resultavam sempre do decaimento radioativo da fonte com a

mesma energia, e ainda não tinham compreendido como produzir partículas, além das que emergiam naturalmente. Para complicar o caso, as fontes de partículas alfa, como o rádio, eram fracas, e mais fracas se tornavam à medida que decaíam com o tempo. Algumas preparações decaíam ao fim de apenas meia hora. Não pareciam ferramentas adequadas ao estudo do núcleo do átomo.

A única coisa que conseguiam controlar era o erro das suas experiências. Para garantir que tiravam o máximo partido das partículas instáveis, o grupo formulou um método intrincado para realizar observações fiáveis. Uma experiência padrão exigia três investigadores. Dois deles sentavam-se numa sala escura e esperavam que os seus olhos se habituassem às trevas. A terceira pessoa acabava de preparar a montagem, fechava as persianas e as cortinas quando tudo estava pronto e dava início à experiência. Os dois investigadores revezavam-se na observação através de um microscópio virado para o ecrã fosforescente: cada um deles observava durante cerca de um minuto de cada vez e registava os clarões numa bobina de papel. Ao fim de uma hora deste movimento de vaivém, o olhar ficava cansado e a equipa era rendida. Tratava-se de um trabalho árduo, mas necessário, seguindo uma variante mais evoluída da técnica que Marsden e Geiger tinham utilizado muitos anos antes.

Todos os novos estudantes de investigação no Cavendish eram formados e testados na contagem de partículas assim que chegavam, sob a orientação de James Chadwick, o meticuloso colega de longa data de Rutherford. Além de conduzir uma investigação própria, à qual regressaremos mais adiante, Chadwick

supervisionava os estudantes no «laboratório de formação». Quando estavam preparados, tinham uma conversa com Rutherford, que lhes recomendava um projeto de investigação.

Os estudantes construía as suas experiências do nada. A simples obtenção de peças para experiências nos armazéns do Cavendish era um desafio, ou seja, tinham de ser expeditos e determinados. O gerente da oficina, chamado Lincoln, controlava com rigor os recursos do laboratório. Media os pedaços de arame em vez de entregar um rolo inteiro, e contava, um a um, porcas e parafusos. A lenda diz que um estudante que precisava de um pedaço de tubo de aço recebeu uma serra e foi encaminhado para as bicicletas no pátio. Na realidade, o miserabilismo vinha de cima, do próprio Rutherford, que preferia impressionar toda a gente com uma experiência barata, mas engenhosa, do que passar o tempo a justificar gastos ou a pedir dinheiro.

Apesar de todo o engenho, métodos cuidadosos e resiliência, a pesquisa continuava infrutífera. Uma solução passava pela aquisição de mais rádio pelo Cavendish. Mas este material precioso escasseava e a sovínice de Rutherford vetou a ideia. A equipa sabia que os seus concorrentes tinham a vantagem de dispor de muito mais rádio para trabalhar. Marie Curie recebera a enorme doação de um grama de rádio das mulheres dos Estados Unidos em tributo à sua digressão pelo país, e a sua filha, a física Irène Curie, em conjunto com Frédéric Joliot, desenvolvia um trabalho intenso com ele em Paris. Muitos outros laboratórios na Europa procuravam também tomar a dianteira, mas a equipa de Cambridge continuava a liderar graças ao seu trabalho árduo. E assim foi até 1924, quando

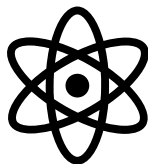
o seu estatuto como principal laboratório do mundo começou a ser questionado.

Um grupo de investigação em Viena pôs a circular um artigo que parecia mostrar a facilidade de desintegrar os átomos. Tentavam reproduzir de forma exata as mesmas experiências que a equipa do Cavendish, mas obtinham resultados espantosamente diferentes. Em Cambridge, o moral desceu a pique. Sob a orientação de Chadwick, todos os estudantes-contadores voltaram a receber formação e foram de novo testados antes de começarem a tentar replicar os resultados da equipa vienense. Mas o facto é que não o conseguiram. Havia um desacordo respeitoso, mas firme, entre os dois grupos e, por fim, Chadwick viajou para Viena para perceber onde estava o problema.

Em Viena, os investigadores contrataram mulheres especificamente para a tarefa da contagem, mas, ao contrário de Cambridge, instruía brevemente as pessoas sobre o que deviam procurar antes de a experiência começar. E, pasme-se, elas encontravam-no. Quando repetiram as experiências sem esta intervenção, o grupo de Viena fracassou na replicação dos resultados anteriores, e os seus dados ficavam alinhados com os resultados de Cambridge.

Após este episódio, Rutherford e Chadwick tiveram de reconhecer um facto que lentamente se tornava evidente: dependerem de fontes débeis de partículas alfa travava o progresso científico. Eles sabiam que havia descobertas pela frente. Para lá chegarem, as experiências precisavam de uma mudança radical.

Necessitavam de um método de produzir prótons, partículas alfa e outras à discrição, com energias variáveis. Mas esse método ainda não existia. Teriam de ser eles a inventar essa tecnologia.



Ernest Walton concluíra a sua formação, e chegara a altura de assumir um projeto de investigação próprio. Walton, filho de um clérigo, era um físico irlandês de 24 anos recém-chegado a Cambridge para se doutorar, ao abrigo do mesmo programa de bolsas¹ que permitira a Rutherford mudar-se da Nova Zelândia para o Reino Unido. Walton era excelente a matemática e a física e obtivera notas máximas em ambas as disciplinas em Dublin. Como também gostava de construir objetos, a física experimental parecia ideal para ele. Encheu-se de coragem e apresentou a sua ideia a Rutherford: queria construir uma máquina que acelerasse partículas com carga elétrica.

Mal sabia Walton que, dois dias antes, Rutherford estivera em Londres e proferira um discurso apaixonado na Royal Society, da qual fora eleito presidente. Perante uma audiência ilustre, anunciou o desígnio mais importante e urgente da ciência naquele ano de 1927. Queria descobrir uma forma de criar «uma fonte abundante de átomos e eletrões que tivessem, individualmente, uma energia muito superior à das partículas alfa e beta»². Se tal pudesse ser alcançado, um feixe de corrente com apenas um miliampere produziria mais partículas do que cem quilogramas de rádio, o que

era uma quantidade astronómica. Do que precisava era de uma maneira de extrair partículas fundamentais e de as projetar com energia elevada contra um átomo. O que ele queria era exatamente o que Walton lhe sugerira: um *acelerador de partículas*. Impressionado pela coragem do jovem irlandês, Rutherford assentiu e conduziu-o logo a um laboratório onde podia encontrar algum espaço para trabalhar.

O laboratório que escolhera era um espaço numa cave, com paredes de tijolo e teto alto. Continha três bancadas e albergava já outros dois investigadores, Thomas Allibone e John Cockcroft. Allibone, ou «Bones», fizera recentemente uma proposta semelhante a Rutherford e procurava utilizar bobinas de Tesla de alta tensão para acelerar eletrões a velocidades elevadas. Rutherford deve ter pensado que um pouco de competição amigável ajudaria os jovens investigadores.

O outro investigador era John Cockcroft que, aos 30 anos, era um pouco mais velho do que os outros, porque seguira um caminho mais sinuoso até ao Laboratório Cavendish. Cockcroft era conhecido pela sua capacidade de trabalho e os colegas costumavam comentar a forma como geria confortavelmente o esforço resultante de dois empregos e meio a tempo inteiro. Enquanto desenvolvia investigação própria, dava uma ajuda nas experiências complexas no laboratório vizinho de Peter Kapitza, que tentava criar campos magnéticos extremamente poderosos. Dividido entre tarefas diferentes, rabiscava lembretes para si próprio numa pequena agenda de capa preta, numa caligrafia minúscula e ilegível. Diziam os seus colegas que tudo o que escrevia ali «era para ser tratado

sem demora»³. Ele conhecia o desafio de construir um dispositivo de alta tensão para acelerar partículas, mas, após ouvir o discurso de Rutherford, aquela ideia ficou firmemente alojada na sua mente e na sua agenda. Sabia que havia duas barreiras enormes a ultrapassar: uma teórica e outra experimental.

Cockcroft estava numa posição única para resolver um problema que colocava desafios, quer teóricos quer práticos. Depois de a Primeira Guerra Mundial lhe ter interrompido os estudos de matemática, estagiou numa firma de engenharia eletrotécnica de Manchester chamada Metropolitan Vickers, ou Metrovick, que produzia equipamento industrial como geradores, turbinas, transformadores e sistemas eletrónicos. Apenas depois desta experiência em engenharia é que Cockcroft ingressou na Universidade de Cambridge, onde consolidou a sua formação em matemática e física, da qual emergiu como físico experimentalista e como teórico respeitado.

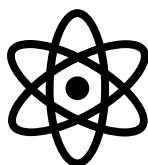
O principal problema teórico que enfrentavam era o modo de disparar partículas alfa ou prótons contra o núcleo atómico, já que estes projéteis com carga positiva seriam repelidos pelo núcleo atómico, também positivamente carregado. A esta repulsão dá-se o nome de *barreira de Coulomb*. Cockcroft teve de começar por calcular a energia necessária às partículas alfa para vencer esta barreira e penetrar no núcleo. O seu trabalho teórico dizia-lhe que esse valor equivalia à tensão requerida para acelerar as partículas alfa com energia suficiente. Efetuou o cálculo, mas o resultado deixou-o desanimado. Precisavam de um valor da ordem de dez milhões de volts.

Se alguma vez esteve perto de uma torre de transmissão de 300 kV (quilovolts) que transporta eletricidade a longas distâncias e ouviu estalidos e crepitações ocasionais, terá concluído que é bastante perigoso trabalhar com este tipo de tensão elevada. Assim é. E era ainda mais perigoso em 1927. Hoje, estamos relativamente familiarizados com a eletricidade porque a utilizamos em permanência, mas naquele período era ainda uma novidade, e nunca se ouvira falar de usar tensões tão elevadas num laboratório. O risco de um aparelho de laboratório que funcionava com milhões de volts produzir uma descarga e eletrocutar Cockcroft e Walton — ou, mais provavelmente, Rutherford, que costumava aparecer sem aviso — era considerável. Além disso, todas as peças do acelerador teriam de suportar aquela tensão extraordinária sem se partirem, incendiarem ou até explodirem.

Enquanto Cockcroft matutava no problema, havia físicos nos Estados Unidos que já tinham abraçado o desafio de gerar tensões elevadas. Merle Tuve procurava usar uma bobina de Tesla, tal como Allibone. Robert van de Graaff trabalhava num sistema de transferência de cargas com uma faixa transportadora e uma grande cúpula metálica. Em simultâneo, havia outras tentativas — tensões pulsadas elevadas, descargas de condensadores e transformadores enormes —, todas elas visando fornecer energia aos feixes de partículas. Na Europa, alguns investigadores alemães não se importavam de arriscar a vida, escalando montanhas e procurando aprisionar a energia dos relâmpagos.

Entretanto, em Cambridge, Walton e Allibone continuavam os seus esforços de aceleração de partículas. Walton experimentou

com protótipos de um pequeno acelerador circular e também com uma versão linear, mas sem êxito em qualquer deles. Porém, antes que conseguissem perceber de facto como proceder, um físico teórico russo chamado George Gamow chegou a Cambridge e tudo mudou.



Gamow estivera pouco antes em Göttingen, na Alemanha, onde ficara a conhecer as novas ideias da mecânica quântica que queria explorar no seu doutoramento. Enquanto todos os outros estudavam a distribuição dos eletrões nos átomos, Gamow resolveu aplicar a mecânica quântica ao núcleo atómico. Durante as suas leituras sobre o tema, descobriu um novo artigo de Rutherford, que descrevia a dispersão das partículas alfa por um alvo composto por urânio⁴. Rutherford afirmava que a dispersão das partículas alfa acontecia de acordo com as suas equações, mas Gamow não ficou convencido. Ele sabia que, no decaimento radioativo, o urânio emitia partículas alfa, cuja energia era cerca de metade da que Rutherford utilizara para o bombardear.

Embora Gamow não soubesse grande coisa acerca da força misteriosa que mantinha a coesão do núcleo, percebia que ela devia atuar da mesma maneira, quer quando a partícula alfa entrava no núcleo, quer quando saía dele. De acordo com a experiência de Rutherford, para entrar no núcleo, a partícula alfa ultrapassava a barreira de Coulomb e acabava aprisionada no núcleo. No

decaimento radioativo, a partícula alfa precisava de escapar primeiro à força que a prendia ao núcleo, antes de a força de Coulomb prevalecer e a repelir para longe. Em ambos os casos, os processos deviam ser iguais, só que aconteciam pela ordem inversa. Então, como era possível que aquelas partículas alfa dentro do núcleo «fizessem batota» e escapassem com apenas metade da energia necessária?

Quando acabou de ler a publicação, Gamow recordou que «sabia o que acontecia realmente neste caso. Era um fenómeno característico que seria impossível na mecânica clássica newtoniana, mas expectável de facto na nova mecânica ondulatória»⁵. Na mecânica quântica ondulatória, como vimos no Capítulo 3, cada partícula tem uma natureza ondulatória que se pode propagar no espaço. Isto significa que nenhuma barreira é 100 por cento sólida: as ondas conseguem penetrar em regiões que, na visão clássica, lhes são completamente inacessíveis. Segundo Gamow: «Se a onda conseguir passar, mesmo que com certa dificuldade, leva sempre alguma partícula com ela.»⁶ Trata-se daquilo a que hoje chamamos *efeito túnel quântico*. Depois de ler o artigo de Rutherford, Gamow formulou rapidamente um modelo simples para descrever a probabilidade de isto acontecer com o urânio e descobriu que a sua teoria explicava na perfeição a meia-vida radioativa deste elemento. E, sem mais, esclareceu o modo como as partículas alfa escapam do núcleo durante o decaimento radioativo. Ele sabia que estava à beira de uma descoberta.

Gamow deslocou-se então ao Instituto Niels Bohr, onde realizou cálculos adicionais para perceber se a ideia também funcionaria no

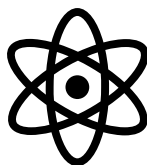
sentido inverso, quando se pretendia bombardear elementos com projéteis artificialmente acelerados. Niels Bohr incitou-o a visitar Cambridge, mas, conhecendo a tendência de Rutherford para ignorar os teóricos, planejaram fazer uso de alguma bajulação. No início de 1929, Gamow chegou a Cambridge e trazia uma prenda: dois gráficos desenhados à mão, relativos às experiências de Rutherford com o bombardeamento de núcleos leves por partículas alfa. O primeiro mostrava que, aumentando a energia das partículas alfa, o número de prótons extraídos dos elementos leves crescia com rapidez, um pensamento desesperante para a equipa que continuava a contar os clareões na escuridão. O segundo revelava que, para uma partícula alfa com determinada energia, extraíam-se menos prótons quando os núcleos eram mais leves. Ambas as teorias de Gamow pareciam ajustar-se na perfeição aos dados experimentais. A estratégia resultou e Gamow foi bem recebido no Cavendish.

De acordo com as memórias de Gamow, quando chegou a Cambridge e mostrou o seu trabalho a Rutherford, foi posto a calcular a energia necessária a que os prótons penetrassem no núcleo de elementos leves⁷. Com um argumento muito simples, Gamow disse que seria cerca de $1/16$ da energia das partículas alfa que considerara anteriormente. «É assim tão simples?», perguntou Rutherford. «Pensei que iria cobrir montes de folhas com as suas malditas fórmulas.»

Antes da sua visita, o esboço de um artigo de Gamow chegara às mãos de John Cockcroft, que efetuou cálculos semelhantes. Os seus resultados deram-lhe energias em eletrões-volt (ou eV), que

é a quantidade de energia que uma partícula⁸ adquire ao atravessar uma diferença de potencial de um volt. Até então ele pensava que os prótons tinham de atingir um milhão de eletrões-volt (MeV), o que exigia um acelerador de partículas com um milhão de volts. Agora concluía que havia uma pequena probabilidade de um próton com energia inferior a 1 MeV conseguir penetrar no núcleo. Na realidade, a energia necessária podia ser mais baixa, da ordem dos 300 keV (quiloelétrões-volt). Cockcroft já se tinha apercebido das consequências desta ideia: se os prótons pudessem, graças ao efeito túnel quântico, atravessar a barreira de Coulomb, então talvez conseguissem penetrar no núcleo atómico com a ajuda de um acelerador de partículas mais pequeno do que pensavam. Os relatos discordam sobre se foi Cockcroft ou Gamow o primeiro a mostrar a Rutherford esta possibilidade, mas o importante é que ambos chegaram ao mesmo resultado⁹, e os dois estavam no mesmo laboratório quando isso aconteceu.

Rutherford estava decidido. Pela primeira vez desde sempre, tomaria uma decisão crucial baseado exclusivamente numa previsão teórica, porque sabia que, se não agisse de imediato, a concorrência se adiantaria. Chamou Cockcroft e gritou: «Constrói-me um acelerador de um milhão de eletrões-volt; vamos conseguir cindir o núcleo do lítio sem problemas!»



Agora que Cockcroft precisava apenas de um décimo da tensão que inicialmente julgara necessária, o projeto parecia mais exequível, e ele empenhou-se em obter 300.000 volts. Esta era a tensão mínima, de acordo com os seus cálculos, à qual algo de notável poderia acontecer. Porém, como todo o seu tempo estava preenchido com a organização do laboratório vizinho onde se estudava um campo magnético elevado, ele e Rutherford perceberam que precisavam de um parceiro que pudesse desenvolver as experiências e estivesse interessado em acelerar partículas. E encontraram um cúmplice adequado em Ernest Walton.

Em conjunto, Cockcroft e Walton queriam construir o maior dispositivo experimental de todo o Cavendish. Mesmo com a nova tensão de 300 kV, seria um monstro complexo e dispendioso. Também reconheciam que havia outros desafios a enfrentar, além da tensão elevada, para que o acelerador funcionasse. Primeiro, precisavam de uma fonte de partículas. Isso era bastante fácil para os elétrons, mas obter uma corrente estável de prótons, partículas alfa ou outras era muito mais difícil. Precisavam que essas partículas vencessem uma grande diferença de potencial e adquirissem uma energia elevada. Depois, tinham de perceber como controlar o feixe e operar o aparelho a uma distância segura, visto que envolvia radiação. Assim que obtivessem partículas com energia elevada, precisavam de as disparar contra algum tipo de alvo e, por fim, precisavam de um sistema detetor para conseguir ver o que se passava na reação.

Pelo menos havia um aspeto que os não preocupava. O laboratório estava cheio de especialistas mundiais na contagem de cintilações e surgiam continuamente novas ideias para a fase de deteção, entre as quais a câmara de nevoeiro de Wilson. Porém, a situação complicava-se quando se tratava de criar uma fonte de prótons, gerar tensões elevadas sem destruir o dispositivo e conseguir controlar tudo de maneira eficaz.

Utilizar equipamento de vanguarda, concebido para suportar tensões elevadas, num laboratório universitário mal preparado era uma perspetiva que teria intimidado muitos físicos, mas John Cockcroft estava decidido a fazer funcionar o acelerador. Ciente de que não podiam produzir internamente tudo o que precisavam, recorreu aos seus ex-colegas na Metrovick, um dos líderes mundiais na criação de equipamento gerador de tensão elevada. O seu primeiro pedido foi uma fonte de energia para a experiência, um motor-gerador, que Cockcroft adquiriu por bom preço. A seguir, precisavam de um transformador para elevar a tensão para 300.000 volts, mas, quando Cockcroft fez esse pedido, surgiram problemas. Os transformadores existentes na Metrovick, utilizados para tubos de raios X de alta energia ou verificações elétricas, eram demasiado grandes para conseguirem passar pelo estreito arco de pedra da entrada do Laboratório Cavendish. Como se imagina, Cockcroft pediu à Metrovick que inventasse um transformador que conseguisse passar a porta do laboratório.

A próxima etapa era converter a corrente alternada de tensão elevada do transformador numa fonte de corrente contínua. A corrente alternada, aquela que obtemos das tomadas das nossas

casas, oscila entre valores positivos e negativos cerca de 50 vezes por segundo, mas Cockcroft sabia que isto não servia para acelerar partículas, porque a parte negativa da onda da corrente alternada iria *desacelerar* as partículas, em vez de as acelerar. Precisava sim de corrente contínua, que criasse uma tensão capaz de impulsionar permanentemente os prótons pelo tubo adentro. Isto implicava acrescentar um dispositivo chamado *retificador* a seguir ao transformador, mas não havia retificadores disponíveis no comércio que conseguissem resistir aos 300.000 volts que eles queriam utilizar. Cockcroft sabia que se tratava de um obstáculo sério, porque era inevitável que precisassem de usar tensões mais elevadas no futuro. Enquanto a Metrovick continuava a trabalhar no novo transformador, Cockcroft e Walton dedicaram-se a inventar um retificador.

Cockcroft era o mestre da logística, mas, na realidade, Walton desenvolveu a maior parte do trabalho experimental. Um dos desafios que enfrentavam respeitava às ampolas de vidro que integravam o retificador. Walton encomendava essas ampolas ao soprador de vidro do Cavendish, Felix Niedergesass, e a seguir sujeitava-as a uma tensão elevada usando a bobina de Tesla de Allibone, amiúde com efeitos desastrosos. Os campos elétricos concentravam-se em todas as irregularidades, fossem elas causadas por pó ou por alguma imperfeição do vidro, e o «efeito coroa»¹⁰ gerava faíscas na superfície e abria orifícios. Obter ampolas do formato certo consumia meses de esforços e por fim os formatos cresceram tanto que o laboratório de Niedergesass já não tinha como produzi-los e foi preciso encomendá-los a uma fábrica especializada.

Além das ampolas de vidro, precisavam de cabos especializados para o ânodo e o cátodo, uma fonte de aquecimento para o cátodo, escudos antiefeito coroa para ajudar a prevenir as faíscas e bombas de vácuo fiáveis. Tal como muitos dos investigadores do Cavendish, usaram o lacre vermelho do Banco de Inglaterra para vedar todas as junções e extremidades. A resistência dos componentes à tensão elevada tinha de ser verificada. Mês após mês, Walton introduzia melhoramentos. Tinha de trabalhar depressa, mas também não podia precipitar-se, porque estavam em causa tensões altas perigosas. De cada vez que era necessária uma alteração, ele tinha de quebrar todos os lacres, limpar, aquecer e lacrar de novo, antes de realizar novo teste. À medida que avançavam, tinha de passar dias à procura de fugas no vácuo e a vedá-las.

Rutherford aparecia de vez em quando nas suas voltas para ver como iam as coisas. Assistia à chegada dos grandes equipamentos dos fornecedores industriais e queixava-se, no seu estilo habitual, de que as máquinas eram demasiado volumosas ou demasiado caras, o que levava os físicos da Metrovick a dizer que ele parecia «olhar para tudo do lado errado de um telescópio, porque tudo era demasiado grande para ele!». Em 1930, a Metrovick tinha cumprido a sua promessa de construir um novo transformador compacto que pudesse cruzar a porta do Cavendish e descer as escadas até à cave. Mesmo assim, o pavimento do laboratório teve de ser reforçado para não ceder. A empresa entregou também um novo sistema de vácuo, após um dos seus cientistas, Bill Burch, ter inventado uma bomba baseada num novo tipo de óleo por ele desenvolvido (Apeizon). Cockcroft teve acesso a alguns protótipos desse sistema antes de qualquer outra pessoa.

Apesar de todo o progresso, ainda precisavam de construir a fonte de prótons ou o tubo de aceleração pelo qual as partículas se deslocariam. Quanto à fonte de prótons, testaram uma série de dispositivos diferentes e acabaram por escolher um parente do tubo de raios catódicos, chamado *tubo de raios canais* ou *tubo de raios anódicos*. Este dispositivo é semelhante a um tubo de raios catódicos: um longo cilindro de vidro cheio de hidrogénio gasoso e com uma tensão elevada aplicada entre o ânodo (num extremo) e o cátodo (agora no meio do tubo). Os prótons são criados pelo campo elétrico que desintegra o hidrogénio gasoso no tubo e são atraídos pelo cátodo negativo, que é perfurado para que os eletrões o possam atravessar. Por fim, os eletrões emergem no outro lado, no sentido oposto dos eletrões (raios catódicos), gerando ao mesmo tempo uma bonita fluorescência no tubo.

Este tubo delicado foi montado no cimo do dispositivo, de modo que os prótons pudessem deslocar-se para baixo e para dentro da principal secção de aceleração, um tubo de vácuo em vidro com 1,5 metros de comprimento. Dentro do tubo, a tensão elevada estava ligada a dois elétrodos cilíndricos de metal, com um intervalo entre si. Os prótons seriam acelerados pela tensão alta ao atravessarem esse intervalo. Eis a gestação do primeiro acelerador de partículas do mundo.

Por fim, em maio de 1930 estavam prontos para um teste. Ao longo de uma semana, Cockcroft e Walton conseguiram lentamente elevar a tensão de 50.000 V para 100.000 V e, por fim, para 280.000 V, valor no qual houve sinais de que haviam atingido um limite. O feixe de prótons que emergiu, contudo, era menos do que

satisfatório. Desfocado por completo, dispersava-se num círculo com cerca de quatro centímetros de diâmetro. Um feixe tão largo não servia. Para resolver esse problema, teriam de desmontar todo o equipamento. Antes disso, porém, verificaram se estava a acontecer algo de interessante do ponto de vista científico. Para uma energia tão baixa não acreditavam que os prótons causassem grandes mudanças num núcleo. Mas talvez excitassem algumas partículas no interior e emitissem raios gama, pelo que instalaram um simples eletroscópio e colocaram uma amostra de lítio sob o feixe. Nada aconteceu. Com berílio? Um efeito minúsculo. Com chumbo? Talvez um pequeno efeito, mas que podia resultar de algum problema no aparelho. Antes que conseguissem ir mais longe, o transformador avariou-se.

Chegara a altura. Com o transformador fora de ação, precisavam de avaliar se valia a pena repará-lo de maneira a reconstruir a máquina de 300 kV. Dada a ausência de resultados até então, não tinham a certeza de que valesse a pena. E se os cálculos que tinham feito estivessem errados e 300 kV não fossem suficientes para cindir o núcleo? Pequenas mudanças dos números conduziam a resultados muito diferentes. Entretanto, Rutherford — agora Lorde Rutherford — mostrava-se impaciente com a ausência de resultados do acelerador experimental. Para que o chefe continuasse do lado deles, precisavam de demonstrar que o investimento naquela grande experiência valera a pena. Embora fosse mais rápido reconstruir a máquina de 300 kV do que construir uma versão nova e maior, tinham de reconhecer que a de 300 kV fora sempre a pretendida como primeira etapa. Por fim, as questões de espaço acabariam por resolver o impasse. Mudaram-se para uma outra sala

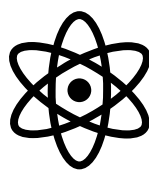
maior, banhada pela luz que entrava pelas janelas altas em arco ao longo de uma parede, enquanto a outra parede estava coberta de quadros negros. Conseguia acomodar facilmente uma máquina maior. Cockcroft e Walton resolveram que precisavam de ter a certeza de que obtinham resultados da próxima vez, por isso decidiram abandonar a máquina de 300 kV e concentrar todos os esforços na construção de uma nova máquina de 800 kV.

O novo *design*, criado por Cockcroft, acrescentava engenhosamente camadas de um circuito duplicador da tensão ao primeiro estágio retificador¹¹. Com quatro destas etapas, conseguiam elevar a tensão de entrada de 200 kV para 800 kV. No retificador e na secção de aceleração, substituíram os tubos em forma de ampola, tão difíceis de produzir, por cilindros de vidro mais fiáveis. Essa ideia surgiu quando viram o trabalho de Charles Lauritsen, um físico do Caltech, nos Estados Unidos. Descobriram também que, em vez de usarem lacre para isolar as junções, a plasticina era muito mais eficaz e mais rápida de aplicar se fosse necessário fazer algum ajuste. Tal como antes, Walton trabalhou incansavelmente na construção da nova máquina, enquanto de algum modo conseguia arranjar tempo para escrever a sua tese de doutoramento.

No princípio de 1932, quase quatro anos depois de Cockcroft e Walton começarem a trabalhar, o Cavendish assistiu a uma nova descoberta crucial. No entanto, não se deveu a eles, mas antes a James Chadwick. Havia anos que Chadwick realizava discretamente experiências, desde que soubera dos resultados de Irène Curie e Frédéric Joliot em Paris, os quais tinham disparado partículas alfa

de uma fonte de polônio contra um alvo de berílio e produzido raios gama com energia muitíssimo elevada. Sabia que as experiências do casal estavam corretas: eles eram excepcionalmente meticolosos nesse domínio. Porém, discordava da interpretação deles. Em poucas semanas, realizou uma nova série de experiências que demonstraram que o berílio bombardeado não emitia raios gama, mas sim uma partícula neutra que tinha sensivelmente a mesma massa que o próton. Por fim, após uma demanda de quase 12 anos, Chadwick descobrira o nêutron.

Perante este novo progresso, Rutherford estava a perder a paciência com o projeto do acelerador, que era extremamente caro e moroso. Diz a lenda que, quando Rutherford foi falar com eles, entrou no laboratório, pendurou a gabardina molhada num terminal de alta tensão e foi eletrocutado. Recuperado do choque, acendeu o cachimbo no meio de uma nuvem de cinzas e fumo e ordenou-lhes que se despachassem.



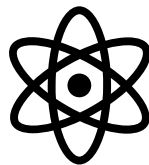
Na manhã de 14 de abril de 1932, Walton estava sozinho quando ligou a máquina, entretanto aperfeiçoada, para que aquecesse. Cockcroft tinha ido à procura de algum objeto noutra laboratório. Por insistência de Rutherford, tinham instalado o seu detetor preferido, um ecrã de sulfureto de zinco, em vez de um eletroscópio. Walton colocou um alvo de lítio na base do tubo do acelerador e estabilizou a máquina com uma tensão de cerca de

250.000 V. A seguir, ajustou os controlos para obter o feixe de protões. Desejoso de saber se alguma coisa se estava de facto a passar, rastejou da consola de controlo até ao acelerador, evitando os componentes de tensão elevada, e trepou para a cabina revestida a chumbo que tinham construído para realizar observações. Correu a cortina negra para impedir a entrada da luz do dia, ajustou o microscópio e olhou através dele.

Viu clarões brilhantes que apareciam em todo o ecrã. Walton não estivera muito tempo no «laboratório de formação», mas identificou de imediato o que via: partículas alfa. Tantas que nem conseguia contá-las. Saiu da cabina e desligou o feixe. As partículas desapareceram. Voltou a ligá-lo, e lá estavam elas. Mal conseguia acreditar nos seus olhos. Foi chamar Cockcroft, que repetiu rapidamente os testes. Os dois chamaram Rutherford, fizeram-no entrar na cabina minúscula, onde mal cabia, e mostraram-lhe o que tinham descoberto. Tratava-se, sem dúvida, de partículas alfa — e como fora ele quem as descobrira, conhecia-as melhor do que ninguém! Mais tarde, Chadwick concordou com eles. Sabiam o que acontecera, sem precisarem de trocar impressões: os protões penetravam no núcleo do lítio, com massa atómica 7, que se dividia em duas partículas alfa. Artificialmente, tinham causado uma desintegração nuclear pela primeira vez na história¹². Além disso, tinham-na alcançado com protões com cerca de 250 keV, muito menos do que 1 MeV ou até que os 10 MeV que julgavam necessários. A teoria quântica de Gamow estava certa.

Prometeram uns aos outros manter a descoberta em segredo até Cockcroft e Walton completarem as verificações necessárias e

escreverem um breve artigo para enviar à *Nature*. Enquanto o faziam, ao longo de uma semana na primavera de 1932, apenas quatro pessoas no mundo sabiam que acontecera uma quebra do átomo. Prosseguiram as experiências a um ritmo frenético, dispondo pilhas de folhas finas no trajeto das partículas alfa para confirmar que elas emergiam do núcleo a uma velocidade tremenda. Cada uma delas deslocava-se com 8 MeV de energia, o que podia parecer impossível, visto que os prótons colidiam com apenas algumas centenas de keV, mas a medição reforçou a confiança de que a conclusão era correta. A massa combinada do próton e do lítio antes da reação era pouco superior à massa das duas partículas alfa resultantes. Considerando esta diferença de massas e convertendo-a em energia usando a famosa equação de Einstein, $E = mc^2$, o resultado correspondia quase exatamente aos 8 MeV de energia.



Rutherford convidou Cockcroft e Walton para um encontro na Royal Society na quinta-feira, 28 de abril. A multidão reunira-se para comemorar a descoberta do neutrão por Chadwick, e Rutherford mencionou esta grande proeza no discurso de abertura. A seguir continuou no estrado. Após uma pausa teatral, anunciou que dois jovens presentes no auditório, John Cockcroft e Ernest Walton, tinham acelerado artificialmente partículas e conseguido cindir com êxito o núcleo do lítio e uma série de outros elementos

leves. Depois bastou-lhe erguer a mão e indicar os dois jovens para o público explodir num aplauso espontâneo.

No intervalo de dias, os jornais anunciaram: «A maior descoberta da ciência»¹³. As notícias espalharam-se depressa pelo mundo, com o cabeçalho do *The New York Times* a anunciar «O átomo revela os seus poderosos segredos». Cockcroft e Walton adaptaram-se com rapidez a uma nova vida a posar para as câmaras, ao lado de Rutherford ou do equipamento, e pareciam ligeiramente embaraçados quando um magote súbito de jornalistas aparecia à porta do laboratório para os entrevistar.

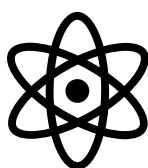
A concorrência foi apanhada de surpresa. Se tivessem sabido que conseguiam dividir um átomo de lítio com apenas 125.000 V¹⁴, a descoberta ter-lhes-ia pertencido. Os próprios Cockcroft e Walton poderiam ter sido bem-sucedidos dois anos antes, se tivessem usado um ecrã de sulfureto de zinco na experiência — para assim conseguirem ver com facilidade cada clarão das partículas alfa —, em vez de um eletroscópio. Quando, por fim, adotaram o ecrã, perceberam que era muito mais fácil trabalhar com ele do que com os movimentos quase abstratos das folhas do eletroscópio. O problema estava em não terem acreditado que a tensão baixa do seu primeiro acelerador fosse suficiente. No final de 1932, outros laboratórios em todo o mundo atarefavam-se a equipar vários dispositivos com a tensão suficiente para cindir os átomos. Nascera um novo domínio: a física nuclear.

Finalmente, Rutherford e a sua equipa tinham, não uma, mas duas novas e inovadoras descobertas quase em simultâneo. A

existência do neutrão foi confirmada, mas ainda mais empolgante era a capacidade de dividir artificialmente o núcleo de um átomo. Rutherford queria saber o que estava no interior do núcleo e obtivera uma resposta: prótons e nêutrons. A experiência confirmava a importância da mecânica quântica no núcleo e também que a equação de Einstein, $E = mc^2$, continuava válida quando se dividiam átomos. Lideravam de forma firme a corrida à descoberta do núcleo atômico e agora, pela primeira vez, Rutherford e a sua equipa tinham a possibilidade de decompor núcleos para melhor os estudar. Em vez de dependerem dos raios cósmicos, podiam controlar as experiências alterando o tipo, o número e a energia das partículas que aceleravam, de maneira a estudar o seu impacto em qualquer amostra que quisessem bombardear. Podiam «ligá-las» e «desligá-las» quando bem entendiam. O núcleo estava à sua disposição para ser explorado. A súbita aparição da capacidade de acelerar partículas de modo artificial fez crescer rapidamente a procura de aceleradores por parte de investigadores. As empresas aderiram de modo rápido à nova tecnologia, com frequência para utilização nos seus laboratórios de investigação. Na Europa, a Philips, nos Países Baixos, construiu retificadores e geradores de Cockcroft-Walton, o nome pelo qual o *design* ficou conhecido, e mais tarde até vendeu um aparelho ao Cavendish, quando expandiu o seu laboratório de altas tensões, em meados dos anos 1930. Os seus concorrentes nos Estados Unidos, incluindo Van de Graaff, também tiveram êxito comercial com os seus aceleradores de alta tensão. Pouco depois da grande descoberta, a Westinghouse começou a construir máquinas de alta tensão com o método de Van de Graaff e em 1937 construiu um acelerador de 5 MeV conhecido por Westinghouse

Atom Smasher («Esmagador Atômico Westinghouse»). Em meados da década de 1950, qualquer laboratório ou departamento universitário de física digno desse nome dispunha de um acelerador de partículas. Atualmente, um punhado de empresas continua a produzir este tipo de máquina e encontramos os seus produtos em laboratórios e institutos de investigação de todo o mundo.

Se alguma vez viu um destes aparelhos, nunca o esquecerá. No norte de Inglaterra encontramos o Cockcroft Institute, hoje especializado no *design* e na construção de novos aceleradores de partículas¹⁵. No vasto e intensamente iluminado átrio do instituto, os visitantes são surpreendidos pela visão de um enorme aparelho de metal. Quatro postes isoladores de cerâmica castanho-escuros, com superfícies estriadas, elevam-se, circundados a cerca de meia altura por anéis de metal em forma de dónute, enquanto tubos avermelhados de cobre ziguezagueiam entre eles. Toda a estrutura ascende ao teto do edifício de três pisos, culminando num enorme terminal metálico prateado em forma de bolbo. Este gerador de Cockcroft-Walton específico foi utilizado para fornecer protões a um grande sistema acelerador¹⁶ no Rutherford Appleton Laboratory, a sul de Oxford. Embora a primeira impressão causada por este gerador seja de grandiosidade, o aparelho não é assim tão antigo: prestou serviços fiáveis entre 1984 e 2005, data em que foi reformado e substituído por tecnologia mais moderna¹⁷.



Não era um acelerador de Cockcroft-Walton, mas um de Van de Graaff, que o físico nuclear Harry Gove tinha no seu laboratório na Universidade de Rochester quando Charles Bennett lhe pediu que o ajudasse a determinar a idade do violino, em 1977. Esta tarefa afigurava-se impossível, pelo menos até surgir a ideia de utilizar o acelerador para detetar vestígios minúsculos de carbono-14. Para a primeira experiência compraram sacos de carvão vegetal em lojas locais, carvão esse que representava o carbono atual (de árvores recém-cortadas). Introduziram-no na fonte iónica, o ponto de partida do acelerador, que vaporiza as amostras e utiliza uma tensão elevada para extrair os eletrões e criar um feixe de iões que podem ser acelerados mais adiante. Para comparação, foram buscar uma amostra de grafite, extraída de jazigos de petróleo com milhões de anos, onde o carbono-14 devia ser quase inexistente. Em 18 de maio de 1977, ensaiaram as duas amostras e descobriram que o carvão vegetal tinha mil vezes mais carbono-14 do que a grafite. Segundo Gove: «Foi um daqueles triunfos instantaneamente evidentes e que são tão raros em ciência.»¹⁸

Em vez de se limitar a esperar que o decaimento radioativo do carbono-14 acontecesse de modo espontâneo, o acelerador de partículas permitia-lhes extrair uma amostra minúscula e acelerar todos os átomos e isótopos nela presentes. Assim que atingiam uma velocidade elevada, a trajetória das partículas era encurvada com o auxílio de um magneto, e como a trajetória do carbono-14 é um pouco menos curva do que a do carbono-12, por ter massa superior, as quantidades relativas podiam ser contabilizadas de modo simples com um detetor. O acelerador de partículas proporcionava-lhes um controlo e uma precisão apurados, e permitia-lhes contornar as

limitações naturais da datação por radiocarbono. Depressa ficou claro que as aplicações potenciais eram vastas.

Meyer Rubin, um geoquímico que chefiou a unidade de datação por radiocarbono do US Geological Survey, viu o artigo e contatou de imediato Gove e a sua equipa. Rubin disse-lhes que tinha conservado pilhas de amostras geológicas demasiado pequenas para o método tradicional de datação por carbono, na expectativa de que alguém criasse uma maneira de as medir. Algumas semanas depois, encontrava-se em Rochester para trabalhar com a equipa de Gove e Bennett na medição de amostras da ordem do miligrama usando o novo acelerador.

Rubin estava entusiasmado com o potencial de medição de pequenas amostras, em particular nos âmbitos da geologia, climatologia, oceanografia e dendrocronologia (o estudo dos anéis de crescimento das árvores). Em conjunto, a equipa produziu uma série de avanços recorrendo à nova técnica: verificaram o método através da datação de amostras orgânicas com 48.000 anos e descobriram que os valores concordavam com as medições anteriores de Rubin, que havia utilizado amostras muito maiores. Em colaboração com os numerosos investigadores que os contataram, os membros do grupo de Rochester dataram meteoritos da Antártida, gelo, um mamute-lanoso e até amostras de ar antigo que continha, não miligramas, mas microgramas de carbono-14, sempre com êxito. Em 1978, Rubin apareceu com um pedaço de ligadura de uma múmia egípcia que se estimava tivesse 2050 anos, e em conjunto realizaram uma experiência que

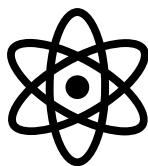
confirmou essa data. A seguir, receberam um pedido empolgante, mas controverso.

Por volta de 1979, a equipa foi contatada pela Sociedade Britânica do Sudário de Turim, que queria datar o artefato que terá envolvido o corpo de Jesus no túmulo. Esse projeto levou uma década a concretizar-se, tendo conduzido a uma famosa investigação em 1987. Pequenas amostras foram enviadas para um conjunto de laboratórios em todo o mundo que haviam adaptado ou instalado aceleradores de partículas para este objetivo específico, incluindo Rochester e o equipamento de datação por radiocarbono de Oxford. Gove e Rubin descobriram que o sudário era medieval (entre 1260 e 1390) com um grau de confiança de 95 por cento, ou seja, estava longe de ter dois mil anos. Todos os outros laboratórios confirmaram os resultados de Gove. Apesar dos resultados, o Sudário de Turim continua a ser venerado.

A técnica que emergiu, cuja invenção é parcialmente atribuída a Gove¹⁹, chama-se Espetrometria de Massa com Aceleradores, ou AMS (da sigla em inglês para Accelerator Mass Spectrometry). Hoje existem instalações em laboratórios que utilizam aceleradores de partículas específicos para esta técnica, não apenas nos Estados Unidos, mas também na Turquia, Roménia, Austrália, Japão, Rússia e China, para mencionar apenas alguns deles. Muitos dos países que possuem estas instalações interessam-se por conhecer as riquezas da sua história geográfica e cultural, e a AMS permite reconstituir as histórias de objetos raros e preciosos sem necessidade de os destruir. Tal como sucedeu com o violino de Bennett, as amostras exigidas pela AMS são pelo menos mil vezes

mais pequenas do que as usadas na datação por carbono tradicional. Em muitos casos, não há outro método conclusivo para estabelecer uma cronologia. Desde então, a tecnologia dos aceleradores tem aberto novas perspectivas nos domínios da história, da geologia, da arqueologia e de muitos outros.

Que se saiba, Bennett nunca descobriu se o seu violino era ou não um verdadeiro Stradivarius. Pelo menos nunca autenticou a improvável reivindicação, visto que não houve mais notícias acerca dele²⁰. Talvez por essa altura já se tivesse esquecido por completo, conduzido pelo entusiasmo científico supremo de inventar o método mais acurado de datação de artefatos históricos que conhecemos.



Hoje, muitas pessoas continuam a pensar que os aceleradores de partículas e os feixes por eles criados são utilizados apenas pelos físicos e que nada têm a ver com os alimentos, a água, os objetos domésticos ou os nossos próprios corpos. Porém, desde os *chips* de telefones e computadores até aos pneus dos automóveis e às películas aderentes que envolvem os alimentos, no quotidiano estamos rodeados por objetos que foram reforçados ou de algum modo aperfeiçoados graças aos feixes de partículas. Com frequência, estes métodos de irradiação ou modificação baseados em partículas são escolhidos porque são mais rápidos, mais amigáveis para o ambiente e mais eficientes do que as alternativas que recorrem a produtos químicos ou a processamento manual. Não

é um mercado pequeno: estima-se que, todos os anos e apenas nos Estados Unidos, produtos no valor de cerca de 500 mil milhões de dólares são obtidos ou alterados usando feixes de partículas. Muitas destas máquinas são aceleradores eletrostáticos, descendentes daquele que Cockcroft e Walton utilizaram para cindir o átomo no princípio dos anos 1930.

Uma das aplicações mais amplas é na indústria dos semicondutores. Os potentes *chips* dos nossos *smartphones* e portáteis baseiam-se em componentes eletrónicos obtidos com semicondutores, que geram os 1s e 0s nos quais se baseia toda a lógica do computador. Para transformar um semicondutor, como o silício, num dispositivo útil é necessário torná-lo ligeiramente impuro mediante a adição de um dopante: porções minúsculas de outros elementos, tais como boro, fósforo ou gálio. São estes dopantes que permitem exercer um controlo preciso sobre as propriedades elétricas do semicondutor, mas é muito difícil adicioná-los mediante métodos químicos. A única maneira acurada de o fazer passa por controlar os iões individuais e implantá-los usando um acelerador de partículas, num processo chamado «implantação de iões». Sem a presença dos aceleradores de partículas nestas fábricas não teríamos a moderna eletrónica baseada em semicondutores que integra atualmente as máquinas fotográficas digitais, as máquinas de lavar, as televisões, os automóveis, os comboios e até as arrozadeiras.

Não são apenas os semicondutores que podem ser modificados com feixes de partículas: outro sector interessado é a joalharia. A empresa de diamantes DeBeers possui aceleradores que produzem

feixes iónicos utilizados para bombardear pedras preciosas em bruto. Com isso conseguem alterar a cor de um diamante, ou transformar uma turquesa rosa-escuro noutra com o azul transparente que a torna tão apreciada.

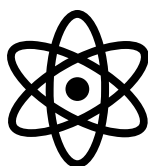
Entretanto, apenas 15 metros abaixo da sua famosa pirâmide de vidro, o Museu do Louvre em Paris tem um acelerador de partículas dedicado inteiramente ao estudo das obras de arte. A instalação, com 37 metros de comprimento, é conhecida por AGLAE — Accélérateur Grand Louvre d'Analyse Élémentaire — e utilizada para bombardear artefactos do museu e descobrir os elementos que os compõem. Sob a orientação da diretora do laboratório, a Dra. Claire Pacheco, a equipa usa o acelerador numa série de aplicações que são coletivamente conhecidas como análise por feixe iónico. Uma das técnicas habituais designa-se por Espetrometria de Retrodispersão de Rutherford (ou RBS, da sigla em inglês para Rutherford Backscattering Spectrometry). Nela se faz a contagem dos iões que ressaltam de um alvo, em busca exatamente do mesmo tipo de resultado que os cientistas do Cavendish, quando usaram a folha de ouro para mostrar que o átomo tinha um núcleo. Agora, com as condições controladas de um acelerador, podem explorar todas as potencialidades da ideia de uma forma jamais sonhada pelos primeiros experimentalistas. A amostra da obra de arte é alinhada com o feixe de partículas, e um detetor regista os iões que ressaltam. Para cada posição do detetor, diferentes núcleos atómicos fazem ressaltar diferentes números de iões. O acelerador faz variar a energia do feixe iónico, e essa variação traduz-se numa curva característica em que a energia é representada em função do número de iões. Depois basta comparar

esta curva com a de um material conhecido para ficar a saber quais são os átomos presentes na amostra, e as respectivas quantidades. Esta técnica foi utilizada, por exemplo, para confirmar que a bainha de uma espada que pertenceu a Napoleão era efetivamente de ouro maciço. Com este e outros métodos, a equipa da Dra. Claire Pacheco consegue identificar até vestígios ínfimos de elementos de toda a Tabela Periódica, do lítio ao urânio, contribuindo para revelar os segredos e as origens de obras de arte sem lhes provocar qualquer estrago. Se já se interrogou como é que os historiadores da arte sabem de forma inequívoca que uma peça é autêntica, é desta maneira.

Estas mesmas técnicas são utilizadas para medir a composição exata do vidro de garrafas de vinhos antigos e compará-la com o de garrafas reconhecidamente autênticas. Este tipo de fraudes é um problema grande e crescente na indústria dos vinhos de qualidade. Num caso, um colecionador gastou 500 mil dólares em quatro garrafas de vinho que haviam alegadamente pertencido ao presidente dos Estados Unidos Thomas Jefferson. A análise das garrafas com o feixe iónico mostrou que eram falsas, e uma ação judicial não tardou a ser instaurada contra o negociante de vinhos.

A mesma ideia começa também a ser usada na medicina forense. Numerosos métodos de deteção de vestígios de drogas, como a cocaína, ou de resíduos de tiros de armas de fogo destroem as amostras. Porém, cientistas como a Dra. Melanie Bailey, da Universidade de Surrey, no Reino Unido, utilizam agora a análise por feixe iónico para estudar os indícios descobertos em cenários criminais²¹. Sem destruir esses indícios, ela consegue verificar a

composição elementar de uma amostra e descobrir porções minúsculas de drogas ou resíduos que outros métodos poderão não detetar. Consegue inclusivamente comparar os seus resultados com material descoberto na roupa ou no corpo dos suspeitos: minúsculas amostras de solo agarrado a um sapato podem situar um suspeito no cenário criminal.



Para os físicos de 1932, todas estas aplicações estavam ainda num futuro distante. Cockcroft e Walton trabalharam com o acelerador durante alguns anos, mas os novos investigadores não tardaram a tomar a dianteira. John Cockcroft passou a dirigir outras secções do laboratório e mais tarde estudou a utilização da energia atómica para a produção de eletricidade em tempo de paz. Ernest Walton assumiu um cargo académico na sua Irlanda natal, no Trinity College de Dublin. Este período intenso das suas carreiras, que lhes valeu o prémio Nobel em 1951, não mais se repetiria.

O seu êxito — que aconteceu no mesmo ano da descoberta do positrão — concretizou o sonho de Rutherford, de revelar o que existe dentro do núcleo. As várias peças do quebra-cabeças estavam agora a juntar-se: os núcleos contêm protões e neutrões, com frequência em números aproximadamente iguais. Os isótopos têm massas variáveis devido aos números diferentes de neutrões, embora o número de protões se mantenha igual. Algumas configurações são mais estáveis do que outras, e as instáveis são

radioativas. Agora, a investigação de Rutherford passava a centrar-se nas forças que mantêm a coesão do núcleo. De que modo a presença dos neutrões conseguia impedir a desintegração do núcleo pelos prótons de carga positiva? Devia existir uma nova força nuclear que os mantinha juntos.

Embora o invento de Cockcroft e Walton continuasse a ser explorado com fins científicos e industriais, tornou-se claro que os aceleradores de partículas que utilizavam tensões elevadas não tardariam a esbarrar numa fronteira. Era necessária uma nova tecnologia. Mal sabiam eles que essa mesma tecnologia, já desenvolvida nos Estados Unidos, quase os derrotara na corrida que os conduziu ao seu resultado mundialmente famoso.

¹ A bolsa foi atribuída pela Comissão Real para a Grande Exposição de 1851.

² E. Rutherford, «1928 Address of the President at the anniversary meeting», *Proceedings of the Royal Society*, vol. 117, 1928, pp. 300-16.

³ M.L.E. Oliphant e W.G. Penney, John Douglas Cockcroft 1897-1967», *Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society*, vol. 14, 1968. Disponível online em <https://royalsocietypublishing.org/doi/pdf/10.1098/rsbm.1968.0007>.

⁴ E. Rutherford, «Structure of the radioactive atom and the origin of the α -rays», *Philosophical Magazine*, Series 7(4), 1927, pp. 580-605. <https://doi.org/10.1080/14786440908564361>.

⁵ George Gamow, *My World Line: An Informal Autobiography*, Nova Iorque, Viking, 1970.

⁶ Ibid.

⁷ Ibid.

⁸ Isto é, uma partícula com carga elétrica unitária. $E = qV$ significa que a energia, E , adquirida por uma partícula, é o produto da sua carga, q , pela diferença de potencial que atravessa, V .

⁹ Brian Cathcart, *The Fly in the Cathedral: How a Small Group of Cambridge Scientists Won the Race to Split the Atom*, Harmondsworth, Penguin, 2004.

¹⁰ O efeito de coroa acontece quando o campo elétrico em redor de um condutor não é suficientemente elevado para causar avarias ou faíscas, mas torna condutor o ar circundante. Com frequência, este emite um resplendor azulado.

¹¹ Cada etapa consistia de díodos (que permitem que a corrente os atravessasse apenas numa direção, como uma via de sentido único para a eletricidade) e condensadores (que armazenam carga elétrica, como um ponto de carregamento de automóveis elétricos). Mais tarde, quando tentou registar a patente da sua invenção descobriu que Heinrich Greinacher já o fizera.

¹² J.D. Cockcroft e E.T.S. Walton, «Disintegration of lithium by swift protons», *Nature*, vol. 129, 1932, p. 649. <https://doi.org/10.1038/129649a0>.

¹³ Cathcart, *The Fly in the Cathedral*.

¹⁴ Cockcroft e Walton tinham reduzido a tensão para este valor e perceberam que a experiência continuava a funcionar.

¹⁵ The Cockcroft Institute é um dos dois institutos com aceleradores no Reino Unido, assim chamado em homenagem a John Cockcroft, que era natural de Todmorden, a cerca de uma hora de distância do Cockcroft Institute em Daresbury, Cheshire. O outro, em Oxford, é o John Adams Institute for Accelerator Science, onde estudei e trabalho à data da escrita deste livro, que tem o nome do ex-investigador do CERN, e não do antigo presidente dos Estados Unidos.

¹⁶ The ISIS Neutron and Muon Source.

¹⁷ J. Thomason, «The ISIS spallation neutron and muon source», *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, vol. 917, 2019, pp. 61-7. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.11.129>;

¹⁸ Harry E. Gove, *From Hiroshima to the Iceman: The Development and Applications of Accelerator Mass Spectroscopy*, Institute of Physics Publishing, Bristol, 1999.

¹⁹ Houvera trabalho prévio com ciclotrões nos Estados Unidos. Ver Richard Muller, «Radioisotope Dating with a Cyclotron», *Science*, vol. 196, 1977, pp. 489-94, conquanto este artigo não demonstre a datação por radiocarbono com AMS. A equipa de Gove foi a primeira a fazê-lo e a usar um acelerador Tandem para a experiência, que, ainda hoje, continua a ser a tecnologia preferida

²⁰ Não é claro se Gove e Bennett chegaram a analisar o violino, mas é provável que tenham obtido uma data ambígua, que até podia estar certa. O período em que os violinos Stradivarius foram construídos corresponde a um intervalo de 30 anos de reduzida atividade solar conhecida por mínimo de Maunder. O nível mais reduzido de luz ultravioleta solar neste período permitiu a acumulação de mais ozono na atmosfera terrestre e, em consequência, os raios cósmicos criaram um excesso de carbono-14 radioativo na atmosfera. Qualquer madeira do período do mínimo de Maunder possui carbono-14 suplementar e este dado faz com que pareça ser muito mais recente, neste caso da década de 1950. Não é possível eliminar esta ambiguidade de datação sem uma investigação histórica mais tradicional. Períodos como este são conhecidos e tidos em conta nas modernas técnicas de datação por carbono.

²¹ Disponível online em https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:47061416.

CAPÍTULO 6

Ciclotrão:

A Produção Artificial de Radioatividade

Em 1932, no ano em que um acelerador de partículas realizou a primeira separação bem-sucedida de um átomo nas suas partes, a lista de partículas fundamentais descobertas na natureza estava em crescimento rápido. Incluía o eletrão e a sua versão na antimatéria, o positrão, juntamente com prótons e neutrões. Pensava-se que todas estas partículas fossem indivisíveis, embora, como veremos mais adiante, prótons e neutrões também possuam uma estrutura. Os fótons, partículas de luz, tinham acabado de entrar em cena e, passados apenas quatro anos, foram descobertos os múons positivos e negativos, os «primos» pesados de eletrões e positrões. Ninguém conhecia a natureza das partículas que não faziam parte dos átomos, se eram importantes ou se havia mais partículas como elas. Sabia-se apenas que, para descobrir mais, era preciso seguir as pisadas de Cockcroft e Walton e partir átomos.

Havia indícios de que existiriam mais partículas, um dos quais já encontrámos — o facto de uma força desconhecida parecer ligar prótons e neutrões no interior do átomo e impedi-los de se soltarem uns dos outros. Outro indício vinha da química ou, para sermos mais precisos, do que faltava na química. Nesta época, o urânio era o

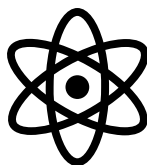
elemento mais pesado conhecido na Tabela Periódica¹, mas havia quatro lacunas correspondentes aos elementos 43, 61, 85 e 87. Dispondo em colunas os elementos por peso atômico crescente e com propriedades químicas semelhantes, o químico russo Dmitri Mendeleev previra, no século XIX, que estes elementos deviam existir, a par de outros que haviam sido subsequentemente descobertos. Por exemplo, abaixo do alumínio na tabela havia uma lacuna para a qual Mendeleev previra um elemento a que chamou «eka-alumínio» e que devia ter uma densidade, um ponto de fusão e propriedades químicas específicas. O gálio (elemento 31) viria a ser descoberto em 1875, correspondendo quase exatamente a estas previsões. À *posteriori* é mais fácil referir os elementos em falta pelos nomes que agora têm: tecnécio (43), promécio (61), ástato (85) e frâncio (87), mas no início dos anos 1930 eles nunca haviam sido observados e, portanto, não tinham nomes.

Poderíamos pensar que o esforço dos cientistas se centrava na procura destes elementos em falta na tabela, mas, na realidade, não era nisso que eles despendiam mais energia — e por uma boa razão. A descoberta de elementos radioativos ensinara-lhes que nem todos os elementos na Tabela Periódica eram estáveis, tal como os químicos sempre tinham admitido, pelo que era possível que os elementos em falta tivessem simplesmente desaparecido ao longo do tempo e fosse impossível encontrá-los. Agora que a radioatividade entrara em cena, o átomo tornara-se um lugar imprevisível e confuso, com uma dinâmica que a química não conseguia apreender. O objetivo supremo residia em conhecer a natureza dos átomos e a estrutura do núcleo, bem como as forças que mantêm a coesão de toda a matéria. Isto significava explorar

e compreender os pormenores do maior número possível de elementos, na tentativa de construir uma teoria abrangente que pudesse prever as propriedades dos elementos e dos seus isótopos, conhecidos ou desconhecidos, radioativos ou não.

Se ao menos fosse possível criar feixes de partículas suficientemente poderosos para partir átomos de qualquer elemento, quem sabe o que poderiam alcançar?

Fora isso que conduziu Cockcroft e Walton a dominar tensões elétricas elevadas e a construir o primeiro acelerador de partículas do mundo, mas não eram os únicos a trabalhar nesse problema. Ao fim de alguns anos, o seu trabalho seria prosseguido por um jovem americano chamado Ernest Orlando Lawrence. A máquina que ele inventou acabaria não apenas por dominar o campo da física nuclear, mas também congregaria cientistas de diversas disciplinas para unirem esforços além-fronteiras e desbravarem áreas inexploradas. Em consequência, o trabalho de Lawrence também transformaria a medicina para sempre.



Lawrence nunca quisera ser físico. Estava decidido a estudar medicina quando se matriculou na Universidade de Dakota do Sul e escolheu a Química como cadeira secundária. O seu amor pela física cresceu graças a um seu orientador.

Foi o *hobby* de Ernest Lawrence que o atraiu para a órbita desse orientador. Tendo crescido no Dakota do Sul, Lawrence e o seu vizinho Merle Tuve passavam a maior parte do tempo livre a construir equipamentos de rádio, a comunicar através de código Morse no sótão da família Tuve, a aprender a instalar relés, transmissores e outros aparelhos. Quando Lawrence foi para a universidade deixou o equipamento de rádio em casa, mas depressa começou a desejar que a universidade tivesse um equipamento próprio. Lawrence contatou o diretor do departamento de Engenharia Eletrotécnica, Lewis Akeley, e apresentou-lhe uma proposta clara e coerente para a aquisição de algum equipamento de rádio, incluindo listas de peças com os respectivos preços.

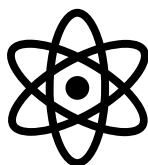
Nessa tarde, Akeley foi para casa e falou com entusiasmo à mulher sobre Ernest Lawrence, a sua curiosidade científica e a sua evidente competência. Mas por que é que Lawrence não se tinha matriculado em física ou engenharia eletrotécnica? Por que estudava ele medicina e química? Convicto de que Lawrence era genial no domínio da física, emprestou-lhe cem dólares para que comprasse o equipamento de rádio, arranjou-lhe um espaço para se instalar e confiou-lhe a responsabilidade pelo projeto. Akeley, físico de formação, teve o cuidado de não pressionar Lawrence a mudar de curso, pois acreditava que os bons estudantes acabavam por reconhecer espontaneamente a importância da física. Começou por perguntar a Lawrence se pensava que a física lhe poderia ser útil, dado o seu interesse pela rádio, mas a resposta de Lawrence foi negativa. Estudara física na escola secundária, mas duvidava que tivesse a capacidade de concretizar algum projeto nesse domínio.

Contrariando a sua própria vontade, Akeley convidou Lawrence para jantar e começou a bombardeá-lo com histórias de grandes físicos e das suas aventuras: desde Heinrich Hertz, que viu a conexão entre luz e eletricidade e se tornou a primeira pessoa a transmitir ondas de rádio sem fios, até Marie Curie e a sua descoberta dos elementos radioativos. Mais empolgante era a história de Ernest Rutherford, que mostrara que o átomo, afinal, não era sólido. Akeley expôs a aventura que aguardava os exploradores do domínio. Eles haviam penetrado no mundo íntimo da matéria e desvendado os segredos do Universo nas suas escalas ínfimas, sobre os quais assentava tudo o resto, incluindo a química, a biologia e a medicina, de que Lawrence tanto gostava. Akeley, com os seus modos persuasivos, disse-lhe que era importante a capacidade de aprendizagem em qualquer domínio, e que a física ajudava nesse processo. Fez uma derradeira proposta a Lawrence: se passasse um mês com ele a aprender física no verão, e continuasse a não estar interessado, Akeley não voltaria a insistir na ideia. Lawrence concordou. E, quando as aulas recomeçaram, Akeley tinha ganhado a aposta.

«Turma: este é o Ernest Lawrence», anunciou Lewis Akeley numa aula de Física. «Olhem bem para ele, porque virá um dia em que todos sentirão orgulho de terem sido colegas do Ernest Lawrence.» Os estudantes fitaram aquele jovem alto com sorriso encantador, cabelo castanho-claro bem penteado e olhos azuis. Um dia, quando Lawrence adormeceu na aula, Akeley limitou-se a dizer ao resto da turma: «Não importa! Deixem-no estar! Ele sabe mais física a dormir do que vocês todos acordados.»² Akeley não podia

saber o que o futuro reservava, mas as suas palavras revelaram-se proféticas.

Em 1928, com apenas 27 anos, Ernest deixou o Dakota do Sul para se tornar professor associado na Universidade da Califórnia. Era por fim responsável por um projeto de investigação e tinha a liberdade e o apoio de uma instituição jovem. Só precisava de um bom problema sobre o qual centrar a sua investigação.



Neste instante da nossa história, temos uma vantagem em relação a Lawrence, porque sabemos já qual era a situação em 1928, e o que aconteceria alguns anos depois. Sabemos que a teoria de Gamow incentivou Cockcroft e Walton a desenvolverem o seu acelerador em Cambridge. Sabemos que apenas algumas centenas de keV de energia são suficientes para partir um núcleo de lítio. Mas Lawrence, tal como Cockcroft e Walton na sua época, desconhecia-o. Ele sabia que os físicos tinham descoberto eletrões e raios X e que o átomo tinha um núcleo, e estava ciente das realidades contraintuitivas da mecânica quântica e da dualidade onda-partícula. E sabia também que os raios cósmicos nos bombardeiam continuamente do espaço, e que a invenção da câmara de nevoeiro por C.T.R. Wilson nos permite estudá-los, ainda que nessa altura Lawrence não estivesse muito interessado em detetores.

Embora muitos cientistas estudassem os raios cósmicos, a Lawrence parecia mais importante do que nunca conseguir controlar as partículas de energia elevada no laboratório. Não estava satisfeito com as tentativas em curso. O seu velho amigo Merle Tuve tentava dominar tensões elétricas inferiores a 1 MV, enquanto Cockcroft e Walton e os seus concorrentes faziam o mesmo, mas Lawrence queria saber aonde a investigação o conduziria depois de se atingir 1 MV. Ele tinha toda uma carreira pela frente; não queria enveredar por um caminho que se desvaneceria ao fim de poucos anos. A Lawrence parecia haver um defeito essencial na ideia de utilizar tensões elevadas para acelerar partículas. Mesmo que conseguissem criar uma tensão aplicável de um milhão de volts, continuavam a não conseguir obter partículas com energias superiores aos 5 MeV das partículas alfa emitidas por fontes naturais (como o rádio), visto que a tensão elétrica elevada se traduz diretamente na energia das partículas. Um milhão de volts dá um milhão de eV (1 MeV), mas nunca 5 MeV. Para os mistérios do átomo poderem ser revelados no laboratório, alguém teria de descobrir um método prático de atingir energias elevadas, de dezenas ou centenas de MeV, sem as tensões altas correspondentes.

Numa noite de 1929, Lawrence estava a ler revistas científicas na biblioteca da Universidade da Califórnia. Por capricho pegou numa publicação sobre engenharia eletrotécnica, escrita em alemão, e folheou-a até que alguns diagramas e equações num artigo da autoria de um norueguês chamado Rolf Wideroe captaram a sua atenção. Lawrence não sabia alemão, mas a ideia era suficientemente clara para que a percebesse.

Mais tarde, o próprio Lawrence descreveu a ideia como sendo tão simples que até as crianças conseguiam compreendê-la de forma intuitiva: quando nos sentamos num balanço há duas maneiras de o fazer elevar-se no ar: ou damos um forte empurrão ao balanço, ou damos uma série de pequenos empurrões no momento certo, fazendo crescer a oscilação, recorrendo ao conceito de ressonância. As ideias existentes sobre os aceleradores seguiam a primeira abordagem, mas Lawrence compreendeu que o segundo método era o que ele precisava de aplicar. Em vez de utilizar uma única tensão muito elevada para acelerar as partículas, os diagramas de Wideroe pareciam sugerir que se aplicasse uma tensão oscilante a uma série de tubos metálicos alinhados, com espaços ou «lacunas» entre eles. A tensão elétrica nos tubos oscilaria de positiva para negativa e vice-versa alguns milhões de vezes por segundo, para um valor relativamente modesto de tensão. As partículas passariam pelo meio dos tubos de metal como se atravessassem uma tubagem de água, e apenas nas lacunas entre os tubos é que as partículas «sentiriam» a tensão³. Com o *timing* certo, as partículas receberiam um pequeno impulso ao passar pelas «lacunas», semelhante a cada um dos pequenos empurrões que damos ao balanço. Uma série de tubos, todos abastecidos de energia pela mesma fonte oscilante, precisariam apenas de uma tensão pequena, mas a energia total obtida mediante uma série destes tubos poderia ser muito elevada.

A ideia de Wideroe era boa, mas tinha uma falha crucial. Para se atingirem energias elevadas, a sequência de tubos precisava de ser incrivelmente longa. E se, em vez de tantos tubos alinhados, Lawrence conseguisse que as partículas descrevessem uma trajetória circular e reutilizasse a mesma «lacuna» aceleradora

repetidas vezes? Podia utilizar o conceito de aceleração ressonante para criar, nas suas palavras, um carrossel de prótons.

Desejoso de verificar se a ideia era exequível, Lawrence agarrou num guardanapo de papel e começou a escrevinhar as equações. Sabia que era possível curvar a trajetória das partículas com um campo magnético, usando o facto, há muito conhecido, de que a força de um magneto pode impelir as partículas segundo ângulos perpendiculares à sua direção de deslocamento. Em cada revolução, as partículas ganhavam um pouco de energia, subindo em espiral para círculos de diâmetro cada vez maior, conforme se deslocassem mais depressa. Analisando as equações, ele percebeu que a maior velocidade das partículas em cada círculo mais amplo compensaria exatamente a trajetória maior que tinham de seguir, pelo que o intervalo necessário para retornarem à lacuna de tensão continuaria a ser o mesmo em cada rotação. Isso significava que podia utilizar uma tensão que oscilasse com uma frequência constante, algo que seria fácil de conseguir. Era quase demasiado bom para ser verdade.

Apressou-se a regressar ao clube da faculdade e pediu ao primeiro matemático que encontrou, Donald Shane, que fizesse uma verificação rápida dos seus cálculos. Shane confirmou que estavam corretos, fitou Lawrence e perguntou: «Mas o que vais fazer com isto?»⁴ «Vou bombardear e partir átomos!», respondeu Lawrence. Era uma ideia tão simples e elegante que Lawrence se interrogou sobre o porquê de ninguém ter pensado nela antes. Apesar do seu empolgação, não passou logo à ação, pois já fizera planos para uma viagem pelo país. Foi a Washington, ao encontro

da American Physical Society, depois visitou o seu irmão John em Boston e, por fim, deslocou-se até à General Electric, em Schenectady, Nova Iorque, onde prometera passar dois meses. Ao longo do seu périplo, proferiu palestras e jantou com muitos físicos de topo, como Robert Millikan. A todos os lugares aonde ia, falava da sua nova ideia a quem o quisesse ouvir.

Muitos deles conseguiam apresentar uma razão pela qual aquela ideia não podia resultar. Diziam que não havia maneira de concentrar as partículas num aparelho daqueles, pelo que nunca seria possível alvejar algo tão pequeno como um núcleo atómico. Pensavam que as partículas nunca se manteriam numa trajetória em espiral, mas sim que escapariam na vertical, colidiriam com a câmara e se perderiam. Interrogavam-se sobre o modo como Lawrence planeava extrair as partículas da máquina, embora pelo menos sobre este aspeto ele tivesse algumas ideias. Até o seu velho amigo Merle Tuve expressou dúvidas, enquanto Lawrence, pelo seu lado, encarava com ceticismo a utilização por Tuve de uma grande bobina de Tesla para acelerar partículas. Porém, na altura em que Lawrence regressou à Califórnia, estava pronto para testar a sua ideia.

O primeiro estudante de doutoramento de Lawrence na Universidade da Califórnia, Niels Edlefsen, era seis anos mais velho do que Lawrence e estava a concluir a sua tese. Corria o ano de 1930 e Edlefsen ainda não decidira que emprego iria arranjar após o doutoramento, pelo que não tinha tempo a perder. Edlefsen queria concentrar-se no trabalho teórico e preparar-se para a prova de defesa da tese de doutoramento, mas Lawrence tinha outras

ideias. Insistiu com Edlefsen que a sua nova ideia radical para um acelerador de partículas era muito mais entusiasmante do que estudar teorias, e que não via qualquer razão para que a máquina não funcionasse. Edlefsen também não encontrava nada de errado nela e depois de a estudar durante mais duas semanas, acabou por se render e concordou em juntar-se ao projeto. «Excelente!», exclamou Lawrence. «Vamos trabalhar. Vais já construir aquilo de que precisamos.»⁵

Na primavera de 1930, Edlefsen começou com um balão de vidro do tamanho de um frasco de perfume que alisou e revestiu de prata. A seguir raspou uma faixa estreita no meio, deixando duas regiões com prata para os elétrodos. Podia extrair-se o ar do balão, que tinha aberturas para o filamento produtor de iões, para introduzir o hidrogénio produtor de protões e para uma sonda elétrica para medir os resultados. Todas as aberturas eram depois vedadas com cera. Entretanto, Lawrence, com falinhas mansas, conseguira autorização para utilizar o maior magneto do departamento. A ideia era fazer as ligações elétricas ao balão, esvaziá-lo de ar e colocá-lo entre os polos do magneto, o que faria as partículas descreverem círculos enquanto ganhavam energia. Por fim, estavam prontos para testar a grande ideia de Lawrence.

Ligaram o dispositivo. O vidro estilhaçou-se. Era evidente que uma câmara de vidro não funcionava. Sem se deixarem desencorajar, tiveram outra ideia. Pegaram numa pequena caixa circular de cobre, que Edlefsen cortou ao meio para criar os elétrodos. Estes foram então colados com cera a uma placa de vidro, ficando as duas metades da caixa separadas por uma

pequena distância e com as aberturas paralelas uma à outra de modo a formar dois «dês» (assim chamados porque apresentam a forma da letra «D» maiúscula). Imagine que tem uma bolacha grande e a envolve em fio de cobre. A seguir divide o conjunto ao meio e retira a bolacha: as duas metades do fio de cobre têm o mesmo aspeto dos «dês». Ligava-se um oscilador de radiofrequência aos «dês» para produzir uma tensão alternada. Parecia uma trapalhada. Depois de toda a conversa de Lawrence, os outros membros do laboratório não se continham em provocar Edlefsen e Lawrence acerca da sua alegadamente poderosa máquina para acelerar partículas.

Não se sabe ao certo se Edlefsen conseguiu acelerar prótons com aquele dispositivo. Pelo menos fez circular alguns prótons, mas, antes de chegar a algum resultado conclusivo, teve de se dedicar ao emprego que arranjava noutro lugar. Contudo, para Lawrence, o projeto era suficientemente promissor para colocar de imediato um novo estudante a trabalhar no acelerador de ressonância.

Esse estudante, Milton Stanley Livingston, era um rapaz de aspeto grave, filho de um pároco, que trocara a química pela física na universidade. Filho único, crescera na quinta da família na Califórnia, entre ferramentas e máquinas, onde adquiriu as competências práticas para *design* e construção de sistemas complexos. Essas competências iam agora ser postas à prova no trabalho com o dispositivo que ficaria conhecido por «ciclotrão».

Livingston montou um dispositivo minúsculo que cabia na palma da mão e era parecido com aquele que Edlefsen esboçara, mas mais

bem feito. Tinha apenas 11 centímetros de diâmetro, era de latão e vedado com cera e a sua construção custou cerca de 25 dólares. Livingston progrediu rapidamente e, nas férias de Natal de 1930, ele e Lawrence utilizaram este modelo de 11 centímetros e uma tensão oscilante de 1800 V para acelerar prótons a 80.000 eV, mostrando que o conceito funcionava. O ciclotrão conseguia acelerar partículas até energias que eram múltiplas vezes superiores à tensão aplicada, tal como Lawrence sonhara naquela noite na biblioteca.

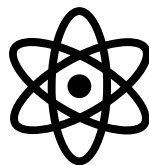
Conforme construíam, iam afinando o *design*, seguindo um método por tentativas. Alteraram a forma dos elétrodos e a dimensão do intervalo entre eles, e adaptaram ligeiramente o magneto para conseguirem maior focagem, o que aumentou imenso o fluxo do feixe. Após algumas semanas, criaram um ciclotrão com pouco menos de 30 centímetros de diâmetro, para o qual mandaram construir um magneto ainda maior. Quando o afinaram, Livingston descobriu que, mediante a aplicação de apenas 3000 V, conseguiam produzir prótons que se deslocavam com uma energia pouco inferior a um milhão de eV. Lawrence desatou a dançar no laboratório: por fim, a sua máquina conseguia esmagar átomos. Mais uma vez Lawrence tinha viagens programadas e, enquanto esteve ausente, expondo as virtudes do seu novo invento, o qual atingira quase — mas não exatamente — a marca mágica do milhão de volts, Livingston continuou o trabalho. Em 3 de agosto de 1931, Lawrence recebeu um telegrama que anunciava que o recorde fora por fim alcançado: «O Dr. Livingston pediu-me que o informasse de que obtive prótons com 1.100.000V. Sugeriu-me também que acrescentasse “Iupiii!”.»

Lawrence estava em casa da namorada, Molly Blumer, quando as notícias lhe chegaram. Leu o telegrama em voz alta à família. No meio das felicitações, levou Molly para a rua e pediu-a em casamento. Ela aceitou, na condição de poder concluir os seus estudos em Harvard antes do casamento. A seguir, Lawrence apressou-se a regressar ao laboratório e passou os dias subsequentes com Livingston, fazendo demonstrações do invento a todos os colegas e amigos interessados. Com uma máquina relativamente pequena e barata, tinham ultrapassado a energia alcançada pelo gerador de Cockcroft e Walton, que ocupava uma sala inteira.

Se, neste momento, tivessem de facto dado seguimento ao que Lawrence almejava desde o início — partir átomos —, a história da física nuclear teria sido um pouco diferente. Em vez disso, a sua equipa, com perto de dez físicos e engenheiros, estava decidida a alcançar energias cada vez mais elevadas. Impulsionados pelo entusiasmo contagiante de Lawrence, construíram máquinas maiores: primeiro, um ciclotrão com 69 centímetros, que beneficiou da doação de um grande magneto pela Federal Telegraph Company, o qual depressa seria reformulado numa versão com 94 centímetros. Passado pouco tempo, obtiveram protões com 2.000.000 eV.

Por que não utilizaram eles os ciclotrões em estudos científicos? Por que ficaram presos no desígnio de construir instrumentos cada vez maiores? Ao construírem o ciclotrão inventaram todo um novo domínio da física, o meu campo de estudo, a física dos aceleradores. Compreenderam que o controlo e a manipulação de feixes de

partículas carregadas era, por si só, uma pesquisa fascinante e que os avanços nesta área garantiriam o progresso futuro da física, tal como Lawrence previra que acontecesse se os investigadores fossem limitados pelas tensões elevadas. Com o seu êxito na aceleração de feixes com o ciclotrão tinham causado perplexidade nos numerosos detratores, que haviam dito que tal não seria possível. Agora tinham de tentar compreender exatamente o modo como funcionava, e como podia ser melhorado, o que exigia um conhecimento aprofundado da física e do comportamento das partículas carregadas. A sua investigação projetava-se tão para além das fronteiras da tecnologia, que criava saberes nos domínios da física e da engenharia: a maneira como os feixes de partículas subatômicas criam e interagem com campos elétricos e magnéticos, como conceber eletromagnetos com propriedades definidas, e como focar, transportar e medir feixes de partículas subatômicas que eram invisíveis a olho nu.



O entusiasmo de Lawrence e Livingston com o aperfeiçoamento da máquina impediu que a equipa fizesse uma série de descobertas importantes. Em 1932, quando o ciclotrão liderava a corrida das altas energias, Lawrence e a sua equipa ficaram para trás — no aspeto científico —, ultrapassados por outros com experiências mais simples. Chadwick descobriu o neutrão e mediu a sua massa, concluindo que era muito parecida com a do próton. Na Universidade de Colúmbia, Harold Urey descobriu um novo isótopo

do hidrogénio, com carga unitária, mas o dobro da massa, chamado deutério. No mesmo ano, Anderson utilizou uma câmara de nevoeiro para descobrir o positrão. Então, em abril, chegou a grande notícia: Cockcroft e Walton tinham conseguido, pela primeira vez, a separação bem-sucedida do átomo. A equipa de Lawrence apressou-se a preparar o ciclotrão com um alvo de lítio, para replicar os resultados. Em poucas semanas tinham obtido protões do lítio com 1,5 MeV, quase o dobro da energia que se conseguira atingir no Cavendish. De acordo com a teoria do efeito túnel quântico de Gamow, perceberam que as energias mais elevadas aumentavam ainda mais a taxa de reação. Mesmo não sendo os primeiros a cruzar a meta, pelo menos tinham razão na crença de que as energias elevadas lhes permitiriam cindir átomos de forma mais eficaz. Agora, dispondo das energias mais elevadas em jogo, estavam lançados.

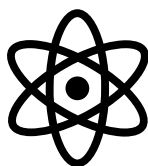
Os «ciclotronistas», como ficaram conhecidos, resolveram criar uma experiência que não estava ao alcance de mais ninguém. Pediram ao departamento de Química da universidade que produzisse algum deutério, ou «hidrogénio pesado». Colocaram-no na sua fonte iónica para remover o eletrão e produzir deuterões (núcleos de deutério) que seriam utilizados como projéteis no ciclotrão. Como o deuterão, com um protão e um neutrão, é mais pesado, consideravam que penetraria mais facilmente nos núcleos do que o protão. Em 1933 estavam em território próprio e produziam resultados que eram deveras desconcertantes. Todos os elementos que bombardeavam com deuterões pareciam ter taxas de reação enormes, muito superiores ao que conseguiriam com protões. As reações produziam sempre neutrões e protões com

quantidades de energia surpreendentes. A única conclusão, de acordo com Lawrence, era a de que havia uma cisão do deutério. Se isto fosse verdade, ele calculava que o neutrão poderia ser bem mais leve do que a medição feita por Chadwick.

Antes que pudesse verificá-lo, chegou um convite. Lawrence foi convidado a participar na Conferência Solvay de Bruxelas em 1933, o encontro das sumidades da física nuclear. A princípio, Lawrence pensou em recusar, porque a sua carga letiva era pesada, mas o convite era uma honra tão grande para o laboratório e para a universidade que o autorizaram a faltar a algumas aulas e reservaram-lhe uma viagem em primeira classe num navio. Como preparação, Lawrence reuniu todos os resultados que conseguiu sobre as experiências com o deutério. Em Bruxelas, Lawrence viu-se no meio de todas as grandes personalidades da física, de Albert Einstein a Marie e Irène Curie e, claro, Lorde Rutherford. Quando chegou a sua vez, Lawrence discursou sobre a grande promessa do ciclotrão e apresentou os resultados das experiências com o deutério. Contudo, esteve longe de causar a grande impressão que pretendia, pois a maior parte dos participantes ficou cética, ou pelo menos pensou que Lawrence cometera algum erro. Rutherford agora o autointitulado avô da física nuclear, concordava com eles. Apesar disso, simpatizou com aquele pioneiro que falava com toda a franqueza. Chamou a atenção de Chadwick, que não devia estar muito impressionado pelo jovem norte-americano, e disse: «Ele é exatamente como eu era naquela idade!»

Posteriormente, a equipa do Cavendish demonstrou, utilizando o acelerador de Cockcroft e Walton, que os deuterões formavam uma

camada de hidrogénio pesado na superfície do alvo. As reações que a equipa de Lawrence tinha visto eram a colisão entre deuterões, e não a desintegração dos elementos-alvos. Isto explicava a razão de os resultados serem muito parecidos para todos os materiais componentes do alvo, e calculando a massa do neutrão, tendo em conta a reação correta, chegava-se ao valor esperado. Lawrence, penalizado, escreveu a toda a gente a pedir desculpa pelo erro. Junto da sua equipa, insistiu que a «ciência também se pode desenvolver graças aos erros», mas aprendera a lição. De futuro, teriam de ser muito mais cuidadosos.



Parte da razão pela qual o êxito continuava a escapar a Lawrence e Livingston residia na ausência de dispositivos de deteção e contagem de partículas — coisas que não faltavam no Laboratório Cavendish. Por duas vezes, a equipa de Lawrence tentara desenvolver um contador Geiger, mas desistira, pois os contadores pareciam ser muito afetados pela radiação de fundo. Também não dispunham de câmaras de nevoeiro, pelo que as suas medições eram bastante rudimentares, apesar de o ciclotrão conseguir produzir energias muito mais elevadas do que outras máquinas.

Passada a Conferência Solvay e o fiasco do deuterão, Lawrence e Livingston regressaram ao trabalho, tal como todos os colegas que com eles competiam em todo o mundo. Em 1934, Lawrence entrou a correr no laboratório com um exemplar de uma publicação

francesa. Quando recobrou o fôlego, deu as notícias à equipa: em Paris, Irène Curie e Frédéric Joliot haviam induzido a radioatividade mediante o bombardeamento de alvos compostos por elementos leves com partículas alfa naturais. Nem sequer tinham utilizado um acelerador.

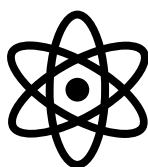
Compreendendo que tinham à sua frente todos os elementos para obterem uma versão artificial da mesma experiência, Livingston recorda que: «[...] viraram a roda do alvo para o carbono, ajustaram os contracircuitos e bombardearam o alvo durante 5 minutos [...]. O contador foi ligado e clique-clique-clique-clique. Estávamos a observar radioatividade induzida menos de meia hora depois de sabermos dos resultados de Curie e Joliot»⁶.

A equipa de Lawrence estava tão concentrada no desenvolvimento da tecnologia do ciclotrão que também não tinha conseguido ser a primeira a detetar a radioatividade induzida artificialmente. Desta vez, pelo menos, não estavam sozinhos, visto que o Cavendish e todos os outros laboratórios com aceleradores registavam igual fracasso. Tinha ligado o contador Geiger ao mesmo interruptor do acelerador, pelo que, quando o feixe era desligado, o mesmo sucedia ao contador. Se este tivesse ficado ligado, teriam verificado, logo nas primeiras experiências, que o ciclotrão produzia elementos radioativos. Agora, pelo menos conseguiam perceber a razão pela qual não conseguiam obter um contador Geiger fiável: todo o laboratório estava radioativo⁷.

Com os resultados de Curie e Joliot, Lawrence percebeu que era possível produzir dezenas de novos elementos radioativos.

Recorrendo ao ciclotrão, podiam bombardear diversos elementos com prótons ou deutérios, alterar o número de prótons ou neutrões e produzir isótopos radioativos. Era até possível obter elementos radioativos não existentes na natureza. Podiam recriar as reações que acontecem no seio das estrelas, as quais estavam na própria génese dos elementos. Talvez fosse possível criar elementos e isótopos radioativos há muito desaparecidos da Terra, ou que tivessem decaído para quantidades muito pequenas.

Uma equipa menos motivada, com um chefe pouco inspirador, teria ficado desanimada pela derrota do seu ciclotrão na corrida à cisão do átomo, que lhe fora imposta por Cockcroft e Walton — por escassas semanas —, e por não ter identificado a produção de radioatividade artificialmente induzida. No ano seguinte, Irène Curie e Frédéric Joliot receberam o prémio Nobel da Química pela sua descoberta. Porém, se Lawrence ficou com inveja do êxito alheio, não o mostrou. «Havia descobertas suficientes para todos», dizia aos seus alunos⁸. Além disso, não trocava de lugar com Cockcroft e Walton nem com Curie e Joliot, porque dispunha agora de uma máquina que conseguiria ultrapassá-los a todos.



Em 1934, um ou dois dias depois de conhecido o resultado de Curie-Joliot, Lawrence tinha descoberto o rádio-sódio⁹, ao bombardear com deutérios um alvo de cloreto de sódio (sal das cozinhas). O ciclotrão conseguia produzir milhões de átomos de

rádio-sódio por segundo, os quais decaíam com uma meia-vida de 15,5 horas, emitindo elétrons e raios gama. Uma vez mais, percebeu que, quanto mais elevada fosse a energia do feixe do ciclotrão, maior era o rendimento de rádio-sódio. A seguir, obteve rádio-fósforo. Imagina-se a excitação que Lawrence deve ter sentido, ao perceber que, conforme construísse máquinas com energias mais elevadas, as portas do mundo dos radioelementos ficariam abertas de par em par. Seria possível descobrir dezenas, se é que não centenas, de novas substâncias radioativas. No meio da excitação, ocorreu-lhe que talvez esses novos elementos radioativos pudessem revelar-se úteis para a sociedade.

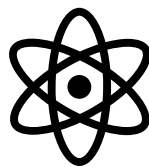
Lawrence escreveu ao seu irmão mais novo, John, que era um médico especialista em hematologia. No verão de 1935, John Lawrence chegou ao «Rad Lab» — o nome pelo qual o Laboratório de Radiação era conhecido —, de férias de Yale, a pedido de Ernest, para ver o que poderia fazer com os novos radioisótopos no quadro da medicina. Já se sabia que os raios X tinham a capacidade de matar células humanas, o que sugeria que pudessem vir a ser usados no tratamento do cancro, mas ninguém explorara a via dos radioisótopos. Visto que os novos isótopos tinham as mesmas propriedades químicas que os seus equivalentes não-radioativos, John compreendeu que os sistemas corporais podiam processar os elementos radioativos da mesma maneira que os normais. Por exemplo, o sal produzido com sódio radioativo recebia o mesmo tratamento do sal normal. Desse modo, podia utilizar as propriedades radioativas para interagir com o corpo, ou talvez mesmo para detetar a radiação emergente e observar os processos

no interior dos órgãos, sem precisar de fazer uma única incisão na pele.

John começou por utilizar o fósforo-32 radioativo, produzido pelo ciclotrão, para investigar o metabolismo de animais. O fósforo é o segundo mineral mais abundante no corpo a seguir ao cálcio, compondo 1 por cento do peso corporal, e está envolvido na formação dos ossos e dos dentes, entre muitas outras funções. John arranjou um grupo de ratos com leucemia e injetou-lhes fósforo radioativo. A seguir, foi pescar no rio local. Duas semanas depois, verificou que o grupo de ratos que injetara estava vivo e aparentava boa saúde, enquanto os ratos do grupo de «controlo», que não haviam sido injetados, tinham morrido. Ao fim de alguns meses, John ensaiou o fósforo radioativo em pacientes humanos, com resultados impressionantes — o fósforo contribuía para a remissão da doença.

Pouco depois, John e Ernest testaram o que aconteceria a um rato se fosse exposto a radiação. Puseram-no no ciclotrão, dentro da câmara de feixes situada entre os polos superior e inferior do magneto, próximo de um alvo de berílio, e ligaram o feixe com uma dose muito baixa. Ao fim de cerca de um minuto, John pediu que se desligasse o ciclotrão para verificar o estado do rato. Estava morto. A equipa do ciclotrão ficou aterrorizada com a possibilidade de os efeitos biológicos da radiação serem muito piores do que pensavam. Deitaram mãos ao trabalho, para melhorar a blindagem do ciclotrão. Mais tarde, John percebeu que o rato não morrera devido à radiação, mas por asfixia: tinha sido encerrado num recipiente do qual todo o ar fora extraído para obter o vácuo

necessário à experiência. Apesar de tudo, aumentou imenso o interesse das pessoas pelos efeitos da radiação, quer pelos positivos quer pelos negativos¹⁰. As experiências foram suficientemente promissoras e, no ano seguinte, John transferiu-se para a Universidade da Califórnia, criou um laboratório e uma equipa própria, e os dois irmãos trabalharam em conjunto durante muitos anos.



Se visitássemos o Rad Lab naqueles dias, encontraríamos um local apinhado. No mesmo espaço, havia gaiolas cheias de ratos, laboratórios para a separação química e aparelhos elétricos para os físicos, para não falar do ciclotrão e da sua blindagem. Estaríamos não apenas no meio de físicos, mas de especialistas de muitos domínios, incluindo engenheiros, químicos e cientistas biomédicos, entre outros. Lawrence nem sempre conseguia pagar-lhes — mas muitos deles mantinham-se ali apenas pelo entusiasmo que sentiam pelo projeto. As novas aplicações médicas contribuíram para a angariação de verbas, o que foi particularmente importante durante a Grande Depressão. O trabalho com o rádio-sódio tinha sido alcançado com um ciclotrão de 67 centímetros que produzia deuterões com 6 MeV com uma corrente relativamente modesta, mas em 1937 o ciclotrão foi transformado numa máquina de 92 centímetros, tinha o dobro da corrente e uma energia de feixe de 8 MeV. Com ela, os investigadores em medicina dispunham de rádio-sódio e rádio-fósforo em quantidade suficiente para o seu trabalho,

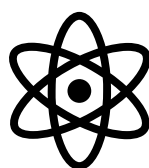
enquanto os físicos também tinham feixes com energia suficiente para aprofundarem o estudo em física nuclear.

Num dia normal, o ciclotrão bombardeava um alvo e este era entregue a alguém do departamento de Química, que se encarregava da separação química. Este processo costumava implicar a dissolução do alvo e uma posterior destilação, a fim de separar os componentes segundo o seu ponto de ebulição. Por vezes, a separação dos elementos dissolvidos exigia outras técnicas, como a adição de químicos suplementares para forçar o elemento a regressar ao estado sólido ou a separação de elementos mediante cromatografia. Feito isso, o físico retomava o trabalho com um eletroscópio ou outro instrumento para medir a atividade e as meias-vidas dos produtos. Em 1937, o químico Glenn Seaborg descobriu, utilizando este método, um novo isótopo radioativo do ferro, o ferro-59, que revelou de imediato a sua utilidade no estudo das doenças do sangue.

John e Ernest viram que o maior potencial residia nas aplicações diretas da radiação no tratamento do cancro. Realizaram experiências com neutrões que pareciam promissoras. Estudaram também raios X com energia elevada, produzidos num acelerador linear construído por David Sloane, colega de Lawrence. Em 1937, John e Ernest souberam que a mãe sofria de cancro do útero e tinha poucos meses de vida. A clínica onde estava internada — a Mayo Clinic — recusou-se a tratá-la com radiação, mas os irmãos tomaram conta do caso e pediram a um dos médicos que trabalhava com John que os ajudasse a tratar a mãe com os raios X. Mais tarde, numa entrevista, John Lawrence contou: «Em resumo, aquele

tumor enorme começou a evaporar-se.» Ela tinha 67 anos e viveu até aos 83. Regressaremos ao conceito de radioterapia com muito mais pormenor no Capítulo 10.

Em 1938, Seaborg descobriu o cobalto-60, um emissor intenso de raios gama com uma meia-vida de 5,3 anos, que mais tarde teria uma vasta aplicação como fonte de radiação, proporcionando no seu apogeu quatro milhões de irradiações terapêuticas anuais, apenas nos Estados Unidos. Continua ainda a ser amplamente utilizado em medicina e na indústria, sendo uma fonte de radiação bem regulamentada¹¹. No mesmo ano, após uma conversa com um médico, Seaborg tomou conhecimento dos estudos sobre o metabolismo da tiroide usando iodo-128, que tinha uma meia-vida de 25 minutos — tão curta que condicionava os estudos. O médico dizia que preferia um isótopo com uma meia-vida de cerca de uma semana. Seaborg e os seus colegas identificaram rapidamente o iodo-131 que, por coincidência, tinha uma meia-vida próxima de oito dias. O ciclotrão era um terreno de descobertas tão fértil que quase permitia a invenção de novos isótopos a pedido. O iodo-131 é agora utilizado milhões de vezes por ano no diagnóstico e no tratamento das doenças da tiroide, no diagnóstico de perturbações dos rins e do fígado, e em testes ao funcionamento dos órgãos. A própria mãe de Seaborg seria tratada com iodo-131 e a sua vida foi prolongada mais alguns anos.



À medida que o número de aplicações médicas crescia, os físicos continuavam a avançar na descoberta de novos radioelementos e a coligir tudo o que aprendiam sobre a estrutura do núcleo e sobre as muitas formas que poderia apresentar. Conseguiram criar não apenas isótopos radioativos de elementos conhecidos, mas também elementos que nunca haviam sido observados na natureza, que iam preencher os intervalos vazios na Tabela Periódica. O primeiro elemento completamente novo, descoberto em 1937, foi o tecnécio (com número atômico 43). Foi isolado por Emilio Segrè em Itália depois de visitar o Rad Lab e convencer Lawrence a enviar-lhe por correio uma fina folha de molibdénio que fizera parte do ciclotrão, para verificar se conseguia determinar o tipo de elementos radioativos presentes. Após uma série de separações e purificações, Segrè e o seu colega Carlo Perrier encontraram vestígios de dois isótopos de tecnécio: o tecnécio-95m (com uma meia-vida de seis dias) e o tecnécio-97m (com uma meia-vida de 91 dias).

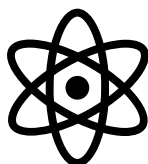
Todos os isótopos do tecnécio são radioativos, e visto que o tecnécio-99, o isótopo naturalmente predominante, tem uma meia-vida de 211.000 anos, é muito difícil encontrá-lo na natureza porque quase todo ele decaiu durante o período de existência da Terra¹². Porém, esse isótopo era fácil de criar com o ciclotrão. Em 1938, Segrè mudou-se para os Estados Unidos e colaborou com Glenn Seaborg, usando o ciclotrão para confirmar a existência de outro isótopo do novo elemento, o tecnécio-99m. Este isótopo tem uma meia-vida mais curta, cerca de seis horas, e é uma etapa no decaimento do núcleo de tecnécio, durante o qual há emissão de raios gama.

O tecnécio-99m revelou-se um isótopo incrivelmente importante no diagnóstico médico e começou por ser usado num exame ao fígado em 1963. No fim da década de 1990, utilizava-se em mais de dez milhões de exames de diagnóstico anuais, só nos Estados Unidos, à tiroide, ao cérebro, ao fígado, ao baço e à medula óssea, entre outras partes do corpo. A procura não cessou de crescer e continua a ser o marcador radioativo médico mais utilizado em todo o mundo. Seaborg e Segrè não suspeitavam da sua potencial aplicação em medicina quando desenvolveram o trabalho¹³.

Os outros três elementos em falta na Tabela Periódica de Mendeleev viriam ocupar os seus lugares nos anos seguintes. Os quatro elementos em falta revelaram-se radioativos, o que explica o porquê de terem escapado à deteção, pois pouco restava deles de forma natural na Terra. O isótopo mais duradouro, o frâncio-233, tem uma meia-vida de apenas 22 minutos (descoberto em 1939 por Marguerite Perey, em Paris), enquanto a do ástato-210 é de 8,1 horas (descoberto em 1940 por Corson, MacKenzie e Segrè, na Califórnia) e a do promécio-145 é de 17,7 anos (descoberto em 1945 por Marinsky, Glendenin e Coryell, no Tennessee). Assim que a Tabela Periódica ficou completa, o ciclotrão permitiu que os físicos de Berkeley fossem ainda mais longe. Ao longo dos anos, Seaborg e outros físicos criaram elementos cada vez mais pesados, impulsionados pelo desejo de saber quantos neutrões e prótons se mantêm coesos num núcleo e em que circunstâncias são estáveis ou instáveis. Seaborg recebeu o prémio Nobel da Química em 1951 pela descoberta dos elementos transurânicos plutónio, amerício, cúrio, berquélio e califórnio. Seaborg e os seus colegas de Berkeley

prosseguiriam com a síntese do einsténio, do férmio, do mendelévio, do nobélio e, claro, do seabórgio, em sua homenagem.

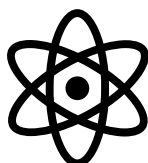
Graças ao ciclotrão e a outros aceleradores, a Tabela Periódica expandira-se imenso desde o tempo em que o urânio (com o número atómico 92) era o elemento mais pesado conhecido. Hoje, o elemento mais pesado sintetizado num laboratório é o ununóctio (118), também conhecido por oganéssio, em homenagem ao seu descobridor, Yuri Oganessian. Foi produzido em 2016, em Dubna, na Rússia, e até hoje só foram criados quatro átomos dele, pelo que as suas propriedades químicas e físicas continuam por compreender. A pesquisa sobre a formação de elementos superpesados é crucial para entender a criação de elementos pesados no Universo primordial e prossegue em muitos laboratórios do mundo. A Tabela Periódica apresenta os elementos dispostos por número atómico, ou número de protões, mas após o enorme crescimento dos radioisótopos com o ciclotrão existe agora uma segunda versão, a «carta dos nuclídios» — também conhecida por carta de Segrè —, em que o número de neutrões é representado no eixo horizontal e o número de protões no eixo vertical. Os elementos estáveis da Tabela Periódica encontram-se sobre uma linha aproximadamente diagonal, mas em redor deles foi desenhada uma ampla faixa de configurações exóticas e instáveis conhecidas por *nuclídios*, posicionados e coloridos de acordo com o tipo de radiação que emitem durante o decaimento.



Em Berkeley, a potência crescente dos ciclotrões conduziu à criação de um novo laboratório, inaugurado em 1939. O Laboratório Crocker alojava uma máquina de 150 centímetros, e a equipa de Lawrence contava agora com 60 pessoas para construir e operar ciclotrões. Na época, consumiam tanta energia que causavam apagões na cidade. De algum modo, no meio de todo este trabalho frenético, Lawrence arranhou tempo para visitar Estocolmo e receber o prémio Nobel da Física de 1939. As descobertas prosseguiram, incluindo a do carbono-14, o isótopo crucial para a datação por carbono. Enquanto os conflitos recrudesciam a nível mundial em 1939 e 1940, Lawrence projetou e construiu uma máquina ainda maior, concebida para ultrapassar, pela primeira vez, a barreira de energia de 100 MeV. Para alcançar este valor de energia era necessário um magneto muito maior para confinar o feixe. Para duplicar a energia, o peso do magneto tinha de aumentar oito vezes, e exigia tanto ferro como um vaso de guerra. A enorme máquina de 460 centímetros, o pináculo dos ciclotrões, foi erguida num novo local, mais alto do que o do Rad Lab original, e a construção continuava quando rebentou a Segunda Guerra Mundial.

Durante a guerra, os serviços de muitos físicos, incluindo Lawrence, foram requisitados: era preciso apurar de que modo a energia podia ser libertada do núcleo e utilizada numa arma. E também o novo e gigantesco ciclotrão foi requisitado para o esforço de guerra. Entretanto, o contributo de John Lawrence consistiu em desenvolver técnicas de imagiologia que utilizavam gases radioativos para estudar o funcionamento interno do corpo humano. Trabalhando em equipa com Cornelius Tobias, um dos alunos de Ernest Lawrence, utilizou isótopos radioativos de nitrogénio, árgon,

crípton e xénon gasosos (produzidos no ciclotrão de 150 centímetros) para compreender a natureza da doença da descompressão. Isto aconteceu antes de os aviadores usarem fatos pressurizados. Hoje, o gás crípton radioativo continua a ser utilizado em hospitais para obter imagens da respiração dos doentes.



Atualmente, o lugar mais provável onde podemos encontrar um ciclotrão não é um grande laboratório, mas a cave de um hospital. Mais de 50 tipos de radioisótopos foram, entretanto, criados e são habitualmente usados em medicina. Quase todos os hospitais principais dispõem de um departamento de medicina nuclear. Existem radioisótopos que podem tratar doenças e auxiliar no diagnóstico de problemas hormonais, da corrente sanguínea ou de outras funções dos órgãos. Se alguma vez precisar de obter uma «imagem» do funcionamento da tiroide, dos ossos, do coração ou do fígado, é provável que tenha de recorrer a uma técnica desenvolvida pelos irmãos Lawrence e pela sua equipa. No mundo, entre 15 e 20 milhões destes exames são realizados todos os anos — um exame por cada cem pessoas em países desenvolvidos.

Sem a colaboração entre John e Ernest Lawrence, sem o objetivo de cindir átomos com aceleradores de partículas cada vez maiores e sem a colaboração interdisciplinar, nada disto teria acontecido. Mais tarde, Seaborg afirmou que, quando trabalhava na identificação de radioisótopos, não suspeitava da dimensão das

suas aplicações clínicas benéficas. Lawrence não tinha por certo a intenção de construir uma máquina que transformaria a medicina. John e Ernest, quando eram jovens, não tinham a intenção de trabalhar em conjunto da forma como o fizeram. Contudo, posteriormente, Lawrence e o seu laboratório seriam vistos como pioneiros da colaboração multidisciplinar e como fundadores da Era da Grande Ciência.

A inspiração que conduziu Lawrence a construir um acelerador circular abriu o caminho para energias mais elevadas do que as até então alcançadas. Durante décadas, o ciclotrão foi a máquina de eleição para os físicos nucleares. O próprio Chadwick construiu um ciclotrão na Universidade de Liverpool, recorrendo à colaboração de Lawrence e dizendo-lhe que era um dos mais belos instrumentos jamais inventados. Porém, apesar de todas as descobertas e avanços em medicina, a energia dos feixes do ciclotrão era ainda muito inferior à das partículas provenientes dos raios cósmicos e, por fim, estas belas máquinas começaram também a atingir os seus limites.

As enormes quantidades de ferro necessárias para os magnetos dificultavam cada vez mais a construção de máquinas maiores. Mesmo tendo ferro disponível, sabiam que as leis da física acabariam por travar os planos para ciclotrões cada vez maiores. A relatividade restrita de Einstein ditava que, conforme as partículas se aproximavam da velocidade da luz, continuavam a ganhar energia mas sem aumentar de velocidade. Isto significava que, com o crescimento da energia, as partículas no ciclotrão perderiam a sincronia com os impulsos dos aceleradores e estagnariam num

limite superior que rondaria algumas centenas de MeV. Era preciso mudar alguma coisa.

¹ Uma versão da Tabela Periódica desta época encontra-se em https://www.metasyntesis.com/webbook/35_pt/pt_database.php?PT_id=1017.

² Herbert Childs, *An American Genius: The Life of Ernest Orlando Lawrence, Father of the Cyclotron*, Boston, E.P. Dutton, 1968.

³ Dentro de um condutor como um tubo de metal, qualquer tensão elétrica no exterior não penetra no interior.

⁴ Childs, *An American Genius*.

⁵ *Ibid.*

⁶ M.S. Livingston e E.M. McMillan, «History of the Cyclotron», *Physics Today*, vol. 12(10), 1959. <https://doi.org/10.1063/1.3060517>.

⁷ L. Alvarez, *Ernest Orlando Lawrence: A Biographical Memoir*, Washington DC, National Academy of Sciences, 1970.

⁸ Childs, *An American Genius*.

⁹ E.O. Lawrence, «Radioactive sodium produced by deuteron bombardment», *Physical Review*, vol. 46, 1934, p. 746. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.46.746>.

¹⁰ A ética da realização de experiências em animais conheceu também uma mudança importante desde aquele tempo.

¹¹ Há pouco tempo, a utilização de cobalto-60 no domínio médico foi classificada como um fator de proliferação nuclear, além de existir o risco de uma exposição indesejada à radiação se as fontes forem acondicionadas de modo incorreto. Espera-se que a utilização diminua no futuro, visto que os aceleradores são agora a fonte preferida, como veremos no Capítulo 10.

¹² Hoje, a existência de tecnécio no espectro das estrelas constitui a prova de que os elementos pesados são criados nas estrelas, um processo conhecido como nucleossíntese estelar, o qual foi descoberto apenas no fim da década de 1950.

¹³ D.C. Hoffman, A. Ghiorso e G.T. Seaborg, «Chapter 1.2: Early Days at the Berkeley Radiation Laboratory», in *The Transuranium People: The Inside Story*, University of California, Berkeley and Lawrence Berkeley National Laboratory, 2000.

CAPÍTULO 7

A Radiação do Sincrotrão:

Uma Luz Inesperada

Em 1933, Karl Jansky, engenheiro de rádio dos Bell Labs, escrutinava o céu com «ondas curtas» ou frequências de rádio usando uma antena. Tentava apurar se havia algumas fontes de ruído que interferissem com a transmissão de sinais telefônicos pela AT&T através do Atlântico. Em vez disso, descobriu um silvo misterioso a que poeticamente chamou «ruído estelar», ondas de rádio cósmicas que eram mais fortes na direção do limite da nossa própria galáxia. Durante milénios, os seres humanos contemplaram o céu noturno sem saberem que estavam a ver apenas uma fração de tudo o que nele existe, porque os nossos olhos não conseguem ver para além do espectro visível. A descoberta de Jansky mostrou que boa parte da luz que chega do Universo não está no espectro visível, mas no espectro do rádio.

Foi uma coincidência que esta descoberta tenha acontecido na mesma época em que os físicos nucleares começavam a conhecer a natureza à sua escala ínfima. A princípio, as duas áreas — astronomia e física nuclear — não pareciam relacionadas, até que uma descoberta fortuita, usando aceleradores de partículas, criou uma ponte entre elas. O resultado não foi apenas uma maior compreensão da astrofísica, mas também instrumentos potentes,

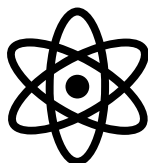
hoje utilizados em quase todos os domínios da ciência e cujos achados tiveram impacto nas nossas vidas.

De início, a descoberta das ondas de rádio cósmicas por Jansky foi ignorada pela comunidade dos astrónomos. Porém, um outro engenheiro de rádio, Grote Reber, interessou-se por ela. Reber financiou e construiu o primeiro radiotelescópio no Illinois em 1937, tendo detetado fontes intensas de ondas de rádio nas constelações do Cisne e de Cassiopeia. Com a passagem do tempo, os astrónomos começaram a prestar atenção a este novo utensílio, que conduziria a uma alteração notável da nossa visão do cosmos. Nas décadas de 1950 e 1960, a radioastronomia dava-nos uma imagem do Universo à qual estivéramos cegos. Os objetos celestes que nos rodeiam, incluindo a nossa galáxia, a Via Láctea, emitiam ondas de rádio. O astrónomo Jesse Greenstein descreveria mais tarde a alvorada da radioastronomia ao *The New York Times* como tendo «veiculado a informação que derrubou a ideia de um universo que se desenvolvia de modo racional [...] e a substituiu por um cosmos relativístico, de energia ultraelevada, com forças assustadoras, violentas e incontroláveis, como os buracos negros e os quasares. Foi uma revolução»¹.

A radioastronomia gerou muitas descobertas, tais como a realizada em 1945 pela geóloga e física Frances Elizabeth Alexander, que determinou que os sinais de rádio provinham do Sol. Em 1967, Jocelyn Bell-Burnell descobriu objetos que emitiam pulsações intensas e regulares de ondas de rádio, como se de um farol extraterrestre se tratasse, o que lhes valeu a alcunha de «homenzinhos verdes». Os pulsares, o seu verdadeiro nome, são

estrelas em rotação extremamente compactas cujos polos emitem radiação e que permitiram aos astrónomos aprender muito sobre os processos que ocorrem no final da vida de uma estrela. A descoberta dos pulsares foi considerada tão importante que seria premiada com o Nobel, mas quem o recebeu não foi Bell-Burnell — aparentemente porque, à data, era ainda uma estudante de doutoramento. O prémio foi para o seu orientador, Antony Hewish².

Hoje, muito do que sabemos sobre cosmologia, buracos negros, supernovas e outros objetos espetaculares do Universo resulta de décadas de trabalho em radioastronomia, mas na década de 1940 uma grande pergunta persistia sem resposta: *como* é que estes objetos espaciais, desde os pulsares até à nossa Via Láctea, emitiam ondas de rádio? A resposta chegaria da Terra, dos físicos que construía aceleradores para penetrar no átomo.



No princípio da década de 1940, um novo tipo de acelerador de partículas entrou em cena, tendo ficado conhecido por «betatrão»³. O sufixo «trão» significa instrumento, ao passo que a radiação «beta» é formada por eletrões de energia elevada, exatamente aquilo que os cientistas queriam produzir de modo artificial com a nova máquina.

Por que não utilizar simplesmente um ciclotrão? Sucede que os ciclotrões são excelentes para acelerar prótons e deutérios, mas

não para acelerar eletrões. O ciclotrão, como vimos no último capítulo, é uma máquina que se baseia num campo magnético, que faz as partículas descreverem trajetórias circulares, e num campo elétrico oscilante, que aumenta a velocidade dessas partículas. Por serem os membros mais leves do mundo das partículas, os eletrões podem alcançar facilmente velocidades próximas da velocidade da luz e a relatividade determina que, embora os eletrões ganhem mais energia a essas velocidades, não se tornam mais velozes. Isto significa que o campo elétrico oscilante em ação nos «dês» do ciclotrão perde a sincronia com os eletrões e começa de facto a desacelerá-los. Os físicos, em busca de eletrões de energia elevada para gerar raios X ou realizar experiências de dispersão, estavam num beco sem saída. A ideia do betatrão mostrava, como Lawrence gostava de dizer, que havia «mais do que uma maneira de esfolar um gato».

Os betatrões foram concebidos para trabalhar de uma maneira muito diferente da dos ciclotrões. Utilizam o princípio da indução magnética: ou seja, recorrem à ideia de que um campo magnético variável induz uma corrente elétrica num fio circular, da mesma maneira que uma placa de indução na cozinha gera uma corrente que aquece uma frigideira. Um feixe de eletrões que se desloca em círculo pode comportar-se como se estivesse num arame ou numa frigideira — por isso, colocar eletrões num campo magnético variável pode conferir energia ao feixe, controlando-o e concentrando-o em simultâneo, sem que o *timing* das tensões oscilantes constitua um problema. Na realidade, esta ideia era igual à que o jovem Ernest Walton apresentara a Rutherford no fim da década de 1920. Mas as tentativas de Walton para construir um

aparelho funcional fracassaram, o que explica em parte a razão de ter acabado por construir um acelerador, em conjunto com John Cockcroft⁴. Ainda que as suas experiências iniciais tenham falhado, Walton forneceu contributos essenciais para os fundamentos teóricos desta máquina, entre os quais a forma de obrigar as partículas a permanecerem na órbita desejada. Na verdade, isto é mais difícil de conseguir do que se possa pensar.

Num acelerador circular, o objetivo é manter as partículas numa órbita perfeita segundo uma trajetória anelar que prossegue incessantemente no interior de um tubo circular, a que se chama «dónute»⁵. Quando se trabalha com um feixe de partículas real, temos de pensar nas partículas não individualmente, mas como um conjunto de partículas independentes, cada uma das quais nunca está exatamente no meio do tubo. Em vez disso, cada partícula segue uma trajetória própria que não corresponde por completo à órbita ideal. Walton tinha razão em preocupar-se, visto que, conforme as partículas iam sendo aceleradas, era preciso «empurrá-las» constantemente para o centro do tubo, para não se dispersarem e perderem. Realizou cálculos pormenorizados sobre a forma de o conseguir, a qual passava por modelar o campo magnético para que diminuísse lentamente à medida que aumentava o raio, de modo que o campo formasse uma protuberância em redor do contorno exterior do tubo. Percebeu que esta montagem concentrava as partículas e garantia que eram sempre reconduzidas à órbita ideal⁶.

Em 1940, o primeiro betatrão operacional foi finalmente concretizado por Donald Kerst nos Estados Unidos, e a nova

máquina depressa se transformou numa tecnologia promissora para acelerar elétrons até cerca de 99,99 por cento da velocidade da luz. Agora que os elétrons podiam ser acelerados, não tardou a ser encontrada uma aplicação para eles, não apenas em ciência, mas também no mundo quotidiano. Em concreto, havia um mercado crescente para os aceleradores de partículas na medicina e na indústria. Em 1944, o físico Herb Pollock chefiou uma equipa no laboratório de investigação da General Electric (GE) em Schenectady, Nova Iorque, que construiu um betatrão que atingia valores de energia de 100 MeV. A frente estriada da máquina de ferro com 130 toneladas elevava-se bem acima das cabeças dos físicos, assemelhando-se mais a um vaso de guerra do que a um aparelho médico, com a etiqueta «General Electric» presa por rebites ao magneto. Um intervalo no ferro, aproximadamente à altura das cabeças, abria espaço para o recipiente de vácuo em forma de anel. Em funcionamento, a máquina fazia um zunido ensurdecador quando as grandes correntes elétricas rodopiavam pelas bobinas do eletromagneto, acelerando os feixes de zero a 100 MeV sessenta vezes por segundo.

O diretor do laboratório de investigação da GE, o físico e engenheiro William Coolidge, planeava utilizar o betatrão para obter raios X de energia elevada mediante o disparo de elétrons de 100 MeV contra um alvo, o que criava um tubo de super-raios X que conseguiam atravessar corpos ou objetos industriais e zerar imagens, algo impossível para raios X de energia mais baixa. Coolidge esperava conseguir comercializar o aparelho, o que permitiria à equipa construir betatrões cada vez maiores à medida que o mercado crescesse. E o melhor era que não anteviam limites

para a energia dos elétrons capaz de ser alcançada com aquele aparelho.

No entanto, quando já se tinham habituado a operar a máquina, John Blewett, um físico de outra equipa da GE, tomou conhecimento de uma teoria que parecia suscitar um problema. Na União Soviética, Dmitri Ivanenko e Isaak Pomeranchuk tinham referido, numa carta à *Physical Review*, que havia um problema com a aceleração de elétrons numa máquina circular. Se aplicarmos o princípio de conservação da quantidade de movimento a uma partícula carregada que é obrigada a descrever uma curva, verificamos que esta curvatura força as partículas a emitir radiação⁷. Blewett repetiu os cálculos e percebeu que os russos tinham razão.

Para o betatrão de 100 MeV, previa-se que o efeito fosse pequeno. A energia perdida era de apenas 10 eV por revolução, pelo que a energia final da máquina seria 99 MeV, em vez de 100 MeV. Não era importante. Mas os cálculos previam que, de cada vez que a energia do elétron duplicasse, a perda de energia aumentaria 16 vezes. Se quisessem criar betatrões maiores, seriam emitidas grandes quantidades de radiação conforme as partículas alcançassem energias superiores. A energia perdida seria tão grande, diziam Ivanenko e Pomeranchuk, que o mecanismo de aceleração não conseguiria prosseguir. O limite superior máximo de energia para as partículas, diziam eles, era de cerca de 500 MeV. Se isso fosse verdade, o conceito de betatrão não tardaria a tornar-se obsoleto.

Uma parte da equipa da GE tinha dúvidas de que esse efeito pudesse existir. Afinal, os eletrões deslocam-se em permanência pelos cabos e não emitem radiação. Blewett insistiu em realizar um ensaio na GE para verificar se as previsões se confirmavam. Tinham o betatrão de 100 MeV à sua disposição e era importante esclarecer aquela questão. Blewett calculou que a órbita deveria desviar-se um pouco, devido ao efeito da radiação.

Quando ligaram a máquina e efetuaram as medições, a órbita parecia de facto um pouco estranha. Porém, tratava-se de uma máquina complexa e um desvio da órbita podia acontecer por diversas razões. A prova seria a própria radiação. Dispuseram equipamento em volta da máquina para detetar o espectro de rádio das emissões, mas não encontraram nada. A questão continuava por resolver no fim de 1945, quando Ernest Lawrence fez uma das suas visitas habituais a Schenectady e desviou a atenção da equipa para um novo objetivo. Num seminário apresentou uma ideia em que a sua equipa em Berkeley estava a trabalhar. Em vez de partículas a descrever espirais no ciclotrão, propôs uma máquina com um feixe restrito a uma só órbita, onde a aceleração era proporcionada por campos elétricos de radiofrequência e a intensidade dos magnetos variava no tempo com a aceleração. A ideia fora proposta recentemente em simultâneo por Ed McMillan, colega de Lawrence em Berkeley, e por Vladimir Veksler na Rússia, e desenvolvia uma outra ideia que o australiano Mark Oliphant⁸, um dos estudantes de Rutherford, propusera alguns anos antes. Este novo conceito tornava desnecessários os magnetos gigantes dos ciclotrões e dos betatrões, mas em contrapartida funcionava segundo um princípio um pouco mais complicado: como a

velocidade das partículas mudava de órbita para órbita, a frequência da aceleração teria de variar no tempo para a acompanhar. Para funcionar, tudo teria de estar perfeitamente sincronizado, o que explicava o nome da máquina: *sincrotrão*.

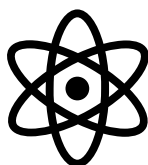
Nesta altura, os físicos da GE estariam a prestar atenção. Já dispunham de um betatrão, mas estavam preocupados com a possibilidade de a tecnologia atingir um limite superior de energia devido às perdas por radiação. A ideia do sincrotrão parecia interessante, mas de que modo resolvia o problema? De que modo o sincrotrão poderia continuar a acelerar eletrões para níveis de energia superiores se eles emitiam radiação?

McMillan e Veksler solucionaram este problema com o princípio da *estabilidade de fase*, que se baseava no *timing* dos campos de radiofrequência utilizados para acelerar o feixe, órbita a órbita. É mais fácil imaginar um conjunto de partículas carregadas num acelerador circular como um grupo de surfistas desafiando uma onda (a tensão elétrica). Se um surfista mais lento precisar de acelerar, pode subir a onda, onde a curvatura é mais inclinada; se precisar de desacelerar, pode deslocar-se para a base da onda. Ajustando corretamente o *timing* em relação à onda de tensão proporcionada pelos campos de radiofrequência, as partículas da frente (mais rápidas) experimentam uma tensão mais baixa do que as partículas de trás (mais lentas) e permanecem agrupadas.

Isto mantém as partículas não apenas agrupadas e em boa aceleração, mas McMillan afirmava que também poderia ultrapassar qualquer perda de energia por radiação; ou seja: seria como surfar

contra um vento frontal — todos os surfistas precisariam de subir um pouco na onda para continuar, mas poderiam fazê-lo desde que a onda fosse suficientemente grande⁹. Em consequência, o sincrotrão poderia exceder o limite de energia de 500 MeV previsto por Ivanenko e Pomeranchuk.

O interesse de Lawrence era evidente, visto que a ideia do sincrotrão parecia expansível para uma energia quase ilimitada, ao contrário do ciclotrão por ele inventado. Estava decidido a construir um sincrotrão para atingir energias elevadas e também para evitar o consumo das quantidades crescentes de ferro necessárias aos ciclotrões. Contudo, à maneira característica de Lawrence, ainda não construía qualquer sincrotrão, mas falava acerca dele a toda a gente, enquanto McMillan e ele próprio delineavam o projeto. Para os físicos da GE, o seu seminário clarificou subitamente duas questões. Primeira, o reinado do betatrão podia ser ainda mais efêmero do que se imaginava: pelo contrário, no sincrotrão parecia estar a solução para obter eletrões de energia superelevada. Segunda, podiam construir um pequeno sincrotrão antes de Lawrence concluir o dele e assim demonstrar a ideia pela primeira vez ao mundo.



Os físicos da GE receberam logo autorização para construir um sincrotrão de 70 MeV e começaram a desenhar os diversos componentes. O magneto pesava oito toneladas e tinha um

intervalo de 6,25 centímetros no centro para um «dónute» de vidro com 70 centímetros de diâmetro pelo qual o feixe passava¹⁰. Conceberam um engenhoso circuito elétrico que transferia energia para o meio, elevando e diminuindo o campo magnético nos momentos certos, de modo a controlar as partículas. Entretanto, Blewett, que já não trabalhava na GE, deixara-lhes alguns cálculos que recebera do reputado físico teórico Julian Schwinger e que esclareciam mais pormenores acerca da radiação prevista por Ivanenko e Pomeranchuk.

No fim da década de 1940, Schwinger viria a partilhar o prémio Nobel com Richard Feynman e Shinichiro Tomonaga pelo desenvolvimento da eletrodinâmica quântica (QED). Os cálculos de Schwinger previam que a radiação libertada por uma trajetória circular não seria emitida em todas as direções; em vez disso, devia formar um feixe estreito, dirigido para a frente, ao longo da trajetória da partícula. Estimavam que a frequência da radiação aumentasse com a energia do eletrão. Por último, faziam notar que, para as energias a que a equipa da GE trabalhava, a radiação estender-se-ia além da gama das radiofrequências, para o domínio da luz visível.

O sincrotrão começou a funcionar em outubro de 1946¹¹, mas não tinha a estabilidade esperada. Os componentes estavam sempre a avariar e tinham de ser substituídos. Porém, eles não desistiram e, em abril de 1947, a operação corria bastante bem, com exceção de um problema: a máquina produzia faíscas. O tecnólogo Floyd Haber foi chamado para examinar o sincrotrão em funcionamento e tentar descobrir a causa do problema.

Como era perigoso permanecer junto da máquina para a observar em funcionamento, Haber arranjou um grande espelho, com 180x90 centímetros, para examinar o sincrotrão, por detrás de uma grossa parede de betão. Depois de os cientistas forçarem os limites da máquina, Haber informou que via faíscas e pediu-lhes que a desligassem. Em regra, se existem faíscas, o nível de vácuo — a pressão no «dónute» — varia com rapidez, mas este caso era diferente: o nível de vácuo permanecia estável. Um dos físicos, Robert Langmuir, juntou-se à observação, e os dois viram um pequeno e muito brilhante ponto azulado que provinha do sincrotrão.

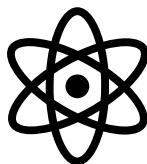
Langmuir percebeu de imediato do que se tratava. Pediu-lhes que parassem de acelerar o feixe e a luz desapareceu. Tinha de ser a «radiação de Schwinger». Espantada pelo facto de o feixe de eletrões produzir luz visível, a equipa apressou-se a verificar a previsão de que a cor da luz devia estar relacionada com a energia das partículas. Conforme diminuía a energia, observaram — por certo, com uma mescla de satisfação e descrença — que a cor do ponto de luz passava de azul a amarelo, de amarelo a vermelho, após o que desaparecia por completo. Todo o fenómeno, como recordaria mais tarde um membro da equipa, demorou cerca de 30 minutos¹². Por mero acaso, a nova câmara de vácuo era de vidro, pelo que era possível observar a luz que provinha da máquina, resultante dos eletrões em circulação. Três anos antes, não tinham conseguido detetar o efeito no betatrão, porque a câmara metálica bloqueava a passagem da luz. Foi um daqueles raros momentos de serendipidade, cujo impacto se revelaria fundamental.

A luz emitida desta maneira chama-se *radiação do sincrotrão* e possui propriedades muito específicas. Pode ser incrivelmente intensa, é coerente (mais parecida com o laser do que com a luz de uma lâmpada) e pode englobar todo o espectro eletromagnético, desde os raios X, passando pela luz visível, até aos infravermelhos, dependendo do campo magnético e da energia dos elétrons. A luz é também polarizada, ou seja, todas as oscilações das ondas luminosas ocorrem na mesma direção. A luz pode polarizar-se de muitas formas, por exemplo, quando é refletida pela água ou pelo capô de um automóvel, casos em que a polarização acontece sobretudo na direção horizontal. É por isso que as lentes polarizadas dos óculos de sol bloqueiam o brilho, deixando passar apenas as ondas luminosas que oscilam na vertical¹³. Quando a luz emerge do sincrotrão, está polarizada numa direção que decorre da curvatura dos elétrons: para um feixe que circula num acelerador, sai polarizada na horizontal. As suas propriedades são tão peculiares que podemos fazer medições para determinar o momento em que é produzida: se medirmos luz com as propriedades certas podemos deduzir que proveio com grande probabilidade de elétrons cuja trajetória foi encurvada por campos magnéticos.

Este *insight* revelou-se crucial para solucionar as questões dos astrónomos acerca da origem das emissões de ondas de rádio no espaço exterior. A Via Láctea, os pulsares e muitos outros objetos não são apenas bolas de gás e poeira: possuem também campos magnéticos. Quando as trajetórias das partículas carregadas são encurvadas por esses campos, elas emitem radiação do sincrotrão, tal como no acelerador, que ilumina o Universo, normalmente no espectro das ondas de rádio. Os astrónomos podem verificar se as

emissões são polarizadas e, desse modo, deduzir a estrutura magnética — a localização e a força dos campos magnéticos — dos objetos espaciais.

O desenvolvimento da radioastronomia nas décadas de 1950 e 1960 revelou que os campos magnéticos são muito mais comuns do que antes se supusera. Um exemplo espetacular é o da nebulosa do Caranguejo, o vestígio de uma supernova cataclísmica do ano de 1054 na constelação do Touro, que possui uma nuvem energética de elétrons a descrever espirais segundo as linhas do campo magnético gerado por um pulsar existente no seu centro. Sabemos agora que estrelas, galáxias, estrelas de neutrões e supernovas apresentam campos magnéticos. O magnetismo poderá também explicar o comportamento dos objetos espaciais mais estranhos, tais como os enormes jatos de matéria ionizada lançados por buracos negros supermaciços, que se pensa serem causados por partículas aceleradas nos campos magnéticos entrelaçados no centro destes objetos densos e compactos. Compreendendo a radiação do sincrotrão, os astrónomos puderam utilizar as emissões de rádio que detetavam no espaço para ficar a saber mais sobre objetos como estes e revelar as propriedades magnéticas do nosso Universo.



Na GE, a luz começou por ser uma curiosidade, que os físicos exibiam a todos os visitantes. Depois, perceberam que podiam usar

a luz para ajustarem, otimizarem e controlarem o sincrotrão, o que os ajudou a desenhar as próximas máquinas que iriam comercializar. Ao longo dos anos seguintes, construíram-se sincrotrões para energias mais elevadas em todo o mundo e depressa se tornou evidente que o potencial da luz do sincrotrão não se limitava ao diagnóstico do feixe de eletrões. Donald Kerst, o inventor do betatrão, descreveu-o de modo apropriado: «Não seria interessante se o maior contributo para a ciência destas belas e sofisticadas máquinas fosse como lâmpadas?»¹⁴ Sob muitas formas, a irónica previsão de Kerst era exata. Assim que pôde ser produzida no laboratório, a luz do sincrotrão tornar-se-ia um utensílio imbatível na investigação científica, desde a química e a biologia até à ciência dos materiais e à arqueologia.

Em 1956, os primeiros cientistas a tentar utilizar a radiação do sincrotrão foram os da Universidade de Cornell. Cinco anos depois, seriam imitados pelos cientistas do National Bureau of Standards dos Estados Unidos — a entidade que define e normaliza as unidades que facilitam o trabalho em domínios como a rádio, a indústria automóvel e a eletrónica. Estes ensaios confirmaram que a luz do sincrotrão era muito superior a qualquer outra fonte de luz ou tubo de raios X padronizados. Outros cientistas apressaram-se a adaptar os sincrotrões existentes, de maneira a permitir aos utilizadores o acesso à luz para a realização de experiências. De início, estes utilizadores secundários eram obrigados a competir pelo tempo e pelo espaço nas instalações de física nuclear, mas em 1970 foi construída a primeira instalação dedicada ao utilizador: o Synchrotron Radiation Source (SRS), no Laboratório Daresbury, no Reino Unido. Governos de todo o mundo financiaram a construção

de aceleradores de partículas, não para o estudo da física da cisão do átomo, mas para corresponder à procura de uma grande variedade de utilizadores científicos e comerciais. Em 1974, havia mais de dez instalações de sincrotrões à escala mundial, projetadas e construídas especificamente para criar a luz do sincrotrão.

Esta permite obter imagens mediante a colocação das amostras sob a luz, a jusante de uma janela ou porta da câmara de vácuo, e registar o resultado, originariamente em chapas fotográficas, como se fazia na década de 1970, e hoje com detetores digitais. As amostras em estudo podem ser muitíssimo diversificadas: por exemplo, chocolate, aço ou até pedaços de pepino-do-mar.

Um domínio que beneficiou talvez mais do que qualquer outro da luz do sincrotrão é a biologia estrutural. A biologia, como se veio a descobrir, depende em última análise de estruturas físicas à escala microscópica: do modo como as proteínas se dobram, da forma como as doenças se instalam e até da própria estrutura do ADN. Como explicou o biólogo David Stuart, professor em Oxford, numa entrevista ao Nuffield Department of Medicine, os biólogos estruturais procuram compreender a biologia com grande pormenor, do mesmo modo que quem quer perceber como funciona um automóvel tem de estudar cada peça individual, a maneira como ela se liga às outras peças e como todas trabalham em conjunto como uma máquina. Porém, a biologia é mais complexa do que um automóvel. Organismos como os nossos são compostos por muitos milhões de células, as quais apresentam uma variedade notável de componentes internos, que funcionam a nanoescalas. Quando compreendermos o modo como a biologia funciona a estas escalas,

saberemos como intervir de uma maneira muito precisa quando algo corre mal.

O nosso conhecimento atual da biologia estrutural assenta na verdadeira joia da coroa das técnicas de imagiologia, chamada cristalografia de raios X. Utilizada muito antes da existência das fontes de luz do sincrotrão, valeu àqueles que a investigaram nada menos do que 28 prémios Nobel. Começou em 1913, com os físicos britânico-australianos William e Lawrence Bragg, pai e filho, na Universidade de Adelaide, os quais dispararam raios X contra um cristal de sal. O belo padrão de difração que obtiveram revelou-lhes a estrutura do próprio cristal, inclusive ao nível atómico¹⁵. Na sua esteira, os cientistas aperfeiçoaram esta técnica e decifraram a estrutura de quase todas as moléculas e materiais importantes. Em 1929, Kathleen Lonsdale (colega de William Bragg) utilizou a cristalografia de raios X para descobrir que a molécula de benzeno é um anel plano, enquanto Dorothy Hodgkin decifrou a penicilina (1949), a vitamina B12 (1955) — uma proeza que lhe valeu o prémio Nobel em 1964 — e a insulina (1969). Só a pesquisa da insulina demorou 34 anos. Em 1952, Rosalind Franklin recorreu à cristalografia de raios X para produzir a famosa Fotografia 51, que mostrava que a estrutura do ADN era uma hélice dupla. As estruturas da grafite, do grafeno, da hemoglobina e da mioglobina, entre muitas outras, foram determinadas desta maneira, usando apenas tubos de raios X convencionais. Porém, com o advento das fontes de luz do sincrotrão, a cristalografia tornou-se muito mais potente e assim continua.

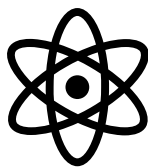
Os sincrotrões permitiram progressos enormes da ciência fundamental. Recorrendo à cristalografia, Sir John Walker e outros deduziram a estrutura da adenosina trifosfato (ATP), a molécula que transporta e armazena a energia em toda a vida vegetal e animal, incluindo a humana. Roger Kornberg apurou que os genes se replicam a si próprios usando o mRNA, e Venki Ramakrishnan e os seus colegas desvendaram a estrutura do ribossoma. Todas estas descobertas foram premiadas com o Nobel. De notar que nenhum destes avanços aconteceu na física nuclear ou de partículas, os domínios que conduziram à feliz descoberta accidental da radiação do sincrotrão.

A princípio, este acréscimo de saber científico parecia bastante distante da vida quotidiana, até se perceber que o nosso conhecimento da biologia essencial dos vírus depende também da cristalografia de raios X. A importância desta técnica tornou-se evidente quando a COVID-19 fez a sua aparição em Wuhan, na China, no final de 2019. Dentro do vírus SARS-COV-2 existem 28 proteínas. Estas proteínas são cadeias de moléculas que se enrolam sobre si próprias de maneiras muito precisas — imagine um novelo de lã que foi intencionalmente emaranhado. Este processo de enovelamento cria os chamados «sítios ativos», que podem interagir com compostos químicos. No seu estudo, os biólogos estruturais conseguem replicar estas proteínas utilizando a sua estrutura genética para as clonarem. Mas, em primeiro lugar, alguém tem de sequenciar o código genético do vírus.

Depois do aparecimento do vírus na China em 29 de dezembro, foram precisos apenas 12 dias para ficarem disponíveis seis

sequências do vírus. Em 5 de fevereiro de 2020, a equipa de Zihe Rao e Haitao Yang na Shanghai Tech depositou a primeira estrutura da protéase principal (uma protéase quebra as proteínas, mas é também essencial para a replicação viral e um alvo interessante para a descoberta de medicamentos) no Protein Data Bank, o repositório online que os cientistas de todo o mundo usam como base central de dados. Para decifrarem a estrutura, utilizaram a Shanghai Synchrotron Radiation Facility. Nesse momento, a equipa já partilhara a informação de modo proativo com mais de 300 grupos de investigadores a nível global.

Antes de a maior parte dos governos tomar qualquer medida, os biólogos estruturais trabalharam arduamente com as fontes de luz do sincrotrão de todo o mundo, criando e estudando as estruturas físicas das proteínas que compõem o SARS-COV-2. Isto por saberem que, para um medicamento ou uma vacina serem eficazes contra um vírus, o corpo humano tem de produzir moléculas que reconhecem fisicamente, se ligam e depois neutralizam e eliminam o patógeno indesejável. Qualquer opção de tratamento ou vacina tem o mesmo ponto de partida: é preciso saber como funciona o vírus. A chave para esse conhecimento reside na estrutura e no funcionamento do vírus. Logo que compreendamos a base química para o reconhecimento de um vírus pelo corpo podemos tentar sintetizar um medicamento que reduza os seus efeitos ou uma vacina que induza o corpo humano a criar anticorpos. Talvez de modo contraintuitivo, uma das principais batalhas da linha da frente contra a pandemia de COVID foi travada, não em hospitais, mas nos edifícios em forma de anel, do tamanho de um campo de futebol, que albergam máquinas oriundas da física de partículas.



A Dra. Eleanor Campbell trabalha como *beamline scientist*, uma especialista que conduz experiências com a luz do sincrotrão e ajuda outros cientistas a fazerem o mesmo, no Sincrotrão Australiano, a meia hora de viagem de Melbourne. Enquanto toda a gente que Campbell conhecia recebeu ordens para trabalhar em casa quando a pandemia se abateu, ela foi dos poucos cientistas cujo trabalho se intensificou no sincrotrão. Campbell cuida de uma *beamline* [«linha de feixe»] chamada «MX-2», utilizada para «cristalografia macromolecular», que permite aos cientistas compreenderem a disposição e as formas de moléculas biológicas ao nível atómico. Em tempos normais, os utilizadores da sua *beamline* trabalham em química, física da matéria condensada, engenharia e ciências da Terra e dos materiais. O início de 2020 foi inteiramente dedicado a estudos relacionados com a COVID.

A *beamline* recebe luz do sincrotrão vinda do cerne das instalações, do próprio sincrotrão, escondido atrás das grandes paredes do escudo de betão. O anel principal é composto por uma montagem de múltiplos eletromagnetos — blocos de ferro com cerca de um metro de altura, ligados a grossos cabos de cobre — que recebem eletrões de energia elevada (3 GeV) de um acelerador mais pequeno. Uma equipa de operacionais especializados trabalha por turnos para garantir o funcionamento contínuo. Os eletrões no interior do sincrotrão podem ser mantidos a circular e a emitir luz ao longo de dias ou semanas, bombeando radiação enquanto a

energia vai sendo sempre reposta. Quando um punhado de elétrons é removido e «despejado» da máquina, logo outro toma o seu lugar, pelo que quase não há uma pausa no fornecimento de radiação aos utilizadores¹⁶.

Tangentes à circunferência do anel, encontramos uma série de estações experimentais: as *beamlines*. A sua localização é ditada pelos «dispositivos de inserção» colocados em volta do anel para gerar a luz do sincrotrão. Hoje, em vez de se usar apenas a radiação emitida de forma natural pelos magnetos, há «dispositivos de inserção», chamados *wigglers* e *onduladores*, que contorcem literalmente o feixe, produzindo outros feixes que podem ser afinados para um comprimento de onda específico. A luz viaja então através de uma janela ou porta que abre para a *beamline*, onde os utilizadores científicos montam as suas experiências, colocam os cristais de proteínas no porta-amostras e se preparam para registar a informação.

A primeira etapa é transformar com sucesso uma proteína num cristal, uma das partes mais difíceis do trabalho. As moléculas biológicas são grandes e dobráveis — ou seja, moles —, ao passo que aquilo que conhecemos por cristais, como o sal, costuma ser rígido. O trabalho de Campbell passa por convencer «uma mistura de matéria biológica a formar um cristal ordenado e rígido». É um método por tentativas que envolve o ensaio de numerosos reagentes — começando pelos químicos que deram provas no passado —, em quantidades precisas, até que uma delas produz o efeito desejado. Se um cientista for afortunado o suficiente e as proteínas formarem cristais, ainda precisará de «pescar» os

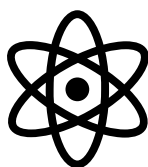
minúsculos cristais, da ordem do micrómetro, com laços miniaturais de nylon. Trata-se de um trabalho manual, que requer uma paciência extrema. Assim que os cristais ficam prontos para o estudo, os grupos de investigação convocam todos os seus membros: revezam-se 24 horas por dia, a fim de aproveitarem ao máximo o breve período de acesso ao feixe. Contudo, durante a pandemia, muitas equipas de investigação foram obrigadas a trabalhar à distância, enquanto Campbell e os seus colegas geriam o sistema das amostras no local.

Campbell sabe o que é conduzir uma experiência à distância num aparelho daqueles. Durante as experiências para o seu doutoramento na Universidade de Cambridge, sentava-se à frente de um computador no seu laboratório enquanto as amostras de cristais que preparara com todo o cuidado eram colocadas no feixe por uma pessoa que se encontrava junto à fonte de luz do sincrotrão no Reino Unido, conhecida por Diamond. Quando clicava em «refrescar», uma nova forma de estrutura proteica surgia no ecrã. Embora o seu conhecimento sobre proteínas aumentasse, não podia ver a geometria real de toda a experiência. E agora estava no outro membro da equação, auxiliando utilizadores remotos na realização de experiências para descobrir tudo sobre o vírus da COVID.

Para os biólogos com os quais Campbell trabalha, as instalações distantes e as noites valem a pena. Sem um sincrotrão, teriam de passar dias a fio com uma fonte de raios X no laboratório, demorando cerca de 40 minutos para cada ângulo da imagem (a cristalografia implica obter imagens ao longo de 180 graus, reunir os padrões de difração e reconstruir a estrutura 3D por meios

matemáticos). Na *beamline* MX-2, dirigida por Campbell, uma experiência para recolher dados em 180 graus demora apenas 18 segundos. Por isso, se alguém quiser ensaiar uma série de amostras, por exemplo, 50 variantes ligeiramente diferentes de uma proteína, uma tarefa que outrora ocuparia todo um doutoramento, pode agora consegui-lo em poucas horas na *beamline*. Em muitos casos, as propriedades exclusivas da luz do sincrotrão permitem a realização de experiências que seriam impossíveis no passado. Sem os sincrotrões, os biólogos teriam levado anos a decifrar as estruturas do SARS-COV-2.

À escala mundial, em instalações como esta, os cientistas uniram-se com o mesmo objetivo primordial: obter mapas à escala atômica do maior número possível de proteínas que compõem o SARS-COV-2. Em tempos mais calmos, os investigadores recorreram a instalações como esta para criar imagens e decifrar as estruturas de muitas moléculas biológicas cruciais, que conduziram a novos tratamentos para a sida, o cancro cutâneo, a diabetes tipo 2, a leucemia e a gripe sazonal, bem como a progressos contra os vírus do ébola, zika e SARS. É por isso que as cerca de 50 fontes de luz do sincrotrão à escala mundial fazem parte da nossa linha da frente na defesa contra as novas doenças virais.



Quando a primeira dessas fontes de luz específicas do sincrotrão, a SRS de Daresbury, encerrou em 2008, foi conduzido um estudo

entre os 11 mil utilizadores científicos ao longo do seu tempo de vida. Este identificou milhares de descobertas que tiveram efeitos, diretos e indiretos, sobre as nossas vidas. Novos materiais para o vestuário e a eletrónica, novos fármacos e novos detergentes são apenas alguns dos produtos que emergiram dos estudos desenvolvidos nesta instalação concreta. É difícil ter uma noção do vasto alcance das utilizações de uma instalação como esta, mas, quando ela encerrou, 11 das 25 principais empresas de Investigação e Desenvolvimento (I&D) do Reino Unido haviam-na utilizado.

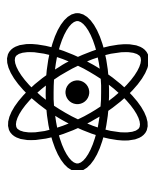
O SRS foi usado para revelar a estrutura da febre aftosa, o que permitiu o desenvolvimento de novas vacinas, e para a compreensão de um fenómeno chamado «magnetorresistência gigante», que explica a vasta capacidade de armazenamento dos nossos aparelhos eletrónicos, como os iPhones. A pesquisa no SRS contribuiu para combustíveis mais limpos e para uma série de novos medicamentos. O seu contributo estendeu-se ao domínio do património cultural, quando foi utilizado no estudo de amostras do *Mary Rose*, um vaso de guerra da época Tudor, tendo em vista o desenvolvimento de melhores processos de conservação dos vestígios. Outro estudo realizado pela Cadbury — o fabricante de chocolate — recorreu à luz do sincrotrão para analisar a formação de cristais no chocolate, com o intuito de tornar o seu paladar ainda mais delicioso. Uma técnica semelhante foi utilizada no estudo da formação de cristais nos metais e na melhoria da segurança das aeronaves.

As descobertas notáveis são o dia a dia destas instalações, onde os avanços científicos se sucedem a um ritmo difícil de acompanhar. A história da luz do sincrotrão mostra-nos a dimensão do poder dos utensílios da física para transformar outros sectores da ciência. Recorda-nos que as diversas áreas do saber são inseparáveis, desde as que se debruçam sobre os objetos mais pequenos da natureza até às que estudam os maiores deles e todos os demais. Campbell afirma que quando entra todos os dias naquele grande edifício se sente pequenina: por vezes reconhece que é deveras avassalador pensar em toda a complexidade dos sincrotrões. Por certo a equipa de físicos dos aceleradores diria o mesmo acerca do trabalho dela. É por isso que tantos progressos científicos modernos são obrigatoriamente interdisciplinares: nenhum indivíduo sozinho consegue dominar toda a instalação. Porém, recorrendo a este produto da investigação física, cientistas como Campbell e os seus predecessores criam conhecimento cujo alcance é muito superior ao que os físicos da General Electric, Lawrence, Kerst ou Oliphant jamais poderiam antever.

Como vimos, este conhecimento estende-se para além da biologia e mesmo da Terra. Compreender a ciência elementar da radiação do sincrotrão permitiu desenvolver um utensílio valioso para a astronomia. Permitiu que os astrónomos vissem os objetos espaciais sob uma luz inteiramente nova, que revela o funcionamento interno de tudo, desde as galáxias até aos quasares e buracos negros, visto que todos eles emitem luz do sincrotrão sob a forma de ondas de rádio. Hoje, os radioastrónomos estudam o comportamento complexo de campos magnéticos gerados em regiões extremas do Universo, tais como as observações recentes

de «emissões bruscas de rádio»: pulsações de ondas de rádio, extremamente potentes e com a duração de um milissegundo, que sugerem novos processos de energia elevada, que ainda não compreendemos por completo. Entretanto, os cosmólogos investigam a existência de magnetismo em regiões longínquas do cosmos, o qual poderia explicar a inflação rápida do Universo primitivo. Na radiação do sincrotrão, os físicos têm uma ferramenta que os une no esforço de compreender a física quer do muito grande, quer do muito pequeno.

Tudo isto é possível porque os princípios da física se aplicam não apenas na Terra, mas, ao que sabemos, em todo o lado. A mesma física que nos permite desvendar os mistérios das paragens remotas do Universo deixa-nos decifrar o funcionamento íntimo da nossa biologia e intervir quando surge algum problema. Não há uma razão específica para o Universo funcionar deste modo, mas é profunda e tremendamente fascinante que assim aconteça.



Todavia, a radiação do sincrotrão, que se tornou uma ferramenta incrível para os astrónomos e outros cientistas, revelou-se uma barreira gigantesca para os físicos de partículas. O objetivo destes era fornecer às partículas energias cada vez mais elevadas para que elas conseguissem cindir os átomos, mas agora enfrentavam o facto de as mesmas partículas perderem energia quando eles procuravam torná-las mais velozes. Precisavam de dar às partículas

ainda mais energia para compensar a que perdiam enquanto giravam na máquina. Não tardaria muito para que se atingisse o limite prático de energia que era possível fornecer às partículas — ou, pelo menos, a alguns tipos delas.

A fórmula da radiação previa que a aceleração de partículas com massa reduzida, como os elétrons, até uma energia elevada constituía um problema, mas também que a energia da radiação emitida seria muito inferior para partículas mais pesadas. Um próton é quase duas mil vezes mais pesado do que um elétron, mas, espantosamente, emitiria 10^{13} vezes menos radiação do que os elétrons¹⁷. Em contrapartida, a tarefa de curvar a trajetória dos prótons de alta energia num acelerador circular requeria ou magnetos muito fortes ou um anel bem maior do que os aceleradores de elétrons que cabiam numa sala. Como os físicos estavam decididos a acelerar elétrons até energias muito elevadas, aquela limitação tinha uma consequência inevitável: os aceleradores de partículas construídos na segunda metade do século XX não iriam parar de crescer.

Os físicos precisavam de juntar esforços e reunir equipas de engenheiros, analistas de dados, gestores e outros especialistas que soubessem construir e manusear máquinas de grandes dimensões. Eles foram algumas das primeiras pessoas a adotar a tecnologia da computação e a criar formas de visualização das partículas, sempre com o intuito de alargar os limites do possível. Ao longo do tempo, a sua pesquisa revelaria a existência de muito mais partículas do que se supunha. Centenas de investigadores tentavam responder à pergunta: existirá uma ordem subjacente à

natureza? Conseguiremos prever e classificar as muitas e diferentes partículas, ou será a realidade tão-só uma espécie de caos controlável?

¹ Disponível online em <https://www.nytimes.com/1998/06/09/nyregion/commemorating-a-discovery-in-radio-astronomy.html>.

² Bell-Burnell é hoje uma professora bem conhecida e uma defensora da diversidade na ciência. Em 2018 doou os três milhões de dólares do Breakthrough Prize ao financiamento de bolsas de estudo para aumentar a diversidade na física.

³ O departamento de Física da Universidade de Illinois lançou um concurso para lhe dar um nome e das propostas fazia parte um nome alemão com 64 letras que, felizmente, não saiu vencedor: *usserordenilichehochgeschwindigkeitselektronenentwickelndesschwerarbeitsbeigollitron*, que se traduz como «Trabalho árduo de máquina golly para gerar elétrons com velocidade extraordinariamente elevada».

⁴ Rolf Wideroe propôs também um conceito semelhante.

⁵ Na realidade, o recipiente de vácuo é conhecido pelos peritos como «dónute».

⁶ Hoje continuamos a chamar oscilações de betatrão às oscilações características das partículas nos aceleradores.

⁷ Os físicos teóricos aperceberam-se deste efeito logo em 1897 e utilizaram-no nas primeiras tentativas de descrever a maneira como se esperava que os elétrons perdessem energia e descrevessem uma queda em espiral no núcleo, no modelo atômico de Rutherford. Contudo, muitos físicos deixaram de o considerar depois de Bohr explicar a estabilidade do átomo com recurso à mecânica quântica, o que tornou o problema irrelevante para a compreensão do átomo. Na década de 1940, com o aparecimento do betatrão, as energias alcançadas pelos elétrons eram suficientes para que o efeito constituísse um problema.

⁸ Alguns anos depois, Ed McMillan publicou uma teoria completa do sincrotrão e, apesar de conhecer a ideia de Oliphant, não fez uma única referência ou citação do trabalho deste.

⁹ Esta analogia do surfista com vento frontal pertence ao meu ex-colega da RAL, o Dr. Stephen Brooks, que trabalha hoje no Brookhaven National Laboratory.

¹⁰ O magneto era formado pela união de numerosas peças planas ou «laminações», como se fosse um bolo de metal cortado em fatias extremamente finas. Este método de segmentação do magneto é útil quando se acelera e desacelera de maneira rápida, pois faz com que as correntes elétricas em «turbilhão» não fluam desordenadamente no aço.

¹¹ Tinham perdido a corrida um mês antes para dois físicos britânicos, F. K. Goward e D. E. Barnes, que transformaram um pequeno betatrão em Woolwich Arsenal num sincrotrão de elétrons de 8 MeV.

¹² H. Pollock, «The discovery of synchrotron radiation», *American Journal of Physics*, vol. 51, 1983. <https://doi.org/10.1119/1.13289>.

¹³ Para saber se os seus óculos de sol são polarizados, segure-os num ângulo de 90 graus em relação a uns óculos polarizados numa loja e olhe através das lentes: se vir escuridão completa, são polarizados. Rode-os para 0 graus e deixarão passar novamente a luz.

¹⁴ M. L. Perlman *et al.*, «Synchrotron radiation: Light fantastic», *Physics Today*, vol. 27, 1974. <https://doi.org/10.1063/1.3128691>.

¹⁵ Em 1915, passados apenas dois anos, este trabalho valeu-lhes o prémio Nobel.

¹⁶ O feixe de elétrons tem um «tempo de vida» limitado devido a numerosos efeitos, que conduzem à perda gradual dos elétrons: dispersão dos elétrons causada pela minúscula porção de gás deixada no vácuo; dispersão dos elétrons causada por colisões entre eles; e excitações quânticas. Recordemos que os elétrons emitem quanta de luz — fotões — e que cada elétron emite cerca de cem fotões por cada giro no sincrotrão. Este efeito quantizado provoca «ressaltos» súbitos que afetam os elétrons e causa a difusão do feixe, o que reduz o seu tempo de vida no anel.

¹⁷ A potência da radiação emitida é proporcional à quarta potência da massa da partícula, ou seja, a massa duas vezes ao quadrado.

PARTE TRÊS

O Modelo Padrão e Mais Além

«A verdade não é para todos os homens, mas apenas para os que a procuram.»

Ayn Rand,
Anthem, 1938

CAPÍTULO 8

A Física de Partículas Expande-Se: As Estranhas Ressonâncias

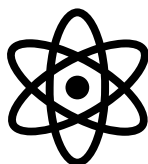
Luis Alvarez estava prestes a adormecer enquanto o avião em que viajava, chamado *Great Artiste*, se aproximava do Japão. Era a madrugada de 6 de agosto de 1945 e o físico de 34 anos estava exausto. O seu piloto seguia outra aeronave, o bombardeiro B-29 *Enola Gay*. Um terceiro avião sem nome, mais tarde designado por *Necessary Evil*, voava por perto. Ao contrário da maior parte das missões de bombardeamento da Segunda Guerra Mundial, que envolviam centenas de aviões, esta reunia apenas três: fizeram uma sortida furtiva e largaram uma só bomba sobre a cidade de Hiroxima. Não se tratava de armamento vulgar: tratava-se de *Little Boy*, uma bomba atômica cheia de urânio enriquecido.

Alvarez fizera uso do seu talento de físico para ajudar a desenvolver a *Little Boy*, uma parte do Projeto Manhattan, o supersecreto projeto sediado nos Estados Unidos, concebido com os aliados britânicos e canadenses, que construía as primeiras armas nucleares. Durante a guerra, o projeto cresceu para se tornar um empreendimento vasto que empregava cem mil pessoas, a maioria das quais não fazia a mínima ideia do objetivo do seu trabalho. Quando os chefes militares tomaram a decisão de usar as

novas armas no Japão, Alvarez¹ foi encarregado de posicionar os instrumentos que acompanhariam a descida da bomba e registariam a energia libertada na explosão. Ainda que o seu equipamento incluísse um paraquedas, Alvarez decidiu que não o utilizaria: se fossem abatidos, parecia-lhe preferível morrer a ser capturado pelos japoneses. Quando chegou o momento, a bomba foi libertada do porão e caiu durante 44 segundos antes de detonar. Uma pequena explosão interna juntou dois pedaços de urânio extremamente enriquecido que formaram uma massa crítica. Os núcleos de urânio-235 cindiram-se, libertando neutrões e gerando mais cisões. Seguiu-se uma reação em cadeia. Uma onda luminosa ofuscante encheu a aeronave de Alvarez, seguida por uma série de ondas de choque que quase desintegraram o avião. Foram precisos dez minutos para que a nuvem em forma de cogumelo ascendesse a 18 km de altitude. A seguir, Alvarez olhou para a paisagem em baixo. Estava arrasada. Mais tarde escreveria que «procurou em vão a cidade que era o nosso alvo», pensando que talvez tivessem falhado. O piloto tirou-lhe as dúvidas: o alvo, a cidade de Hiroxima, fora destruído. Oitenta mil pessoas tiveram morte instantânea.

No voo de regresso à base, quando a enorme gravidade da missão se lhe tornou evidente, Alvarez escreveu uma carta ao filho de quatro anos. Sabia que ele teria dificuldade em compreender a razão de o pai ter estado envolvido naquele acontecimento histórico. A família Alvarez tinha um legado de aventuras abundantes: o avô de Alvarez fugira de Cuba, estudara medicina na Califórnia, casara-se com a sua avó (que crescera numa missão na China) e mudara-se com a família para o Havai. O seu pai (também físico) e a sua mãe tinham passado algum tempo a trabalhar no

México antes de regressarem a São Francisco, onde Alvarez nasceu. Alto, louro, corajoso e inteligente, Alvarez escolheu a física porque sentiu que lhe podia trazer aventura. Mas o trabalho na guerra não era o tipo de aventura em que tinha pensado. Três dias depois, na ilha de Tinian, Alvarez observou a descolagem do avião que transportava uma segunda bomba, que seria largada sobre a cidade de Nagasáqui. Um dia depois, a 10 de agosto de 1945, o Japão capitulou. Alvarez não voltou a escrever sobre estes acontecimentos nos 40 anos seguintes.



Hoje, o Museu Memorial da Paz em Hiroxima narra a história do impacto devastador que as armas nucleares tiveram na cidade e explora as consequências mais vastas da sua utilização na Segunda Guerra Mundial. Para os físicos que o visitam é particularmente inquietante: um número chocante de nomes famosos aparece na descrição que o museu faz do Projeto Manhattan. Muitas das personalidades que encontramos até agora estiveram envolvidas no desenvolvimento de armas nucleares, porque eram os únicos cientistas com os conhecimentos e as capacidades necessários ao projeto. Os ciclotrões de Ernest Lawrence foram transformados para separar os isótopos do urânio e o próprio Lawrence coordenou um projeto vasto de construção de calutrons (dispositivos de separação de isótopos), baseado nos conhecimentos que a sua equipa adquirira ao construir máquinas em Berkeley. O projeto envolveu um conjunto de alunos e pessoal da equipa de Lawrence, entre os

quais Alvarez. A Seth Neddermeyer deve-se a ideia de uma implosão para reunir a massa crítica da bomba de plutônio que foi largada em Nagasáqui. Niels Bohr, James Chadwick, John Cockcroft e Mark Oliphant integraram o projeto, juntamente com muitos físicos teóricos que desempenharam um papel menos proeminente na nossa história, como o famoso Robert Oppenheimer, colega de Lawrence, que viria a chefiar o projeto.

Alguns dos físicos convidados declinaram participar no Projeto Manhattan, para se dedicarem a outros trabalhos durante a guerra. A Carl Anderson foi proposto dirigir o projeto, mas, como precisava de cuidar da sua mãe², preferiu trabalhar em foguetes de artilharia. Uma das pessoas que recusou terminantemente participar foi a física Lise Meitner, uma das poucas mulheres que na época trabalhavam neste domínio. Alcunhada «Marie Curie alemã» por Einstein, Meitner era natural de Viena. Teve de estudar física a título privado, porque as universidades públicas não aceitavam mulheres. Com o encorajamento e o apoio financeiro do pai, foi para Berlim depois de concluir o doutoramento. Ali conseguiu convencer Max Planck a autorizá-la a assistir às suas aulas e viria a tornar-se sua assistente. Primeira mulher a ser nomeada professora de Física na Alemanha, teve de fugir do país devido à sua ascendência judaica. Lise Meitner foi a primeira pessoa a compreender que os núcleos não se limitavam a emitir partículas beta ou alfa, mas que podiam desintegrar-se por completo, e o seu sobrinho Otto Frisch propôs a expressão «cisão nuclear» para descrever a ideia³. Apesar das vantagens que advinham da partilha do seu saber, recusou juntar-se ao Projeto Manhattan, dizendo: «Não quero ter nada a ver com uma bomba!» Otto Hahn, colega de Meitner, publicou a primeira

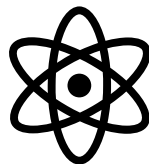
prova da cisão nuclear sem a mencionar como coautora, para evitar revelar que mantivera correspondência com ela e ser, também ele, objeto de perseguição por esse motivo. Hahn recebeu o prêmio Nobel em 1944. O contributo de Meitner não foi reconhecido.

Aqueles que concordaram juntar-se ao Projeto Manhattan não sabiam sequer se o problema que tinham sido encarregados de resolver – produzir uma arma nuclear – teria uma solução. Porém, após observarem a primeira explosão em julho de 1945, conhecida por ensaio «Trinity», ficou claro que, de facto, tinha. Essa realidade horrorizou muitos físicos, que lançaram petições em Chicago e Los Alamos protestando contra a utilização da arma que haviam criado. Mas a decisão não estava nas suas mãos.

Após o bombardeamento e a destruição das cidades de Hiroxima e Nagasáqui, o estado de espírito dos físicos de Los Alamos era sombrio. Evelyne Litz, que trabalhava em física médica e como bibliotecária, recordaria depois: «O dia em que a bomba foi lançada não foi de festa [...]. Não houve reuniões de amigos; estávamos muito apreensivos.»⁴ Muitos dos físicos, à semelhança de Alvarez, não conseguiram falar do caso durante muito tempo. Mais tarde, uma boa parte deles refugiou-se na narrativa objetiva de que a bomba ajudara a pôr fim à guerra e salvara vidas dos dois lados da barricada. Qualquer que fosse o seu posicionamento moral, para a grande maioria deles a missão fora cumprida.

A Segunda Guerra Mundial tornou os físicos menos ingénuos e deu-lhes uma consciência social inédita. Não estavam propriamente à procura de expiação, mas no pós-guerra fizeram esforços para

pôr as suas aptidões ao serviço de uma sociedade pacífica. A guerra assistira à utilização da física com fins destrutivos, mas agora era tempo de perseguir um objetivo mais nobre: a criação de conhecimento e a descoberta de novas partículas. Tal como o Projeto Manhattan, este empreendimento desafiante exigia uma cooperação ampla, que os Estados Unidos podiam providenciar. Os físicos começaram a adotar uma nova abordagem em grande escala ao seu trabalho, o que traria bons resultados à ciência e à sociedade.



Em 16 de agosto de 1945, Winston Churchill declarou que, «neste momento, a América ergue-se no topo do mundo». Partilhava com a Câmara dos Comuns o desejo de manter a confidencialidade dos segredos das armas atômicas, em nome da «segurança comum do mundo». Os Estados Unidos tinham criado enormes potencialidades na indústria militar, que Churchill acreditava conferirem ao país uma nova obrigação no pós-guerra. E prosseguiu: «Que atuem em harmonia com as suas responsabilidades, não para si próprios, mas para todos os homens em todas as terras, e assim possa um dia mais radioso alvorecer na história humana.»⁵

Para muitos jovens físicos como Alvarez, o seu trabalho de investigação fora completamente desfeito pela guerra. Agora, cada um deles tinha uma escolha pela frente: o que fazer a seguir?

Muitos físicos regressaram às suas universidades e aos seus laboratórios. Alvarez voltou a Berkeley, decidido a pôr os seus conhecimentos sobre radares ao serviço dos aceleradores de partículas.

A sua escolha foi impulsionada pelo facto de poder trabalhar com a melhor máquina do mundo. Com o apoio financeiro do governo dos Estados Unidos, a equipa de Berkeley concluiu o grande ciclotrão que começara a construir antes da guerra, mas com uma alteração: incorporou o conceito de estabilidade de fase de Edwin McMillan⁶ (ver Capítulo 7) e assim construiu um «sincrociclotrão» protónico que alcançava um valor sem precedentes para a energia do feixe: 350 MeV. A equipa de Berkeley preparava-se para descobrir novas partículas.

Primeiro, utilizaram o acelerador para replicar as descobertas conseguidas por meio dos raios cósmicos. As experiências no cume das montanhas, com câmaras de nevoeiro e emulsões nucleares, haviam sido um método produtivo de descobrir positrões, muões e piões, tal como vimos no Capítulo 4. Agora surgiam indícios de novas partículas que apresentavam propriedades muito diferentes das já observadas — como as partículas «V», eletricamente neutras (1947), assim designadas porque decaíam gerando pares de rastos que desenhavam um «V» nos detetores. Em 1949, descobriu-se outra partícula cujo decaimento criava três piões⁷, depois chamada caão, e, em 1952, uma nova partícula chamada hiperão Xi-menos («hiper» porque era mais pesado do que um protão) foi descoberta nos raios cósmicos⁸.

A natureza parecia fervilhar de partículas que não desempenhavam qualquer papel na matéria quotidiana e cuja importância estava longe de ser clara. Para piorar as coisas, a maior parte das novas partículas parecia ter vidas bem mais longas do que o esperado — por longas entenda-se alguns nanossegundos —, o que gerou perplexidade nos teóricos. As novas partículas ficaram conhecidas por «partículas estranhas». Com poucas fotografias de cada uma, não havia informação suficiente, oriunda dos raios cósmicos, para um entendimento completo das novas partículas. A única maneira de saber mais sobre estas partículas misteriosas passava por criar grandes quantidades delas no laboratório.

O novo grande ciclotrão de Berkeley constituiu um ponto de viragem. Em 1949, colegas que trabalhavam com o acelerador de 350 MeV de Alvarez e Lawrence descobriram uma partícula que não fora detetada nas câmaras de nevoeiro a grande altitude: uma versão eletricamente neutra do pião⁹. Este acontecimento correspondeu à primeira vez que uma partícula desconhecida foi descoberta com um acelerador e não nos raios cósmicos. Por fim, a tecnologia dos aceleradores atingia energias sem precedentes e, com máquinas muito mais evoluídas e fiáveis, os físicos podiam começar a ir mais além do que era possível alcançar com as experiências dos raios cósmicos. Os aceleradores de partículas proporcionavam as condições controladas necessárias para compor o *puzzle* complexo de partículas e forças. O único problema estava em que 350 MeV não era uma energia suficientemente elevada para permitir uma panorâmica completa.

A energia que o acelerador conseguia atingir era crucial, porque as partículas estranhas são *pesadas* — ou seja, têm massa superior às anteriormente descobertas, como o muão e o píon. A equivalência entre energia e massa é dada pela equação de Einstein, $E = mc^2$, e está tão inculcada nos físicos de partículas que até usamos unidades de energia para descrever as massas das partículas. O píon neutro (π^0), por exemplo, tem uma massa de 135 MeV, que é a sua *massa em repouso* — a massa que é medida quando a partícula está imóvel —, mas é expressa em unidades de energia (MeV). Esta equivalência entre massas e energias de partículas significa que $E = mc^2$ dá-nos a taxa de câmbio entre massa e energia. É uma taxa de câmbio absolutamente extraordinária, porque c , a velocidade da luz, é 2.999.792,458 metros por segundo. Este número, elevado ao quadrado, é tão grande que não ousa escrevê-lo. Não se tratava já de uma taxa de câmbio teórica: graças aos grandes aceleradores, tornava-se uma realidade experimental.

A construção de aceleradores que alcançassem energias mais elevadas não se destinava apenas a explorar os neutrões e prótons do núcleo. O que os cientistas queriam, embora à época ainda o não formassem deste modo, era criar partículas inteiramente novas no vácuo, partindo da energia. De início, isto pode ser um pouco difícil de compreender. O princípio básico é este: pegamos em partículas com energia elevada — prótons, neste caso — e disparamo-las contra um alvo. As partículas originais desaparecem e toda a energia é convertida em *novas* partículas, em nova matéria. A partícula original deixa simplesmente de existir — o que

é contraintuitivo no domínio clássico, mas permitido na mecânica quântica.

Claro que há regras nestas situações: a natureza não nos deixa disparar uma partícula qualquer contra um alvo qualquer e obter o que queríamos. Algumas grandezas têm de ser conservadas. Por exemplo, a energia total das partículas tem de ser a mesma antes e depois da colisão com o alvo. Quando disparamos um feixe de partículas contra um alvo, há muita energia que não conduz à criação de novas partículas, mas é dissipada como energia cinética nos destroços. Há outras regras a governar estas interações de partículas, tais como a conservação da *carga elétrica*, do *momento angular* (uma partícula pode rodar em torno do seu eixo) e de outros números quânticos, aos quais voltaremos mais adiante. Por agora, o que importa é que, para criar partículas estranhas, os físicos de Berkeley sabiam que precisavam de um feixe de prótons com energia mais alta do que aquela que um ciclotrão podia proporcionar.

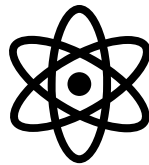
Para Alvarez e Lawrence havia um novo e grande objetivo em vista: construir uma máquina suficientemente potente para criar todas as partículas estranhas descobertas nos raios cósmicos, e talvez até outras, ainda mais pesadas. Para esse fim, precisavam de construir um tipo diferente de máquina. Em vez de um ciclotrão, que exigia um magneto enorme — o magneto para o ciclotrão de 350 MeV era tão grande que toda a equipa, composta por uma centena de pessoas, foi fotografada sentada na câmara de ferro —, queriam construir um acelerador formado por um anel de numerosos magnetos mais pequenos. A equipa de Berkeley

começou a projetar um *sincrotrão de protões*¹⁰ — uma máquina em forma de anel, diferente do sincrociclotrão que surgira antes —, que conseguia atingir as mesmas energias das partículas oriundas dos raios cósmicos. Visto que conseguia alcançar milhares de milhões* de eletrões-volt, a gama «BeV», o nome da máquina foi fácil de estabelecer: chamaram-lhe «Bevatrão».

A equipa de Berkeley não estava sozinha nas suas ambições. Do outro lado do país, em Long Island, 11 universidades diferentes tinham-se associado para fundar o Brookhaven National Laboratory e a construção de um grande sincrotrão de protões estava em bom andamento. Em 1953, estrearam o Cosmotrão: um anel acobreado de 23 metros, composto por 288 magnetos, cada um deles com seis toneladas de peso. Uma beleza à escala industrial. No seio de todo aquele cobre e ferro, havia um tubo onde um feixe de protões era acelerado a 88 por cento da velocidade da luz. Quando o Cosmotrão atingiu a energia para a qual fora concebido, 3,3 GeV (o nome «BeV» não durou e agora usamos «giga» para mil milhões, daí «GeV»), estabeleceu o recorde para o acelerador com energia mais alta do mundo, com um desempenho quase dez vezes superior ao do ciclotrão de Berkeley.

A equipa de Berkeley renovou os esforços e, em 1954, apenas um ano após a entrada em funções do Cosmotrão, acontecia a estreia do Bevatrão. Não havia dúvidas de quando estava em operação: um enorme motor-gerador acelerava e desacelerava, enchendo o compartimento de betão de sons que se pareciam com queixumes. O Bevatrão era mesmo maior do que o Cosmotrão, estendendo-se transversalmente por 41 metros e com um tubo de

vácuo tão largo que se dizia ser possível guiar um automóvel através dele. Alvarez e os seus colegas — designadamente o físico Ed Lofgren e o engenheiro William Brobeck — superaram os rivais, pois conseguiram quase o dobro da energia do Cosmotrão e produziram um feixe de prótons com um recorde mundial de energia de 6,2 GeV.



Por que foram construídos dois aceleradores em vez de apenas um? Além da distância geográfica entre os dois laboratórios e da concentração das comunidades de investigadores nas costas leste e oeste, a razão residiu essencialmente no facto de o governo dos Estados Unidos ter decidido apoiar a continuação do funcionamento dos grandes laboratórios que criara durante a guerra, reunindo recursos humanos e financeiros para a consecução de grandes objetivos científicos. Apoiava igualmente novos centros como Brookhaven, por acreditar que a existência de múltiplos laboratórios favorecia um nível de competição produtivo.

Os desenvolvimentos tecnológicos da Segunda Guerra Mundial mostraram que uma equipa de físicos e engenheiros com recursos suficientes conseguia solucionar problemas teóricos e práticos incrivelmente difíceis. Além disso, havia uma apetência para trabalhar em equipas de dimensão e complexidade sem precedentes, com centenas de cientistas e engenheiros laborando ao lado de dezenas de milhares de outros profissionais, desde

operários da construção até bombeiros, tendo em vista alguns dos objetivos mais estimulantes jamais fixados pela humanidade. A forma como trabalhavam tornou-se o modelo para outros projetos científicos ambiciosos, tais como o programa espacial norte-americano (e o soviético). A partir desse momento, a física, em particular nos Estados Unidos, conquistou um estatuto peculiar, alheio a outros domínios da ciência.

Este novo apoio à física coincidiu com um extraordinário período de crescimento nos Estados Unidos. A economia prosperou, com novos bens de consumo, novos subúrbios e nova riqueza. A taxa de natalidade subiu em flecha, com um recorde de 3,4 milhões de bebês nascidos em 1946. O orçamento do Estado cresceu também, com investimentos em autoestradas interestaduais, escolas, operações militares e novas tecnologias, como os computadores. Em consequência, nas décadas de 1950 e 1960, a física de partículas prosperou na mesma proporção. Os próprios físicos adquiriram uma nova autoconfiança. Responder às questões importantes estava agora ao seu alcance: o que eram as partículas estranhas detetadas nos raios cósmicos, e o que se podia aprender com elas — sobre o Universo, a matéria e as forças que ligam tudo? Existiriam para todas as partículas entretanto descobertas equivalentes na antimatéria? Existiria uma ordem subjacente a tudo?

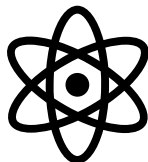
Tão numerosas eram já as experiências que extravasaram os laboratórios universitários e fizeram nascer institutos públicos, onde grandes grupos de pessoas uniam os seus esforços em prol de um objetivo comum. Alvarez e Lawrence eram apenas dois dos muitos

físicos envolvidos nesta transformação. As experiências concebidas neste período centravam-se nos grandes aceleradores de partículas, a começar pelo Bevatrão e pelo Cosmotrão, os quais viriam a fornecer partículas a novos detetores que geravam milhões de imagens que precisavam de ser analisadas. O próprio significado da palavra «experiência» no léxico da física começou a mudar.

Como vimos, nos primórdios, um investigador construía o seu equipamento do zero, ou pelo menos era ele próprio a manipulá-lo. Concebia-se uma experiência para testar ou demonstrar uma ideia. Na década de 1950, uma experiência envolvia um conjunto gigantesco de equipamentos, projetado por um grupo, mantido por engenheiros especializados e operado por pessoal específico, cujos resultados eram analisados por uma equipa e interpretados por outra. Grupos diversos podiam utilizar a mesma experiência para estudarem questões distintas, e os aceleradores, detetores e outros equipamentos eram afinados e melhorados à medida que se inventavam e adotavam novas tecnologias. Era difícil definir onde terminava uma experiência e começava outra.

Atualmente, os investigadores da física de partículas estão habituados a grandes laboratórios e a colaborações internacionais, mas nem sempre foi assim. Só em meados do século XX é que os aspetos tecnológico, político, científico e pessoal coalesceram na Era da Grande Ciência, que gerou a nossa maneira atual de trabalhar em física de partículas. Em consequência, disparou o número de partículas descobertas, com experiências que se adiantaram tanto à teoria que foram precisos quase 20 anos para

que o significado matemático da ordem subjacente fosse compreendido.



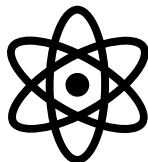
Sentados em frente a painéis de controlo repletos de indicadores e medidores, os operadores especializados dos aceleradores conduziam o Cosmotrão (na costa leste) e o Bevatrão (na costa oeste) até à energia máxima e orientavam depois o feixe para um alvo, criando uma fonte prodigiosa de partículas raras. Passado pouco tempo, as equipas haviam produzido e medido todas as partículas dos raios cósmicos que se conheciam: piões, muões, positrões e partículas estranhas. Agora, em vez de observarem piões individuais em análises exaustivas dos raios cósmicos, os aceleradores conseguiam produzir um feixe estável de piões com grandes quantidades de energia, prontos para serem analisados em pormenor. Em 1953, no Cosmotrão, os piões foram disparados contra uma câmara de nevoeiro e produziram um número elevado das partículas estranhas desejadas. O Bevatrão não tardou a imitá-lo. Com os aceleradores, os físicos dispunham de uma velocidade de produção de dados com que os pioneiros dos raios cósmicos apenas podiam sonhar.

Em 1954, quando o Bevatrão começou a funcionar, a lista de partículas estranhas tinha aumentado: pelas contas de Alvarez, havia «várias partículas carregadas e uma neutra, todas com massas vizinhas de 500 MeV»¹¹, bem como três outras mais

pesadas do que o próton: o lambda neutro (Λ), os dois sigmas carregados ($\Sigma^\pm$) e o xi negativo (Ξ^-). Longe de responder a todas as perguntas, a lista de excentricidades não parava de crescer, à medida que efetuavam mais medições. As partículas estranhas continuaram a emergir com tempos de vida cem mil milhões de vezes superiores ao expectável. Objetivamente, não viviam muito tempo: duravam apenas 10^{-10} segundo antes de decaírem, um milhão de vezes mais depressa do que um piscar de olhos — mas as melhores estimativas dos teóricos previam que o decaimento aconteceria em apenas 10^{-21} segundo, cem mil milhões de vezes mais rápido! Além disso, algumas partículas que se esperava que fossem produzidas em quantidades iguais não o eram.

Neste momento, os físicos acreditavam que havia quatro forças na natureza. A gravidade e o eletromagnetismo eram bem conhecidas, mas não conseguiam explicar o domínio nuclear, por isso foram propostas outras duas. A força nuclear *forte* foi sugerida por Hideki Yukawa, em 1934, como a força que liga os prótons e os neutrões no núcleo. A sua teoria continha uma partícula com uma massa cerca de 200 vezes superior à do eletrão, que podia transportar ou *mediar* esta força. A princípio, pensava-se que o múon seria portador da força forte, mas não tardou a ser excluído, pois não interagia com a matéria nuclear da forma esperada. Posteriormente, o píon pareceu um candidato mais provável, mas não estava isento de dúvidas. A segunda força proposta foi a força nuclear *fraca*, responsável pelo decaimento radioativo beta, descrita numa teoria de Enrico Fermi já em 1933. Desconhecia-se onde encaixavam exatamente as partículas estranhas neste cenário. Será que as partículas estranhas eram produzidas por meio

de uma força, a força nuclear forte, mas decaíam por outro caminho, através da força fraca?



Na Universidade do Michigan, um físico experimental de 25 anos chamado Donald Glaser não parava de refletir no problema das partículas estranhas. Logo em 1950, percebeu que, por causa das partículas estranhas, a física de partículas tinha ficado, nas suas palavras, «a modos que encalhada»¹². Na altura, todos os investigadores sabiam porquê: não estavam a recolher dados suficientes. Sem esses dados, os teóricos não tinham informação suficiente para compreender o que eram as partículas estranhas, ou de que modo se relacionavam com outras partículas e forças na natureza. Glaser queria criar um método que alterasse tudo isto.

Construir grandes aceleradores, só por si, não resolvia todos os mistérios das partículas estranhas. É evidente que um acelerador permite *criar* mais partículas estranhas, mas de nada servia se não fosse possível a sua deteção e medição. Enquanto Alvarez e outros continuavam a construir grandes aceleradores, Glaser propunha a construção de um detetor que conseguisse recolher mais informação sobre os raios cósmicos do que a conhecida câmara de nevoeiro.

Ao contrário de muitos outros físicos da época, Glaser não estava interessado em integrar as equipas dos grandes laboratórios,

preferindo trabalhar com um pequeno grupo na universidade. Havia ponderado cuidadosamente o género de vida que queria levar. De tipo atlético, aspirava a viver numa estância de esqui no cume de uma montanha, onde pudesse esquiar durante o dia, enquanto o seu dispositivo experimental recolhia os dados. À noite, examinaria os resultados e descobriria novas partículas. Conhecia alguns investigadores suíços que viviam praticamente dessa maneira, produzindo um fluxo lento, mas regular, de novas revelações e dispondo de muito tempo para dedicar à contemplação.

Quando pensava num novo detetor, Glaser sabia que precisava de uma forma de amplificar enormemente as interações das partículas minúsculas para que o seu registo fosse possível. Aquilo que ele perseguia era um estado «metaestável», onde uma porção minúscula de energia desencadeia um efeito muito maior, tal como sucede com a câmara de nevoeiro, que usa o estado metaestável de um vapor sobressaturado para desencadear a formação das gotículas da nuvem. As nuvens pareciam-lhe uma boa hipótese, mas, quando encontrou um grupo em Brookhaven que tentava construir uma câmara de nevoeiro de alta pressão que levava 20 minutos a reiniciar entre imagens, concluiu que não servia, pois nunca conseguiria recolher dados suficientes. Glaser começou à procura de um novo processo de visualizar as partículas.

Glaser imaginou que tinha descoberto um líquido que solidificava quando uma partícula o atravessava, para dar origem a algo semelhante a uma «árvore de Natal de plástico» de decaimentos e interações de partículas. Sonhava que seria capaz de extrair as árvores de plástico, medir todos os ângulos e descobrir novas

partículas dessa forma. Porém, quando procurou fazê-lo com uma solução química, em vez de obter árvores de Natal, ficou com uma mistura de um castanho lamacento. Não se deu ao trabalho de publicar o resultado e passou à ideia seguinte. Tentou utilizar cristais de gelo em água, mas compreendeu que demoraria demasiado tempo a derreter o gelo e a reiniciar o processo. Glaser experimentou todas as montagens físicas, elétricas e químicas que conseguiu imaginar, mas nenhuma delas parecia capaz de produzir um registo utilizável da atividade das partículas e adequado à recolha de dados.

Então, num dia de 1951, quando pensava em painéis de pressão, a sua sorte mudou. Numa panela de pressão, a água pode ser aquecida acima do ponto de ebulição (100 graus Celsius) antes de se formarem bolhas. Interrogou-se: «Conseguirei pôr um líquido numa panela de pressão e elevar a sua temperatura acima do ponto de ebulição o suficiente para que, removendo a tampa muito depressa, antes da explosão acontecer, o líquido fique instável e se torne sensível a uma partícula?»¹³

Experimentou uma série de líquidos diferentes, verificando se formavam bolhas quando expostos a uma fonte de radiação. A água gaseificada não servia, porque tinha uma tensão superficial demasiado grande, nem tão-pouco o *ginger ale*. A certa altura, pensou que um líquido que tivesse uma pequena quantidade de álcool poderia funcionar, pelo que recorreu a um líquido bastante comum, que cumpria os critérios: a cerveja. O único problema era o álcool estar proibido na universidade e nas suas imediações, pelo que teve de trazer uma grade às escondidas para o departamento,

pela calada da noite. Introduziu uma garrafa numa grande proveta cheia de óleo quente, colocou uma fonte de cobalto-60 — um poderoso emissor de raios gama — perto dela, abriu a garrafa e esperou para verificar e a cerveja formava uma espuma diferente devido à fonte de radiação. Concluiu que a cerveja não parecia ser afetada pela fonte de cobalto, mas ele esquecera-se de ter em conta outro aspeto da sua experiência noturna. Ao ser aquecida, a cerveja formou espuma tão depressa que explodiu, projetando-se no teto. Na manhã seguinte, Glaser viu-se na situação desconfortável de ter de explicar o porquê do fedor a cerveja que pairava em todo o departamento. O chefe deste — um abstémio — estava furioso¹⁴.

Por fim, Glaser estudou as tabelas de compostos químicos importantes e encontrou um líquido chamado éter dietílico, habitualmente usado como anestésico. Glaser arranjou um pequeno balão de vidro, do tamanho do seu polegar, e verteu nele o éter dietílico. Às três horas da madrugada sobreaqueceu o éter com o óleo. A seguir, pegou na amostra de cobalto-60 e aproximou-a rapidamente do balão. O líquido encheu-se de bolhas. Repetiu a experiência, com o mesmo resultado. Apressou-se a acrescentar à montagem uma câmara com uma elevada taxa de fotogramas por segundo e um *flash*, que pedira emprestada aos colegas engenheiros, e conseguiu captar uma imagem dos raios gama que atravessavam o detetor minúsculo. Conseguira. Glaser tinha inventado um novo tipo de detetor de partículas: a *câmara de bolhas*¹⁵.

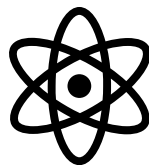
Glaser percebeu que o seu invento lhe permitia obter dados com uma velocidade enorme. Na câmara de bolhas, o líquido é mil vezes

mais denso do que o ar, pelo que a probabilidade de ver uma partícula atravessar a câmara é mil vezes maior do que numa câmara de nevoeiro. Escreveu um artigo e propôs-se apresentar o seu trabalho no encontro da American Physical Society em Washington, em abril de 1953.

Ao chegar à conferência, Glaser ficou perturbado quando percebeu que a sua intervenção estava programada para o último dia: aquele em que todos os físicos mais velhos e mais renomados já se teriam ido embora, a tempo de apanhar os aviões de regresso a casa. Certa tarde, lamentou-se da sua pouca sorte enquanto bebia um copo com um grupo de físicos mais velhos, entre os quais estava Luis Alvarez. Este admitiu que também ele já teria saído da conferência nessa altura, mas ficou curioso acerca do trabalho de Glaser. Quando o ouviu falar da câmara de bolhas, Alvarez compreendeu de imediato as implicações da ideia do colega mais novo: «Dera voltas à cabeça sem êxito para descobrir um detetor adequado ao Bevatrão, que estava prestes a ser ligado. Percebi logo que a câmara de Glaser era aquilo de que andava à procura.»¹⁶

Alvarez certificou-se de que dois membros da sua equipa ficavam para trás e ouviam a intervenção de Glaser. Tanto Alvarez como Glaser sabiam o que tinha de acontecer para que a câmara de bolhas fosse útil na deteção de partículas no Bevatrão. Primeiro, havia um melhoramento óbvio, que passava pela substituição do éter dietílico por hidrogénio líquido — visto que o hidrogénio consiste sobretudo em protões, aconteceriam colisões simples dos protões de energia elevada do Bevatrão com os protões do hidrogénio. Porém, o hidrogénio é extremamente explosivo e o

hidrogénio líquido é extremamente frio — cerca de -250 graus Celsius —, pelo que era preciso proceder com muito cuidado. O segundo desafio era aumentar o volume do detetor de modo que os prótons de alta energia tivessem o espaço suficiente para interagir no hidrogénio, criar partículas estranhas e deixar longos rastos que pudessem ser fotografados e analisados.



Glaser, de regresso ao Michigan, sabia que não podia competir com os vastos recursos e equipas de engenheiros que Alvarez tinha ao seu dispor. Sonhara utilizar a câmara de bolhas com os raios cósmicos de alta energia que vinham do espaço, enquanto levava uma vida idílica no cume de uma montanha. Agora percebia que o seu sonho tinha um problema: os rastos de bolhas apareciam e desapareciam tão depressa que não havia uma maneira fiável de disparar a câmara no instante certo para fotografar as interações das partículas dos raios cósmicos. Quando o sistema eletrónico abrisse o obturador da câmara, o rasto de bolhas teria desaparecido há muito. A única maneira de usar a câmara de bolhas passava por combiná-la com um dos grandes aceleradores, onde o *timing* previsível de chegada das partículas lhe daria uma possibilidade de detetar as interações.

Ao fim de tantos anos em que conseguira furtar-se a trabalhar num grande laboratório, o seu futuro parecia traçado. Reuniu os seus alunos para uma conversa séria e, por fim, todos concordaram

que precisavam de recorrer aos grandes aceleradores. Glaser construiu uma câmara com 15 centímetros de largura, que encheu de propano, e adquiriu um atrelado de 12 metros, onde ele e os alunos de pós-graduação carregaram todo o equipamento, e atravessaram o país. Primeiro, utilizaram o seu detetor no Cosmotrão de Brookhaven. O primeiro rolo de filme utilizado tinha apenas 36 imagens. Entre elas estavam 30 a 40 exemplos de decaimentos raros, de que apenas houvera vislumbres em voos de balão e emulsões nucleares. Quando saiu da sala escura, esperava-o uma grande multidão. «Bem, eu não sabia exatamente o que ia encontrar, mas sabia que encontraria coisas — e sabia que, se funcionasse, o resultado seria grande.»¹⁷

A câmara de bolhas tinha ciclos temporais muito mais rápidos e melhor resolução do que a câmara de nevoeiro, além de conseguir acompanhar a proliferação de partículas produzidas pelos novos aceleradores. Alvarez e a sua equipa registaram o potencial daquele detetor e começaram logo a planear a criação de uma grande câmara de bolhas de hidrogénio para o Bevatrão. Primeiro, recriaram os resultados de Glaser; a seguir, um pequeno grupo da oficina mecânica construiu uma série de câmaras de bolhas de hidrogénio de tamanhos crescentes. As ampolas de vidro não eram suficientemente fortes, por isso conceberam tanques de aço com janelas de vidro através das quais pudessem fotografar as bolhas.

Em 1958, Alvarez tinha uma câmara de bolhas de 37,5 centímetros em atividade no Bevatrão e conseguiu convencer Glaser a mudar-se para a Califórnia com seis alunos de pós-graduação. Alvarez estava a lançar um projeto de construção de

uma enorme câmara de bolhas de 1,80 metros com hidrogénio líquido, mas, ainda antes de esta estar concluída, as câmaras mais pequenas produziram torrentes de informação. O repto principal depressa passou a ser a análise dos milhões de fotografias obtidas. A câmara de bolhas de Glaser resolvia por certo o problema da escassez de dados, mas criava um desafio: para extrair a informação útil do filme era necessário que alguém examinasse as imagens, uma a uma.

As fotografias foram enviadas para estudo por grupos em todo o mundo. Glaser mandou fazer uma pasta especial, equipada com um visualizador de filme, para poder analisar os rastos nas câmaras de bolhas durante as suas numerosas viagens de comboio entre Brookhaven, Michigan, Chicago e Berkeley. Ao longo do tempo, esta análise tornou-se um trabalho especializado, realizado por um grupo de «analistas» treinados. Tratava-se de um grupo quase inteiramente feminino, conhecido por «*scanning girls*», que passavam os dias a examinar os rastos das partículas¹⁸. A princípio mediam o comprimento e o arco dos rastos de partículas interessantes, registando os dados manualmente, etapa a etapa. A equipa de Alvarez viria a criar máquinas de medição semiautomáticas, cujos dados eram introduzidos pelas analistas em cartões perfurados e nos computadores primitivos.

O que emergiu desta recolha de dados industrializada não foi a imagem clara que se esperava, mas uma perfeita confusão. Em 1956, Alvarez descobriu uma nova partícula desconcertante a que chamou $Y^*(1385)$ — diz-se «Y estrela treze oitenta e cinco» —, cujo nome deriva da sua massa de cerca de 1385 MeV. Reforço «cerca

de» porque a verdade é que a sua massa era incerta, e isso era uma parte crucial do seu mistério. Na verdade, as massas de todas as partículas são incertas; a precisão com que conhecemos a massa está relacionada com o tempo de vida. Deixemos claro que isto não decorre de um erro de medição, mas de uma propriedade da matéria consagrada num princípio fulcral da mecânica quântica: o *princípio da incerteza de Heisenberg*. Este princípio determina que, quanto mais curta for a vida de uma partícula, menos certeza teremos da sua energia e, portanto, da sua massa. A nova partícula Y^* de Alvarez vivia apenas cerca de 10^{-23} segundo, razão pela qual a sua massa era apenas «cerca de» 1385 MeV. O que Alvarez descobrira não era apenas uma nova partícula, mas o fenómeno físico mais efémero do mundo natural: mesmo movendo-se a uma velocidade próxima da luz, a partícula desloca-se menos do que a largura de um protão antes de decair.

A $Y^*(1385)$ era a primeira partícula de um tipo completamente novo chamado «partícula *ressonante*», e muitas mais se seguiriam. À data de arranque do Bevatrão, havia cerca de 30 partículas conhecidas, mas viriam a ser descobertas perto de 200 novas partículas e ressonâncias — tantas, que esgotaram as letras do alfabeto grego. Enquanto os experimentalistas faziam sucessivas descobertas, os físicos teóricos travavam uma revolução criativa própria para trazerem ordem às novas partículas.

Primeiro, trataram das partículas estranhas. Em 1956, o físico teórico Murray Gell-Mann¹⁹ (e, de modo independente, Kazuhiko Nishijima, em 1953) atribuíra a cada uma das partículas estranhas uma nova grandeza chamada *estranheza*. A estranheza era

conservada nas interações *fortes*: se duas partículas fossem criadas e uma tivesse estranheza +1 e a outra -1, a estranheza global seria conservada. Tendo observado que as partículas estranhas costumavam ser criadas em pares, isto parecia adequado. Gell-Mann sugeriu também uma razão pela qual as partículas estranhas pareciam viver mais do que o expectável: a estranheza, previa ele, *não* se conservava em decaimentos fracos. Quando as partículas estranhas decaem em outras, não-estranhas, este decaimento não pode prosseguir pela interação forte (que obedece à conservação da estranheza), mas deve sofrer um decaimento fraco, numa escala de tempo mais lenta. O seu decaimento é inibido pela natureza, o que explica os tempos de vida relativamente longos das partículas estranhas.

Em 1961, Murray Gell-Mann e Yuval Ne'eman tinham ambos proposto um sistema de classificação baseado na estranheza e na carga elétrica, amiúde referido como o «Modo Óctuplo» — uma brincadeira com o Nobre Caminho Óctuplo do budismo. Sustentando a sua teoria em matemática pormenorizada, Gell-Mann e Ne'eman conseguiram distribuir a multidão de partículas por grupos, ao criarem um sistema de classificação. Um aspeto dessa classificação era a divergência do *spin* da partícula, um número quântico que descreve o momento angular intrínseco de uma partícula que gira em torno do seu eixo. Os píões e caões (ambos com *spin* 0) formam um grupo de oito *mesões*, enquanto o lambda, o protão e o neutrão (*spin* $1/2$) faziam parte de outro octeto, o dos chamados bariões. Havia um grupo diferente de dez bariões — um decuplete (todos com *spin* $3/2$) que compreendia algumas das partículas mais estranhas, como a delta, a sigma e a xi, todas elas

observadas. O problema era o seguinte: no decuplete, a teoria previa que devia existir uma partícula ainda por descobrir, chamada ómega menos. Havia apenas uma maneira de confirmar a correção do sistema de Gell-Mann.

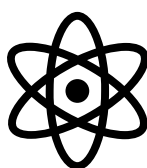
Em 1964, Brookhaven tinha aperfeiçoado o Cosmotrão, mediante a criação de um novo acelerador chamado AGS (Alternating Gradient Synchrotron — Sincrotrão de Gradiente Alternado)²⁰, e instalado uma enorme câmara de bolhas de hidrogénio líquido com dois metros e um magneto de 400 toneladas. Uma equipa, dirigida por Nicholas Samios, começou à procura da ómega menos. Quando a descobriu, no final desse ano, foi um grande triunfo para a nova teoria. Estavam no caminho certo.

Depois desta descoberta, o sustentáculo matemático do sistema de classificação de Gell-Mann conduziu-o a uma proposta deveras assombrosa: a de que prótons, neutrões, mesões (como os píons) e ressonâncias não eram verdadeiramente partículas fundamentais, pois compunham-se de parcelas mais pequenas. A estes constituintes fundamentais Gell-Mann chamou «quarks».²¹ Propôs que haveria três tipos de quarks, conhecidos por «cima», «baixo» e «estranho». Os quarks cima e baixo eram os constituintes do próton e do neutrão, enquanto os quarks estranhos formavam as partículas estranhas — caões, lambdas e outras. As partículas ressonantes podiam ser vistas como estados excitados de quarks combinados.

A Grande Ciência à escala industrial começava a dar frutos. Sem ela, não teria sido possível chegarmos à ideia de quark: é

impraticável construir e operar um equipamento tão complexo com uma equipa pequena. Claro que uma expansão tão significativa traz problemas — em retrospectiva, pode ser difícil perceber quem esteve exatamente envolvido numa descoberta, ou quais foram os papéis específicos de cada membro. São raros os registos originais das «*scanning girls*» que subsistem. Os alunos de pós-graduação que deixam o seu domínio de estudo não são alvo de biografias pormenorizadas. O artigo sobre a descoberta da ómega menos tinha 33 autores, entre os quais não estavam incluídos os projetistas do acelerador, os engenheiros, as «*scanning girls*» ou os teóricos — nem sequer Gell-Mann²². Em consequência, hoje conhecemos as histórias de alguns físicos teóricos, mas não as das equipas de experimentalistas, engenheiros e outros, necessários para que descobertas como a das partículas ressonantes e a da ómega menos aconteçam.

Glaser, o eterno paladino da pequena ciência, ficou perturbado por esta enorme mudança no estilo de trabalho. Poucos anos depois de ter recebido o prémio Nobel, em 1959, pela sua câmara de bolhas, Glaser estava cansado do trabalho burocrático envolvido na coordenação de grandes equipas de analistas e engenheiros e deixou a física para trabalhar em neurobiologia, tendo fundado a primeira empresa de biotecnologia, a Cetus Corporation²³. Entretanto, Alvarez venceu o prémio Nobel em 1968.



A Grande Ciência, tal como é praticada em laboratórios como Berkeley, congrega diferentes tipos de cientistas, o que permite quer uma investigação aplicada ambiciosa, quer um estudo da física impulsionado pela curiosidade. Alvarez tornou-se um defensor deste estilo de investigação, bem como outro veterano do Projeto Manhattan, Robert Rathbun («Bob») Wilson. Tal como Alvarez, Wilson era um dos antigos ciclotronistas de Ernest Lawrence, mas, em vez de Berkeley, começou por escolher Harvard depois da guerra. Wilson não sentia orgulho no papel que desempenhara no desenvolvimento de armas atómicas, tendo afirmado numa entrevista: «Nunca esperei que tivéssemos êxito.»²⁴ Wilson cresceu no Wyoming e os seus antepassados eram quacres. Pacifista mesmo antes da guerra, após aquela experiência sentiu que tinha de contribuir fortemente para as aplicações da física em tempos de paz.

Em 1946, Wilson propôs uma ideia que lhe parecia tão evidente que presumiu que devia ter ocorrido a muitos outros. As energias do feixe de prótons dos ciclotrões eram agora suficientemente elevadas — algumas centenas de MeV — para os feixes conseguirem penetrar nos tecidos humanos e terem aplicações terapêuticas diretas, em particular no tratamento do cancro. Quando a sua sugestão chegou ao conhecimento da comunidade médica, percebeu que nunca ninguém havia pensado realmente nela. Seriam precisos muitos anos, mas a sua ideia acabaria por abrir caminho à criação de um novo tipo de terapia oncológica que utiliza partículas carregadas, com energia elevada, chamada terapia com partículas²⁵.

A pergunta a que precisava de responder era esta: de que modo as partículas de energia elevada interagem com o corpo humano e como podem ser utilizadas no tratamento do cancro? Conhecedor do êxito clínico que os isótopos gerados em ciclotrões haviam tido, sabia que John Lawrence, irmão de Ernest, era a pessoa certa a contatar para que o seu projeto avançasse.

Nos anos 1950, o tratamento do cancro com radiação estava a generalizar-se. Os raios X (e, por vezes, os eletrões) eram usados em radioterapia, porque era bem conhecido que a *radiação ionizante* — radiação com energia suficiente para expulsar eletrões e gerar iões — conseguia matar as células cancerosas. O objetivo deste tipo de tratamentos é sempre aplicar uma dose de radiação que seja suficiente para destruir o tumor, mas sem afetar o tecido saudável, um equilíbrio difícil de conseguir. A dificuldade advém das características físicas do comportamento dos feixes dentro da matéria, motivo pelo qual a ideia de Wilson constituiu um enorme progresso.

Quando um fotão ou eletrão com energia elevada penetra no tecido humano, 70 por cento do qual é água, interage com os eletrões dos átomos e perde energia bastante depressa. No que concerne à dose de radiação, isso significa que deposita uma grande porção imediatamente abaixo da pele e outra porção, mais pequena, bem no interior do corpo. Porém, quando uma partícula pesada e com carga penetra em tecido ou na água, os eletrões minúsculos não chegam para a abrandar, por isso ela perde energia lentamente, desviando-se pouco da sua trajetória. Um protão ou outra partícula pesada e com carga conseguem penetrar bem fundo

no corpo, começando por depositar uma pequena quantidade de energia, mas depois desaceleram e acabam por se imobilizar, libertando a maior parte da sua energia (e causando o maior dano) no fim da sua viagem. Se representarmos a dose de um próton em função da profundidade, obtemos uma curva chamada pico de Bragg²⁶.

Wilson percebeu que, no âmbito da biologia, o pico de Bragg das partículas pesadas e carregadas seria muito mais adequado ao tratamento de tumores situados a maior profundidade. Se se fizesse variar a energia inicial dos prótons, eles poderiam imobilizar-se a diferentes profundidades, o que permitiria aos clínicos dirigir a radiação para os pontos onde fosse necessária. Porém, conhecer a física da radiação e da matéria não significa que se conheça o efeito biológico num ser humano.

John Lawrence e o seu colega, o Dr. Robert Stone, tinham já investigado o uso dos neutrões em terapia, mas não chegaram a resultados conclusivos. A ideia de Wilson de utilizar partículas carregadas inspirou um colega chamado Cornelius Tobias a realizar experiências biológicas com o ciclotrão de 350 MeV em 1948, para verificar os efeitos dos prótons e deuterões nas células. Quando os resultados pareceram promissores, o primeiro ser humano foi exposto a feixes iónicos de hélio e deuterões em 1952. Em 1954, ano em que mudaram para o Bevatrão, o primeiro ser humano foi exposto a feixes de prótons.

Conquanto dispusessem de uma ferramenta mais eficaz para administrar radiação às regiões profundas do corpo, os médicos não

conseguiram usar os feixes de partículas com precisão porque trabalhavam às cegas: os métodos de imagiologia da época não permitiam visualizar o interior do corpo, visto que a TC (Capítulo 1) não tinha ainda sido inventada. Havia um alvo que *podia* ser visto: a hipófise, que controla a libertação de determinadas hormonas. Por isso, os primeiros tratamentos visaram a hipófise, para a impedirem de produzir as hormonas que levam à proliferação do cancro. A primeira paciente, uma mulher com cancro da mama metastático, foi tratada com êxito desta maneira²⁷. Décadas depois, a imagiologia e as tecnologias dos aceleradores coalesceram para criar um tratamento do cancro plenamente integrado, mas aquele acontecimento marcou o início de uma das técnicas mais sofisticadas da medicina.

Hoje, mais de uma centena de centros em todo o mundo proporciona *terapia com partículas* — usando prótons ou iões pesados (normalmente, iões de carbono). Há uma década existiam apenas 22 desses centros, e o número continua a crescer de maneira exponencial. A terapia com partículas adequa-se em especial a tumores profundos e de acesso complicado, casos difíceis em crianças, ou a tumores próximos de órgãos críticos. Em 2016, uma família do Reino Unido esteve nas notícias por ter decidido, contra o conselho dos médicos, atravessar a Europa em busca de terapia com prótons para um filho. Encontrou-a em Praga, numa altura em que as primeiras clínicas de terapia com prótons do Reino Unido estavam ainda em construção.

As clínicas são cuidadosamente projetadas para que aos pacientes passe despercebido o facto de haver um acelerador de

partículas nas proximidades. No Instituto Paul Scherrer, na Suíça, as salas de tratamento dos pacientes encontram-se ao fundo de corredores apainelados de madeira em que a iluminação é filtrada por telas de papel translúcido ao estilo japonês, para criar a impressão de se tratar de luz do dia. As telas dissimulam o escudo antirradiação de betão com um metro de espessura. Durante o tratamento, o paciente fica deitado numa plataforma de fibra de carbono, no centro de uma pequena sala, acoplada a um sistema de posicionamento robotizado. Não fosse a grande tubeira de metal branco que sobressai do teto e esperaríamos que um cirurgião aparecesse a qualquer momento. Porém, os cirurgiões humanos não são necessários neste centro.

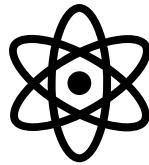
Para os pacientes (ou físicos) curiosos, é possível fazer uma visita aos bastidores. Nas paredes robustas da sala de tratamentos há uma porta discreta que dá para um espaço profundo, cheio de equipamento volumoso, do som das bombas de vácuo e do zumbido das fontes de energia. Na retaguarda desse espaço, um tubo de metal emerge de um buraco no escudo de betão, para transportar o feixe de prótons que provém do acelerador vizinho. O feixe de prótons passa pelo meio de uma série de magnetos que se estendem por cima da sala de tratamento. Por fim, o feixe é obrigado a descrever uma curva para baixo por um magneto de 200 toneladas que o direciona para o local necessário. É verdade! Um dos magnetos tem quase o dobro do peso de uma baleia-azul e costuma estar posicionado mesmo por cima do paciente.

Toda esta estrutura — chamada *gantry* — é móvel: roda em torno da plataforma, podendo lançar o feixe de todos os ângulos,

enquanto o paciente permanece deitado, sem detectar nem sentir o feixe de partículas que interage com o seu corpo. Na terapia por prótons, o ciclotrão, que fica a escassos metros de distância, é apenas uma pequena peça de todo o sistema. Para partículas mais pesadas, são necessários sincrotrões com cerca de 20 metros de diâmetro.

Os físicos que projetam aceleradores de partículas são os mesmos que concebem sincrotrões (e alguns ciclotrões) para a terapia com partículas em hospitais. O desenvolvimento em paralelo da terapia oncológica e da física de partículas foi possível pela colaboração interdisciplinar. Não se tratou de um acaso: a intenção de Lawrence (que morreu em 1958) e dos seus colegas era a criação de ambientes onde o conhecimento atravessasse facilmente as fronteiras. Esta nova abordagem à ciência, com equipas de grande dimensão, não só revolucionou o nosso entendimento da física de partículas como catalisou os seus benefícios para a sociedade.

Hoje, a motivação reside em tornar esta tecnologia ainda mais pequena, mais barata e mais precisa. A terapia com partículas confere aos físicos uma força motriz completamente nova, para adaptarem e inventarem novas tecnologias para os aceleradores. É apenas uma das muitas e espantosas aplicações práticas da física que resultaram da transição do ramo para as vastas experiências coletivas.



Essa transição aconteceu não apenas nos Estados Unidos, mas em todo o mundo. À medida que a Europa começava a recuperar da Segunda Guerra Mundial, o físico francês Louis de Broglie foi o primeiro a propor que os cientistas europeus se juntassem para fundar um laboratório multinacional. Tal era absolutamente necessário se queriam continuar a investigação em física de altas energias. Examinaram os grandes projetos em planeamento e execução nos Estados Unidos e perceberam que a única maneira de não ficarem para trás passava pela exploração em comum dos recursos.

Depois de pressionarem os governos durante anos, em 1954, 12 países da Europa Ocidental ratificaram a criação de um novo laboratório, o Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, ou CERN, perto de Genebra. O CERN congregou investigadores de países que haviam estado em guerra poucos anos antes, como a Bélgica, a Dinamarca, a França, a Alemanha, a Grécia, a Itália, os Países Baixos, a Noruega, a Suécia, a Suíça, o Reino Unido e a Jugoslávia. Administrado por uma série de conselhos com representações de cada Estado-membro, o CERN criou uma estrutura ímpar para a tomada de decisões e a promoção de projetos científicos importantes, tendo em vista encorajar as nações a unirem esforços para a consecução de objetivos comuns. Ao contrário de numerosos laboratórios dos Estados Unidos, está inscrito na convenção do CERN que o laboratório «não se envolverá

em trabalho com fins militares e que os resultados do seu trabalho experimental e teórico deverão ser publicados ou amplamente disponibilizados». O lema do CERN foi, e continua a ser, a ciência para a paz.

O Japão, entretanto, viu a sua capacidade científica destruída não apenas pela pobreza causada pela guerra, mas também pelas ações militares dos Estados Unidos em 1945. Receando que os ciclotrões pudessem ser utilizados no desenvolvimento de armas nucleares, as forças militares americanas ocupantes destruíram quatro dos grandes ciclotrões do Japão e lançaram os destroços ao mar, junto do porto de Tóquio²⁸. Só em 1952, com o Tratado de São Francisco, que restaurou a paz entre o Japão e as potências aliadas, é que os japoneses foram autorizados a construir novas máquinas. Hoje, o Japão possui uma investigação de categoria mundial não apenas em física de partículas, mas também em terapia com partículas. Para os físicos dos anos 1960, as aplicações do seu trabalho à biologia continuavam a ser um projeto secundário, cuja realização plena pertencia a um futuro distante. Com o novo sistema de classificação das partículas fundamentais, começavam finalmente a compreender a matéria e as forças a um nível essencial. Nem todas as novas partículas eram elementares, visto que algumas delas eram formadas por componentes chamados quarks, mas os próprios quarks ainda não tinham sido observados. Todas as partículas que contêm quarks interagem mediante a força nuclear forte, mas os físicos, naquele momento, ainda não haviam desvendado o mistério do funcionamento da força nuclear fraca. Sabiam apenas que esta quarta força era responsável

pelo decaimento beta. E é o decaimento beta que nos conduz à nossa aventura seguinte.

¹ Alvarez foi acompanhado por dois outros físicos, Harold Agnew e Lawrence Johnson.

² <https://www.manhattanprojectvoices.org/oral-histories/carl-d-andersons-interview..>

³ Em conjunto com o seu sobrinho, Otto Frisch.

⁴ <https://ahf.nuclearmuseum.org/voices/oral-histories/evelyne-litzs-interview/>

⁵ Winston S. Churchill, *Victory*, Nova Iorque, Rosetta Books, 2013.

⁶ Alvarez foi quem informou Ernest Lawrence da descoberta.

⁷ Passariam outros oito anos até os físicos reconhecerem que ambas as partículas eram na realidade versões daquilo a que agora chamamos caão.

⁸ R. Armenteros *et al.*, «LVI. The properties of charged V-particles», *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. 43, 1952, pp. 597-611. <https://doi.org/10.1080/14786440608520216>.

⁹ Há três tipos de pião: positivo, negativo e neutro.

¹⁰ Tratava-se de um desafio tremendo, visto que os prótons, como antes referido, são cerca de 2000 vezes mais pesados do que os elétrons e exigem magnetos mais fortes para se manterem a velocidades elevadas, mas foram forçados a essa opção, porque os feixes de elétrons perdem muita da sua energia como radiação do sincrotrão, como vimos no capítulo anterior.

* *Billions*, em inglês. [N. da T.]

¹¹ Luis W. Alvarez, *Alvarez: Adventures of a Physicist*, Nova Iorque, Basic Books, 1987.

¹² Eric Vettel, *Donald Glaser: An Oral History*, Berkeley, University of California, 2006.

¹³ Ibid.

¹⁴ Há uma lenda popular entre os físicos de que Glaser inventou a câmara de bolhas ao olhar para uma garrafa de cerveja. Infelizmente, não é verdade. A verdadeira história é que Glaser estava num bar chamado Pretzel Bell com um grupo de colegas que começaram a provocá-lo sobre as suas experiências. Um deles apontou para as bolhas da cerveja e disse: «Caramba, Glaser, devia ser fácil, consegue-se ver os malditos rastros em quase todo o lado!» Mais tarde, o dono do bar pendurou a fotografia de Glaser na parede e garantia que fora ali que ele chegara ao seu invento. Assim se perpetuou a lenda.

¹⁵ Vettel, *Glaser*.

¹⁶ L. M. Brown, M. Dresden e L. Hoddeson, *Pions to Quarks: Particle Physics in the 1950s*, Cambridge, Cambridge University Press, 1989, p. 299.

¹⁷ Vettel, *Glaser*.

¹⁸ Desde pelo menos a década de 1920 que as mulheres estudavam os dados das partículas, como aquelas que registaram as cintilações em Viena, mencionadas no Capítulo 5. Na década de 1940, foram também mulheres as encarregadas do estudo dos dados da emulsão nuclear, sobretudo no laboratório de Cecil Powell, em Bristol. Durante a guerra, enquanto os homens combatiam, muitas mulheres descobriram novas oportunidades laborais, incluindo como «computadores», realizando cálculos pormenorizados para resolver as equações diferenciais presentes em numerosos projetos. Quando as primeiras máquinas calculadoras eletrônicas apareceram, foram as máquinas que passaram a ser chamadas «computadores» e as mulheres assumiram naturalmente a função de programadoras dos computadores, embora com frequência o seu trabalho não fosse reconhecido e as suas histórias tenham sido ignoradas durante muito tempo. Por isso, quando chegou a altura de analisar os rastros de partículas das câmaras de bolhas, a divisão do trabalho segundo os estereótipos de género nem sequer foi questionada. Era claramente «trabalho de mulheres».

¹⁹ M. Gell-Mann, «Isotopic spin and new unstable particles», *Physical Review*, vol. 92, 1953, p. 833. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.92.833> e M. Gell-Mann, «The interpretation of the new particles as displaced charged multiplets», *Il Nuovo Cimento*, vol. 4(S2), 1956, pp. 848-66. <https://doi.org/10.1007/BF02748000>.

²⁰ «Gradiente alternado» foi um novo conceito de focagem que resultou de uma descoberta na física dos aceleradores realizada no Cosmotrão: invertendo a polaridade de magnetos alternados, era possível confinar o feixe a um tubo muito mais estreito (mas não um tubo por onde se possa conduzir um automóvel!). Isso permitiu construir máquinas com magnetos mais pequenos e mais baratos, e obter feixes com energias ainda mais elevadas.

²¹ A ideia dos quarks foi proposta, de forma independente, por George Zweig, que lhes chamou «ases».

²² V.E. Barnes *et al.*, «Observation of a Hyperon with Strangeness Minus Three», *Physical Review Letters*, vol. 12(8), 1964, pp. 204-6. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.12.204>.

²³ Vettel, Glaser.

²⁴ Mary Palevsky, *Atomic Fragments — A Daughter's Questions*, University of California Press,

2000, p. 128.

²⁵ Esta é uma das áreas que eu própria investigo e Wilson é, reconheço, um dos meus heróis. A minha tese de doutoramento abordou o *design* de novos aceleradores, semelhantes a ciclotrões, que construímos especificamente para aperfeiçoar a atual terapia por partículas. Estas máquinas chamam-se «Fixed Field Alternating-gradient» («Gradiente alternado de campo fixo»), ou aceleradores FFA, e foram inventadas nas décadas de 1950 e 1960, nos Estados Unidos, pela colaboração MURA.

²⁶ Batizado em homenagem ao físico australiano-britânico William Henry Bragg, o primeiro a fazer a previsão em 1904.

²⁷ U. Amaldi, «History of hadrontherapy im the world and Italian developments», *Rivista Medica*, vol. 14(1), 2008.

²⁸ L. Hoddeson, «Establishing KEK in Japan and Fermilab in the US: Internationalism, nationalism and high energy accelerators», *Social Studies in Science*, vol. 13(1), 1983. <https://doi.org/10.1177/030631283013001003>.

CAPÍTULO 9

Megadetetores: Descobrimdo o Neutrino Esquivo

Dos três tipos básicos de decaimento radioativo — alfa, beta e gama —, um deles divergia estranhamente dos outros. O decaimento beta intrigava os físicos desde o início do século XX, pois parecia infringir uma das leis cruciais da física. O mistério do decaimento beta levaria mais de 50 anos a ser esclarecido, obrigando os físicos a realizar uma série de experiências subterrâneas extraordinárias, na tentativa de vislumbrar uma nova partícula teórica que os principais especialistas acreditavam que nunca viria a ser detetada. Essa partícula era o *neutrino*: a partícula mais abundante no Universo, mas também a mais esquivo.

Desde o princípio do século XX que as experiências mostravam que a radiação beta parecia produzir elétrons com um conjunto de energias diferentes. À época, isto não gerou preocupação, mas depois de o núcleo atômico ter sido desvendado, os problemas começaram a surgir. Quando um elemento sofre decaimento beta, conhece uma alteração: desloca-se uma casa para a direita na Tabela Periódica. Não é o mesmo que perder um elétron, o que apenas altera a carga elétrica no átomo, não o *tipo* de átomo. O decaimento beta, por outro lado, produz elétrons que vêm do

interior do núcleo. Medições pormenorizadas, realizadas por James Chadwick e pelos seus colegas, mostraram que os eletrões beta podiam apresentar um espectro contínuo de energias, que iam das muito pequenas ao valor máximo, aparentemente de maneira aleatória. Isto representava um desafio profundo. O decaimento beta contradizia os princípios mais elementares da física.

Num átomo que sofre decaimento beta começa por haver um só objeto: o átomo. Depois, há dois objetos: o átomo e o eletrão. Uma das leis essenciais da física, a lei de conservação da quantidade de movimento, determina que a energia cinética transportada pelos projéteis num sistema simples de dois corpos como este deve assumir um valor único e previsível. As radiações alfa e gama obedecem a esta lei, mas na radiação beta as energias eram aleatórias e imprevisíveis. Infringir um princípio científico tão fundamental é um sinal claro de que a nossa experiência enferma de algum erro ou que as nossas medições estão incorretas. Porém, por muito que tentassem, todos os que realizavam a experiência não conseguiam obter um resultado diferente.

Cada físico tinha uma opinião diversa acerca do que se passava. Alguns, como Niels Bohr, ponderavam descartar a ideia da conservação da quantidade de movimento, ou pelo menos contorná-la mediante a proposta de que, às escalas minúsculas do interior dos átomos, a energia apenas podia ser conservada em média, mas não em todo e qualquer decaimento. Um teórico em particular, Wolfgang Pauli, não conseguiu deixar de dar importância àquele mistério. Pauli era bem conhecido pela sua abordagem crítica e racional, que lhe valeu a alcunha de «o flagelo de Deus».

Não estava satisfeito com a sugestão do físico neerlandês-americano Peter Debye, que lhe dissera, durante um encontro em Bruxelas, que deveria deixar simplesmente de pensar no decaimento beta. Pauli estava decidido a preservar a conservação da quantidade de movimento e conseguiu apresentar uma solução teórica, mas ficou horrorizado ao verificar que piorava ainda mais o caso. «Fiz uma coisa terrível», afirmou. «Postulei uma partícula que não pode ser detetada.»

Pauli começou por apresentar a sua ideia a outros físicos numa carta, em 1930. Talvez, sugeria ele, uma minúscula partícula eletricamente neutra pudesse remover a energia? Pauli sentia que a sua sugestão era tão absurda que dizia aos destinatários que «não ousava publicar nada» acerca daquilo e que ia perguntar aos «caros colegas das radiações» qual a probabilidade de encontrarem provas experimentais de tal partícula. O problema, como Pauli bem sabia, estava em prever que estas partículas não tivessem massa nem carga elétrica, o que impossibilitava a sua deteção numa experiência.

Em 1933, a ideia de Pauli foi transformada numa bem articulada teoria do decaimento beta por Enrico Fermi, um físico italiano reverenciado tanto pelas competências teóricas como pelas experimentais. Fermi deu à nova partícula o nome de *neutrino*, «pequeno neutro», e apresentou a teoria à revista *Nature*, que a rejeitou com a justificação de «conter especulações demasiado afastadas da realidade para terem interesse para o leitor». Um ano depois, em Manchester, os físicos Rudolf Peierls e Hans Bethe calcularam que os neutrinos criados pelo decaimento beta podiam

atravessar toda a Terra sem quaisquer interações com a matéria. Na realidade, conseguiam atravessar blocos de chumbo com uma espessura da ordem de anos-luz. Em teoria, o neutrino podia resolver o problema do decaimento beta, mas de que serve uma partícula se é impossível detetá-la e verificar o que pensamos que ela faz? Durante anos, foi mais ou menos ignorada pelos experimentalistas.

O problema não conheceu progressos durante duas décadas. Por fim, na década de 1950, um físico de 33 anos resolveu que iria atrás do esquivo neutrino. Essa pessoa era Fred Reines, oriundo dos arredores de Nova Jérсия. Mal tinha acabado o seu projeto de doutoramento quando começou a trabalhar na divisão teórica do Projeto Manhattan, e continuou em Los Alamos depois da guerra. O interesse de Reines por física fora útil ao governo dos Estados Unidos, mas, tal como sucedeu com muitos dos seus colegas, a guerra redirecionou as suas competências para o tema das armas atômicas. Reines resolveu que chegara a altura de se dedicar a assuntos de importância mais fundamental para a física. Ao fim de várias semanas sentado no gabinete, a única ideia que teimava em regressar à sua mente era a procura dos neutrinos.

Como produzir uma fonte de neutrinos? Como detetá-los? Se conseguisse construir o detetor adequado, talvez conseguisse provar a sua existência. Um cálculo rápido fê-lo perceber que, mesmo que conseguisse encontrar uma maneira de construir um detetor, a probabilidade de um neutrino interagir era tão baixa que o detetor teria de ser enorme. Por certo a eficácia seria maior se usasse algum tipo de líquido, mas os maiores detetores líquidos

daquele tempo tinham cerca de um litro de volume. (O ano era 1951 e a câmara de bolhas de Glaser estava nos primórdios, embora não pudesse detetar o neutrino de forma direta, visto ele não ter carga.) Como construir um detetor com um volume mil vezes superior ao que se dispunha na época? Enrico Fermi também não fazia ideia de como construir um desses detetores¹. Se Fermi não sabia, quem haveria de saber? Parecia uma tarefa impossível e, durante algum tempo, Reines guardou a ideia na gaveta.

Pouco depois, uma avaria no motor do avião onde ia viajar obrigou Reines a ficar em terra no aeroporto de Kansas. Um colega de Los Alamos, Clyde Cowan, estava com ele. Cowan, engenheiro químico e ex-capitão da Força Aérea dos Estados Unidos, trabalhara com radares durante a guerra. Enquanto Reines era um extrovertido espirituoso, Cowan era mais comedido, menos sociável, mas um experimentalista brilhante. Os dois deambularam pelo aeroporto a conversar, e quando Reines mencionou a sua intenção de procurar neutrinos, Cowan ficou entusiasmado. Ambos resolveram que iriam em busca do neutrino, simplesmente porque todos diziam que era impossível encontrá-lo. Os chefes em Los Alamos concordaram com a proposta extravagante e, desta forma simples, nasceu uma nova colaboração.

Em 1951, quando lançaram o seu projeto, Reines, Cowan e os cinco membros da equipa principal foram fotografados de pé numa escada, em volta de um cartaz onde fora desenhado um logótipo com um olho esbugalhado e as palavras «Projeto Poltergeist». Atrás do cartaz, um dos cientistas segura enigmaticamente uma grande vassoura. Parecem bem-dispostos, e precisavam disso: a

experiência que se propunham realizar envolvia construir um reservatório enorme, enchê-lo com líquidos filtrados e preparados com rigor, equipá-lo com sistemas eletrônicos e esperar que estes conseguissem detetar uma partícula que era quase invisível.

Reines e Cowan haviam estudado a teoria de Fermi, que lhes dizia que as interações dos neutrinos são incrivelmente raras. Por isso concluíram que a sua primeira etapa seria encontrar um material que lhes fornecesse o maior número possível de neutrinos. Embora cada neutrino consiga percorrer longas distâncias através da matéria, se existissem em número suficiente era estatisticamente provável que um deles interagisse com um núcleo durante a travessia do detetor. De início, a ideia era capturar os neutrinos de uma bomba atômica, mas não tardaram a perceber que a nova tecnologia dos reatores de cisão nuclear lhes oferecia uma alternativa menos perigosa. Previam que o reator nuclear produziria um fluxo enorme de neutrinos, próximo de 10^{13} por segundo e por centímetro quadrado. É certo que não seriam tantos como os de uma arma nuclear, mas ficavam com uma fonte estável de neutrinos que os abasteceria durante um intervalo de tempo muito longo.

A atenção de Reines e Cowan concentrou-se na busca de uma reação prevista pela teoria de Fermi, em que um próton captura um neutrino, transformando-se num neutrão e emitindo um positrão². Com este processo, esperavam ver duas marcas identificadoras do neutrino. Primeira, o positrão aniquilava um eletrão e criava um clarão de raios gama, que seria o sinal inequívoco de que um neutrino havia visitado o detetor. A segunda marca viria do neutrão

libertado, que seria absorvido por um núcleo e emitiria um clarão de raios gama após cerca de cinco microssegundos. Aquilo de que o Projeto Poltergeist precisava de facto era de um sistema que conseguisse captar dois clarões de raios gama, com cinco microssegundos de intervalo. Esta marca, esperavam eles, distinguiria um neutrino de um raio cósmico ou de outro ruído de fundo.

Tendo percebido aquilo que procuravam, conceberam um detetor. Então, dois avanços tecnológicos recentes entraram em cena. O primeiro foi a descoberta de que alguns líquidos orgânicos transparentes emitem luz visível quando um raio gama ou uma partícula carregada passa através deles. Este «cintilador líquido» emitiria pequenos clarões que seriam captados por outro invento astuto, o tubo fotomultiplicador. Estes tubos de vácuo assemelham-se um pouco a uma lâmpada comprida cheia de sistemas eletrónicos. Quando um clarão de luz incide na frente de um destes tubos de vácuo é convertido em eletrões (mediante o efeito fotoelétrico, como vimos no Capítulo 3), que são amplificados num impulso elétrico suficientemente grande para ser medido pelos sistemas eletrónicos. Os tubos fotomultiplicadores seriam os «olhos» da experiência³. Como é natural, a equipa precisava de saber de química e eletrónica, além de física.

A equipa decidiu também conceber um método de medição totalmente eletrónico. Não era preciso analisar milhões de fotografias, como nas câmaras de nevoeiro ou de bolhas. Se os neutrinos interagissem de facto no cintilador líquido, os tubos captariam a sequência específica de clarões, que exibiriam como

pontos luminosos num osciloscópio⁴. O intervalo entre os impulsos confirmaria a presença de um neutrino.

A medição eletrônica tinha uma desvantagem: os cientistas ficavam mais distantes daquilo que acontecia na experiência. Era mais difícil compreender os dados de um modo intuitivo quando apenas dispunham de alguns pontos luminosos. Qualquer clarão de raios gama no detetor criava a possibilidade de, ao fim de cinco microssegundos, um clarão casual enganar os físicos, levando-os a pensar que haviam detetado um neutrino. Tinham de se certificar de que isto não acontecia, mas só havia uma forma de o conseguir: precisavam de eliminar todas as eventuais fontes de radiação de ambiente. O trabalho árduo começara a sério.

O ambiente de trabalho de Reines e Cowan era um edifício parecido com um armazém, isolado e sem aquecimento. Chegavam continuamente camiões com equipamentos para a experiência, que foram enchendo o edifício até as pessoas estarem cercadas por pilhas de caixas com o dobro das suas estaturas. A equipa passou meses a ensaiar diferentes misturas no cintilador e a medir a reação dos tubos do fotomultiplicador para se certificar do bom funcionamento dos sistemas eletrónicos. No inverno, a falta de aquecimento constituía um desafio por si só, visto que o líquido do cintilador tinha de ser mantido acima de 16 °C para não ficar turvo e arruinar a experiência. Adquiriram aquecedores elétricos para terem a certeza de que a temperatura do líquido não baixava, mas não tinham como pagar o aquecimento para si próprios.

A primeira versão do detetor ganhava forma num protótipo alcunhado «El Monstro». Quando perceberam que o êxito residia na conjugação das tecnologias, construíram um segundo detetor, ao qual chamaram «Herr Auge» ou «Senhor Olho». Longe iam os detetores de um litro, pois dispunham agora de um cilindro com a capacidade de 300 litros, cercado por 90 tubos fotomultiplicadores.

A seguir dedicaram-se à tarefa hercúlea de eliminar as fontes de radiação que produziam raios gama desgarrados no detetor. Algumas fontes eram evidentes e podiam ser antecipadas: os neutrões provenientes do reator nuclear podiam ser bloqueados com um escudo de grande espessura, composto por blocos de parafina. Não foi preciso gastar dinheiro na encomenda destes materiais a uma empresa especializada. A própria equipa encarregou-se da tarefa: depois de varrer a neve acumulada no exterior do edifício, moldaram manualmente cada bloco e transportaram-no para o local do reator.

Outras fontes de radiação eram mais difíceis de eliminar, porque o Herr Auge captava radiação que não era detetada pelos contadores Geiger e outros instrumentos. O Herr Auge revelou-se o melhor detetor de raios gama jamais construído. Era tão sensível que chegaram a colocar membros da equipa dentro dele, para verificar se conseguia detetar radiação oriunda do corpo humano. Identificaram facilmente um certo número de impulsos por segundo, causados por uma pequena quantidade de potássio-40 radioativo na pessoa que tratava do secretariado e nos colegas⁵. A sensibilidade era justamente o que necessitavam, e fê-los perceber que o detetor auxiliava a sua própria construção.

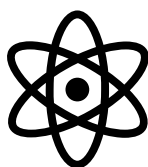
Antes da construção de cada novo aparelho, colocavam-no no Herr Auge para medir o nível de radioatividade. O latão e o alumínio eram mais radioativos do que o ferro e o aço. O próprio potássio do vidro dos tubos do fotomultiplicador contribuía para o ruído de fundo no detetor. Encontraram alguns componentes radioativos na estrutura física do detetor, o que obrigou à sua desmontagem para substituição das peças. Em cada caso, procederam a uma troca exaustiva de todos os materiais que produziam ruído de fundo. Embora possa parecer perfeccionismo levado ao extremo, eles precisavam de ter a certeza de qual era a fonte de cada clarão observado no detetor, e descobriram que essas fontes eram numerosas.

Ao fim de meses de trabalho estavam prontos a avançar. Transportaram e instalaram o detetor na vizinhança de um reator nuclear em Hanford, Washington. A seguir, esperaram. Sabiam que não haveria um «momento heureka», mas antes uma acumulação gradual de acontecimentos individuais, que analisariam depois de terem recolhido um número suficiente. Durante alguns meses, a equipa fez turnos para vigiar a experiência, aguardando e observando, enquanto o sistema se mantinha em silêncio dentro do seu invólucro fortemente blindado.

Quando coligiram e analisaram os dados, alguns dos clarões pareciam corresponder a neutrinos. Eram resultados sugestivos, mas ainda não convincentes. Havia demasiado ruído nos dados para que pudessem anunciar uma descoberta. O ruído não provinha de radiação de origem humana nem dos materiais do detetor, mas dos raios cósmicos. Tinham trabalhado arduamente para reduzir a

radiação desgarrada, mas agora precisavam de eliminar esta derradeira fonte. Havia apenas uma maneira exequível de proteger a experiência contra a radiação oriunda do espaço: ela tinha de acontecer no subsolo.

Felizmente, estava disponível uma cave em Savannah River Site, um reator nuclear na Carolina do Sul, cujo proprietário autorizou os físicos a realizarem a experiência a 12 metros de profundidade. A Reines e Cowan juntaram-se vários colegas de Los Alamos para redesenhar e reconstruir todo o detetor.



No fim de 1955, o Projeto Poltergeist passou a ser formalmente designado por Savannah River Neutrino Experiment. A instalação crescera e assemelhava-se a uma sanduíche de três camadas, com reservatórios retangulares que pesavam umas colossais dez toneladas. Atrás do reator fortemente blindado ficava o detetor, de onde partiam cabos eletrónicos que transportavam os sinais para um atrelado no exterior.

Reines e Cowan permaneceram em Savannah River a dirigir a experiência durante perto de cinco meses. Assim que todos os aspetos químicos e eletrónicos ficaram resolvidos, tratava-se apenas de efetuar uma recolha cuidadosa de dados, clarão a clarão. A expectativa crescia de cada vez que viam, uma ou duas vezes por hora, o *blip-bloop* característico de dois clarões com cinco

microssegundos de intervalo, que pareciam sussurrar a palavra «neutrino».

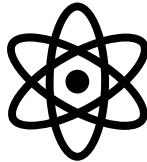
Queriam ter a certeza de que não se tratava de um acidente. Nada foi deixado ao acaso. Testaram o detetor com uma fonte de positrões, para se assegurarem de que o clarão do positrão emitia o *blip* correto, e depois testaram uma fonte de neutrões, para se certificarem de que produzia o *bloop* esperado. Extraíram todo o líquido cintilador, recalibraram a mistura para alterar o *timing* do segundo clarão e verificaram se produzia o efeito desejado. De facto, assim acontecia. E foram registando os dados, ao longo de 900 horas, quando o reator estava ligado, e de 250 horas, quando desligado.

Num esforço derradeiro para se assegurarem de que não observavam apenas neutrões fortuitos do reator, mandaram vir camiões carregados com sacos de estilhas de uma serração próxima, que mergulharam em água. Um por um, arrastaram os sacos para junto da montagem experimental e construíram com eles paredes com cerca de 1,20 metros de espessura em redor do detetor. Este esforço gigantesco proporcionava a blindagem adicional da água, para travar todos os neutrões oriundos do reator. Mesmo assim, o *blip-bloop* persistia. O sinal do neutrino era legítimo.

O «momento heureka» não chegou de rompante, mas após uma acumulação gradual de dados até não restarem dúvidas. Feitas as contas, havia cinco vezes mais sinais de neutrinos quando o reator estava ligado do que quando estava desligado. Face aos 10^{14}

neutrinos emitidos pelo reator em cada segundo, e contrariando as probabilidades, tinham conseguido conceber um sistema que capturava alguns neutrinos por hora e que media as suas interações. Vinte e cinco anos após a previsão por Pauli de uma partícula indetetável, Reines, Cowan e a sua equipa haviam alcançado o impossível.

«Temos o gosto de o informar que detetámos inequivocamente neutrinos», eis o teor do telegrama que enviaram a Pauli, que interrompeu uma reunião no CERN para o ler em voz alta e proferir uma minipalestra de improviso. Conta-se que Pauli e os seus amigos festejaram bebendo uma caixa inteira de garrafas de champanhe, o que poderá explicar a razão de o seu telegrama de resposta nunca ter chegado a Reines e a Cowan. Nele se lia: «Quem espera sempre alcança.»



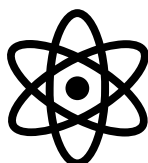
O esquivo neutrino fora finalmente detetado e a lei de conservação da quantidade de movimento continuava válida, mesmo a escalas ínfimas, explicando o decaimento beta. O neutrino não era apenas um fruto da imaginação dos teóricos, mas sim um objeto real e tangível da natureza: uma partícula esquiva, neutra, leve e capaz de viajar sem restrições até aos recantos mais longínquos do Universo. A descoberta do neutrino inaugurava uma novíssima área de investigação.

Desde a primeira detecção que as perguntas sobre neutrinos não cessam de surgir: que propriedades têm? Existem apenas num tipo, ou em vários? São estáveis ou têm um tempo de vida limitado? Que processos no Universo criaram eles? Tal como muitas das experiências que vimos, o Projeto Poltergeist suscitou uma avalanche de novas perguntas. Ao longo do tempo, a maior parte delas — mas não todas — obteve resposta. Em última análise, o neutrino esquivo revelou-se mais importante do que se pensava. Os neutrinos não nos ajudaram apenas a compreender o decaimento radioativo; deram-nos uma nova visão do Sol, das supernovas e da origem da matéria.

Ao longo do tempo, a importância e riqueza crescentes deste domínio de investigação foram reconhecidas pelo Comité Nobel. Três prémios Nobel foram atribuídos pela física dos neutrinos, todos eles muito depois da experiência pioneira. O primeiro, em 1995, foi para Reines, décadas após a sua descoberta (infelizmente, Cowan falecera 13 anos antes), o segundo para Ray Davis e Masatoshi Koshiro em 2002, e o terceiro para Takaaki Kajita e Arthur McDonald em 2015.

A pesquisa original dos neutrinos foi motivada pelo mistério do decaimento beta, e Pauli propôs o neutrino em 1933, um ano após a descoberta do neutrão por Chadwick. Agora, podemos juntar estas ideias para melhor compreender o que acontece num núcleo atómico durante o decaimento beta: um neutrão converte-se num próton, alterando o tipo de elemento e libertando um eletrão (para equilibrar a carga elétrica) e um neutrino⁶. O neutrino transporta alguma da energia da reação, e partilha a energia total disponível

com o elétron, razão pela qual os elétrons têm valores de energia imprevisíveis. Nem o elétron nem o neutrino existiam antes do decaimento. As peças do *puzzle* começavam a encaixar-se. Porém, enquanto isso acontecia, uma segunda experiência concorrente lançou de novo a dúvida entre os físicos.



Quando o neutrino foi descoberto em meados da década da 1950, os físicos começavam a perceber que o Sol era uma fornalha nuclear, e que produzia energia por meio de uma reação nuclear em cadeia chamada cadeia «p-p», que transformava prótons em hélio mediante uma série de etapas⁷. Se as teorias a respeito do Sol estivessem corretas, um número colossal de neutrinos sairia dele e viajaria, a uma velocidade próxima à da luz, em direção à Terra, aonde chegaria cerca de oito minutos depois⁸.

Um ano antes da primeira experiência com neutrinos de Reines e Cowan, Ray Davis, um radioquímico de Brookhaven, dera alguns passos na direção certa. Davis não queria detetar clarões, mas sim testar uma ideia proposta por um outro teórico, Bruno Pontecorvo, que previra que a interação de um neutrino com um átomo de cloro produziria um átomo de árgon radioativo. A especialidade de Davis era a radioquímica, ou seja, era a pessoa indicada para encontrar átomos de árgon radioativos.

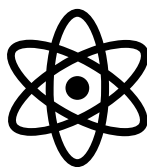
Davis propunha-se detetar neutrinos com enormes tinas cheias de um produto líquido usado na limpeza a seco — um material barato e acessível que continha cloro. Começou por utilizar 3800 litros e foi aumentando a quantidade. Apesar de ter partido na dianteira, Davis não logrou ser o primeiro a descobrir o neutrino, porque os reatores nucleares — e o decaimento beta — produzem na realidade o equivalente do neutrino na antimatéria, o antineutrino, que foi o tipo de partícula detetada por Cowan e Reines⁹. Porém, a experiência de Davis conseguiu tão-somente identificar o tipo «normal» de neutrino. Embora tivesse sido ultrapassado por Cowan e Reines na descoberta, Davis não desistiu de encontrar neutrinos, mas abandonou os reatores e fixou-se no Sol. Esta decisão foi crucial: a física dos neutrinos deixou de ser um efeito secundário curioso do decaimento beta para se transformar na vanguarda da investigação em física de partículas.

Davis colaborou com um jovem físico teórico chamado John Bahcall, que efetuou os difíceis cálculos para prever a taxa de produção solar de neutrinos. Em 1964, os dois colaboradores publicaram artigos a partir dos seus projetos. Estavam confiantes de que conseguiriam capturar neutrinos solares, talvez dez ou 20 por semana, mas para isso precisariam de um dispositivo experimental cem vezes maior do que aquele que tinham, e que já era enorme — um projeto tão ambicioso, que chegou às páginas da revista *Time* ainda antes de ter garantido o financiamento.

Em 1965, uma caverna gigantesca foi escavada na mina de Homestake, no Dakota do Sul. Nela foi construído um reservatório com capacidade para 380.000 litros, que seria enchido com produto

líquido para limpeza a seco, numa quantidade que cabia em dez vagões ferroviários. Com uma perseverança incrível e uma manipulação química cuidadosa, o esforço monumental compensaria. Graças à recolha de algumas dezenas de átomos de árgon radioativos, Davis conseguiu demonstrar que tinha detetado neutrinos solares. Porém, havia um problema: ele encontrara apenas cerca de um terço do número de neutrinos estimados por Bahcall. Verificados os cálculos, não identificaram erros. Davis regressou ao trabalho e continuou a reunir dados ao longo de quase 20 anos. Durante esse período, o mistério persistiu: havia uma estranha falta de neutrinos provenientes do Sol.

O problema dos neutrinos solares suscitou as perguntas seguintes: os cálculos estariam errados? Haveria algum processo desconhecido pelo qual o Sol gerava a energia? Os neutrinos teriam alguma característica estranha? Teria o Sol cessado de produzir energia e estaríamos nós — confiantes no que víamos dele — em risco? Por fim, optou-se pela teoria de que os neutrinos se transformavam, ou que desapareciam entre o Sol e a Terra. A ideia deste comportamento deveras estranho da parte dos neutrinos fora sugerida por Pontecorvo em 1957¹⁰, mas não fora levada a sério durante muito tempo. Foi este problema que motivou Art McDonald e perto de uma centena de outros colaboradores a construírem o Sudbury Neutrino Observatory (SNO).



McDonald, originário da Nova Escócia, no Canadá, interessou-se desde muito cedo por matemática e estudou física, doutorando-se em Física Nuclear no Caltech, em 1969. Abandonou um cargo docente em Princeton para regressar ao Canadá em 1989 e dirigir o SNO. Sob a sua chefia, o SNO foi construído a mais de um quilómetro de profundidade, numa mina de níquel em Ontário. A experiência, realizada por uma equipa de cem pessoas, decorreu entre 1999 e 2006. Takaaki Kajita tinha conduzido uma experiência semelhante numa mina de zinco no Japão, chamada Super-Kamiokande. Estas duas experiências valeram a ambos o prémio Nobel da Física em 2015.

Na realidade, o SNO é uma vasta «sala limpa» subterrânea. Felizmente, podemos visitá-la de forma virtual e sermos poupados ao incómodo¹¹ pelo qual tem de passar um visitante presencial, que deve tomar um duche, mudar de roupa e passar por chuveiros de ar de modo a manter a poeira da mina fora do local da experiência. O interior é bastante austero: basicamente, o esqueleto de uma mina transformado em laboratório. A sala de controlo consiste em cinco monitores de computador em cima de secretárias, ao lado de várias prateleiras cheias de equipamento. Cabos e tubagens descem pelas paredes, acima da altura das cabeças. Se não houvesse rocha a toda a volta, talvez esquecêsemos que a experiência decorre a quase 2000 metros no subsolo, e que há perigos para os quais alerta um letreiro na parede, que recorda aos cientistas: «Segurança e qualidade. Em todo o espaço.» Os visitantes podem sair — virtualmente — da sala de controlo, percorrer um corredor e entrar numa sala cheia de máquinas. A seguir, penetra-se na própria câmara do detetor.

E, virtualmente suspensos no detetor vazio, parecemos estar dentro de uma bola de espelhos virada do avesso. Em todos os ângulos vemos 9600 tubos fotomultiplicadores de tom dourado. Mesmo num ecrã de computador, é arrebatadora a beleza caleidoscópica da esfera geodésica com 12 metros de diâmetro. De pé, à nossa frente, está um homem de fato-macaco azul e capacete cor de laranja, que nos faz perceber como é pequeno quando comparado com a vastidão do dispositivo em redor. A visita virtual decorre quando o detetor está vazio, mas normalmente todos aqueles detetores dourados são como que os olhos da experiência, examinando os milhares de toneladas de água pesada, emprestados pela frota de reatores do Canadá, cujo valor extraordinário ascende a 500 milhões de dólares canadianos.

Afinal, a ideia mais louca estava correta. Existem três tipos de neutrinos, e os neutrinos individuais *oscilam*: ou seja, um neutrino que nasceu com um certo tipo, por exemplo, um neutrino do eletrão, oscila entre o seu estado original e dois outros tipos de neutrino, chamados neutrino do muão e neutrino do tauão. A experiência de Davis era sensível apenas aos neutrinos do eletrão, pelo que, se os neutrinos solares oscilassem para os outros tipos, ele não teria podido detetar dois terços deles. A primeira prova disso chegou em 1998, do Super-Kamiokande¹², o detetor de Kajita instalado no Japão, que consistia em 50 mil toneladas de água ultrapura num reservatório a mil metros no subsolo, com 13 mil tubos fotomultiplicadores que procuravam os clarões produzidos diretamente pelas interações dos neutrinos. Os resultados de Kajita comprovavam a ideia de que os neutrinos atmosféricos criados pelos raios cósmicos mudam de tipo durante a sua viagem. Isto não

resolvia por completo o problema dos neutrinos solares, visto que não se estava a observar neutrinos oriundos do Sol. Por fim, a 18 de junho de 2001, Art McDonald e a equipa do SNO anunciaram que tinham utilizado o seu belo detetor dourado para demonstrar a oscilação dos neutrinos solares, assim resolvendo o mistério dos neutrinos solares em falta, identificado por Ray Davis quase 50 anos antes.

Em 2015, após a cerimónia da entrega do Nobel em Estocolmo, McDonald visitou as numerosas instituições que tinham contribuído para aquela vitória. Uma delas ficava em Oxford, onde McDonald festejou com muitos colegas na sala de jantar apainelada a madeira do Mansfield College. Embora eu não seja uma física de neutrinos, tive a sorte de estar presente. Entre o prato principal e a sobremesa, McDonald ergueu-se para discursar. «Ninguém encontra neutrinos no seu quotidiano», disse. «Talvez uma vez na vida um neutrino mude um dos nossos átomos e nem sequer nos apercebemos disso.» Sabemos agora que os neutrinos são abundantes — tanto quanto sabemos, são a partícula mais comum no Universo. Dezenas de milhares de milhões deles atravessam o nosso polegar em cada segundo, mas são extremamente difíceis de detetar. O SNO é um exemplo extremo da abordagem que os físicos de partículas foram obrigados a seguir para compreender partículas tão esquivas como os neutrinos.

Graças às experiências de McDonald e Kajita, sabemos agora que o tipo dos neutrinos pode mudar ao longo do tempo e da distância. Trata-se de uma ideia muito estranha. Talvez a melhor analogia que encontrei para a descrever seja a de Emily Conover, da

Universidade de Chicago¹³, que compara um neutrino à viagem de Cinderela no coche a caminho do baile. No início, o veículo em que viaja parece-se, sem dúvida, com um coche. Porém, conforme se aproxima do palácio, aumenta a probabilidade de o coche se transformar numa abóbora. No que diz respeito à mecânica quântica, podemos dizer que o veículo é, em simultâneo, uma abóbora e um coche. Aquilo que o veículo é depende do ponto da trajetória no qual o observamos. Se Cinderela viajar num neutrino do eletrão, é provável que, no instante em que chega ao baile (ou a um detetor), verifique que se encontra num neutrino do muão ou do tauão.

Esta oscilação exige — matematicamente — que os neutrinos tenham uma massa pequena. Porém, não sabemos ainda qual dos neutrinos é o mais pesado, nem exatamente o valor de cada uma dessas massas. As outras partículas não oscilam; esta propriedade parece ser exclusiva dos neutrinos. Tudo o que sabemos é que, se adicionarmos as três massas, o valor será ainda um milhão de vezes inferior ao da massa de um eletrão. Não sabemos por que motivo são tão leves.

Os neutrinos não «sentem» a força forte nem a força eletromagnética, mas apenas a força fraca e a gravidade. Da perspetiva de um neutrino, a matéria quase não existe; são apenas alguns eletrões rodando no espaço. Isto dificulta imenso a sua deteção, mas também os transforma num utensílio central na investigação da interação fraca, visto não ser afetado pelas forças forte e eletromagnética. Ao longo do tempo, este vislumbre levou à criação de feixes de neutrinos impelidos por aceleradores de

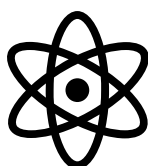
partículas (os feixes de prótons criam píons, que decaem em múons e neutrinos) e à atribuição do Nobel em 1988 a Leon Lederman, Jack Steinberger e Melvin Schwartz, que descortinaram a diferença entre o neutrino do elétron e o neutrino do múon (o terceiro tipo, o neutrino do tauão, seria finalmente detetado no ano 2000, numa experiência específica realizada no Fermilab).

Hoje, sabemos também que os neutrinos apresentam outras características invulgares, que parecem distanciá-los de todas as outras partículas. Por exemplo, a maior parte das partículas pode ser «esquerdina» ou «destra», mas não os neutrinos. Todos os neutrinos são esquerdinos e todos os antineutrinos são destros. Neste contexto, «esquerdino» ou «destro» indica o sentido da rotação das partículas e o modo como esse sentido se relaciona com a direção de deslocamento da partícula. Quando cerra os punhos, repare que mesmo que os seus polegares apontem na mesma direção (a direção do deslocamento), os dedos das mãos esquerda e direita estão enrolados em sentidos opostos; é análogo ao que se passa com uma partícula.

Não compreendemos o porquê de os neutrinos não se apresentarem em variedades esquerdinas e destros. O que sabemos é que existem numerosas fontes de neutrinos no Universo. Em 1987, foram detetadas, em múltiplas experiências, ejeções de neutrinos de uma supernova, o que originou o novo domínio da astronomia dos neutrinos. Numa estrela, os fótons da luz estão em interação constante, sendo absorvidos e reemitidos pelos átomos. Os fótons podem precisar de cem mil anos para viajar entre o núcleo e a superfície de uma estrela. Em comparação, os neutrinos

deslocam-se pelo espaço sem restrições, penetrando no coração do Sol e nas supernovas de uma forma impossível a outras partículas. Fora da nossa galáxia, o espaço assiste à criação de partículas com energias extremamente elevadas e é muitíssimo provável que os neutrinos venham um dia a ser os mensageiros que nos ensinam o modo de funcionamento desses aceleradores de partículas cósmicos. Talvez nos proporcionem um mecanismo que possamos replicar nos laboratórios da Terra.

A criação de neutrinos acontece também mais próximo de nós. Na realidade, o decaimento beta acontece igualmente no interior da Terra, produzindo antineutrinos¹⁴. O detetor Borexino, concebido para procurar estes *geoneutrinos* (além dos neutrinos solares), encontra-se num laboratório nas entranhas de uma montanha em Gran Sasso, na Itália. Uma colaboração de cem físicos de Itália, Estados Unidos, Alemanha, Rússia e Polónia procura determinar que fração do calor da Terra é causada pelo calor radiogénico, gerado no interior da Terra por decaimentos radioativos, sobretudo de potássio-40, tório-232 e urânio-238. Isto é incrivelmente importante para os geólogos, visto que o calor impulsiona a quase totalidade dos processos dinâmicos na Terra, dos vulcões aos terremotos, e gerou uma nova disciplina científica, chamada geofísica dos neutrinos.



Para lá de novos e interessantes ramos científicos e de questões fascinantes em física de partículas, quando comecei a escrever sobre o Projeto Poltergeist e os seus sucessores sabia que, chegada a este ponto, tinha de reconhecer que não dispomos ainda de uma utilização direta para os neutrinos no nosso quotidiano. Apesar disso, os neutrinos são tão importantes para a história global da física das partículas que ignorá-los seria um erro imperdoável.

O neutrino é o exemplo clássico de uma investigação impulsionada pela curiosidade que não parece ter quaisquer aplicações práticas. Em comparação com o fogoso eletrão, que interage com a matéria por meio da força eletromagnética, ou com o neutrão, que interage com núcleos atômicos através da força forte, o neutrino, sem carga e quase sem massa, é como que o fantasma de uma partícula, que mal se consegue detetar e que praticamente não interage. Porém, se pensarmos nas experiências atrás descritas, sabemos que nem sempre é óbvio qual será a aplicação específica de uma descoberta.

Muitas das descobertas que vimos até aqui eram prematuras quando comparadas com as tecnologias suas contemporâneas: a princípio, nem a luz do sincrotrão nem o eletrão pareciam ter utilidade. O efeito fotoelétrico não foi utilizado em pleno na tecnologia quotidiana durante décadas. Os aceleradores de partículas não foram inventados para produzir isótopos para uso clínico nem para tratamentos oncológicos. Ninguém aguardava ansiosamente estas descobertas, exceto os físicos nelas envolvidos, e nem sempre as descobertas foram intencionais. Conquanto seja provável que os neutrinos nunca venham a ter uma utilização

direta, ao contrário dos elétrons, o conhecimento que deles dispomos é importante e — por incrível que pareça — há planos para algumas aplicações.

Na mina de Boulby, no norte de Inglaterra, um consórcio americano-britânico está presentemente a construir uma nova experiência chamada WATCHMAN (WATER CHerenkov Monitor of ANTineutrinos)¹⁵. Este projeto utilizará um detetor de neutrinos na monitorização remota de reatores de fissão nuclear através da detecção do fluxo de neutrinos por eles criado. O projeto poderá dar um contributo único para a segurança global ao criar um método fiável para verificar se os reatores estão conformes aos tratados de não-proliferação. Visto que os neutrinos são tão difíceis de travar, não há maneira de esconder um reator nuclear em operação de um detetor deste tipo.

Dos neutrinos poderá também chegar uma ajuda indireta na transição energética dos combustíveis fósseis e dos reatores de fissão nuclear para os reatores de fusão: estes são a nossa melhor hipótese de dispor de eletricidade abundante, segura e baixa em carbono no futuro. Os reatores de fusão recriam reações nucleares semelhantes àsquelas que alimentam o Sol, mas sem o risco de atingirem um «ponto crítico». No entanto, pôr em funcionamento um reator de fusão exige confiança absoluta nos nossos conhecimentos de física nuclear. Estes conhecimentos resultaram em parte das experiências com os neutrinos solares de Ray Davis, do Super-Kamiokande e do SNO, que confirmaram que o nosso modelo para a formação dos neutrinos no Sol está correto.

No futuro, poderão existir aplicações diretas dos neutrinos e do conhecimento que deles temos. Devido à sua capacidade de percorrerem distâncias cósmicas vastas a uma velocidade próxima da luz e sem qualquer restrição, os neutrinos poderão vir a tornar-se uma espécie de sistema de mensageiros cósmicos. Se existirem civilizações avançadas no espaço, sediadas em alguns dos milhares de exoplanetas que já descobrimos, os neutrinos poderão permitir que comuniquemos com elas. Apesar de se parecer mais com ficção científica do que com ciência, em 2012 decorreu no Fermilab uma experiência com neutrinos, chamada MINERvA (Main Injector Neutrino Experiment to study ν -A interactions), cujo propósito era exatamente esse. Codificaram um feixe de neutrinos com uma mensagem binária, usando um acelerador de prótons. A seguir, enviaram-no através de cerca de meio quilómetro de rocha para um detetor, e decodificaram-no com êxito¹⁶. Também na Terra este método podia ser útil, por exemplo na comunicação dos submarinos, visto que as ondas de rádio são distorcidas pelos obstáculos. Recorrendo aos neutrinos, os submarinos poderiam comunicar não apenas dentro de água, mas também numa linha direta através do centro da Terra.

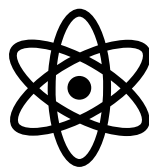
É correto dizer que os neutrinos não estão ainda prontos a utilizar, e talvez esse dia nunca chegue. Não conseguimos prever o futuro, mas o que podemos dizer acerca dos neutrinos é que o resultado do nosso esforço para os compreender contribuiu para a nossa vida de forma indireta, mas profunda. Já vimos que o SNO se localizava num laboratório no subsolo profundo no Canadá (entretanto, foi ampliado e rebatizado SNOLAB). Note-se que «subsolo profundo» significa exatamente isso. A 2100 metros

abaixo do solo, o laboratório está a uma profundidade 20 vezes superior à do Grande Colisionador de Hadrões, que abordaremos mais à frente. A pressão do ar aumenta 20 por cento durante a descida de seis minutos no elevador. Nigel Smith, diretor executivo do SNOLAB até 2021, descreve esta viagem como uma espécie de descida num avião, ainda que estejamos cercados por rocha.

O laboratório subterrâneo não é apenas o local de trabalho dos físicos de partículas. A sua criação abriu possibilidades em muitas outras áreas da ciência. Estar a uma tão grande profundidade proporciona um ambiente especial, porque o laboratório tem um nível incrivelmente baixo de radiação de fundo dos raios cósmicos. A existência de instalações subterrâneas estáveis e «limpas», com níveis de radiação tão baixos, possibilitou um programa de investigação amplo sobre o impacto dos baixos níveis de radiação em células e organismos. Nunca houve animais terráqueos que conseguissem viver — ou evoluir — sem exposição à radiação de fundo dos raios cósmicos, pelo que estas experiências ajudam os biólogos a compreender qual é o impacto quando se elimina esta radiação. Trata-se de um facto importante, porque pode esclarecer se a radiação terá sempre efeitos negativos nas células e nos organismos, se causará sempre lesões, ou se existirá algum nível de radiação limite não-lesivo ou mesmo eventualmente benéfico para os seres vivos. Pode ajudar-nos a perceber se a evolução será influenciada pelas mutações aleatórias provocadas pela radiação. Até agora, os resultados parecem indicar que a vida requer de facto um baixo nível de radiação¹⁷. Se esta hipótese for validada por outras experiências, terá implicações tremendas não apenas para nós, humanos, e para as nossas interações com a radiação, mas

também para o modo como encaramos a existência de vida noutros locais do cosmos. Sem laboratórios no subsolo profundo, seria impossível realizar esta investigação.

Sucede também que o SNOLAB é um dos melhores lugares à superfície (ou no interior?) da Terra para realizar experiências em computadores quânticos. Surgem provas de que o tempo de decoerência, ou seja, o tempo durante o qual um «bit» quântico pode armazenar informação antes de a perder, pode ser limitado pela radiação de fundo natural na superfície da Terra. No futuro, talvez venha a ser necessário instalar os computadores quânticos no subsolo para conseguirem funcionar. Por enquanto, pelo menos, estes laboratórios proporcionam um espaço precioso para o desenvolvimento deste trabalho.



Ao neutrino chamaram fantasma, mensageiro, nave espacial, uma mão-cheia de nada. Começou a sua vida como uma desculpa para preservar uma lei básica da física, mas ao longo do tempo conduziu a enormes progressos em astronomia, cosmologia, geologia e na nossa compreensão dos fundamentos da matéria.

Os neutrinos fazem agora parte do Modelo Padrão da física de partículas, mas algumas das suas propriedades — serem «esquerdinos», terem massa, mudarem de tipo — mostraram-nos que deve haver física além do Modelo Padrão, o que, como é

evidente, levanta inúmeras questões. Por que têm massa os neutrinos? Serão os neutrinos a sua própria antipartícula? Será que as oscilações dos neutrinos e dos antineutrinos acontecem da mesma maneira e, se assim não for, poderá isso explicar a razão de se observar mais matéria do que antimatéria no Universo? O neutrino, conquanto minúsculo, é mil milhões de vezes mais abundante no Universo do que a matéria que constitui as estrelas, as galáxias e nós próprios. Para revelar os seus segredos, quer os experimentalistas quer os teóricos escalaram grandes altitudes ou desceram às profundezas da Terra. Numa reviravolta irónica, ao preservar uma lei básica da física, o neutrino tornou-se um dos mais prolíficos geradores de lacunas no conhecimento físico. O que apenas comprova que há muito mais por descobrir sobre as partículas e as forças do Universo.

¹ Do discurso de Fred Reines na cerimónia do Nobel, disponível online em <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/reines-lecture.pdf>.

² Tecnicamente, este processo captura o gémeo do neutrino na antimatéria, mas Reines e Cowan não sabiam disso e, para o que nos importa, não faz grande diferença por enquanto. Trata-se do processo oposto do decaimento radioativo beta, patente nas experiências pioneiras de Meitner e Hahn, e chama-se *decaimento beta inverso*.

³ A invenção destes tubos é difícil de situar, mas pensa-se que tenha acontecido ou na Rússia ou nos Estados Unidos. Atualmente são desenvolvidos e comercializados sobretudo pela empresa japonesa Hamamatsu.

⁴ Este teria sido um osciloscópio de raios catódicos. Ver Capítulo 1.

⁵ A ideia de um *contador de radiação de corpo inteiro* foi depois utilizada em medicina para medir o nível a que o material radioativo, natural ou sintético, consegue penetrar, circular e ser assimilado pelo corpo humano.

⁶ Tecnicamente trata-se de um antineutrino, o equivalente do neutrino na antimatéria, necessário, visto que o decaimento tem de conservar o «número leptónico»: o eletrão tem o número leptónico +1 e o antineutrino -1, que se anulam mutuamente.

⁷ Isto não acontece com facilidade, porque não é possível haver uma fusão direta dos protões. Primeiro, é preciso fundir quatro protões em dois deuterões, a seguir adicionar protões para ter dois núcleos de hélio-3 e, por último, fundir estes para formar um núcleo de hélio-4. Ao longo das diversas etapas da sequência, são libertados neutrinos, raios gama e positrões.

⁸ Os raios gama, por outro lado, envolvidos em interações eletromagnéticas, levam centenas de milhares de anos a atingir a superfície e a manifestar-se, por fim, como luz visível.

⁹ Detetar ou não a versão de matéria ou antimatéria de uma nova partícula tem pouca importância para os físicos atuais. Porém, os neutrinos são interessantes neste aspeto. Definimos neutrinos e antineutrinos pela maneira como interagem com outras partículas, pelos valores do chamado número leptónico, mas ainda não sabemos se eles são de facto diferentes ou se os neutrinos são a sua própria antipartícula.

¹⁰ A vida de Pontecorvo é uma história fascinante; ver os livros de Frank Close, *Neutrino*, Oxford, OUP, 2010, e *Half Life*, Londres, Oneworld, 2015.

¹¹ Pode fazer uma visita virtual aqui: <https://www.snolab.ca/facility/underground-facilities/>.

¹² A Experiência de Decaimento de Nucleões de Kamioka foi originalmente concebida para medir o decaimento de um próton. Conseguiu estabelecer limites ao tempo de vida do próton, mas também se revelou eficiente no caso dos neutrinos e foi aperfeiçoada ao longo do tempo com este objetivo. A interação dos neutrinos na água pode produzir elétrons ou pósitrons que se deslocam mais depressa do que a luz (notando que se trata da velocidade da luz na água, que é inferior à velocidade da luz no vácuo), um efeito equivalente ao estampido sónico de um jato. Este efeito produz um cone de luz a que chamamos radiação de Cherenkov, para cuja medição o Super-Kamiokande foi concebido.

¹³ <https://www.symmetrymagazine.org/article/june-2013/cinderellasconvertible-carriage>.

¹⁴ <https://www.techexplorist.com/scientists-measured-neutrinos-originating-interior-earth/29364/>.

¹⁵ <https://www.sheffield.ac.uk/news/nr/nuclear-particle-physicsresearch-study-watchman-uk-us-boulby-1.828008>. (Não encontrada).

¹⁶ <https://www.popsi.com/science/article/2012-03/first-timeneutrinos-send-message-through-bedrock/>. (Não encontrada).

¹⁷ C. Thome *et al.*, «The REPAIR project: Examining the biological impacts of subbackground radiation exposure within SNOLAB, a deep underground laboratory», *Radiation Research*, vol. 88(4.2), 2017, pp. 470-4. doi: 10.1667/RR14654.1.

CAPÍTULO 10

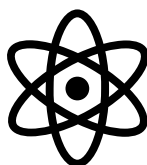
Aceleradores Lineares: A Descoberta dos Quarks

Ao longo da costa sul da Grã-Bretanha, há uma série de pratos de betão gigantes voltados para o mar. O maior deles é uma parede curva de 60 metros. À distância, assemelham-se a equipamentos de rádio ou satélite, mas são anteriores a estas tecnologias. Construídas entre 1915 e 1930, estas estruturas cuidadosamente modeladas são espelhos acústicos, instalados como um sistema de alerta para a aproximação da aviação inimiga. A ideia era engenhosa: recorrer a grandes pratos parabólicos que refletissem as ondas sonoras para um ponto focal onde um operador estaria à escuta do ruído da hélice de um avião. Infelizmente, eram bastante ineficazes — mas isso de pouco importou, porque surgiu uma nova técnica que os tornou obsoletos.

No fim da década de 1920, os transmissores e recetores de rádio começavam a impor-se. Em 1935, o físico britânico Robert Watson-Watt inventou um sistema capaz de refletir sinais de rádio de onda curta¹ emitidos por objetos distantes em movimento, tais como navios ou aeronaves, e detetar as ondas refletidas com uma antena que identificava a localização do objeto. Chamou ao sistema «Radio Detection and Ranging», ou *radar*. Em 1939, quando eclodiu a

Segunda Guerra Mundial, uma série de estações de radar fora construída ao longo das costas sul e leste da Grã-Bretanha.

O radar prometia ser muitíssimo mais eficaz do que os espelhos acústicos, mas para cumprir todo o seu potencial o sistema exigia três melhoramentos cruciais. Primeiro, precisava de funcionar a um comprimento de onda ainda mais curto para conseguir detetar objetos pequenos, como os submarinos alemães. Estes aparelhos, que atacavam e afundavam navios com regularidade, podiam, em princípio, ser detetados por um radar de alta frequência assim que emergiam. Segundo, para ter um maior alcance, o sistema precisava de transmissores de rádio mais potentes do que os disponíveis naquela época. E terceiro, era necessário um sistema de radar que pudesse ser instalado em caças, pelo que tinha de ser mais pequeno e mais leve do que os sistemas existentes. Esta determinação em obter um radar funcional em tempo de guerra conduziu a progressos tecnológicos enormes, desde as telecomunicações até ao tratamento do cancro. Em simultâneo, os avanços na tecnologia do radar seriam aperfeiçoados pelos físicos e conduziram a uma das descobertas mais empolgantes de sempre: os quarks.



Na costa da Califórnia, Russell Varian, formado em Física por Stanford, e o seu irmão mais novo, o piloto Sigurd Varian, viviam numa comunidade socialista-teosófica chamada Halcyone, onde

trabalhavam nas suas ideias sobre a tecnologia do radar. Tentaram construir um laboratório na comunidade para nele trabalharem, mas não foram bem-sucedidos devido ao isolamento. Em 1937, os irmãos perceberam que lhes seria útil a colaboração com Bill Hansen, ex-colega de quarto de Russell durante a pós-graduação. Hansen era um especialista em tecnologia de emissão de ondas de rádio na Universidade de Stanford. Firmaram um acordo com a universidade, que não lhes pagaria salários mas facultaria um orçamento de cem dólares e ficaria com 50 por cento do lucro de tudo o que inventassem.

Hansen tinha crescido na Califórnia e interessava-se por brinquedos mecânicos e elétricos desde tenra idade. Estudante brilhante, sobretudo a matemática, concluiu a escola secundária aos 14 anos e matriculou-se em Stanford dois anos depois, tendo começado por estudar engenharia e depois física experimental. Durante a pós-graduação, Hansen trabalhou em física atômica, onde teve como colega Russell Varian. A dislexia de Russell fazia com que fosse amiúde subestimado. Nesta altura, o interesse de Hansen não residia apenas na geração de ondas de rádio; em vez disso, ele queria construir um acelerador de partículas para os eletrões.

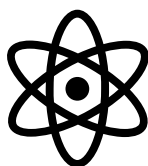
Hansen acreditava que, se fosse possível construir uma cavidade metálica com as dimensões certas, as ondas eletromagnéticas ressoariam dentro dela. Disparando um feixe de eletrões contra a cavidade, seria possível utilizar as ondas eletromagnéticas em oscilação no interior dela para acelerar o feixe. O nome que escolheu para o seu dispositivo — *rumbatrão* — aludia à maneira

como as ondas pareciam dançar, ao ressaltarem na cavidade. Porém, o rumbatrão tinha um problema semelhante ao que haviam enfrentado os pioneiros do radar: para funcionar, precisava de uma fonte de energia na área das radiofrequências, cujo comprimento de onda era inferior ao de todas as fontes conhecidas.

No lapso de 12 meses, Hansen e os irmãos Varian inventaram um aparelho a que chamaram *clistrão*. No interior de um dispositivo cilíndrico do tamanho de uma lata, aplicaram um sinal rádio de baixa potência a um feixe de eletrões que atravessava uma série de cavidades, tal como Hansen imaginara. O dispositivo não acelerava os eletrões; em vez disso, a combinação da cavidade e dos eletrões em trânsito criava uma ressonância e emitia ondas eletromagnéticas. Em resultado, o pequeno sinal de entrada era amplificado pela energia do feixe de eletrões e produzia *micro-ondas* de energia elevada, com frequências na gama dos GHz. De modo contraintuitivo, o nome «micro-ondas» não significa que o respetivo comprimento de onda seja minúsculo — na realidade, está próximo de 10 centímetros, cerca de 200 mil vezes superior ao da luz visível, aquela que os nossos olhos conseguem ver. A escolha deste nome deve-se ao facto de as ondas produzidas serem mais curtas do que as familiares ondas de rádio. Este comprimento de onda mais curto tornava o próprio clistrão pequeno e leve, com apenas alguns quilogramas de peso.

O clistrão não era suficientemente potente para ser utilizado em radares, mas representava um grande passo em frente — era o primeiro dispositivo a funcionar na gama das micro-ondas, de forma eficiente e estável². Para eles, era de facto o primeiro, pois

desconheciam que no Reino Unido outro fora inventado em simultâneo.



Em 12 de setembro de 1940, uma delegação secreta de seis homens, entre os quais John Cockcroft, chegou a Washington levando consigo o que os historiadores norte-americanos chamaram «a carga mais valiosa que jamais chegou à nossa terra»³. Tratava-se de um baú de folha de Flandres que continha um pequeno dispositivo em cobre e uma série de documentos explicativos sobre outros inventos britânicos. Naquele momento, os Estados Unidos eram ainda território neutro e o plano⁴ era o seguinte: a Grã-Bretanha entregava-lhes estes segredos e, em troca, recebia recursos para o desenvolvimento e a produção.

O dispositivo de cobre no interior do baú fora construído pelos físicos John Randall e Harry Boot, na Universidade de Birmingham, em 1939. Este invento⁵, o magnetron de cavidades, é um bloco cilíndrico de cobre com um grande buraco central, rodeado por outros buracos mais pequenos, dispostos em redor do central como as pétalas de uma flor. Os eletrões circulam dentro do buraco central por influência de um magneto e, ao passarem pelas «pétalas» ou cavidades, criam uma ressonância que produz ondas eletromagnéticas. Quanto mais pequeno for o dispositivo, mais elevada será a frequência das ondas que cria: este funcionava a 3 GHz, uma frequência muito parecida com a do clistrão.

Quer o magnetrão quer o clistrão podiam produzir impulsos de frequência elevada com um comprimento de onda muito inferior ao dos sistemas de radar existentes, o que permitiria a detecção de objetos mais pequenos com antenas também mais pequenas. Ambos os aparelhos eram compactos e leves. O que distinguia o magnetrão era produzir impulsos com valores de potência sem precedentes e poder utilizar-se na localização de aviões a quilómetros de distância. Os britânicos perceberam a valia do magnetrão de cavidades, pelo que o mantiveram em segredo, mas careciam da capacidade de manufatura para desenvolver a tecnologia em grande escala. Com o bombardeamento alemão a intensificar-se, o governo britânico decidiu partilhar a tecnologia ultrassecreta com os Estados Unidos e pedir-lhes ajuda.

De início, o contingente norte-americano mostrou-se relutante, mas acabaria por partilhar o seu próprio protótipo de radar que sabia ter atingido um beco sem saída. Precisava de maior potência transmissora. Quando John Cockcroft e os seus colegas revelaram o magnetrão de cavidades, o problema ficou resolvido, pois este aparelho tinha uma potência de saída mil vezes superior à do clistrão. Em resultado, o governo dos EUA financiou os físicos do MIT para que criassem em segredo o Rad Lab⁶, que conjugava muito da teoria e dos componentes necessários ao funcionamento de um radar de alta frequência — sempre com base na tecnologia do magnetrão. Na época, as únicas pessoas com experiência em tecnologia de alta frequência eram os cientistas dos aceleradores, que foram contratados para elevar cada vez mais a potência de saída dos magnetrões. Bill Hansen costumava aparecer para orientar os físicos do MIT. No seu auge, o Rad Lab empregava

quatro mil pessoas e concebeu metade de todos os sistemas de radar utilizados durante a guerra.

As empresas começaram a fabricar magnetrons em grande escala e o MIT selecionou a empresa de eletrónica local Raytheon para o ajudar no desenvolvimento. Grandes empresas, como a General Electric e a Westinghouse, não tardaram a começar a produzir magnetrons, bem assim como pequenas empresas, como a Litton Industries, situada num subúrbio industrial de San Francisco, que produzia tubos de vácuo e ajudara os irmãos Varian a construir o seu primeiro clístrão.

Em 1945, uma destas empresas, Raytheon, produzia 17 magnetrons por dia para o Departamento de Defesa. Foi então que um dos seus engenheiros, Percy Spencer, reparou que uma barra de chocolate que trazia no bolso tinha derretido enquanto ele estava perto do magnetron. Resolveu experimentar o magnetron para cozinhar alimentos, primeiro pipocas — um êxito retumbante —, depois outros alimentos, os quais aqueciam rapidamente quando acondicionados numa caixa metálica. A Raytheon registou a patente do primeiro forno de micro-ondas, cuja primeira versão comercial, o «Radarange», media 2,4 metros de altura e custava cinco mil dólares. Ao longo do tempo foram surgindo fornos de micro-ondas mais pequenos e baratos, acionados por magnetrons, que desembocaram no eletrodoméstico que todos conhecemos. Tratou-se de um derivado inesperado do radar, mas não seria o único.

Um artigo no *Saturday Evening Post*⁷ de 8 de fevereiro de 1942 anunciava: «O feixe do clístrão é ainda mais espantoso do que o

sonhado pelos seus inventores.» O texto referia-se entusiasticamente aos engenheiros dos telefones, que utilizavam as ondas dos clistrões para transmitir 600 mil conversas em simultâneo através do país, e aos engenheiros da televisão, que faziam o mesmo com as imagens. As aplicações militares não serviam apenas para detetar aeronaves ou navios inimigos: «Se for disparado de um avião na direção do solo, o feixe do clistrão indica ao piloto a altitude de voo. Disparado em frente, avisa-o da presença de montanhas escondidas, a tempo de alterar o rumo.»

O clistrão era licenciado pela empresa Sperry Gyroscope para aplicações comerciais e militares, incluindo o radar, e Russell e Sigurd Varian mudaram-se temporariamente para Long Island para trabalhar nestes projetos confidenciais. Em 1948, os irmãos Varian aperceberam-se do potencial comercial do clistrão para as transmissões de TV e telecomunicações, por isso deixaram a Sperry Gyroscope e regressaram à Califórnia para fundar uma empresa, a Varian Associates⁸, que fabricaria clistrões para esses mercados em crescimento rápido.

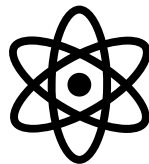
As forças armadas britânicas foram um cliente importante dos magnetrons para radares. Em 1953, criaram um relatório que classificava a qualidade dos diversos fabricantes de magnetrons na Europa e nos Estados Unidos. Para surpresa da General Electric, da Raytheon e da Westinghouse, o primeiro lugar da lista foi ocupado pela Litton Industries. Como era possível, interrogavam-se as grandes companhias, que esta pequena firma as ultrapassasse? A Litton conseguira começar a construir magnetrons para os sistemas de radar, porque dispunha do *know-how* da produção de tubos de

vácuo, conquanto outras companhias também os produzissem. O que dera então vantagem à Litton? Havia uma ligação que a pusera à frente das grandes empresas: tratava-se da ligação a Bill Hansen, ao clistrão e ao impulso de construir aceleradores de partículas.

O grupo de Stanford não poderia ter construído os primeiros clistrões sem a colaboração da Litton Industries. Esta forneceu componentes ao grupo de Stanford, com quem havia debatido os processos de fabrico. Foi graças a este intercâmbio que a Litton soube, por exemplo, da importância do vácuo elevado para a criação de aparelhos estáveis a altas energias. Sabiam estabelecer processos de controlo de qualidade para garantir que os aparelhos conseguiram manter um vácuo elevado e que todos os componentes permaneciam limpos durante o fabrico. Foi este segredo técnico que explicou o seu êxito quando começaram a construir magnetrons.

Com a Litton e a Varian na vanguarda, outras empresas tecnológicas começaram a crescer no parque industrial de Stanford. A Varian e os seus novos concorrentes locais atraíram a atenção de pessoas que procuravam trabalhar em áreas técnicas altamente qualificadas. Uma década após o arranque, a Varian Associates ocupava vários grandes edifícios e empregava mais de 1300 pessoas, com vendas anuais de 20 milhões de dólares⁹. Milhares de pessoas acorreram à zona para trabalhar nas empresas florescentes dos ramos das micro-ondas e dos tubos de vácuo, ou tentaram iniciar negócios próprios, comercializando materiais especializados, máquinas de alta precisão ou outros serviços. O lugar que não passava de um subúrbio é agora o núcleo tecnológico mais famoso do mundo: Silicon Valley.

O crescimento de Silicon Valley na história da tecnologia é uma narrativa complexa, mas a sua génese está na infraestrutura industrial criada pelas empresas naquela área. Foi esta concentração de competências no sector da alta tecnologia que preparou o terreno fértil no qual floresceu a indústria dos semicondutores nas décadas de 1950 e 1960¹⁰. Tendo como vizinha a Universidade de Stanford, permitiu uma das maiores descobertas da física do século XX.



Tal como acontecera a muitos físicos, o trabalho de Hansen tinha descarrilado durante a guerra, e o seu sonho de construir um acelerador de partículas para investigação em física fora posto de parte. Após a guerra, os projetos dos magnetrons e clistrons de grande potência foram desclassificados e, de súbito, os cientistas dos aceleradores de todo o mundo puderam dispor de tecnologia, industrializada e de baixo custo, para conseguirem aperfeiçoar os seus aceleradores de partículas. Hansen regressou à sua inspiração inicial: construir um acelerador de eletrões, sabendo que magnetrons e clistrons — *fontes de energia de radiofrequência* (RF) — podiam fornecer energia a um novo tipo de acelerador. Era a concretização plena da ideia que Wideroe tivera na década de 1920: o *acelerador linear*.

Em vez de aplicar tensões elevadas, como na época de Cockcroft e Walton, Hansen planeava fazer passar as partículas pelas

cavidades de radiofrequência para que ganhassem energia. Concebeu o sistema como uma série de cavidades de cobre maquinadas com precisão e com um orifício para a passagem do feixe. A aceleração ocorria nestas cavidades. A energia que as alimentava provinha de um clístrão — escolhido, em parte, por ser uma invenção da qual era coautor —, que gerava ondas eletromagnéticas. Dentro das cavidades aceleradoras, estas ondas oscilariam de tal forma que o campo elétrico daria um «empurrão» às partículas, para que se deslocassem mais depressa. Ele sabia que se redesenhasse o clístrão para produzir energia com RF suficientemente elevada, o «empurrão» e a energia que as partículas ganhariam enquanto passavam pelas cavidades aceleradoras seriam substanciais. Os aceleradores lineares de eletrões tinham agora o potencial de se tornarem compactos e eficientes, graças às novas fontes de energia de RF.

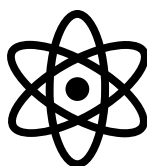
Em Stanford, Hansen reuniu uma equipa que incluía Ed Ginzton e Marvin Chodorow, a qual construiu o primeiro acelerador de 6 MeV, em 1947. O relatório que enviaram à entidade financiadora consistia em apenas uma frase: «Acelerámos eletrões.» O acelerador linear, ou LINAC, era muito mais pequeno e leve do que os aceleradores existentes. Pouco depois, uma equipa chefiada por Luis Alvarez, em Berkeley, construiu um acelerador de prótons de frequência mais baixa. Orgulhoso, tirou uma fotografia à equipa: uma fila com cerca de 30 pessoas sentadas lado a lado sobre a (relativamente grande) máquina. Quando Hansen descobriu esta foto, chamou três dos seus alunos de pós-graduação. De pé, cada um encostou o peito às costas de outro, e ergueram no ar com uma mão o seu novo acelerador de eletrões de alta frequência. Quando

ficou concluído, tinha menos de dois metros de comprimento: pequeno, leve, eficiente, no rumo do futuro. A investigação de Hansen e de outros envolvia um fluxo de inovação com dois sentidos: primeiro, os físicos inventaram novos aparelhos — o magnetrão e o clistrão — que tiveram aplicações de grande escala no mundo real, no domínio do radar; segundo, a industrialização destes aparelhos ajudou os físicos a concretizarem as suas ambições experimentais.

Hansen sonhava com uma máquina muito maior: um acelerador de elétrons com mil milhões de volts, que pudesse ser utilizado para estudar as forças no núcleo. Foi na mesma época em que ocorreu o planeamento do Cosmotrão e do Bevatrão, e a febre de construção dos grandes aceleradores estava no seu auge. Hansen recrutou cerca de 30 estudantes de pós-graduação e 36 técnicos para o trabalho na grande máquina. Construíram uma série de protótipos, iniciada pelo Mark I (de 6 MeV), a que se seguiu o Mark II, que atingiu 33 MeV em 1949. Infelizmente, Hansen nunca veria a conclusão do projeto, pois sofria de uma doença pulmonar crónica que não parava de se agravar. Faleceu em 1949, pouco antes da entrada em funcionamento do Mark II. Foi um choque para todos, a começar pela sua equipa. Como afirma Ginzton: «Sem ele, não sabíamos se a máquina de mil milhões de volts viria a ser concluída.»¹¹

Toda esta inovação, ocorrida antes dos desenvolvimentos teóricos da década de 1950, deu aos físicos um entendimento mais profundo das interações entre partículas e forças fundamentais. No Capítulo 8 vimos como os grandes laboratórios nasceram para

construir os enormes sincrotrões de prótons, com os quais foi possível criar e estudar píons e partículas estranhas. Ao longo desse período, desenvolveu-se a nova tecnologia LINAC para os elétrons, a qual, no início, parecia ter pouco a ver com a compreensão da força forte e das novas partículas que eram descobertas. Com o tempo, tudo isso iria mudar.



Assim que Murray Gell-Mann impôs uma ordem à extensa lista de partículas com o Modo Óctuplo, tornou-se claro que as partículas estranhas se pareciam muito mais com os prótons e nêutrons do que com os elétrons ou fótons. Para compreender de facto as partículas estranhas era imperativo compreender a força nuclear forte. Uma das vias para essa compreensão passava pelos grandes sincrotrões de prótons, mas o problema desta abordagem está em que os próprios prótons interagem mediante a força forte, tornando quase impossível isolar as interações da força forte das partículas estranhas das interações da força forte dos prótons.

Este era o cerne do debate entre os cerca de 20 físicos e engenheiros de Stanford que foram convocados para a casa do físico alemão-americano W. K. «Pief» Panofsky nas colinas de Los Altos, em 10 de abril de 1956. Quando lá chegaram, disseram-lhes que eram todos voluntários para um novo projeto sem título, nem financiamento. A perspectiva de uma experiência não autorizada espicou-lhes a curiosidade, pelo que decidiram ficar. A ideia de

estudarem as propriedades da força forte nos prótons e nos neutrões com recurso aos eletrões surgiu precisamente porque os eletrões interagem pela força eletromagnética, mas não pela força forte: podiam usar os eletrões como uma sonda para compreender melhor a força forte.

A favor estava o facto de os eletrões serem já bem conhecidos. Na década de 1950, Richard Feynman, entre outros, criou a estrutura teórica da *eletrodinâmica quântica* ou QED, uma forma de calcular as interações das partículas baseada num conjunto de regras que facilitavam os cálculos. O método funcionava com fótons, eletrões e múons, com as respetivas antipartículas e até com os neutrinos. Contudo, não se aplicava às partículas estranhas, nem a prótons e neutrões. Os físicos perceberam que, se construíssem um acelerador de eletrões e bombardeassem materiais ricos em prótons e neutrões, conseguiriam isolar os dados das interações que podiam calcular (usando a QED) das das interações que não podiam calcular. Dessa maneira, talvez conseguissem isolar as interações fortes que os interessavam. Calcularam a energia necessária, e o número revelou-se 20 vezes superior ao do sonho de 1 GeV de Hansen¹². Havia apenas uma tecnologia que podia produzir o feixe que queriam e já estavam a trabalhar nela: o LINAC.

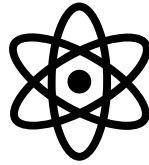
Num LINAC, o feixe não é encurvado, pelo que os eletrões não perdem energia através da radiação do sincrotrão (ver Capítulo 7). Para obter os dados suficientes era preciso o maior número possível de eletrões, e o LINAC produzia feixes com as intensidades elevadas necessárias, porque não era preciso esperar que um lote de partículas fosse acelerado antes de o seguinte poder iniciar a sua

viagem. A máquina podia utilizar um fluxo contínuo de partículas aceleradas em linha reta. As fontes de RF tinham de ser potentes — clistrões —, mas, dispondo de um acelerador suficientemente longo, podiam ser bem-sucedidos. Felizmente, a tecnologia continuara a evoluir desde a primeira versão de 6 MeV de Hansen. Em 1953, a equipa tinha alcançado 400 MeV e, quando o alvo de 20 GeV foi proposto na reunião de Los Altos, o acelerador Mark III aproximava-se do objetivo original de 1 GeV.

Este projeto novo e ambicioso precisava de um nome e, dado o tamanho monstruoso do acelerador — a rondar os três quilómetros — adotaram o nome «Projeto M». Não havia uma razão técnica para a escolha da letra «M», mas os físicos costumam dizer que se referia a «monstro», compreensível por se tratar do maior projeto jamais tentado em Stanford. Numa série de reuniões semanais ao longo do ano seguinte debateram ideias para o acelerador linear de 20 GeV que ficaria situado no *campus* de Stanford, em Menlo Park. Sintetizaram tudo num documento de cem páginas e solicitaram 114 milhões de dólares a três agências federais diferentes.

Ed Ginzton, colega de longa data de Hansen, que cofundara a Varian e assumira a sua chefia após a morte deste, dirigiu o *design*. Ao longo de um período de cinco anos, a equipa ultrapassou uma série de obstáculos políticos tortuosos até que, em 1961, o financiamento foi aprovado. O Stanford Linear Accelerator Centre, conhecido por SLAC, podia finalmente arrancar. Embora a Universidade de Stanford conservasse a direção do projeto, ele estaria aberto a cientistas de todo o mundo. A universidade doou o terreno e o Departamento de Energia dos Estados Unidos pagava a

fatura do acelerador. Tudo se conjugava: um produto das pessoas certas, da tecnologia certa e da localização certa, que coalesceram em redor de um objetivo comum.



Desde o momento em que publicaram o *design* em 1957 até ao da ligação do feixe em 1966, houve desenvolvimentos teóricos poderosos que contribuíram para impulsionar o programa experimental do SLAC. Em 1964, o Modo Óctuplo foi modernizado, dando lugar ao modelo do quark, mais sofisticado, proposto de forma independente por Gell-Mann e Zweig. Afinal, os prótons, neutrões, píons, caões e outras partículas pesadas não eram partículas fundamentais, mas sim compostas por três tipos de quark: cima, baixo e estranho, cada um deles com um *spin* específico e carga elétrica¹³. A teoria tinha uma consequência extremamente preocupante: os quarks possuíam carga elétrica não-inteira, ou seja, fracionária.

Ora, até então, na natureza haviam sido observadas apenas unidades inteiras de carga elétrica. Como podiam estas novas partículas ter carga elétrica de $+2/3$ ou $-1/3$? O próprio Gell-Mann não tinha a certeza de que os quarks fossem entidades reais, ou tão-somente um hábil truque matemático que funcionava. Se estes estranhos quarks com carga não-inteira fossem os componentes dos átomos, e se existissem de facto quarks dentro dos prótons e neutrões do núcleo, devia ser possível criá-los e medir as suas

propriedades. A demanda dos quarks tornou-se o próximo grande desafio experimental.

Os experimentalistas que trabalhavam no CERN depressa compreenderam que as partículas com carga de $1/3$ e $2/3$ deviam deixar rastros característicos numa câmara de bolhas, rastros esses que podiam ter escapado à deteção nas experiências prévias. Dois grupos perscrutaram cem mil fotografias da câmara de bolhas, obtidas em experiências anteriores, mas não encontraram indícios de partículas com carga elétrica fracionária. Em seguida, tentaram encontrar os quarks com o auxílio do sincrotrão de prótons e da câmara de bolhas, mas sem êxito. Ou os quarks tinham massa superior à que eles podiam criar ou não existiam. Ou, então, passava-se mais alguma coisa.

Os laboratórios com grandes aceleradores de prótons não pareciam ser capazes de libertar quarks diretamente pela cisão do próton ou neutrão; por isso, tinham de pensar numa maneira diferente de determinar se os quarks existiam. Mas como? Sucede que as novas instalações do SLAC proporcionavam as condições certas para esse desígnio.

O acelerador de 20 GeV surgiu em 1966, num processo que envolveu vários milhares de pessoas de Stanford e de outros locais, tendo como prioridade a pesquisa dos quarks. Entre o MIT e o SLAC nasceu uma colaboração, que incluía Henry Kendall, Richard Taylor e Jerome Friedman, entre outros. A equipa do SLAC era chefiada por Kendall e Taylor. Kendall era um físico natural de Boston que gostava da vida ao ar livre, e Taylor — conhecido pela vivacidade e

pelo humor — nascera em Alberta, no Canadá. Friedman, da equipa do MIT, originário de Chicago, era o filho artisticamente talentoso de imigrantes judeus russos. Friedman deslocava-se com frequência à Califórnia para se reunir com Kendall e Taylor.

As suas ideias recordam outra experiência que já vimos, quando Geiger e Marsden dispararam partículas alfa contra uma folha de ouro e descobriram que o átomo tinha um núcleo. Para verificar se prótons e neutrões tinham uma subestrutura, os caçadores de quarks do fim da década de 1960 decidiram utilizar praticamente o mesmo método. Os eletrões com 20 GeV tinham a energia suficiente para penetrar bem no interior dos prótons e neutrões. Se dentro destes existissem quarks, os eletrões seriam defletidos após o impacto e os ângulos e as energias resultantes permitiriam reconstituir aquilo com que haviam interagido¹⁴.

Quando conduzimos pela Autoestrada Interestadual 280, a meio caminho entre São Francisco e San Jose, passamos por cima do acelerador, que tem pouco mais de três quilómetros de comprimento. Quando foi construído, o túnel que o alberga era o edifício mais comprido dos Estados Unidos¹⁵. Dentro dele está a sala do clistrão, repleta com os dispositivos de radiofrequência de alta potência inventados por Hansen e pelos irmãos Varian. A energia que geram é transferida para o subsolo, percorrendo alguns metros até às cavidades de cobre, maquinadas com precisão, que compõem o acelerador linear de eletrões. No interior deste, os eletrões navegam nas ondas até atingirem 20 GeV¹⁶, deslocando-se a 99,9999999 por cento da velocidade da luz.

Quando tudo estava pronto para os caçadores de quarks do fim da década de 1960, na extremidade do acelerador os feixes de elétrons eram encurvados e direcionados, ao longo de três linhas de feixe, para dentro de duas câmaras experimentais onde colidiam com — ou, mais precisamente, eram defletidos por — um alvo composto por hidrogénio líquido, rico em prótons. A seguir, os elétrons defletidos passavam por um aparelho chamado espectrómetro magnético. Este aparelho media a energia dos elétrons ao submetê-los a um campo magnético que lhes curvava a trajetória. O espectrómetro era o maior instrumento científico do seu tempo, com 50 metros de comprimento e 3000 toneladas de peso. Amovível, estava montado em carris que o faziam rodar em torno do alvo para realizar medições segundo diferentes ângulos.

Em 1967, Kendall, Taylor e Friedman iniciaram as suas experiências utilizando o grande espectrómetro, a par de dois outros, mais pequenos. O que esperavam eles observar? Apesar da ambição de descobrir os quarks, a maior parte dos físicos da época pensava que os quarks não eram objetos reais e que o próton e o neutrão tinham uma espécie de estrutura interna mole. Seria de esperar que, à medida que o ângulo do espectrómetro aumentasse, menos elétrons fossem defletidos. Qualquer desvio em relação a esta tendência seria um indício da existência de quarks — ou mais alguma coisa — no interior. A experiência recolheu dados de modo a criar uma distribuição de probabilidade, e a equipa debruçou-se sobre os resultados num esforço para os interpretar.

Havia uma diferença de cerca de um fator de mil entre a expectativa e o resultado experimental¹⁷. De início, não era claro

que isso fosse uma prova da existência dos quarks, mas parecia indicar que havia algum tipo de estrutura no interior do próton. Teóricos como Richard Feynman e James Bjorken inventaram o nome *partões* para descrever estas entidades. Foi um momento remanescente da experiência pioneira com a folha de ouro, só que desta vez o resultado estava mais próximo do cerne da matéria: os prótons não eram partículas fundamentais, e os factos pareciam mostrar que os partões — presumivelmente, um tipo de partícula — se assemelhavam a pontos. Qual o significado de uma partícula se «assemelhar a um ponto»? Tal como sucede com o electrão, quer dizer que a partícula é tão pequena que o seu tamanho não pode ser medido. Mais tarde, Jerome Friedman recordaria: «Era uma visão muito estranha. Tão diferente do que se pensava na época que sentíamos relutância em falar acerca dela em público.»¹⁸

Durante os anos seguintes, Friedman, Kendall e Taylor continuaram a recolher dados para diversos ângulos do espectrómetro e realizaram uma segunda ronda de experiências com um alvo de deutério líquido, para reunir dados comparativos sobre o neutrão¹⁹. Com provas em número suficiente, começaram a sentir confiança nos resultados: os partões eram na realidade quarks, componentes pontuais que formavam a estrutura dos prótons e dos neutrões. Podemos agora afirmar que o próton é composto por três quarks, dois «cima» e um «baixo», e o neutrão, por um «cima» e dois «baixos. A peça final do *puzzle* era a confirmação da hipótese de que os quarks tinham cargas eléctricas fracionárias. Conseguiram fazê-lo comparando a dispersão dos electrões com dados semelhantes oriundos do CERN, que utilizavam neutrinos (eletricamente neutros), e que informaram os físicos

sobre as cargas elétricas envolvidas na interação. Os quarks possuíam, de facto, cargas elétricas fracionárias.

Uma análise posterior dos dados revelou informação sobre os prótons e os neutrões que era ainda mais subtil do que o facto de essas partículas conterem quarks. Cada próton ou neutrão possuía partes aproximadamente iguais de quarks e glúons neutros — partículas sem massa, agora consideradas as portadoras da força forte que «cola» os quarks uns aos outros, da mesma forma que o fóton é portador da força eletromagnética. Os três quarks principais no próton e no neutrão chamam-se *quarks de valência*. Em redor disto, há um «mar» de pares quark-antiquark, também evidenciados nos dados de dispersão a energias baixas. Próton e neutrão só poderão ser completamente entendidos, tanto no que respeita à massa quanto às interações, se se tiverem em conta os *quarks de mar* — pares quark-antiquark cima, baixo e estranho —, bem como os quarks de valência.

Na década de 1970, os físicos começaram a entender as propriedades invulgares da força forte que liga os quarks. Bastante fraca para distâncias curtas, é extremamente forte para distâncias longas. É como se fosse um elástico, que mantém os quarks juntos. Quando os quarks estão próximos conseguem deslocar-se com relativa liberdade, mas, se tentarmos separá-los, a força forte opor-se-á, devido a uma propriedade chamada *confinamento*. Esta aprisiona os quarks no interior do próton e do neutrão de tal maneira que, se tentarmos separá-los, a energia que teremos de aplicar vai apenas criar um par quark-antiquark. Isto tem uma consequência bizarra: a impossibilidade de observar quarks livres

na natureza. Eis a razão de Kendall, Taylor e Friedman terem sido bem-sucedidos, ao contrário de outros: descobriram uma maneira de observar quarks no seu estado confinado, no interior de prótons e neutrões.

A força forte é também responsável, de uma maneira subtil, por manter a ligação entre neutrões e prótons no núcleo atómico. Para esta distância maior, a força forte costuma ser chamada *força forte residual*. Os pormenores exatos do modo como os quarks interagem viriam a ser sistematizados numa teoria chamada *cromodinâmica quântica*, ou QCD (sigla do inglês Quantum Chromodynamics), que podemos utilizar para compreender a forma como o núcleo mantém a sua coesão.

A QCD defende que os quarks transportam um tipo de carga (análoga à carga eléctrica), chamada *carga de cor*, que apresenta três tipos, vermelho, verde e azul, embora sem afinidade alguma com o sentido habitual de «cor». Os antiquarks possuem as «cores» antivermelho, antiverde e anti-azul, e quando os quarks se combinam em partículas o todo deve ser «incolor». A combinação de azul, vermelho e verde é incolor, pelo que, se os quarks no interior do próton forem azuis, vermelhos e verdes, esta partícula é «permitida». O píon consiste num quark e num antiquark ou do tipo «cima» ou do tipo «baixo», numa combinação azul e anti-azul, vermelho e antivermelho ou verde e antiverde.

Os prótons e os neutrões dentro do núcleo são incolores, mas os quarks que contêm deixam um pequeno efeito residual da força forte, o qual, de um modo algo milagroso, os mantém unidos.

Embora pareça um pormenor de somenos, não é trivial: sem a força forte residual, os núcleos atômicos não seriam estáveis e a matéria, tal como a conhecemos, não existiria.

Tudo isto demorou algum tempo a ser aceite, mas o que ficou inequivocamente claro após as experiências de Friedman, Kendall e Taylor foi que os quarks existiam de facto²⁰. Os dias em que prótons e neutrões eram considerados os componentes fundamentais do átomo tinham acabado.

A descoberta do quark foi possibilitada pelo acelerador linear, o qual exigiu os clistrões e os magnetrões, que por sua vez haviam sido criados para proporcionar uma tecnologia de radar de grande potência. Hansen e os irmãos Varian não podiam ter previsto o desfecho da sua investigação. As interligações entre ciência pura e ciência aplicada, entre indústria e descoberta costumam ser histórias independentes, narradas por cientistas e por empreendedores. Ouvimos a história da descoberta da boca dos físicos e a narrativa da inovação e do êxito comercial da boca dos empreendedores. De alguma maneira esquecemos a simbiose que existe entre eles. Esta coalescência pode ter resultados imprevisíveis, e a presente história não termina com os quarks.

Quando encontrámos pela última vez os irmãos Varian, eles tinham arrancado com a sua empresa no local que viria a tornar-se Silicon Valley. Passado pouco tempo, já vendiam aceleradores LINAC de eletrões para aplicações exteriores à física, e estas máquinas trouxeram mudanças profundas à medicina, à segurança e à indústria. Hoje, o nome «Varian» é quase sinónimo da

tecnologia do acelerador linear, e o produto que maior probabilidade temos de encontrar — e de que um em cada oito de nós irá provavelmente precisar durante a sua vida — é um LINAC utilizado em radioterapia.

Em 1954, um médico chamado Henry Kaplan ouviu falar do desenvolvimento do acelerador em Stanford e transferiu-se para lá, tendo em vista a criação de um aparelho para tratamento do cancro²¹. Kaplan almoçou com Ed Ginzton e a colaboração entusiástica entre eles conduziu ao desenvolvimento do primeiro LINAC com fins clínicos dos Estados Unidos. Esta máquina com elétrons de 6 MeV foi utilizada pela primeira vez em 1956, em Stanford, para tratar com êxito um tumor ocular num menino de dois anos. O tumor foi eliminado e o menino não perdeu a visão. Kaplan impulsionou a formação de radiologistas no novo tipo de terapia, e a procura de aceleradores pelos hospitais começou a crescer.

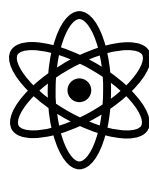
Kaplan e Ginzton convenceram a Varian Associates a construir um acelerador para uso clínico. Reduziram ainda mais o tamanho da máquina de 6 MeV até ficar suficientemente compacta para rodar 360 graus em volta do doente, permitindo ao médico tratá-lo segundo todos os ângulos. Desde então, a radioterapia de raios X tornou-se o método de tratamento de eleição, com o LINAC como aparelho para a sua aplicação — e quando os prótons e as partículas mais pesadas revelaram a sua utilidade clínica, esta forma de radioterapia era já o padrão a seguir (ver Capítulo 8)²².

Atualmente, cerca de metade de todos os casos de cancro são tratados com radioterapia, quando está disponível (os restantes são tratados com cirurgia e quimioterapia). A utilização de eletrões e raios X é bastante mais comum do que a de prótons e iões, em parte porque a tecnologia é muito mais pequena e barata. Um acelerador linear moderno para uso clínico fica alojado na cave do hospital, numa sala cujas paredes de betão com um metro de espessura funcionam como blindagem contra a radiação. Para um doente, o sistema é muito parecido com o centro de terapia de prótons que descrevi no Capítulo 9, só que neste caso todo o equipamento cabe dentro da sala de tratamento. No centro da sala fica a cama onde o doente se deita e, por cima dele, está um acelerador de partículas com um metro de comprimento que aumenta a tensão dos eletrões para cerca de 25 MeV e os direciona para um alvo de metal. À medida que os eletrões desaceleram ao atravessar o metal vão emitindo raios X, tal como nos tubos de raios catódicos que conhecemos no Capítulo 1. Os tratamentos de radioterapia baseiam-se na captação destes raios X e na sua modelação num sofisticado *sistema de colimação*, que absorve a radiação e cria um padrão de sombra de acordo com o plano de tratamento. Assim que adquirem a forma apropriada, os raios X são direcionados para o doente.

Todas as unidades de alimentação elétricas, sistemas de vácuo e sistemas eletrónicos ficam cobertos por um painel na retaguarda da máquina. Quando abrimos esse painel, vemos o clistrão e as guias de ondas que fornecem a energia de RF à estrutura da cavidade aceleradora no cerne do dispositivo. O braço do *gantry*, que contém o próprio acelerador, possui também uma blindagem

de chumbo e uma série de magnetos que direcionam o feixe para baixo, para o alvo de metal, onde são gerados os raios X. Todo o acelerador fica dentro de um compartimento de plástico, cercado por sistemas de imagiologia e painéis de controlo. Premindo um botão, todo o sistema do acelerador pode rodar 360 graus em torno da cama do doente.

Varian é uma das duas marcas que dominam o mercado atual dos aceleradores com fins clínicos. A outra é Elekta, fundada por Lars Leksell em 1972, na Suécia, que comercializa o equipamento de radiocirurgia de precisão conhecido por «Bisturi Gama». Enquanto as máquinas da Varian usam sobretudo os clistrões, inventados pelos irmãos Varian, a tecnologia da Elekta utiliza principalmente magnetrons. Ambas as empresas contam com muitas e ativas colaborações com grupos universitários e inovam continuamente para aperfeiçoar as máquinas e conseguir os melhores resultados clínicos possíveis.



Existem mais de 12 mil LINAC para radioterapia em serviço em todo o mundo. Estas máquinas recordam-nos que a tecnologia experimental é utilizada não apenas no estudo da física de partículas, mas também para salvar as vidas de milhões de pessoas. Na verdade, 12 mil LINAC não chegam. Com as atuais taxas de incidência do cancro, é preciso uma máquina para cada 200 mil pessoas e, conquanto nos países de rendimentos altos este número

seja uma realidade, há hoje uma carência de cerca de cinco mil máquinas nas nações classificadas pelo Banco Mundial como Países de Rendimentos Médios e Baixos (PRMB). Na África subsariana, há 35 países que não dispõem de momento de nenhum programa de radioterapia.

A incidência do cancro cresce a nível mundial, em resultado do aumento da esperança de vida da população, e o crescimento é mais rápido nos PRMB. Estima-se que em 2035 haja cerca de 35 milhões de pessoas diagnosticadas com cancro por ano, e 65-70 por cento de todos os casos de cancro serão nos PRMB. Ainda que os enormes esforços globais para erradicar outras doenças estejam a dar frutos, um dos quais é o aumento da longevidade a nível mundial, a probabilidade de se ser diagnosticado com cancro aumenta com o envelhecimento. Os recursos médicos progrediram o suficiente em numerosos PRMB para se conseguir diagnosticar o cancro, e o acesso crescente à instrução significa que as pessoas conhecem relativamente bem os sintomas da doença e que vão consultar um médico.

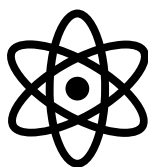
Em 2035 serão necessárias mais 12.600 máquinas, juntamente com dezenas de milhares de oncologistas, radiologistas, especialistas em física médica e outros profissionais da medicina. A Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) desenvolve um trabalho extraordinário neste sentido, mas a necessidade crescente de equipamentos está a ultrapassar a velocidade à qual as novas instalações de radioterapia são construídas e inauguradas.

Em 2016, aconteceu um encontro internacional no CERN para um debate sobre estas máquinas, o qual reuniu especialistas em aceleradores e em saúde global, incluindo médicos da Nigéria, Botswana, Gana, Tanzânia, Zimbabué e outras nações da África subsariana. Os peritos em tecnologia passaram três dias a escutar e a fazer perguntas, procurando compreender o que estava errado e o que precisava de mudar. Eu participei nesse encontro, e assim que despertei para este incrível desafio global, nunca mais deixei de pensar nele.

Mesmo que um hospital consiga adquirir uma máquina, o contrato de manutenção anual custa aproximadamente o mesmo que os salários a tempo inteiro de 25 engenheiros. As peças sobresselentes podem demorar muito tempo a chegar e, depois, ficar paradas nas alfândegas durante meses. E, por cada dia que o acelerador estiver avariado, perto de 50 doentes não receberão tratamento. Estes são os aceleradores de partículas mais comuns no mundo, mas depois percebemos que foram concebidos para os países de rendimentos altos, com fornecimento de energia estável, um exército de engenheiros bem treinados e sistemas de saúde robustos.

Os participantes naquele encontro juntaram-se para lançar uma nova colaboração: STELLA — Smart Technologies to Extend Lives with Linear Accelerators («Tecnologias inteligentes para prolongar a vida com aceleradores lineares»). Há muitos aspetos deste desafio que precisamos de enfrentar, incluindo os da educação, do desenvolvimento global, dos sistemas de saúde e da tecnologia. Recorrendo aos modelos de colaboração que estruturam a Grande

Ciência, propomo-nos vencer este desafio, e a nossa primeira fase — conceber um LINAC mais adequado para estas condições — está em marcha²³.

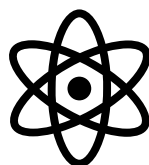


Além da medicina, existem muitas mais aplicações para o LINAC. Há milhares de pequenos aceleradores utilizados em sistemas de verificação de segurança em portos e fronteiras, que permitem aos funcionários das alfândegas obter imagens do interior de camiões e de contentores de cargueiros, em busca de contrabando. Os raios X de energia elevada produzidos pelos LINAC conseguem atravessar objetos volumosos, ao contrário dos tubos de raios X convencionais.

Os aceleradores de eletrões são usados para esterilizar produtos médicos, algumas encomendas postais suspeitas e até para eliminar patógenos de certos alimentos, incluindo vegetais. O número de aplicações continua a crescer. Na Coreia do Sul encontramos pequenos aceleradores lineares que eliminam as emissões nocivas de centrais geradoras e tratam os efluentes de fábricas, sem recorrer a químicos agressivos. Embora possa parecer contraintuitivo, os aceleradores de partículas poderão ser um dos recursos mais amigos do ambiente de que dispomos — são inclusivamente utilizados para produzir painéis solares mais baratos²⁴. O mercado para este tipo de aceleradores vale agora cerca de cinco mil milhões de dólares por ano e não pára de crescer.

Magnetrons, clistrons e aceleradores lineares continuam a ser desenvolvidos, tanto na indústria quanto nos laboratórios universitários, amiúde em projetos colaborativos entre os dois setores. Estas tecnologias estão a ficar mais pequenas, mais baratas, mais fiáveis e energeticamente mais eficientes. As tecnologias dos aceleradores para a física de partículas são agora desenvolvidas em conjugação com as suas aplicações em medicina e na indústria, em parte porque o processo de industrialização pode contribuir para reduzir o custo dos grandes projetos, tal como aconteceu com a pesquisa dos quarks.

Atualmente, as conferências sobre os novos tipos de radioterapia, que conseguem reduzir os tempos de tratamento do cancro de minutos para segundos e de 25 sessões de tratamento para apenas uma ou duas, estão repletas de físicos dos aceleradores²⁵. Os físicos que trabalham ao lado dos colegas da medicina para inventar estas tecnologias da próxima geração são os mesmos que concebem experiências em física de partículas. Eles adoram sentir-se capazes de criar um impacto imediato no mundo real, sem nunca terem de fazer uma pausa na sua procura de respostas para as grandes questões sobre o Universo.



Porém, tudo isto viria muito depois. No final da década de 1960, anunciava-se uma nova Era de descobertas. Enquanto os humanos davam os seus primeiros passos na Lua, os físicos faziam também

incursões pioneiras nos componentes ínfimos da matéria. Após a descoberta dos quarks, os físicos de todo o mundo continuaram a revolucionar a física de partículas. Entre 1974 e 1977, as experiências no SLAC, que utilizaram um anel colisionador de elétrons-positrões chamado SPEAR, encontraram indícios da existência de um leptão tauão — uma versão mais pesada do elétron e do múon — que sugerem que poderá haver uma *terceira* geração de matéria. Se isso for verdade, existiriam também mais quarks. Pareciam infindáveis os mistérios contidos no mundo subatômico.

¹ Que funcionava no intervalo de 20-50 MHz.

² O clístron criava potências da ordem dos miliwatts, na gama de frequências de GHz. Os engenheiros e físicos no domínio dos aceleradores costumam referir-se às frequências, quer das «micro-ondas» (mais de 1 GHz), quer do «rádio» (de MHz a GHz), como «radiofrequência».

³ James P. Baxter, *Scientists Against Time*, Boston, Atlantic-Little Brown, 1947, p. 142.

⁴ Recebeu a designação de «Missão Tizard» em homenagem ao químico britânico Henry Tizard, que a promoveu.

⁵ Sem que o soubessem, Yoji Ito, no Japão, desenvolvera um magnetrão, de forma independente, em 1939.

⁶ A não confundir com o Rad Lab de Lawrence em Berkeley; o Rad Lab do MIT recebeu este nome intencionalmente ambíguo para que se pensasse que nele se trabalhava em física pura e não em radares com objetivos militares.

⁷ Frank J. Taylor, «The Klystron Boys: Radio's Miracle Makers», *Saturday Evening Post*, 8 de fevereiro de 1942, p. 16.

⁸ Em 1956, os irmãos lançariam uma oferta pública de aquisição de ações da empresa.

⁹ John Edwards, «Russell and Sigurd Varian: Inventing the Klystron and saving civilization», disponível em <https://www.electronicdesign.com/technologies/communications/article/21795573/russell-and-sigurd-varian-inventing-the-klystron-and-savingcivilization>. Acesso em 29 de junho de 2021.

¹⁰ Christophe Lecuyer, *Making Silicon Valley: Innovation and the Growth of High Tech, 1930-1970*, Cambridge MA, MIT Press, 2006.

¹¹ E. Ginzton, «An informal history of SLAC: Early accelerator work at Stanford», *SLAC Beam Line*, número especial 2, 1983.

¹² O cálculo baseou-se no pressuposto de se conseguir observar objetos com cerca de 1 por cento do raio do próton ou neutrão, o que dá uma energia para o elétron de 20 GeV usando o comprimento de onda de, De Broglie, dos elétrons.

¹³ No modelo do quark, todas as partículas pesadas e estranhas podiam ser descritas como combinações de quarks e das suas versões da antimatéria, os antiquarks. Deste modo, um próton tinha dois quarks cima e um quark baixo, enquanto um neutrão tinha um quark cima e dois quarks baixo. Os mesões, como o píon e o cáon, eram compostos por dois quarks, ou por um quark juntamente com um antiquark. As partículas estranhas, conhecidas por bariões, tinham três tipos de quarks ou de antiquarks. A determinada altura, todas as partículas que interagiam pela força forte receberam o nome de hádrões.

¹⁴ Porém, havia uma pequena diferença em relação à experiência da folha de ouro. Os elétrons, no caso presente, perdiam alguma energia na colisão, que era conhecida por colisão *inelástica*, por oposição às colisões *elásticas* da experiência da folha de ouro. A experiência é conhecida como *dispersão inelástica profunda*.

¹⁵ Até 1999, quando outro projeto de física, o interferómetro de ondas gravitacionais (LIGO), assumiu o título.

¹⁶ Atualmente, este valor aumentou para 50 GeV.

¹⁷ Michael Riordan, «The discovery of quarks», *Science*, vol. 256, pp. 1,287-93. <https://doi.org/10.1126/science.256.5061.1287>.

¹⁸ Disponível *online* em <https://hueuni.edu.vn/portal/en/index.php/News/the-road-to-the-nobel-prize.html>. Acesso em 5 de outubro de 2020.

¹⁹ Relembremos que o átomo de hidrogénio tem apenas um próton e um eletrão, enquanto o deutério tem um próton, um neutrão e um eletrão.

²⁰ Pela sua descoberta, Friedman, Kendall e Taylor receberam um prémio Nobel da Física em 1990.

²¹ A radiação ionizante fora utilizada no tratamento de lesões cutâneas já em 1897, após a descoberta dos raios X, mas como apenas estavam disponíveis energias baixas, os raios não conseguiam penetrar no corpo, por isso não serviam para detetar a maior parte dos tumores. Foi apenas quando os aceleradores entraram em cena, proporcionando energias eletrónicas (e, portanto, as energias dos raios X) da ordem das «megavoltagens», que os feixes ganharam poder de penetração suficiente.

²² Antes do LINAC tinham existido outras tecnologias para a radioterapia, desde as máquinas de Van de Graaff e Cockcroft-Walton até aos betatrões. A maioria era ou demasiado grande ou não fornecia uma dose de radiação suficientemente elevada para uma terapia de qualidade. No Reino Unido, uma máquina de raios X de 8 MeV com 3m de comprimento foi o primeiro LINAC do mundo para tratamento de doentes, mas era um aparelho enorme que não podia ser deslocado para emitir feixes segundo numerosos ângulos. Algumas máquinas mais pequenas, de 4 MeV, foram também construídas no Reino Unido nesta época, e, pouco tempo depois, houve máquinas instaladas na Austrália, na Nova Zelândia, no Japão e na Rússia. As novas máquinas da Varian substituíram rapidamente estas instalações pioneiras à medida que crescia o uso da radioterapia.

²³ Ver <https://www.iceccancer.org/cern-courier-article-developing-medical-linacs-challenging-regions/>.

²⁴ Ver <https://www.computerworld.com/article/3173166/bill-nye-backed-startup-usesparticle-accelerator-to-make-solar-panels-60-cheaper.html>.

²⁵ A terapia VHEE (Very High Energy Electron), combinada com a rápida administração de doses para conseguir o chamado efeito «FLASH», é hoje um tema quente neste domínio.

CAPÍTULO 11

O Tevatrão: Uma Terceira Geração de Matéria

Conhecemos Robert Rathbun («Bob») Wilson em Berkeley, em meados da década de 1940, quando propôs a ideia da terapia de prótons. No fim dos anos 1960, deixara de ser o delfim de Ernest Lawrence para se tornar um líder de pleno direito. Wilson era um novo tipo de físico, uma espécie de homem dos sete ofícios simultaneamente um visionário, um engenheiro, um angariador de fundos e um empreendedor. Era igualmente um talentoso poeta, escultor e orador, e o tempo ensinar-lhe-ia a entretecer as facetas criativa e científica para fundar um laboratório de primeira linha mundial. Porém, em primeiro lugar, tinha de conseguir a aprovação do respetivo financiamento.

Em abril de 1969, Wilson compareceu perante o Congresso dos EUA a fim de solicitar 250 milhões de dólares para a construção do projeto do acelerador mais ambicioso jamais empreendido nos Estados Unidos. Os dias felizes em que o dinheiro para financiar a física corria a rodos tinham acabado e Wilson era forçado a competir com numerosas candidaturas a fundos governamentais, desde as missões espaciais da NASA até aos custos enormes de navios, aeronaves e armamento defensivo. Antes mesmo de Wilson começar a falar, o senador John Pastore assinalou que a máquina

proposta era experimental. Nem sequer sabiam ao certo o que poderiam descobrir com ela. Como podia ele defender uma proposta tão dispendiosa e arriscada?

A máquina fora concebida, explicou Wilson, para encontrar respostas a perguntas antiquíssimas sobre a simplicidade da natureza. Seria possível, perguntou, encontrarmos uma descrição da desordem de toda a vida e do Universo, tendo por base algumas partículas elementares? Partindo desta imagem, ele expôs o estado da arte. Conheciam a força da gravidade, a força eletromagnética e a força nuclear, que liga prótons e neutrões. A descoberta dos quarks estava em marcha no SLAC e, como vimos em capítulos anteriores, havia também indícios de uma quarta força, a força nuclear fraca. No decaimento beta, durante o qual um neutrão se transforma num próton, parecia que os quarks experienciavam quer a força nuclear forte quer a força nuclear fraca. Esta nova máquina, afirmou ele, realizava experiências numa gama de energias que possibilitavam aos físicos confirmar estas forças e obter uma compreensão mais completa do modo como o Universo funciona. No aspeto intelectual, as promessas deste empreendimento eram enormes.

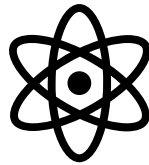
O senador Pastore assentiu e disse que considerava que a razão de ser daquela máquina era a investigação em física de alta energia, um processo educativo e académico. Wilson acrescentou: «É também cultural, mas com a expectativa firme de que resulte em desenvolvimentos tecnológicos... Porque trabalhamos com técnicas extremamente difíceis, e porque o nosso tipo de investigação é singular, as experiências do passado dizem-nos que o aparecimento

de novas técnicas é inevitável, técnicas essas que compensaram, ou mais do que compensaram, o custo da investigação primária, a qual não tivera aqueles desenvolvimentos tecnológicos como objetivo imediato.»¹

O senador queria ajudar Wilson promovendo a ideia de que a máquina seria indispensável à nação. Perguntou ao cientista se a máquina teria alguma relação com a segurança do país, mas Wilson limitou-se a responder: «Não.» Após o Projeto Manhattan, o seu contributo para a defesa através da física estava terminado; este projeto era impulsionado puramente pela curiosidade acerca do Universo. O senador insistiu: «Nada, nada?»

Wilson fez uma pausa, a seguir fitou o senador e respondeu: «Tem apenas que ver com o respeito que temos uns pelos outros, com a dignidade da pessoa humana, com o amor pela cultura. Tem a ver com: seremos bons pintores, bons escultores, grandes poetas? Refiro-me a tudo aquilo que realmente veneramos no nosso país e que desperta o nosso patriotismo... Não tem uma relação imediata com a defesa do nosso país, mas sim em fazer com que valha a pena defendê-lo.»²

O orçamento foi aprovado. Em outubro desse ano, o próprio Wilson cravou uma pá no solo do local do estaleiro, a uma hora de distância de Chicago, marcando simbolicamente o início da construção do complexo do National Accelerator Laboratory (NAL), depois conhecido por Fermilab.



Não existe verdadeiramente nenhum laboratório de física igual ao Fermilab. Respeitando os princípios de Wilson, em vez de tijolos monótonos e edifícios pré-fabricados, o local está repleto de esculturas e destaques arquitetônicos. O visitante atravessa uma pequena aldeia de casas de madeira para chegar ao Fermilab, onde é recebido não por equipamento de alta tecnologia, mas por uma manada de bisontes, numa homenagem à pradaria que existia na região. Para se aproximar do edifício principal, o visitante passa entre longos espelhos de água. No extremo mais distante parece avistar uma catedral: trata-se de Wilson Hall³, uma estrutura de betão com 75 metros de altura, suavizada por curvas arquitetônicas. Do miradouro no topo do edifício vislumbram-se quilómetros de túneis e tecnologia, aceleradores e experiências que se estendem como círculos relvados pela vastidão do local.

Wilson tinha uma visão: criar um laboratório que fosse entusiasmante, funcional e belo. Acreditava que a estética do local seria importante para o seu êxito. A artista Angela Gonzales foi contratada como membro central da equipa responsável pelo *design* global, desde o logótipo do laboratório e dos cartazes até às mesas da cafetaria. A mesma estética aplicava-se ao equipamento científico. Wilson considerava que os instrumentos científicos deviam ser tão belos como as ideias da física teórica. Porque era também escultor, insistia que os aceleradores, as montagens experimentais e todos os outros aspetos de um grande laboratório

deviam exibir linhas graciosas, volumes bem equilibrados e um apelo estético intrínseco⁴.

De início, Wilson esboçou as instalações em traços largos, quase como se traçasse formas numa tela. Tinha de ser ambicioso no aspeto científico de maneira a atrair os melhores colaboradores para o projeto, mas também precisava de ser frugal para não exceder o orçamento. Wilson concluiu que o seu objetivo original, aquele que fora financiado, não era suficientemente ambicioso. Em vez de um feixe com a energia de 200 GeV, o seu propósito era alcançar 500 GeV com uma máquina — o «Anel Principal» — que tinha um quilómetro de raio, um tamanho escolhido simplesmente por ser fácil de recordar. E, como se isto não fosse um desafio suficiente, também acelerou o calendário da construção. Em vez dos sete anos iniciais, queria concluir o projeto em apenas cinco.

Os melhores intelectos do ramo souberam da sua ideia excêntrica e começaram a juntar-se ao projeto. A sua visão atraiu físicos, engenheiros e gente que sabia resolver problemas com uma energia criativa e uma motivação enormes. O novo «Anel Principal» não era o único acelerador que precisava de ser construído. Wilson sabia que precisava de toda uma cadeia de pré-aceleração: os prótons começariam num acelerador de Cockcroft-Walton, a seguir seriam enviados através de um LINAC e passariam para um anel chamado amplificador (*booster*). Só depois é que o feixe de prótons entraria no Anel Principal.

A física de aceleradores Helen Edwards e o seu marido, Don, juntaram-se à equipa em 1970, quando o projeto estava a arrancar.

Natural de Detroit, no Michigan, Edwards interessou-se por ciência e matemática quando frequentava uma escola feminina em Washington D.C. e, conquanto sofresse de dislexia, dominava as matérias por ter uma excelente concentração. Obteve um bacharelato em Física pela Universidade de Cornell, sendo a única mulher entre 12 homens. A sua intenção era passar de imediato ao doutoramento, mas, para isso, naquela época as mulheres tinham de completar primeiro o mestrado. Mesmo assim não desistiu e concluiu a investigação sobre o decaimento de partículas, conseguindo experiência prática ao trabalhar com o acelerador de elétrons de Cornell. Foi aí que conheceu Wilson, e todos perceberam que a sua capacidade de concentração no que era essencial a transformava numa fantástica solucionadora de problemas científicos e técnicos. Wilson correu riscos quando encarregou Edwards de instalar o sincrotrão amplificador.

Edwards e a sua equipa não demoraram a pôr o acelerador a funcionar, para produzir prótons de 8 GeV para o Anel Principal sempre que necessário. As equipas responsáveis pela preparação do Cockcroft-Walton e do LINAC cumpriram o objetivo. Com a construção a decorrer a uma velocidade louca, Edwards juntou-se à equipa que trabalhava no Anel Principal, então parcialmente edificado.

O ritmo de trabalho era febril, e as condições difíceis: as fugas de água levavam a que o túnel do Anel Principal se enchesse por vezes de lama, mas o trabalho prosseguia, porque a instalação de magneto não podia parar. Wilson correu riscos, afirmando que «máquinas que ficam logo prontas a funcionar são

sobredimensionadas e, conseqüentemente, levam demasiado tempo a construir e são demasiado dispendiosas»⁵. Saía mais barato, concluiu, consertar os componentes que se avariassem.

Os problemas tinham de ser solucionados depressa e a equipa de Edwards descreveu posteriormente a maneira como ela fazia cálculos pormenorizados num abrir e fechar de olhos para resolver questões complexas, conforme elas surgiam. A equipa não era menos inventiva. Após a soldadura do acelerador, descobriram que havia pequenos resíduos metálicos no tubo do feixe, os quais podiam provocar o «descarrilamento» dos protões, gerar radiação ou estragar a máquina. Em desespero, um engenheiro treinou um furão fêmea chamado *Felicia* para puxar um cordel ao longo do tubo do feixe. A seguir, atou uma zaragatoa ao cordel e puxou-o para fora, de maneira a remover os resíduos⁶. Deu resultado, mas o pior ainda estava para vir.

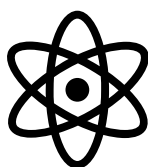
Em 1971, aconteceu um revés, quando a equipa começou a fornecer energia aos 1014 magnetos do túnel e descobriu que nada menos do que 350 deles não funcionavam. A resolução desta «crise dos magnetos» custou-lhes seis meses de paragem e dois milhões de dólares. Ainda hoje, não há uma certeza acerca do que correu mal: mas o fino isolamento de epóxi e problemas de condensação parecem ter sido os principais responsáveis. Apesar de todos os contratempos, em março de 1972, menos de quatro anos após o início das obras, num local onde existia um milheiral, um feixe de protões circulava finalmente na circunferência de 6,28 quilómetros do Anel Principal, e pouco depois batia-se o recorde mundial de energia de um feixe de protões.

A seguir, Edwards dirigiu o difícil processo de retirar o feixe de prótons de alta energia *de dentro* da máquina. Precisava de conservar pelo menos 98 por cento do feixe ou corria o risco de criar radiação e destruir componentes. A solução que adotou⁷ passava por uma afinação extremamente precisa da máquina, de maneira que o feixe se aproximasse muito da borda do tubo em três pontos, onde a equipa instalou septa eletrostáticos — tiras de metal mantidas a uma tensão muito alta —, que forneciam a força suficiente para «convencer» o feixe vacilante a sair da máquina.

Em 1974, o sistema funcionava e as três áreas experimentais conseguiam receber o feixe em simultâneo. Nos anos que se seguiram, a energia do Anel Principal aumentou de 200 GeV para 400 GeV em 1975, e posteriormente para 500 GeV. Cada um dos pontos de saída do anel apresentava três divisões para proporcionar um total de nove feixes, vindos de um só acelerador. Agora que a máquina estava pronta a usar, a atenção podia virar-se para as experiências a jusante. As principais áreas experimentais centravam-se nos neutrinos, nos mésons e nos prótons, por esta ordem. Na sua maioria, as experiências eram concebidas e implementadas por cientistas da universidade, não pelo pessoal do laboratório. Isto devia-se em parte à frugalidade de Wilson. Para poupar custos, decidira que os experimentalistas deviam ser responsáveis pelas suas áreas, e que teriam direito apenas a um «fosso» — literalmente um fosso com chão de terra batida, escavado no solo, para proteger da radiação —, além de paredes e um teto de chapa ondulada. Era evidente que o plano estético de Wilson para o local não contemplava o conforto do utilizador. Os cientistas universitários sentiam-se injustamente tratados no

Fermilab, porque tinham de trabalhar em áreas experimentais sujas, enquanto no SLAC ou no CERN o faziam em laboratórios bastante luxuosos⁸.

Apesar da situação extrema dos fossos experimentais, Wilson sabia que, se criasse os feixes com a energia mais elevada do mundo, os físicos viriam bater-lhes à porta, e claro que vieram. Em 1976, o laboratório recebera propostas de mais de 120 centros de investigação, incluindo de colaboradores internacionais do Canadá, da Europa e da Ásia. Mais de metade das 500 experiências apresentadas foram aprovadas, e em 1978 muitas delas tinham sido concluídas. Um dos primeiros protagonistas dessas experiências foi o carismático físico da Universidade de Colúmbia, Leon Lederman.



Desde o início do Fermilab, Lederman fora um defensor e apoiante do laboratório. Lederman correspondia à imagem que Wilson tinha do experimentalista perfeito: ambicioso, mas disposto a adaptar-se. Enquanto Wilson era um *cowboy*, Lederman era um cidadão da cabeça aos pés. Nascido em Nova Iorque de pais imigrantes judeus ucranianos, optara por estudar física na universidade depois de um amigo o convencer das maravilhas desta disciplina, durante uma longa noite passada a beber cerveja. Possuía a tendência para se dedicar a problemas importantes da física, tendo sido o coautor da descoberta do neutrino do muão em

1962. Esta proeza abriu-lhe a porta para realizar experiências no Fermilab.

Lederman e outros conheciam as duas gerações de matéria existentes, agrupáveis nos *leptões*, que consistiam no eletrão e no seu primo mais pesado, o muão, juntamente com o neutrino do eletrão e o neutrino do muão, que formavam dois conjuntos correspondentes. A estes vinham somar-se os *quarks*: se os quarks cima e baixo eram um par, parecia razoável que o quark estranho pudesse também ter um parceiro, chamado quark *charmoso*, o que compunha uma segunda geração de quarks. Esta foi uma proposta dos teóricos em 1970, originariamente motivada por considerandos estéticos, mas que também os ajudava a resolver alguns problemas técnicos das equações.

Na altura em que o Anel Principal do Fermilab estava em funcionamento, Lederman falhara já a descoberta do quark charmoso. Este tinha sido descoberto em 1974, quase em simultâneo em Brookhaven e no SLAC, sob a forma da partícula « J/Ψ », que se pronuncia «jota-psi», pois Ψ é a letra grega psi⁹. Porém, a natureza reservava mais surpresas. Como vimos no final do último capítulo, em 1975 os investigadores do SLAC encontraram uma versão ainda mais pesada do eletrão e do muão, chamada *tauão*. Lederman tinha uma nova motivação: se existia uma terceira geração de leptões, por que não existiria também uma terceira e mais pesada geração de quarks?

Lederman candidatou-se ao espaço para conduzir uma nova experiência — designada pelo número da proposta, Experiência 288

(E288) —, na qual esperava utilizar detetores eletrónicos para procurar pares de muões, que eram o vestígio expectável de uma partícula pesada e com vida curta. O seu objetivo era descobrir partículas que contivessem quarks ainda mais pesados do que os já conhecidos quarks cima, baixo, charmoso e estranho. Quando a sua proposta foi aceite e a experiência estava preparada, o feixe de prótons com 500 GeV do Anel Principal foi direcionado para o respetivo fosso e a equipa recolheu informação sobre cada par de muões que encontrou. Para analisar os resultados, somaram a energia de cada par de muões e representaram-na como pontos num histograma. Um pico, ou bossa, nesse histograma poderia ser a prova de uma nova partícula.

Em 1976, detetaram uma bossa para uma massa de cerca de 6 GeV. Conquanto o número de ocorrências fosse pequeno, a probabilidade de elas serem um acaso estatístico era apenas de 2 por cento. Seguiram em frente e publicaram um artigo que anunciava uma nova categoria de partícula a que deram o nome de upsilon, ao qual atribuíam o significado de «sublime»¹⁰. Foi então que aconteceu o impensável. Conforme reuniam mais dados, o pico que assinalava a partícula upsilon desapareceu, engolido pelo ruído de fundo de ocorrências aleatórias. Afinal, não havia uma partícula de 6 GeV.

Foi uma lição brutal da estatística, e uma das razões pelas quais, hoje, o padrão comumente aceite para anunciar a descoberta de uma nova partícula é aquilo a que os físicos chamam prova «cinco-sigma». Isto significa que a probabilidade de o acaso estar na origem do resultado é inferior a um em 3,5 milhões¹¹. Não há

praticamente outro domínio na vida ou na ciência onde apliquemos este incrível critério de prova. Por exemplo, se uma doença lhe for diagnosticada e o médico lhe disser que tem 95 por cento de certeza de que os dados do ensaio clínico que estão na base do tratamento que lhe vai propor não resultaram de um acaso, o leitor tomará o medicamento que lhe for prescrito, certo? Os físicos de partículas não aceitam isto como prova. Porque trabalham em escalas temporais tão extensas, e em projetos tão vastos, esta é uma das formas que os físicos de partículas têm de garantir que não são induzidos em erro acerca do que é ou não real.

Lederman reagiu ao falhanço com bom humor, mesmo depois de os colegas rebatizarem a partícula não-existente como *UpsLeon*, em sua homenagem. A equipa E288 regressou à sua experiência na primavera de 1977 e começou a reunir novos dados. Quando surgiu um pico a cerca de 9,5 GeV, ao cabo de apenas sete dias, um dos físicos, John Yoh, perguntou: «Que diabo se passa?» Porém, como mandava a tradição, guardou no frigorífico uma garrafa de champanhe com o rótulo «9,5», por via das dúvidas.

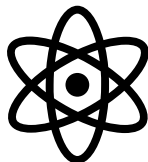
Desta vez não se precipitaram a fazer um anúncio. Queriam ter a certeza de que esta nova partícula, produzida uma vez para cada cem mil milhões de protões que colidissem com o alvo, não era um acaso. Dedicaram-se a recolher mais dados. Às 11 da noite de 20 de maio, houve uma avaria na cablagem de um aparelho que media a corrente. O cabo aqueceu, derreteu e provocou um incêndio no suporte de cabos mais próximo. Pouco depois, um fumo acre encheu a sala. A equipa ficou em pânico.

Os bombeiros chegaram e apagaram rapidamente o fogo, mas a equipa não tardou a ficar ainda mais alarmada: a água que utilizavam reagiu com o cloro gasoso libertado no ar pelo fogo para produzir um ácido que começou a corroer os componentes eletrónicos da experiência. Se não travassem a corrosão, nunca conseguiriam recolher provas suficientes para anunciar a nova partícula. Desesperado para salvar a experiência, Lederman contactou um especialista neerlandês em recuperação dos efeitos dos incêndios, que chegou ao fim de 72 horas, com baldes cheios de uma solução de limpeza secreta. Todos os membros da equipa E288, o pessoal do Departamento do Protão, maridos e mulheres, amigos e secretárias juntaram-se aos físicos numa linha de montagem para lavar, esfregar e secar as 900 placas de circuitos, sob a vigilância atenta do especialista.

Com a experiência resgatada, cinco dias depois recomeçaram a trabalhar e a reunir dados. Desta vez, a bossa dos 9,5 GeV aguentou-se. A massa da nova partícula era cerca de dez vezes superior à massa do protão. Verificaram duas e três vezes os resultados, mas desta feita tinham indubitavelmente um resultado melhor do que o cinco-sigma.

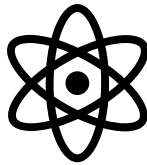
Em 15 de junho de 1977 organizaram um seminário no auditório do Fermilab e anunciaram que haviam sido bem-sucedidos. A E288 tinha descoberto uma partícula completamente nova a 9,5 GeV, que era a partícula mais pesada jamais descoberta e a primeira no Fermilab. Reutilizaram o nome «upsilon», mas desta vez o nome — e a partícula — permaneceram. A garrafa de champanhe «9,5»

animou os festejos e o Fermilab firmou o seu estatuto como laboratório de descoberta experimental.



As novas provas experimentais depressa se conjugaram com os desenvolvimentos teóricos. A *upsilon* mostrou ser uma combinação de um «quark *b*» com um «antiquark *b*», em que *b* equivale a *bottom* (fundo) ou *beauty* (beleza), dependendo do interlocutor. O novo e pesado quark *b* fora previsto já em 1973 pelos teóricos japoneses Makoto Kobayashi e Toshihide Maskawa, e os nomes *top* (topo) e *bottom* (fundo) haviam sido propostos em 1975 pelo físico israelita Haim Harari. Apesar da complexidade crescente da física de partículas, a *upsilon* confirmou que uma simplicidade subjacente estava a emergir, numa teoria que indicava que a natureza possuía uma agradável simetria. Havia seis léptões (elétron, múon, tauão e os seus neutrinos) e seis quarks (cima, baixo, estranho, charmoso, fundo, topo).

À *posteriori*, a *upsilon* era, como dizia Lederman, «uma das mais expectáveis surpresas da física de partículas»¹². Agora que sabiam que o quark fundo existia, então o seu parceiro pesado, o quark topo, também devia existir. Embora não soubessem bem quanto pesado era, pois a teoria não lhes dizia isso, a próxima etapa no Fermilab era inevitável: irem em busca do sexto (e último) quark.



O Fermilab revelava-se à altura do sonho de Wilson como instalação nacional e internacional, mas não ficaria por aí. Wilson sempre apontara muito além desse primeiro estágio. Na época em que descobriram a upsilon, o Fermilab não era, havia muito, o maior acelerador do mundo. Esse título era agora ostentado pelo CERN, que construía um anel com sete quilómetros de extensão chamado Super Síncrotrão de Protões, onde se atingiam energias de 450 GeV. Com orgulho, Wilson e Edwards tinham-no ultrapassado, conseguindo atingir 500 GeV com o Anel Principal, que era ligeiramente mais pequeno, mas agora Wilson decidira revelar o plano em que vinha a matutar.

Desde o início que Wilson sabia que precisavam de ir além do Anel Principal, em busca de melhores oportunidades, e tivera duas ideias. Em primeiro lugar, percebeu que, se juntasse ao complexo um segundo acelerador composto por magnetos potentes, conseguiriam duplicar a energia do feixe. Reutilizando o mesmo túnel para criar feixes de 1000 GeV ou 1 TeV, atingiriam a escala do «tera» e acederiam a todo um novo reino de potenciais descobertas. Em segundo lugar, queria construir uma máquina que pudesse fazer colidir as partículas diretamente umas com as outras, em vez de as disparar contra um alvo fixo, ou seja, um *colisionador* de partículas e não apenas um *acelerador*.

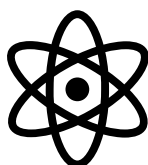
O novo anel, alcunhado «Duplicador de Energia», mas depois conhecido por «Tevatrão», ficaria imediatamente por baixo do Anel Principal, onde Wilson se assegurara de que havia espaço de sobra para o albergar. O plano passava por acelerar prótons no Anel Principal e, a seguir, transferir o feixe para o novo anel do Tevatrão, para que alcançasse 1 TeV. Controlar estas partículas com energia tão elevada exigia uma tecnologia de magnetos de um tipo completamente novo, capaz de criar um campo magnético cuja intensidade mais do que duplicava a do Anel Principal. Os eletromagnetos convencionais, de ferro e cobre, não serviam, por isso Wilson planeava utilizar magnetos *supercondutores*, assim chamados por serem feitos de materiais que conseguem suportar uma corrente elétrica enorme sem gerarem calor.

Os materiais supercondutores perdem toda a resistência elétrica abaixo de uma certa temperatura, habitualmente cerca de -270 graus Celsius, um efeito revelado em 1911. Cinquenta anos depois, foram descobertos os primeiros materiais supercondutores¹³ que podiam ser moldados em cabos. Em teoria, os cabos podiam conduzir um campo magnético forte. O problema estava em que nunca fora feito um magneto para um acelerador desta maneira. Como sempre, Wilson estava um passo à frente e tinha lançado um projeto para investigar a maneira de construir magnetos supercondutores em 1972, uma jogada espantosa cinco anos antes de Lederman e a equipa E288 terem descoberto a upsilon.

O segundo aspeto da visão audaz de Wilson envolvia a colisão de dois feixes, o que não era uma tarefa fácil. Provocar uma colisão frontal entre partículas é uma missão quase impossível, visto que

cada partícula individual é tão pequena que a sua probabilidade de chocar de frente com outra é minúscula. Porém, Wilson não desistiu da ideia, porque ela sugeria oportunidades incríveis para descobertas. Em aceleradores anteriores, quando feixes de energia elevada haviam sido disparados contra alvos fixos, a conservação de energia ditava que a maior parte da energia do feixe servia para expulsar partículas do alvo e para as dispersar. Apenas uma fração limitada dessa energia conduzia à criação de novas partículas. Em física de partículas chamamos a isto a *energia do centro de massa* e, no caso de um feixe de 1 TeV que atingisse um alvo, ficavam apenas disponíveis 43,3 GeV de energia útil para a criação de partículas. Então, a criação de qualquer partícula com massa superior a 43,3 GeV era impossível.

Era esta grandeza que Wilson queria aumentar. Numa colisão frontal, toda a energia à entrada concentra-se na energia do centro de massa. Por isso, quando dois feixes de 1 TeV colidem, ficam com uma energia de centro de massa de 2 TeV. Para conseguir esta proeza era preciso um acelerador com centenas de quilómetros de perímetro, numa experiência tradicional baseada em alvos. Por muito difícil que fosse a sua concretização, havia uma vantagem clara no colisionador.



A construção do Anel Principal fora um empreendimento desafiante, mas esta nova ideia quase parecia uma loucura. Havia

riscos em todos os aspetos e não havia uma única peça que pudesse ser comprada «pronta». O novo anel precisava de 774 magnetos dipolos supercondutores de nióbio-titânio arrefecidos em hélio líquido para encurvar o feixe num círculo e de 216 magnetos quadripolos adicionais para o focar. Precisavam também de sobresselentes para as inevitáveis avarias. Nenhuma empresa sabia como construir os magnetos, nem mesmo o Fermilab. Alvin Tollestrop, um dos projetistas-chefes, apresentou a ideia aos colegas europeus do CERN. Mais tarde, recordaria «uma grande sala com gente que se ria... pensavam que éramos malucos»¹⁴. Os físicos do CERN sabiam que não havia ninguém no mundo capaz de construir os magnetos necessários ao Tevatrão, e muito menos na quantidade que era necessária. Como se produz uma coisa que nunca foi produzida, e numa escala que parece quase absurda, quando não há uma só empresa capaz disso?

A primeira etapa era encontrar as matérias-primas para os magnetos. Em 1974, poucas empresas especializadas vendiam material supercondutor de nióbio-titânio a utilizadores de alta tecnologia, e a maior parte das encomendas era da ordem de alguns gramas ou, no máximo, de alguns quilogramas. A equipa do Fermilab perguntou quanto custaria comprar uma tonelada. No final desse ano, encomendaram uma quantidade assombrosa de nióbio-titânio, equivalente a 95 por cento de todo o material até então produzido.

Com a matéria-prima a caminho, a próxima etapa era descobrir uma maneira de a transformar em cabos. Muitos haviam tentado e fracassado, mas no Laboratório Rutherford Appleton, no Reino

Unido, uma equipa inventara uma forma de transformar o precioso material nióbio-titânio em filamentos finíssimos e incrustar milhares deles numa matriz de cobre, obtendo assim um cordão, que finalmente formava um cabo. Parece fácil quando se sabe, mas no Fermilab tiveram de descobrir como se fazia.

Assim que o conseguiram, o laboratório resolveu entregar a produção a fabricantes externos, fornecendo-lhes a matéria-prima e as instruções para obter cordões longos e perfeitos. Em vez de registar a patente do processo de fabrico do cordão, a equipa do Fermilab preferiu disponibilizá-lo livremente, deixando que os fabricantes competissem para assegurar o fornecimento do cabo completo para o seu magno projeto. Assim que o cabo ficasse pronto, seria enrolado numa bobina, a qual, alimentada por corrente elétrica, criava um magneto.

Todo este cuidado e toda esta precisão eram necessários para garantir que os fios supercondutores não sofriam o fenómeno *quench* (aquecimento), que acontece quando efeitos térmicos minúsculos podem levar um magneto a perder o seu estado supercondutor e a experimentar um aquecimento súbito. O *quench* não é um contratempo de somenos. Liberta uma quantidade assombrosa de energia e, se não for bem controlado, o magneto e a sua fonte de alimentação podem simplesmente explodir. Os magnetos supercondutores são um sistema deveras sensível.

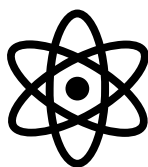
Hoje desfrutamos a vantagem conferida por décadas de investigação, mas na década de 1970 ninguém dispunha de instruções claras para construir este tipo de magneto e era reduzido

o entendimento teórico da complexidade envolvida. Wilson, ele próprio um artesão pragmático e hábil, apercebeu-se do desafio que os esperava e resolveu criar uma «fábrica de supermagnetos», encarregando Tollestrop do desenvolvimento. Os magnetos eram tão sensíveis às mudanças que Tollestrop decidiu mudar apenas uma variável em cada ensaio. Não havia outra maneira de progredir senão por tentativas.

Entre 1975 e 1978 construíram perto de cem magnetos com 30 centímetros de comprimento, cada um deles com um *design* ligeiramente diferente, procurando, em cada etapa, perceber aquilo que funcionava. Se um protótipo curto se mostrava promissor, construíam uma versão mais comprida, até que obtiveram um magneto com 6,7 metros de extensão. A experiência mostrou que as mais pequenas alterações ao método de construção podiam resultar em desastre. Um magneto podia funcionar bem com um comprimento pequeno, mas tal não significava que o mesmo acontecesse se fosse mais longo¹⁵.

Naquela época, o método de investigação e desenvolvimento do Fermilab era, por certo, considerado invulgar. Eles criaram o conhecimento técnico que permitiu escalar a produção de magnetos individuais funcionais para quase um milhar de exemplares, e fizeram-no com recursos internos, para terem a certeza de que controlavam os pormenores mais ínfimos e que conseguiam a qualidade e a consistência necessárias. Em última análise, tinham de se assegurar de que todos os magnetos eram exatamente iguais, e que não apresentavam quaisquer imperfeições ou diferenciais magnéticos, os quais podiam ter um efeito desastroso no feixe de

prótons. Só após um esforço intenso, que se estendeu por vários anos, puderam os magnetos ser ligados em anel e transformados num acelerador de partículas.



Este trabalho de desenvolvimento dos magnetos aconteceu ao longo do período em que a upsilon foi descoberta, apagada dos registos e redescoberta. Wilson tinha distribuído o trabalho da equipa, pedindo a uns que se concentrassem apenas no Anel Principal e a outros que se ocupassem do Tevatrão. Entre aqueles cuja frustração não parava de crescer estava Helen Edwards. Juntamente com outros colegas, ela tinha dúvidas acerca do Tevatrão. Por isso formaram um grupo oficioso chamado Underground Parameters Committee («Comité Clandestino dos Parâmetros»), para estudar os aspetos do *design* que os preocupavam. Wilson descobriu o que se passava e resolveu apoiar o trabalho deles, mas sem se envolver.

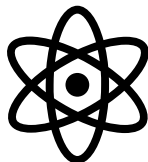
Contudo, os problemas técnicos não eram a única preocupação. O Fermilab estava a ficar sem dinheiro e o governo ainda não aprovara a dotação de fundos para o Tevatrão. Em 1978, sem financiamento e com o projeto do Tevatrão ainda por concretizar, Wilson sentia-se cada vez mais frustrado no seu papel de diretor. Por fim, resolveu ir-se embora, entregando a direção do Fermilab a Leon Lederman, que precisou de tomar — rapidamente — uma decisão: deveriam prosseguir com o novo anel ou reduzir os

prejuízos e transformar o próprio Anel Principal num colisionador? A competição com o CERN era cerrada. Este estava já a adaptar o Super Síncrotrão de Protões para ser um colisionador com 270 GeV em cada feixe, fornecendo uma energia de centro de massa de 540 GeV para pesquisar partículas pesadas.

Lederman organizou uma reunião de avaliação em novembro de 1978, conhecida pelo debate «decisivo». Defensores e opositores da construção do Tevatrão apresentaram os seus argumentos. Especialistas de outros laboratórios foram convidados como avaliadores. Crescia a convicção de que não conseguiriam competir com o CERN se construíssem um colisionador com o Anel Principal. Em paralelo, crescia gradualmente a certeza de que, apesar de todos os riscos, o Tevatrão era exequível. Durante o debate, tornou-se evidente uma segunda vantagem dos magnetos supercondutores: num período em que os preços do petróleo disparavam e a eletricidade era um bem escasso, a conta do Fermilab atingira um valor próximo de 10 milhões de dólares anuais, uma grande parcela dos custos operacionais do laboratório. Os magnetos supercondutores podiam ser alimentados com energia e deixados a funcionar, o que pouparia ao laboratório cerca de cinco milhões de dólares anuais nas faturas de energia.

Ao fim de dois dias de debate intenso, Lederman tomou a decisão: iriam avante com o Tevatrão. O recém-formado Departamento de Energia concordou com um plano faseado. A equipa do Fermilab teria de apresentar cadeias de magnetos que funcionassem de modo estável, primeiro num espaço de ensaio e

depois no túnel principal, para que a continuidade do projeto fosse autorizada.



Dirigir o *design* e a construção do acelerador do Tevatrão era um desafio tremendo, e Lederman encarregou Helen Edwards e Rich Orr dessa missão. Orr era um físico originário do Iowa, conhecido pelo seu temperamento calmo. Ajudara a construir o laboratório do mesão e, tal como Edwards, tornara-se bem conhecido pela capacidade de congregar pessoas e de as motivar para o êxito. Formavam um duo fantástico, que sabia fazer da equipa a sua prioridade, o que viria a ser um fator crítico num projeto com a dimensão do Tevatrão.

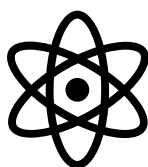
O ensaio dos magnetos decorreu sem qualquer problema. Foi tão bem-sucedido que decidiram pôr à prova os magnetos, fornecendo-lhes uma corrente de 4000 amperes, para verificar se ocorria o *quench*. Todos os sistemas de proteção contra o *quench* funcionaram lindamente, libertando hélio em ebulição e protegendo os magnetos. Experimentaram criar arcos elétricos, mas, tal como Rich Orr recordou depois, «não conseguimos provocá-los». Os magnetos estavam prontos. A produção avançou, o fabrico de magnetos acontecia com rendimento máximo e havia trabalhadores no túnel a todas as horas, instalando tubagens, estabelecendo ligações, realizando trabalhos elétricos e posicionando magneto atrás de magneto.

Em meados de junho de 1983 o feixe já circulava no anel do Tevatrão. Duas semanas depois, a 3 de Julho, alcançaram uma energia de 512 GeV, um novo recorde mundial. Tinham roubado a liderança aos rivais europeus e a proeza foi exaltada na imprensa. Porém, para Edwards e Orr, havia um desafio ainda maior pela frente. Procuravam transformar a máquina num colisionador, em que um feixe de prótons chocaria com um feixe de antiprótons. Ideias para colisionadores existiam desde pelo menos as décadas de 1950 e 1960¹⁶. O primeiro a ser construído foi um pequeno colisionador de eletrões chamado AdA (Anello Di Accumulazione) em Frascati, na Itália, em 1961. O CERN construiu o primeiro colisionador de prótons, chamado Intersecting Storage Rings (ISR), em 1971, com o qual conseguiu uma energia de centro de massa de 60 GeV. Com uma energia cerca de 40 vezes a do ISR, o Tevatrão faria colidir prótons e antiprótons a uma escala nunca antes vista.

Conseguir que um colisionador funcione corretamente exige enorme capacidade técnica. A densidade de um feixe de partículas é inferior à de um alvo sólido ou líquido, por isso os feixes têm de se cruzar o maior número de vezes possível, e cada feixe tem de acomodar o maior número de partículas possível. Assim que os prótons e antiprótons se encontravam no anel, eram precisos perto de 20 segundos para elevar a energia dos feixes a 1 TeV, momento em que podiam ser guiados com magnetos de modo que as suas trajetórias se cruzassem em duas localizações. Por último, quando todas as peças se encaixaram, em 30 de novembro de 1986¹⁷, os primeiros feixes de prótons e de antiprótons colidiram entre si. Os físicos dos aceleradores tinham conseguido o impossível: o maior

acelerador supercondutor do mundo. No entanto, no ponto em que o seu trabalho findava, começava o dos físicos de partículas experimentalistas.

No início da década de 1970, as numerosas descobertas que vimos até aqui foram conjugadas matematicamente para compor uma teoria global chamada Modelo Padrão da física de partículas. O Modelo Padrão compreende todas as partículas descobertas, desde o eletrão, o muão, o tauão e os neutrinos até aos quarks e às partículas por eles compostas: prótons, neutrões, píões, caões, partículas ressonantes, etc. No entanto, faltava descobrir um quark: o quark topo. Esperava-se que fosse pesado, pelo que a sua descoberta exigiria colisões com tanta energia quanto possível. Foi isso que motivou os experimentalistas a construírem o Tevatrão.



Equipas internacionais de físicos começaram a trabalhar na montagem de duas experiências cruciais, que envolviam a construção de dois enormes detetores nos pontos do anel onde aconteciam colisões entre os feixes do Tevatrão. A primeira equipa de experimentalistas construiu o Colliding Detector at Fermilab (CDF) e escolheu Alvin Tollestrop e Roy Schwitters como porta-vozes. A colaboração CDF formou-se rapidamente, com físicos da Universidade de Pisa, em Itália, e da Universidade de Tsukuba, no Japão, a juntarem-se a colegas de cerca de dez entidades dos EUA. O CDF era um vasto detetor cilíndrico estratificado com 4500

toneladas de peso, integrado num solenoide supercondutor que curvava a trajetória das partículas para permitir a medição da sua quantidade de movimento. As diversas camadas do detetor eram sensíveis a partículas diferentes, permitindo aos 87 cientistas que nele trabalhavam a medição da energia, da carga e do tipo da partícula e a criação de reconstruções digitais dos destroços das colisões entre as partículas. Agora, com todas as camadas completamente eletrónicas, a aquisição de dados e a sua computação eram parte integrante da experiência. Para construir o detetor, cada instituição colaborante assumiu a responsabilidade por uma parte distinta do detetor e encarregou-se dos aspetos financeiros e técnicos da sua construção e da sua entrega. Por fim, tudo se congregou e a recolha de dados iniciou-se em 1986.

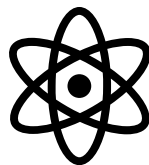
Após o CDF, um segundo detetor, o DZero (assim designado devido à sua localização no anel), foi construído. A equipa do DZero tinha caminho a recuperar, mas a colaboração viria a crescer até atingir um tamanho semelhante ao do CDF, e ambos acabaram por reunir várias centenas de colaboradores. Para garantir uma verificação independente de qualquer nova descoberta física, eram necessárias duas experiências. O DZero era ligeiramente mais volumoso do que o CDF. Com 5500 toneladas de peso, era mais alto do que um prédio de quatro andares, com camadas de detetores semelhantes ao CDF. O DZero começou a recolher informação em 1992.

Estes dois aparelhos incríveis constituíam um novo tipo de detetor de partículas que circundava a linha de feixe. Os detetores eram tão complexos e dispendiosos que não podiam ser

desmantelados no fim de um ensaio experimental, tal como sucedia com anteriores experiências em aceleradores. Ao invés, tinham de ser detetores polivalentes, porque não podiam sair do lugar onde estavam. A escala das experiências que os físicos planeavam realizar neste novo colisionador não tinha precedentes. As experiências podiam demorar mais do que o tempo necessário para um doutoramento ou para um professor auxiliar chegar a catedrático nos Estados Unidos. O próprio diretor das experiências tomava as rédeas apenas por pouco tempo, para logo as entregar a outro colega. Já não se tratava de Grande Ciência; era Megaciência. O Fermilab deixou de ser um laboratório para os utilizadores nacionais para se tornar verdadeiramente internacional, com investigadores de numerosas partes do mundo a juntarem-se ao programa.

Em física, são necessárias duas experiências para garantir a verificação independente de novos resultados. No fim do período de funcionamento do Tevatrão em 1993, das duas experiências começavam a emergir cautelosamente novos indícios de um sexto quark, o quark topo, mas precisavam de mais tempo e de mais dados para alcançar o necessário nível de prova cinco-sigma. Por fim, em 1995, as duas equipas anunciaram a descoberta do quark topo. Tinham encontrado a última partícula da matéria do Modelo Padrão, de longe a partícula fundamental mais pesada jamais descoberta. Um quark topo pesa mais do que um átomo de ouro, embora seja uma partícula pontual, como um eletrão. Vive apenas 5×10^{-25} segundo, decaindo para o próximo quark mais pesado, o quark fundo¹⁸. O quark topo é tão efémero que nem sequer tem tempo para se combinar com outros quarks. Ao contrário do que

acontece com os outros quarks, que se combinam sempre uns com os outros, o quark topo passa o seu tempo de vida incrivelmente curto na solidão. Tinham-se passado duas décadas desde a descoberta na década de 1970 do quark fundo na upsilon até à decisiva revelação do seu parceiro — o quark topo — e esta proeza foi notícia em todo o mundo.



É difícil sobrestimar a dificuldade de descobrir uma partícula como o quark topo, visto que a sua criação é extremamente rara, mesmo entre os destroços da colisão no Tevatrão. Para o conseguir, os físicos de partículas experimentalistas tinham de ser especialistas não apenas nos aspetos práticos da experiência, mas também em estatística e em métodos computacionais. Tratava-se de um conjunto de aptidões bem diferente do dos seus colegas de 20 anos antes. Em grande parte, isto deve-se ao facto de as interações das partículas terem uma natureza probabilística, tal como manda a mecânica quântica. Nem tudo o que dizia respeito à experiência podia ser calculado manualmente, e não fazia sentido construir uma experiência que fosse incapaz de revelar o quark topo, ou outras partículas e outros processos em pesquisa, portanto a preparação era essencial. Então, como procederam? Utilizando simulações em computador, os físicos conseguiram reunir todas as informações teóricas e probabilidades envolvidas e recorrer a uma abordagem conhecida por simulação «Monte Carlo» para obter uma visão global dos resultados estatísticos da experiência.

O nome da técnica provém da famosa «falácia de Monte Carlo», ou falácia do jogador, que parte da ideia de que, embora um acontecimento individual possa ser imprevisível, o resultado de muitos acontecimentos pode ser bem definido. A história é a seguinte:

Em 1913, no casino de Monte Carlo, no Mónaco, a bola da roleta parou em casas negras 26 vezes seguidas. A probabilidade deste acontecimento é de um em 66,6 milhões, mas a probabilidade de parar numa casa negra em cada rotação é sempre igual, 50 por cento. A cada lançamento, os jogadores estavam convencidos de que a bola pararia por certo numa casa vermelha. À medida que o número de rotações em que a bola parava em casas negras aumentou para oito, nove, dez e por aí adiante, eles tinham já tanta certeza de que a bola iria parar no vermelho na rotação seguinte que apostaram milhões de francos. E perderam tudo. A única maneira garantida de não perder dinheiro quando se aposta neste tipo de jogos estatísticos é continuar a aumentar a aposta de cada vez que se perde, para que, quando se ganha, conseguir recuperar as perdas anteriores. Isto é não apenas extremamente difícil no aspeto psicológico, mas também não costuma ser autorizado pelo casino. Eles limitam a dimensão da aposta que se pode fazer, por isso ganham sempre.

Os resultados previsíveis destas rotações da roleta inspiraram matemáticos como Stanislaw Ulam e John von Neumann logo em 1946, quando Ulam trabalhava em Los Alamos. A sua equipa abraçara o desafio de calcular a difusão de neutrões num material. Conheciam a distância média que um neutrão pode percorrer antes de colidir com um núcleo atómico, e sabiam quanta energia estava envolvida na colisão, mas, apesar disso, não conseguiam obter uma resposta matemática. Ulam estava no hospital a recuperar de uma cirurgia e, enquanto jogava às paciências e tentava calcular a probabilidade de uma mão bem-sucedida, teve uma ideia. Por que não conduzir um grande conjunto de ensaios — como uma volta da roleta, o lançamento de uma moeda ou uma partida de paciências — e simular o que acontece em cada caso? Ao estimar os resultados para um grande número de neutrões, em que cada neutrão passava

por uma sequência diferente de colisões definida pelas probabilidades conhecidas, podia determinar-se a difusão global dos neutrões. Um dos colegas de Ulam chamou a esta técnica o método de Monte Carlo.

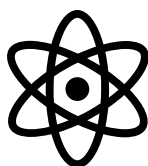
Ao longo do tempo, consoante crescia a potência dos computadores, estes métodos tornaram-se cada vez mais poderosos. O intuito era evitar a realização de cálculos manuais incrivelmente morosos — ou até impossíveis — e, ao invés, efetuar um número elevado de ensaios aleatórios. A física de partículas permaneceu na vanguarda destes desenvolvimentos e, por isso, quando o Tevatrão ficou concluído, os físicos já utilizavam sofisticadas simulações de Monte Carlo, geradas em computador, para projetar detetores, modelar os resultados das experiências e muito mais. Ao proceder deste modo, os físicos de partículas experimentalistas criam bases de dados que são muito parecidas com as que se obteriam se a experiência fosse realizada. Podem desenvolver algoritmos para analisar os dados expectáveis antes da experiência estar sequer montada, o que lhes permite verificar as incertezas a ela associadas e perceber se a experiência tem uma probabilidade de produzir um resultado estatisticamente significativo (e sabendo quão meticolosos somos quando se trata de significado estatístico, é um esforço que vale a pena!). Se existir um modelo teórico para uma partícula ou interação, podem inclusive gerar o «sinal» que procuramos e escondê-lo na retaguarda para verificar se o algoritmo analítico consegue encontrá-lo.

Esta fase de preparação árdua significa que os físicos podem «correr» os seus algoritmos analíticos assim que dispõem de dados experimentais reais para verificarem se há diferenças relativamente à simulação. Se houver, isso é um indicador certo de que encontraram novos fenómenos físicos. Quando se planeia uma experiência para descobrir interações raras, tais como a criação de um quark topo, este é o melhor método de que dispomos para garantir que se encontram pequenos sinais no meio de todos os efeitos físicos conhecidos. Por entre os incontáveis milhões de colisões de partículas que aconteciam no Tevatrão, os físicos conseguiram identificar com êxito as poucas dezenas de quarks topo produzidas anualmente.

Este nível elevado de formação estatística recebida pelos físicos pode ter algumas consequências invulgares. Certa vez, numa conferência no Fermilab, durante o *cocktail*, alguns colegas norte-americanos partilharam comigo uma história sobre a conferência da American Physical Society de 1986, o maior encontro de físicos nos Estados Unidos. De súbito, a conferência teve de encontrar um novo local para acolher quatro mil físicos. Como é natural, escolheram a cidade que recebe mais de 21 mil conferências anuais: Las Vegas. Em vez de irem jogar, os físicos preferiram juntar-se em redor de mesas com uma bebida grátis, papel e caneta e fizeram esquemas e cálculos enquanto conversavam. Sem discussão, fizeram coletivamente a única jogada que garantia a vitória: abstiveram-se de jogar. Em consequência, as finanças do hotel sofreram a pior semana da sua história. A conferência foi um desastre de tal ordem para o hotel que, no fim da semana, o município de Las Vegas

pediu-lhes oficialmente que nunca mais lá voltassem. Por aquilo que sei, a história é verdadeira.

Folclore à parte, a literacia e a perícia estatísticas envolvidas nas técnicas de simulação de Monte Carlo indicam que os físicos de partículas estão extremamente bem preparados para construir modelos de processos e sistemas exteriores à física, e são muitíssimo requisitados para isso. As simulações de Monte Carlo são utilizadas em todos os sectores, desde as previsões meteorológicas até à modelação financeira, telecomunicações, engenharia, biologia computacional e inclusivamente ao direito. Muitos dos meus colegas dos tempos de estudante trabalham em consultoria, na banca, na modelação de cenários de mudanças climáticas e em epidemiologia. Recordo-me da genuína surpresa manifestada por muitos dos meus amigos físicos que transitaram para outros sectores, ao verificarem que o nível de formação computacional ou estatística dos seus novos colegas não ia além das simples folhas de cálculo.



O Tevatrão foi um projeto ambicioso sob muitos aspetos, mas um dos seus mais impressionantes efeitos secundários fez-se sentir no domínio da tecnologia dos magnetos supercondutores. Logo no início da década de 1940, outros físicos descobriram que os magnetos fortes conseguiam alinhar átomos de hidrogénio no interior do corpo humano e que, utilizando uma sequência

específica de campos magnéticos e ondas de rádio, podiam medir diversos materiais dentro do corpo, tais como as localizações de átomos individuais de hidrogénio. A técnica, de início designada por «ressonância magnética nuclear» ou RMN, seria depois rebatizada como «imagiologia por ressonância magnética» ou IRM. Quando foi inventada, não era possível produzir campos magnéticos suficientemente fortes para a tornar útil e viável do ponto de vista comercial. O Tevatrão mudou tudo isso.

O projeto ambicioso do Fermilab criou a procura e o saber de que a indústria precisava para produzir volumes comerciais de cabos supercondutores de grande qualidade. Estavam envolvidos dois fabricantes principais: a Intermagnetics General Corporation (IGC) fornecia 80 por cento dos cabos e a Magnetic Corporation of America (MCA) o restante. Outros fornecedores foram surgindo, à medida que a comunidade da física de alta energia adotava a tecnologia de forma mais ampla. No CERN desenvolvia-se uma grande câmara de bolhas que utilizava magnetos supercondutores, enquanto, no domínio da energia nuclear, grandes dispositivos magnéticos de confinamento, chamados tokamaks, usavam também cabos supercondutores¹⁹. O mercado animou-se e os magnetos supercondutores ficaram disponíveis para uso generalizado.

Hoje, os aparelhos de IRM comercialmente disponíveis são utilizados para obter imagens do interior do corpo humano, em particular de tecidos moles. São uma técnica complementar aos aparelhos de tomografia computadorizada que já abordámos, mas a IRM é excecional visto que não liberta qualquer radiação ionizante

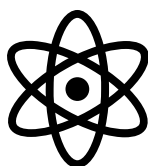
para produzir as imagens. Encontramos estes aparelhos na maioria dos grandes hospitais dos países desenvolvidos, onde servem para fazer uma deteção melhor e mais precoce de muitos tipos de cancro, além de obterem imagens da coluna vertebral, do coração, dos pulmões e de outros órgãos. Nos últimos cinco anos, os aparelhos de IRM têm sido combinados com aceleradores de radioterapia (ver Capítulo 10) para produzir um «Linac-RM», que permite a terapia guiada por imagem e a alteração da dose de tratamento de acordo com as variações diárias da forma, do tamanho e da posição do tumor²⁰.

Além da aplicação médica em hospitais, encontramos também numerosos aparelhos de IRM em laboratórios de investigação. A técnica de IRM funcional consegue mostrar por onde flui o sangue no cérebro, o que indica as áreas de atividade cerebral. Este facto promoveu uma revolução no conhecimento sobre o cérebro, a natureza da consciência e a formação das memórias. Conduziu ainda à descoberta de neurotoxinas que são expulsas do nosso cérebro durante o sono, o que pode contribuir para melhorar a vida dos doentes de Alzheimer.

Atualmente existe um mercado global crescente para os aparelhos de IRM, que ascende a 10 mil milhões de dólares anuais²¹. Só as aplicações de IRM bastam para demonstrar que Bob Wilson tinha razão quando afirmou perante o Congresso dos EUA que o Tevatrão teria benefícios a longo prazo. Conquanto tenham sido necessárias décadas de investigação para que tal fosse possível, o investimento parece agora mais do que justificado. Claro que os físicos do Fermilab não podem reivindicar a invenção das

técnicas de IRM. Porém, sem a inovação magnética exigida para a construção do Tevatrão, a tecnologia dos supercondutores poderia nunca ter chegado aos hospitais.

A tecnologia do magneto supercondutor tem também sido adotada em áreas diferentes dos aceleradores de partículas e da IRM. Os físicos de Brookhaven foram bem-sucedidos com a sua patente de 1968 do conceito de Maglev, uma tecnologia de transporte que se baseia na levitação magnética supercondutora e que é agora utilizada em alguns dos comboios mais rápidos do mundo. Os magnetos supercondutores são igualmente usados na geração e transmissão de energia, em reatores de fusão experimentais e em sistemas de armazenamento de energia. Tal como afirma Robert Marsh, da Teledyne Wah Chang, atualmente o maior fornecedor de ligas supercondutoras em todo o mundo: «Cada projeto na área da supercondutividade hoje existente deve-se em alguma medida ao facto de o Fermilab ter construído o Tevatrão e de este ter funcionado.»²²



Quando o Tevatrão descobriu o quark topo, os físicos nos Estados Unidos tiveram de engolir um sapo. Apesar de todo o seu êxito, eram agora obrigados pelo seu próprio governo a entregar à Europa o testemunho da liderança mundial na física de alta energia.

Enquanto Wilson e Edwards inventavam o Tevatrão em meados dos anos 1970, começaram a surgir teorias que apontavam para novas ideias, com nomes vistosos como supersimetria, *technicolour* e teoria das cordas. Todas elas coincidiam na previsão de que haverá algo para lá do valor da energia alcançada pelo Tevatrão. Além disso, o Modelo Padrão, a síntese de décadas de investigação em física de alta energia, continuava a carecer de uma derradeira peça. O Modelo Padrão continha uma previsão que era necessário confirmar ou refutar: o bóson de Higgs, uma partícula portadora de força (com *spin*-0), cuja massa era desconhecida. Leon Lederman tentou chamar a atenção para a relevância desta peça ausente do *puzzle*, chamando-lhe a «partícula de Deus».

Era fácil perceber para onde a física de alta energia se dirigia. O estudo de todas estas ideias exigia aceleradores em que as partículas pudessem colidir com energias superiores às do Tevatrão. Porém, o orçamento que o governo dos Estados Unidos estava disposto a pagar para esta aventura era fixo ou tendia a decrescer. Os Estados Unidos haviam visto a Europa a unir-se para construir o CERN, onde tinham começado a escavar um enorme túnel com 27 quilómetros de extensão entre a França e a Suíça para albergar a próxima máquina. A etapa lógica seguinte seria ultrapassar o CERN, com uma conjunção de esforços a nível global para construir aquilo a que chamavam um Laboratório Mundial.

Leon Lederman era um forte apoiante da construção de uma nova máquina com parceiros internacionais que partilhariam os custos. Logo em 1976 nasceu a ideia de um colisionador 20 vezes mais potente do que o Tevatrão. Projetaram um anel com 87,1

quilómetros de comprimento, composto de magnetos supercondutores, para fazer colidir dois feixes de 20 TeV, a que chamaram Superconducting Super Collider (SSC). Garantiram ao governo que este projeto voltaria a colocar os Estados Unidos firmemente na liderança da física de alta energia. Um projeto desta dimensão traria prestígio e impulsionaria até a economia local, estimando-se que criasse 13 mil empregos. O Fermilab queria a máquina no Illinois, mas o estado do Texas ganhou o processo de candidatura e um local em Waxahachie, 48 quilómetros a sul de Dallas, foi selecionado. O projeto seria aprovado em 1983 e em meados da década de 1980 as equipas de escavação começaram a abrir os enormes túneis. O físico Roy Schwitters, da Universidade do Texas, em Austin, que chefiara a experiência do CDF tornou-se diretor do projeto.

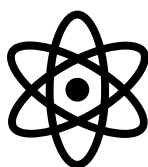
Foi então que os problemas começaram. Para controlar um projeto tão importante, o Departamento de Energia dos Estados Unidos tentou impor um estilo de trabalho militar-industrial que não caiu bem junto dos cientistas. Estes foram acusados de má gestão e de fracasso no controlo do orçamento e do calendário das obras. A confiança começou a desaparecer. Em 1987, o projeto foi alvo de uma auditoria, e o seu elevadíssimo custo, estimado em 4,4 mil milhões de dólares, suscitou um debate acalorado. Era igual, diziam, ao contributo da NASA para a Estação Espacial Internacional. Contudo, ao contrário da Estação Espacial, o SSC não estava à altura da sua pretensão de se tornar um laboratório mundial. A retórica nacionalista sobre os Estados Unidos assumirem a liderança na física de alta energia tinha conquistado o favor do governo, mas desagradou aos parceiros internacionais, entre os

quais o Canadá, o Japão, a Índia e a Europa. Para complicar as coisas, nenhum dos países parceiros se comprometeu a financiar o projeto, à exceção de um contributo de 50 milhões de dólares da Índia.

Em 1992, os Estados Unidos estavam em recessão e o orçamento tinha subido em flecha para 12 mil milhões de dólares. Perante o colapso da União Soviética, parecia haver poucos motivos para demonstrar a superioridade norte-americana com megaprojetos. O Congresso queria acabar com o programa. Naquele momento, haviam sido construídos 22,5 quilómetros de túnel, despendidos três mil milhões de dólares e edificadas as instalações para alojar os cientistas e as oficinas. Duas mil pessoas tinham sido contratadas. Centenas delas eram cientistas que, seduzidos pela grandiosidade do projeto, tinham vindo com as respetivas famílias de países como o Japão, a Índia e a Rússia. Estas pessoas acreditavam que o projeto era demasiado grande e que estava demasiado adiantado para ser cancelado. À última hora, Bill Clinton interveio numa tentativa de o salvar, advertindo o Congresso de que estaria a pôr termo a mais de três décadas de preeminência na ciência fundamental.

Por fim, nada pôde ser feito. O Congresso decidiu cancelar o programa e, em 1 de outubro de 1993, Clinton assinou com pesar o projeto de lei que matava o sonho. O Superconducting Super Collider não passava de um túnel parcialmente concluído no subsolo. Havia muitas lições a tirar do fim do SSC, mas, para mim, a principal foi a de que a Grande Ciência deixara de ser um utensílio nacionalista para pontificar no palco mundial. As nações

colaboradoras esperavam ser tratadas como parceiras, não como irmãos mais novos, em empreendimentos tão vastos. Se o SSC tivesse sido um laboratório genuinamente internacional, de acordo com a intenção original, talvez o desfecho fosse outro. Mais tarde, os edifícios foram adquiridos por uma indústria química chamada Magnablend e os túneis funcionam hoje como coletores da precipitação. Por ser um local escuro e húmido, diz-se que alguns empreendedores o utilizam para produzir cogumelos orgânicos.



Apesar da triste sorte do seu sucessor, o Tevatrão foi um projeto notável que abriu caminho aos aceleradores supercondutores no mundo. Graças a ele, foi revelado o derradeiro quark do Modelo Padrão — o quark topo. Enquanto tudo isto acontecia, os físicos do CERN haviam descoberto partículas portadoras de força, pesadas, chamadas bósons W e Z, que contribuíram para fortalecer o conhecimento da força fraca e consolidar o Modelo Padrão da física de partículas. Por último, no ano 2000, o Tevatrão descobriu também o neutrino do tauão, para completar a lista de partículas de matéria no Modelo Padrão. Porém, faltava descobrir uma peça do *puzzle*: uma partícula portadora de força, chamada bóson de Higgs.

Além desta peça em falta, os teóricos e os experimentalistas estavam divididos: os teóricos estavam interessados na *física* para além do Modelo Padrão, enquanto os experimentalistas dispunham

dos utensílios e da confiança para irem em busca das partículas mais difíceis de encontrar, com a ajuda de grandes colisionadores. A Teoria de Tudo estaria finalmente ao virar da esquina? Apenas precisavam do colisionador adequado para obter a resposta. Os experimentalistas do Tevatrão criaram um programa para iniciar a pesquisa do bóson de Higgs em 2001, com o Tevatrão «Run II», mas a atenção de muitos outros desviou-se, atravessando o oceano, para a Europa. No CERN, fora construída uma máquina com base no legado supercondutor do Tevatrão. O Grande Colisionador de Hádrons estava prestes a nascer.

¹ «R. R. Wilson's congressional testimony, 1969», *Fermilab*. Disponível online em https://history.fnal.gov/historical/people/wilson_testimony.html. Acesso em 31 de maio de 2021.

² Ibid.

³ Wilson inspirou-se na arquitetura da catedral de Beauvaix, em França.

⁴ https://history.fnal.gov/goldenbooks/gb_wilson.html.

⁵ L. Haddeson, A. W. Kolb e C. Westfall, *Fermilab: Physics, the Frontier, and Megascience*, University of Chicago Press, 2009, p. 101.

⁶ Os relatos são ambíguos quanto à eficácia do método de limpeza com o furão, mas, seja como for, *Felicia* seria substituída por um sistema robótico.

⁷ Chamado «extração ressonante lenta».

⁸ Haddeson, Kolb e Westfall, *Fermilab*.

⁹ A partícula « J/Ψ » é uma combinação — ou «estado ligado» — de um quark charmoso e de um antiquark charmoso, visto que os quarks não se «encontram» isolados. O grupo de Burton Richter no SLAC chamou à nova partícula « Ψ », enquanto o grupo de Samuel Ting, que trabalhava em Brookhaven, lhe chamou « J ». Os dois fizeram-no quase em simultâneo, pelo que a partícula ficou conhecida pela combinação de ambas as letras, J/Ψ .

¹⁰ D. C. Hom, L.M. Lederman et al., «Observation of high mass dilepton pairs in hadron collision at 400 GeV», *Physical Review Letters* vol. 36(21), 1976, p. 1236. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.36.1236>.

¹¹ Tecnicamente, significa que se a nova partícula não existir, a probabilidade de os dados terem o aspeto que têm é de um em 3,5 milhões. É um pouco aborrecido expressá-lo desta maneira, mas não há como contornar o «se» condicional, porque é assim que funciona a estatística. Eu prefiro expressá-lo assim: «É inferior a um em 3,5 milhões a probabilidade de que os dados sejam uma feliz coincidência.»

¹² «Revisiting the b revolution», *CERN Courier*, 2017. Disponível em <https://cerncourier.com/a/revisiting-the-b-revolution/>.

¹³ Estes primeiros materiais supercondutores eram nióbio-zircónio e nióbio-titânio.

¹⁴ J. Jackson, «Down to the Wire», *SLAC Beam Line*, vol. 73(9), primavera de 1993, p. 14.

¹⁵ Em Brookhaven, esta lição foi aprendida da maneira mais dura, quando estavam a desenvolver magnetos para um acelerador ligeiramente mais pequeno, chamado ISABELLE. Brookhaven realizou menos protótipos e teve um choque ao perceber que um magneto que funcionava bem com um pequeno comprimento deixava de funcionar corretamente com o tamanho final, um problema cuja importância levou ao cancelamento do projeto ISABELLE em 1982.

¹⁶ A primeira ideia para um colisionador parece ter pertencido a Rolf Wideroe, em 1953. Ideias posteriores chegaram de Novosibirsk, na Rússia, da Midwestern Universities Research Association (MURA), de Brookhaven, do SLAC e do Cambridge Electron Accelerator (CEA).

¹⁷ Colisões de 1,6 TeV aconteceram pela primeira vez em 13 de outubro de 1985.

¹⁸ Este decaimento produz também um bóson W, o portador eletricamente carregado da força fraca.

¹⁹ Ver <https://cerncourier.com/a/superconductors-and-particle-physics-entwined/>.

²⁰ Ver <https://www.elekta.com/products/radiation-therapy/>.

²¹ Ver <https://bccresearch.blogspot.com/2010/09/global-market-for-mri-systems-to-grow.html>.

²² Judy Jackson, «Down to the wire», *SLAC Beam Line*, vol. 23(1), 1993, p. 14. <https://www.slac.stanford.edu/history/newsblq.shtml>.

CAPÍTULO 12

O Grande Colisionador de Hadrões: O Bosão de Higgs e Mais Além

Em 10 de setembro de 2008, os físicos de todo o mundo aguardavam ansiosamente o arranque da maior máquina da Terra: o Grande Colisionador de Hadrões (LHC, da sigla inglesa para Large Hadron Collider). O LHC é um colisionador circular de prótons com 27 quilómetros de perímetro, construído no CERN, perto de Genebra, a cem metros de profundidade, por baixo da fronteira entre França e Suíça. A máquina começou como uma ideia em 1984, a sua construção foi aprovada pelo Conselho do CERN em 1994 e, após duas décadas e meia de trabalho, estava prestes a acelerar prótons pela primeira vez. Para o físico gales Lyndon (Lyn) Evans — que supervisionara o LHC como diretor de projeto desde a aprovação, em 1994 —, era o culminar de toda uma carreira a construir aceleradores de partículas.

Evans transmite modéstia, amabilidade e pragmatismo¹. Esta modéstia leva a que fale pouco da sua carreira nas entrevistas, mas a sua alcunha revela-nos um pouco mais acerca dele. «Evans, o Átomo» é a força primordial por trás do LHC. Evans trabalha no CERN desde 1969, mas a sua carreira tem-no levado aonde a sua mestria é necessária, na esteira de colisionadores com energias crescentes: desde o Super Síncrotrão de Prótons de 300 GeV no

CERN até ao Tevatrão no Fermilab e ao Superconducting Super Collider no Texas. Quando este último foi cancelado, o LHC transformou-se no futuro da física de partículas e a sua concretização, na própria razão de ser para Evans: «Não existe nada de maior que um cientista possa esperar alcançar.»²

Evans está consciente da magnitude da sua obra e ainda se sente esmagado de cada vez que entra no túnel do LHC³. A sua intervenção na construção do colisionador consistiu na supervisão de perto de 2500 funcionários do CERN, a par de outros 300 cientistas e engenheiros oriundos da Rússia, da China, dos Estados Unidos e de outros países que construíram componentes para o acelerador. Evans lembra-se de que, no dia em que se encontrou com o presidente da China, pensou para consigo: «Nada mau para um sujeito nascido em Aberdare!»⁴

Infelizmente, nem todos ficaram tão entusiasmados com o arranque do LHC como Evans e os seus colegas. Quando se aproximava o grande dia, alguns média encheram-se de manchetes como «Os cientistas loucos “não vão destruir a Terra”» e entretinham-se a espalhar a ideia de que o LHC podia criar um buraco negro que nos destruiria a todos, uma ideia alimentada por um processo jurídico desinformado que tentou impedir o arranque da máquina. Este tipo de conspiração acontece de cada vez que um novo acelerador entra em funcionamento. «A máquina do Big Bang pode destruir a Terra», lia-se numa manchete em 1999, quando um acelerador chamado Relativistic Heavy Ion Collider começou a funcionar nos Estados Unidos. Claro que tudo correu bem.

Oriundos do espaço, os raios cósmicos bombardeiam permanentemente a Terra com energias muito superiores — milhares de vezes superiores — às dos feixes do Grande Colisionador de Hadrões e assim tem acontecido, sem problemas, durante os cinco mil milhões de anos de vida do planeta. A diferença está em que o LHC cria intencionalmente estas colisões de energia elevada, por encomenda e com muito maior frequência do que os raios cósmicos. Toda a comunidade dos físicos de partículas depositava as suas expectativas de descoberta nestas colisões: procuravam não apenas o bóson de Higgs — a peça que faltava no Modelo Padrão —, mas tudo o que a natureza pudesse oferecer para lá do nosso atual conhecimento da física.

Em redor do perímetro do LHC encontram-se as quatro experiências principais, chamadas ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS), CMS (Compact Muon Solenoid), ALICE (A Large Ion Collider Experiment) e LHCb (Large Hadron Collider beauty). Os seus objetivos cobrem quase todas as grandes questões da física de partículas, desde a existência da matéria escura até à razão pela qual observamos mais matéria do que a antimatéria em nosso redor. A construção do LHC e das suas experiências foram duas missões muito diferentes. Enquanto o CERN contribuía para 80 por cento do LHC, e os restantes 20 por cento provinham de parceiros, as experiências — compostas por enormes detetores de partículas — eram bem diferentes. As experiências foram desenvolvidas por grupos autónomos de cientistas de todo o mundo, que se juntaram em grandes colaborações internacionais, em que o CERN cobria cerca de 20 por cento dos custos, incluindo os das instalações subterrâneas e da infraestrutura.

ATLAS é a experiência mais próxima do núcleo principal do CERN, em Meyrin, e pode ser vista por vezes pelas pessoas que tenham a sorte de conseguir fazer uma visita. Entra-se por um insuspeito portão de armazém; os visitantes percorrem lentamente o vasto átrio do tamanho de uma catedral em direção a um enorme buraco circular no pavimento. Trevas é tudo o que se vê para lá da barreira. Por cima, há uma pesada grua de metal de aço robusto, que ajuda os camiões a descenderem às profundezas da Terra. Cada componente da experiência ATLAS desce por poços como este e a montagem decorre como se se introduzisse um enorme navio arrefecido a hélio líquido dentro de uma garrafa.

Os visitantes passam por uma jaula de metal azul com aspeto industrial e chegam à porta prateada de um elevador. Aqui, todos devem pôr um capacete azul com a sigla «CERN». A seguir, vem a descida: cem metros no interior da Terra. O entusiasmo cresce quando saímos da jaula para um passadiço metálico que ressoa sob os pés. Ao virar de uma esquina há uma parede que se estende vários pisos para cima e para baixo. Só que, na realidade, não é uma parede. Está coberta por cabos e sistemas eletrónicos e depressa percebemos que se trata de uma série de camadas concêntricas de tecnologia de deteção. Isto é o detetor ATLAS. Com 46 metros de comprimento e 25 metros de diâmetro, costuma ser comparado a uma catedral pelas suas dimensões. Porém, os números não nos preparam para a realidade da sua vastidão. Os visitantes tentam assimilar as numerosas camadas, desde os detetores pixel no centro, que mostram as trajetórias precisas das partículas, até às câmaras muónicas na extremidade, que capturam

as partículas que possam escapar à detecção pelas primeiras camadas.

A visita continua após a descida de uma escada, para acompanhar o tubo do feixe, que prossegue a sua viagem através de uma parede de blindagem em betão. Ao chegarem ao túnel com 3,8 metros de diâmetro, aos visitantes depara-se um dos magnetos supercondutores com dez metros de comprimento, pintado de azul. O olhar percorre este magneto e passa para o seguinte; além dele, estendem-se mais de 1500 destes gigantes num túnel circular com 27 quilómetros de comprimento: eis o Grande Colisionador de Hadrões. A curvatura do círculo é tão suave que a máquina parece desvanecer-se indefinidamente na distância. Ver o colisionador de perto apenas o faz parecer mais irreal, mais desconcertante na sua complexidade.

Quando vi o ATLAS e o LHC pela primeira vez, era uma estudante de licenciatura que frequentava um curso de verão no CERN. Trabalhava num «sistema de controlo dos aquecedores do sistema de arrefecimento do detetor interno do ATLAS». O título do trabalho diz tudo. Eu estava longe do desafio grandioso da física com que sonhava, mas depressa percebi que pouco importava a insignificância do projeto. O que interessava era eu estar ali e ter a oportunidade de participar numa das maiores experiências jamais empreendidas. Naquela altura, decorria ainda a construção da máquina e dos detetores, por isso fazíamos visitas para conhecer todos os componentes subterrâneos da experiência em primeira mão. Isto era muito mais empolgante do que o meu projeto, até me ter apercebido de que, no interior do código que eu escrevia —

de forma medíocre —, estava uma mensagem de alarme que podia ser enviada ao longo da cadeia de comando para desligar todo o detetor ATLAS. Depois de estar frente a frente com a experiência, o meu projeto parecia de súbito mais importante.

Em 2005, o CERN contava com mais de 20 anos de contributos de estudantes dos cursos de verão, de pessoal temporário e de outros, além do trabalho de milhares de físicos, engenheiros e outros profissionais. Se a uma novata como eu era permitido enviar sinais que podiam desligar a máquina, se os meus erros ou má programação podiam destruir o projeto, por certo as leis da estatística diriam que tudo aquilo não tinha futuro.

Três anos depois, em 2008, eu estava a olhar para os especialistas na sala de controlo do CERN. Para o dia do arranque, o CERN fez o que qualquer organização aberta e transparente deve fazer: convidou jornalistas para assistirem ao início da vida da máquina. Em consequência, Evans viria a narrar a ligação da maior e mais complexa máquina jamais construída, perante o olhar do mundo inteiro. Uma fita de delimitação separava os jornalistas das filas de ecrãs de computadores dispostos em câmaras circulares, em cada uma das quais se controlavam aspetos diferentes da vasta experiência. Apenas alguns membros especializados da equipa podiam aceder aos controlos responsáveis pela entrada em operação do maior acelerador do mundo. Evans estava junto destes especialistas que, compreensivelmente, pareciam um pouco nervosos.

Ao raiar do dia, havia apreensão. Durante a noite, alguns dos sistemas criogénicos quase tinham lançado um pau (metafórico) na engrenagem. De manhã, tudo estava resolvido e o arranque recebeu luz verde. Evans supervisionou o processo a que chamamos *beam threading*, que consiste em fazer passar repetidamente porções minúsculas do feixe injetado pelos milhares de magnetos, uma secção de cada vez, para corrigir a órbita em cada ensaio, de maneira que os protões subsequentes continuem centrados no tubo do feixe. Às 8:56 da manhã, hora local no Reino Unido, as câmaras focaram um dos numerosos ecrãs de computadores que mostravam os *blips* dos monitores de posição do feixe, pequenos sinais elétricos oriundos do trajeto vacilante do feixe ao longo dos magnetos no anel, a quilómetros de distância do local onde estavam os operadores. Os repórteres diziam que o feixe de protões se deslocara mais de seis quilómetros em volta de uma secção do anel. Em alguns rostos, a ansiedade deu lugar à alegria. Passados dois minutos, após um número muito baixo de afinações, outro troço do feixe de protões descreveu mais meia-volta.

A três quartos do caminho, 20 minutos depois, o feixe alcançou o detetor ATLAS e começaram a ouvir-se aplausos espontâneos. Em fundo, as câmaras captaram um membro da equipa que dizia: «Acho que vou ganhar a minha aposta: uma hora.» Às 9:24, o feixe completara a travessia de todo o anel. Então o aplauso foi total. Tinham conseguido.

Para a equipa do acelerador, era um triunfo. Paul Collier — o físico britânico que chefiava o departamento do acelerador do CERN — resumiu o alívio e o cansaço, dizendo: «Sinto-me como se tivesse

sido eu a empurrar as partículas em volta do anel.» Tudo correria muito mais fácil e rapidamente do que o esperado. Eu estava deslumbrada; de algum modo, e contrariando as expectativas, aqueles especialistas haviam criado uma máquina que trabalhava na perfeição, tal como projetado.

Se a imagem que lhe vem à cabeça quando pensa num feixe de prótons é a de um sistema organizado como um laser, garanto-lhe que está enganado — na realidade, está mais próximo das formações confusas e complexas que observamos nos estágios iniciais das galáxias. As partículas do feixe não são participantes passivas no seu passeio relativístico nem, por último, no seu desaparecimento cataclísmico. Cada próton interage com todos os outros e com o ambiente circundante. No LHC cada próton rodopia, empurra e puxa no seu universo eletromagnético com 27 quilómetros de comprimento, para formar um de 2808 aglomerados separados por apenas 25 nanossegundos. Campos elétricos e magnéticos bem determinados criam estas galáxias nanoscópicas de partículas e mantêm-nas a circular no anel cem mil vezes por segundo, durante dias a fio, até finalmente colidirem. À energia máxima, se os feixes se desviassem do rumo ou escapassem, poderiam transformar 600 quilogramas de cobre sólido numa poça de líquido. Como é natural, para que nada falhe são precisas as mentes mais brilhantes, as simulações de computador mais avançadas e a melhor engenharia existente na Terra.

No fim do dia de arranque, Evans e a equipa do LHC tinham feixes a circular em ambos os sentidos, e as experiências, incluindo o CMS e o ATLAS, começavam a registar a ocorrência de salpicos

(*splash*) — não resultantes das colisões dos feixes, mas de partículas de alta energia que embatiam em alguns aglomerados de gás residual na câmara do feixe. Um por um, os detetores ganharam vida e reagiram, iluminando-se com os rastos de partículas. Os porta-vozes de cada experiência correram da sala de controlo respetiva para o centro de controlo principal (uma viagem de automóvel de 20 minutos) para entregar garrafas de champanhe embrulhadas em folhas onde tinham sido impressos os primeiros rastos eletrónicos obtidos nos belos detetores.

Nos dias seguintes, os operadores de câmara foram-se embora, as órbitas foram estabilizadas, o sistema de focagem final, concebido para comprimir o feixe para as colisões, foi posto em funcionamento, e tudo estava nos eixos. O objetivo era acelerar o feixe até uma energia de vários TeV para o direcionar para as primeiras colisões. Porém, nove dias depois do arranque, o LHC avariou-se. Os especialistas disseram que ocorrera um «incidente grave».

Ao aumentarem a intensidade dos magnetos — um procedimento normal —, uma das junções supercondutoras entre dois magnetos sofreu um curto-circuito. Isso não é normal. O cabo supercondutor perdeu o estado supercondutor, criando uma resistência elétrica súbita a uma corrente de cerca de um milhão de amperes, que libertava calor. Imenso calor. Esse calor vaporizou seis toneladas de hélio líquido, que se expandiu de forma tão drástica que as válvulas de purga que haviam sido concebidas para uma situação destas não aguentaram. A explosão arrancou do pavimento perto de 30 magnetos, cada um dos quais pesava 35 toneladas. As

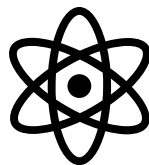
imagens que chegavam do túnel mostravam toda a destruição. O material isolante foi rasgado e os destroços estenderam-se por quilómetros do tubo do feixe. Não houve ferimentos a registar, exceto em alguns milhares de egos.

Precisaram de nove meses para recuperar a máquina: substituir os magnetos estragados, reforçar as ligações e aumentar todas as válvulas de purga para que um acidente daqueles não voltasse a acontecer. Analisaram cientificamente os pormenores para compreender o que se passara, partilhando tudo de forma aberta nas conferências. Conquanto já tivessem sido construídos outros sincrotrões supercondutores, este incidente revelou uma das dificuldades de concretizar algo tão grande e tão difícil: o LHC é o seu próprio protótipo.

As reparações foram bem-sucedidas e a máquina recomeçou a funcionar em 2009, superando as fases de verificação e teste e, por fim, o aumento da energia de cada feixe para 7 TeV. Em operação, a máquina revelou-se um monstro elegante, mas controlar essa operação continuava a ser tão exigente como no primeiro dia. Manter os feixes no rumo certo é uma tarefa intensiva, que envolve sistemas de *feedback* quer eletrónicos quer humanos. Os operadores tinham de efetuar correções frequentes, devido a efeitos incrivelmente pequenos, tais como o movimento da crosta terrestre devido ao Sol e à Lua, a quantidade de água no lago Genebra e o horário de passagem de comboios TGV, que afetam, todos eles, a órbita do próton. Apesar de tudo isto, não houve outros incidentes importantes durante mais de uma década.

Ao construir o LHC, o CERN e as colaborações internacionais atrás de cada experiência tiveram de criar sistemas de controlo de qualidade gigantescos para garantir a fiabilidade após a instalação no túnel subterrâneo. Verdadeiramente, foi apenas ao escrever este livro que percebi que o código que produzira como estudante teria sido examinado por um profissional, verificado e submetido a normativas rigorosas antes de ter sequer uma hipótese de ser utilizado. Todo o empreendimento do LHC é um absoluto triunfo de gestão do projeto, de engenharia e de colaboração.

O LHC tem continuado a funcionar sem problemas desde então, trabalhando sem falhas, 24 horas por dia, juntamente com a sua cadeia de injetores — a série de aceleradores que fornece feixes ao LHC. Em conjunto, este sistema enorme produz dois feixes com centenas de milhares de milhões de prótons com 99,999999 por cento da velocidade da luz, concentra cada um deles numa largura inferior à de um cabelo, e a seguir fá-los colidir. Então, o que vem depois? A física, claro.



Na época em que o LHC começou a funcionar, o Modelo Padrão da física de partículas, a teoria sistemática «de quase tudo menos a gravidade», estava completo nos seus pormenores teóricos. Como vimos, o Modelo Padrão compreende as partículas da matéria; os «leptões», como o eletrão, o muão e o tauão e os seus três neutrinos correspondentes, e os seis quarks (cima, baixo, estranho,

charmoso, fundo, topo). As partículas de matéria pareciam apresentar três gerações — quase idênticas, à exceção da massa, que é crescente — e as experiências para descobrir e confirmar as partículas da terceira geração tinham preenchido os espaços que estavam em branco. Tal como vimos no último capítulo, o quark topo foi descoberto em 1995 e o neutrino do tauão em 2000 no Fermilab, e estas foram as últimas partículas de matéria reveladas.

Além das partículas de matéria, o Modelo Padrão contém os bosões ou «portadores de força». Para já, devemos ignorar a gravidade, visto não estar incluída no Modelo Padrão, mas as outras três forças — fraca, forte e eletromagnética — estão todas lá. A força eletromagnética é mediada pelo fóton. A força forte, que liga os quarks e os prótons e neutrões, é mediada por glúons. A força nuclear fraca é um pouco diferente. Ao contrário dos fótons e dos glúons, que não têm massa, os bosões W e Z, descobertos no CERN nas décadas que antecederam o LHC, são extremamente pesados⁵. A força fraca apresentava também outras subtilidades.

Para escalas de energia elevada (que sabemos agora serem superiores a 246 GeV)⁶, a força eletromagnética e a força fraca são na realidade os componentes de uma única força global, a força eletrofraca. Embora estas duas forças pareçam muito diferentes à escala das energias quotidianas, para valores muito elevados como os que existiam logo após o *Big Bang* (antes mesmo da formação de quarks) fundem-se uma na outra e não podem ser separadas. Isto foi confirmado no CERN graças ao acelerador que precedeu o LHC, um colisionador chamado Grande Colisionador de Elétrons e Positrões (LEP, sigla de Large Electron Positron), que submeteu o

Modelo Padrão aos testes mais exigentes que já conhecera. Esta é uma das razões pelas quais os físicos se referem por vezes aos colisionadores de partículas como máquinas do tempo que recriam as condições do *Big Bang*, visto poderem produzir interações com energia tão elevada como as que se verificavam no Universo primitivo. As experiências permitiram também concluir que há apenas três tipos de neutrinos e, em consequência, que existem apenas três gerações de matéria, pelo menos de acordo com o que hoje sabemos. O Modelo Padrão parecia estar correto e possuir um incrível grau de precisão. Porém, continuava a faltar uma peça: a partícula teórica que poderia dar aos bósons pesados, W e Z, a sua massa, partícula essa conhecida por bóson de Higgs.

Esta nova partícula fora prevista em 1964, em três artigos independentes, um deles da autoria do físico teórico escocês Peter Higgs. A teoria postulava a existência de um campo (o «campo de Higgs») em todo o espaço. Para energias elevadas (onde a força «eletrofraca» é uma só força), todas as partículas não têm massa. Para uma certa escala de energia crítica, que se atingiu conforme o Universo foi arrefecendo, o campo de Higgs cresceu e as partículas principiaram a interagir com ele, ganhando assim massa. Este processo irreversível é conhecido por «quebra de simetria espontânea» e tem por consequência que as partículas diferentes têm massas diferentes, porque apresentam níveis diversos de interação com o campo de Higgs.

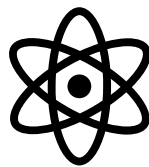
Que significa para o Universo estar preenchido com um campo de Higgs, e quais são os seus efeitos? Uma analogia notável⁷ é imaginar uma festa numa sala cheia de gente colunável. Se uma

pessoa anónima entrar na sala, poderá percorrer a festa sem impedimento. Porém, suponha que uma pessoa famosa entra na sala. Os colunáveis — o campo de Higgs — cercarão a pessoa famosa — uma partícula —, atrasando a sua travessia da sala. Uma pessoa famosa que sofre um grande atraso é como uma partícula que recebeu uma massa pesada do campo de Higgs.

A demonstração de que a natureza obedece realmente a este mecanismo de Higgs exigia que os físicos criassem e detetassem a partícula característica prevista pela teoria, o bóson de Higgs — que é uma excitação do campo de Higgs. Esta é comparável a um boato que se espalha pela festa, levando os colunáveis a aglomerar-se e a transmitir a excitação. Nos colisionadores, as colisões de partículas com energia superelevada podem sacudir o campo de Higgs. Esse acontecimento faz as partículas saltarem para fora do campo — eis os bósons de Higgs. O único problema estava em que o Modelo Padrão não indicava a massa que um bóson de Higgs deveria ter. Por isso, os bósons de Higgs seriam diabolicamente difíceis de encontrar.

A procura do Higgs no CERN já começara com o colisionador LEP. Depois de alcançados os outros objetivos científicos e de o Higgs ser a única peça do Modelo Padrão que faltava descobrir, as colaborações do detetor LEP concentraram-se nesta partícula ultraesquiva. Pouco antes do encerramento em 2001, as quatro experiências tinham encontrado indícios sugestivos de um bóson de Higgs com uma massa próxima de 114 GeV, mas não dispunham de dados suficientes para formular conclusões. Parecia que o LEP não tinha energia suficiente para criar um bóson de Higgs, se é que

ele existia. Foi assim que a equipa do Tevatrão no Fermilab tomou a dianteira na caça ao Higgs, mas apenas durante um curto intervalo. A estratégia de longo prazo do CERN fora sempre utilizar o túnel criado para o LEP para assegurar o futuro do laboratório no século XXI. Em 1984, cinco anos antes da entrada em funcionamento do LEP, o CERN começara já a projetar a próxima etapa, um colisionador de prótons de alta energia — uma máquina exploradora que os levaria muito além do alcance de 2 TeV do Tevatrão, até uma energia de centro de massa de 14 TeV. Esta máquina viria a ser o Grande Colisionador de Hadrões.



Seria preciso muito mais do que o *hardware* do acelerador e os detetores para encontrar o bóson de Higgs. Na Era do LEP e do LHC — e agora que os projetos levam tanto tempo a desenvolver-se podemos falar de Eras —, a física de partículas era muito diferente dos seus primeiros tempos. Os detetores eram compostos por camadas de subdetetores, que funcionavam como câmaras digitais gigantes em camadas, com milhões de canais de informação. Com mais colisões do que nunca, e mais resolução para detetar os destroços das colisões, o volume de dados das experiências crescia sem parar. Quando o LEP entrou em funcionamento em 1989, os dados de calibração rapidamente atingiram o nível dos gigabytes e os dados experimentais, os terabytes⁸. Conquanto, nos dias de hoje, isto não pareça muito, em 1989 um disco rígido corrente tinha uma capacidade de apenas algumas dezenas de megabytes. Onde

se guardaria toda essa informação? Como poderiam as pessoas aceder-lhe?

Este «problema de computação» tornou-se um perigo real que tinha de ser solucionado. Sempre na linha da frente, o CERN ligou em rede os seus computadores e *mainframes* e começou a comunicar por email (sim, ainda antes da década de 1990!), mas ainda não existia uma forma de colaborar nem de aceder aos dados de forma fiável. Foi nesta altura que Timothy John Berners-Lee, um estudante de pós-graduação em física de Oxford que trabalhava em computação científica no CERN, propôs que se conjugassem as novas tecnologias de computadores, redes e hipertexto num sistema que pudesse vencer este desafio. Escreveu um breve artigo em que delineava esta ideia, intitulado «Information Management: A Proposal», no qual o seu chefe no CERN rabiscou as palavras «Vago mas emocionante...»

O que Berners-Lee inventara fora a World Wide Web. Sim, a World Wide Web. Berners-Lee apresentou três inventos cruciais, presentes no nosso quotidiano, que são os sustentáculos da *web*: HTML, Hyper Text Markup Language, que é a linguagem formatada para a *web*; URL, Uniform Resource Locators, que são os endereços únicos utilizados para aceder a cada recurso na *web*; e HTTP, HyperText Transfer Protocol, que é o protocolo de comunicações usado para ligar os servidores e enviar a informação. Em 1990, Berners-Lee publicou o primeiro sítio da *web* e construiu o primeiro browser da *web*. O resto, como se costuma dizer, é história.

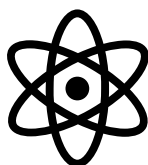
Hoje, existem mais de 1,6 mil milhões de sítios *web* e 4,33 mil milhões de utilizadores ativos a nível mundial, ou seja, 57 por cento da população humana. Diariamente, um utilizador médio passa umas espantosas seis horas e meia *online*⁹. Embora a internet (a parte física da rede) existisse antes da *web*, é realmente a esta que nos referimos quando falamos em «usar a internet».

É impossível atribuir um valor à *web* e quase impensável imaginar o regresso a uma Era onde ela não existia. Ao longo do tempo, a sociedade adaptou-se à ubiquidade da sua existência, mas um exemplo ajuda-nos a não perder de vista a sua importância. Em 2019, o governo da Índia cortou o acesso à internet à região de Caxemira, numa tentativa de reduzir os protestos da população. Mesmo numa região tão pobre como esta, o efeito foi tremendo. Os estudantes que queriam fazer exames *online* não podiam obter as habilitações académicas internacionais; o comércio eletrónico foi arruinado e as fábricas que vendiam bens ficaram isoladas, porque não podiam comunicar com os compradores; e os hospitais e as farmácias não conseguiam encomendar os medicamentos para tratar os doentes. O custo económico nos nove meses que se seguiram à interrupção foi estimado em 5,3 mil milhões de dólares¹⁰ para um PNB total de cerca de 17 mil milhões de dólares. A interdição foi parcialmente levantada em 2020 devido à pandemia do coronavírus, mas à data em que escrevo, o acesso não foi ainda completamente restaurado.

Desde muito cedo, Berners-Lee compreendeu que, para que a *web* pudesse prosperar, teria de ser livre. Ele afirma que «não se pode propor que uma coisa seja um espaço universal e,

simultaneamente, manter o controlo sobre ela». Em abril de 1993, quando apenas havia 600 sítios *web* a nível mundial, o CERN resolveu colocar o *software* da World Wide Web no domínio público, sem royalties nem patentes.

A *web* foi uma derivação completamente inesperada da física. As necessidades dos físicos de partículas e a sua forma colaborativa de solucionar problemas difíceis implicava que a partilha de dados acontecesse por vias mais avançadas do que noutros setores da sociedade. Portanto, bastou uma inspiração criativa no ambiente certo para criar uma das mais importantes invenções do mundo moderno. Hoje, Berners-Lee dirige o World Wide Web Consortium, que continua a orientar o desenvolvimento da *web*. Em 2012, quando Londres foi palco dos Jogos Olímpicos, Berners-Lee participou na cerimónia de abertura. Sentado a uma pequena secretária, tuitou ao vivo as palavras «STO É PARA TODOS», que iluminaram os assentos no estádio como um ecrã LED gigante. Ironicamente, os comentadores da televisão dos Estados Unidos não faziam ideia de quem ele era, e sugeriram aos espetadores que o procurassem no Google, utilizando a mesma tecnologia por ele inventada.



Com o LHC, aumentaram exponencialmente os desafios que a gestão dos dados lançava ao CERN. Embora a capacidade de computação e a conectividade tivessem aumentado, o mesmo

acontecera à quantidade de dados produzidos pelas experiências, o que exigia inovação permanente. Previam-se que a produção de dados anual dos detetores do LHC rondasse os 90 petabytes, equivalente a 56 milhões de CDs — uma pilha cujo comprimento é metade da distância à Lua. Proporcionar toda essa capacidade de computação, juntamente com a armazenagem e o processamento dos dados no CERN, estava fora de questão — só os custos de eletricidade seriam proibitivos. Os especialistas em computação do CERN sabiam que, a certo ponto, as bases de dados se tornariam demasiado grandes para transferir ou manipular na totalidade, visto que os cabos de cobre que suportam a maior parte da internet não seriam suficientemente rápidos.

Em resposta, criaram uma colaboração internacional para construir uma rede de fibra ótica com distribuição global, conexões super-rápidas e enormes centros de computação, ligando os cientistas a nível mundial. Designada por Worldwide LHC Computing Grid (WLCG), mas conhecida como «Grid», este sistema tem mais de 200 mil servidores situados nas nações participantes em todo o mundo. Pode ser usado quer para armazenar, quer para processar dados, e tem permitido a colaboração internacional tão essencial ao sucesso do CERN.

Com todos estes desafios de computação e engenharia em mãos, o Grande Colisionador de Hadrões voltou a estar funcional em 2009. Pouco tempo depois, começava a fazer colidir feixes e a recolher dados de cada uma das experiências, cuja análise foi acelerada pela existência da Grid. Todos os dias, o testemunho era transmitido de um fuso horário para o outro e a análise prosseguia 24 horas por

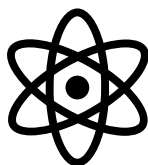
dia, algures no mundo. Os colegas da Austrália podiam aceder e analisar os mesmos dados do LHC que os físicos na Europa, nos Estados Unidos e noutras regiões. Porém, não eram eles os únicos na peugada do bosão de Higgs.

Neste momento, o Tevatrão estava em pleno Run II — iniciado em 2001 — e começara a ser aperfeiçoado para a pesquisa de Higgs. Os físicos do Fermilab sabiam que não conseguiam alcançar as mesmas energias que o LHC, mas esperavam poder encontrar primeiro o Higgs se a sua massa não fosse demasiado elevada (superior a 180 GeV), pois não tinham capacidade para a criar, nem demasiado baixa (inferior a 140 GeV), porque nesse caso decaía em quarks fundo e perdia-se. Conforme o LHC ganhava energia e a taxa de colisão melhorava, as probabilidades de encontrar o Higgs cresciam rapidamente no Tevatrão.

As equipas do Tevatrão trabalhavam de modo incansável na análise dos dados. No início de 2011 conseguiram excluir massas até 103 GeV e entre 147 GeV e 180 GeV com 95 por cento de confiança. Diziam que só precisavam de mais um pouco de informação para encontrar o Higgs ali no meio¹¹. Contudo, havia cortes orçamentais no horizonte e previa-se que o Tevatrão fosse desligado em setembro de 2011. Em julho, as experiências do LHC excluíram o intervalo entre 149 GeV e 190 GeV, mas em setembro, na ausência dos 35 milhões de dólares anuais necessários para o Fermilab continuar a funcionar, o Tevatrão foi mesmo desligado. Num final digno do projeto, Helen Edwards presidiu à cerimónia de abate da máquina gigante que ela se esforçara tão arduamente para

trazer à vida, quase três décadas antes. Agora, todos os olhares se fixavam no LHC.

Em dezembro, o intervalo do Higgs fora estreitado para 115-130 GeV, e a pesquisa concentrava-se numa área que rondava os 125 GeV, onde quer o ATLAS quer o CMS detetavam indícios de algo interessante. Conquanto estivessem apenas ao nível de dois-sigma, e nunca esquecessem o fiasco da *UpsLeon*, a mesma observação fora realizada de forma independente em duas experiências. O entusiasmo da comunidade dos físicos era palpável.



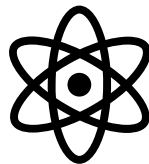
Em julho de 2012, após três anos de funcionamento do LHC e de um fervilhante período de análise, a comunidade mundial da física de partículas reuniu-se numa grande conferência intitulada International Conference in High Energy Physics (ICHEP), que decorreu em Melbourne, na Austrália. O CERN organizou uma conferência de imprensa na sua sede perto de Genebra, que foi transmitida em direto via *streaming* — por meio da *web*, claro — para o auditório em Melbourne, onde se encontrava a maior parte dos físicos. Eu assisti à transmissão no meu gabinete no Laboratório Rutherford Appleton, ao fundo da estrada que vem de Oxford, acompanhada por milhões de pessoas que assistiam *online* em todo o mundo.

Os porta-vozes das duas experiências principais, os físicos Joseph Incandela, dos Estados Unidos, para o CMS, e Fabiola Gianotti¹², de Itália, para o ATLAS, fizeram as suas apresentações em representação de milhares de cientistas. Eu estava impressionada pelo grau de pormenor científico que proporcionaram, apesar da presença dos média. Conforme exibiam a reconstituição dos diversos canais de decaimento do Higgs, sentia-me entontecida pela quantidade de trabalho por trás de cada gráfico e de cada número apresentados.

Enquanto assistia, pensava nos colegas para quem este dia representava o culminar de décadas de trabalho. Alguns tinham os seus gabinetes ao fundo do corredor, e outros estavam do outro lado de mundo, em Melbourne.

Este era o labor de indivíduos que se reuniam em pequenas equipas de cerca de dez a 15 investigadores, cada um dos quais assumia a autoria da pequena peça com que contribuía para o *puzzle*. Depois, estas equipas congregavam-se em equipas maiores ou grupos de trabalho com outros institutos, os quais, por sua vez, coalesciam numa colaboração de cerca de dois mil cientistas por experiência. Todos eles trabalhavam em conjunto num sistema de gestão com organização própria, que é o cunho do estilo de colaboração do CERN. O inabitual era que, naquele dia, tinham jurado guardar segredo do que sabiam, mas todos adivinhávamos o que se seguiria. Quando terminaram as apresentações dos físicos, foi a vez de o físico de partículas alemão Rolf-Dieter Heuer subir ao palco no seu papel de diretor-geral do CERN. Após algumas palavras de introdução, respirou fundo e anunciou: «Fizemos uma

descoberta.» Ouviram-se aplausos, os físicos abraçaram-se e felicitaram-se mutuamente. Tinham mudado de país, desenraizado as famílias, trabalhado horas incontáveis a qualquer altura do dia ou da noite, e interrogavam-se, enquanto o faziam, se haveria de facto alguma coisa para descobrir. Agora, sabiam que sim. Havia descoberto o bosão de Higgs. A câmara fez um zoom sobre Peter Higgs com 82 anos de idade, quando uma lágrima lhe escorria pela face.



Quando nos distanciamos daquele momento e pensamos em tudo o que o CERN alcançou, ficamos impressionados pela dimensão da colaboração internacional. As experiências do LHC envolvem 110 países diferentes, incluindo 23 Estados-membros e oito Estados-membros associados do CERN, nações observadoras e países com acordos de cooperação (como a Austrália). Reúnem aproximadamente metade dos 13 mil físicos de partículas do mundo. Mesmo sendo eu uma cientista firmada que trabalha regularmente em colaborações em diversos fusos horários, continua a ser-me difícil apreender o modo como funciona uma equipa global de tão grande dimensão. Ter chegado ao ponto de partida, ao primeiro feixe e depois às primeiras colisões foi só por si uma proeza notável, depois acrescentada pelo êxito de uma descoberta fundamental.

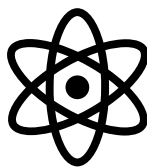
Tal como mostra o exemplo da *web*, o CERN atua de forma diferente de outras grandes organizações. O CERN é financiado pelo dinheiro dos contribuintes, por isso quase tudo o que faz é de «fonte aberta». Promovem as ideias de ciência aberta, dados abertos e *hardware* aberto. A própria loja de recordações tem de obedecer a esta regra: não pode dar lucro. A *web* desenvolveu-se a partir destes princípios de partilha e abertura, sem saber como iria evoluir. Este aspeto exclusivo do modo de funcionamento do CERN não tem sido ignorado por governantes e organizações internacionais.

Em 2014, o CERN festejou 60 anos de ciência para a paz, juntamente com a ONU. O CERN é um exemplo do modo como as nações podem trabalhar em conjunto para o bem público global. Seguindo o modelo do CERN, uma série de outros projetos construíram, entretanto, colaborações semelhantes, aproximando países com profundas diferenças políticas. O centro SESAME (Synchrotron Light for Experimental Science and Applications in the Middle East), na Jordânia, congrega o Barém, Chipre, Egito, Irão, Israel, Jordânia, Paquistão, Autoridade Palestiniana e Turquia. No sudeste da Europa, o SEEIST¹³ (South-East European International Institute for Sustainable Technologies) é um projeto de construção da economia do conhecimento que se centrará numa nova terapia com prótons e iões de carbono e na respetiva instalação de investigação. O CERN contribuiu também para uma das colaborações em que participei, STELLA (Smart Technologies for Extending Lives with Linear Accelerators), em que, juntamente com colaboradores na África subsariana, procuramos melhorar o acesso a tratamentos oncológicos de grande qualidade à escala global,

mediante soluções tecnológicas para a grave escassez de instalações de radioterapia.

Estes tipos de iniciativas e colaborações são essenciais para o nosso futuro global. O modelo do CERN cria um mecanismo de cooperação internacional com um potencial incomparável para resolver desafios planetários. Atualmente, a ONU e o CERN trabalham em conjunto para aprender a criar colaborações que façam avançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, muitos dos quais requerem soluções científicas e tecnológicas, por exemplo nas áreas das mudanças climáticas, dos cuidados da saúde e do acesso à alimentação e água.

O CERN não teria sido capaz de exercer a mesma influência se fosse um *think-tank* ou uma empresa vocacionada para criar patentes tecnológicas sediada num país. O mesmo etos que a *web* suscitara também impulsionou muito a investigação científica e a necessidade de tornar os seus resultados mais abertos ao público.



Claro que a *web* não foi o único derivado tecnológico do CERN. Para os projetos com potencial comercial, há toda uma equipa de transferência de conhecimento para os desenvolver. Toda a gente pode consultar *online* o atual portefólio tecnológico do CERN¹⁴, e alguns exemplos correntes incluem sistemas de software colaborativo, detetores resistentes à radiação para uso clínico e

máquinas cortadoras orbitais compactas que cortam grandes troços de tubagem em locais complicados. Os requisitos específicos das grandes experiências do CERN têm impulsionado continuamente a indústria para inovar de modo a fornecer componentes topo de gama. Num inquérito, 75 por cento dos fornecedores do CERN assinalaram que tinham aumentado a sua capacidade de inovar graças aos contratos com o CERN. Referiam também o «efeito CERN», pelo qual a faturação de uma empresa aumenta quatro dólares por cada dólar de contratos de fornecimento celebrados com o CERNE¹⁵.

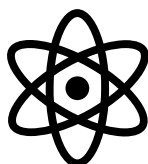
Sendo impossível referir todas as tecnologias que resultaram de desenvolvimentos recentes na física de partículas, é importante mencionar uma delas, porque completa o conjunto de tecnologias de diagnóstico médico. Além dos aparelhos de tomografia computadorizada (Capítulo 1) e de IRM (Capítulo 11), a física de partículas desempenha também um papel crítico no desenvolvimento dos aparelhos de tomografia por emissão de positrões (PET). Além de utilizar positrões (antimatéria), a tecnologia de deteção PET provém do desenvolvimento dos cristais de óxido de germânio e bismuto utilizados para detetar chuvas de partículas. Mais de 1500 aparelhos de PET foram construídos com estes cristais, com um custo entre 250 mil e 600 mil dólares por máquina. Durante a Era LHC foram necessários novos cristais, capazes de resistir aos estragos causados pela radiação resultante da enorme taxa de colisão, o que conduziu a um novo tipo de cristal, chamado LYSO. Estes novos cristais apresentam um tempo de resposta mais breve e produzem o triplo da luz dos cristais de óxido de germânio e bismuto. São agora a referência da indústria para os

aparelhos de PET. A equipa de transferência de conhecimento do CERN garantiu que isto acontecia mesmo antes de a tecnologia ser utilizada no LHC, onde apenas agora está a ser incorporada em detetores para o aperfeiçoamento do programa LHC.

Terá alguma das tecnologias atuais no portefólio do CERN um impacto semelhante ao da *web*? É impossível saber. A LHC Computing Grid não teve ainda o mesmo impacto no quotidiano, mas é já amplamente utilizada fora do domínio da física de partículas. Aos outros domínios científicos tem proporcionado acesso a mais capacidade de cálculo do que nunca. Mesmo nos seus primórdios, a Grid possibilitou a formulação de novos medicamentos antimalária e a análise de 140 milhões de compostos químicos — uma tarefa que exigiria 420 anos de trabalho a um computador padrão. A infraestrutura do CERN e a partilha aberta de conhecimento ajudam outros cientistas a aceder ao reino dos megadados e a criar formas completamente novas de trabalhar em outros domínios.

Entretanto, esta opção pela partilha de recursos tornou-se um fenómeno quotidiano. As empresas em todo o mundo adotaram a mesma abordagem e construíram grandes armazéns, ou *nuvens*, onde os dados são guardados e acedidos em servidores remotos, em vez de estarem no nosso computador. Se utiliza serviços em nuvem, como Google Docs, Dropbox ou outros, saiba que todos eles são construídos de forma semelhante. A diferença entre sistemas em nuvem comerciais e o sistema Grid reside no local onde os dados estão guardados. A computação na Grid significa que a armazenagem de dados e a capacidade de cálculo se distribuem por

muitos computadores diferentes, em vez de ficarem guardados em armazéns de servidores em nuvem que são propriedade de grandes empresas. Atualmente, perante a cada vez maior frustração dos utilizadores pelo facto de os seus dados serem reféns de empresas privadas — pensemos nos formatos .docx ou .xlsx de que a Microsoft é proprietária ou nas coletâneas de música do iTunes da Apple —, alguns aspetos da tecnologia da Grid têm vindo a ser adotados de modo crescente como soluções para os desafios da computação em nuvem. Um dos objetivos centrais é a *interoperabilidade*: a capacidade para transitar abertamente entre sistemas¹⁶. Em grande medida, este objetivo decorre dos princípios do CERN e da criação da *web* por Berners-Lee. Um tipo de sistema nuvem-Grid otimizado seria de igual utilidade para os físicos de partículas: poderia ultrapassar a limitação de tamanho dos sistemas em nuvem e permitir aos físicos utilizarem apenas uma infraestrutura pública bem administrada.



Ainda não conhecemos todas as formas pelas quais o Grande Colisionador de Hadrões influenciou o mundo moderno, porque não discutimos o maior impacto desta experiência: formar pessoas extremamente talentosas. O LHC e os seus detetores são megaciência internacional e inspiradora. Muitas das melhores e mais brilhantes jovens mentes do mundo querem estudar física devido a grandes projetos como este e milhares delas concluem doutoramentos na área. Seria negligente da minha parte ignorar a

pergunta «O que acontece a seguir a isso?» Embora pareça que o seu caminho estaria traçado, tal não pode estar mais longe da verdade.

Em algumas áreas da física há mais de uma centena de candidatos para cada vaga de pós-doutoramento. A seguir, há ainda menos cargos acadêmicos ou empregos permanentes em grandes laboratórios. Com a passagem do tempo, a maioria destas pessoas altamente qualificadas e capazes enfrenta uma decisão muitíssimo dura: ficar na investigação ou abandoná-la. A especialização profunda traz desafios únicos, e os investigadores que chegam ao fim de contratos a prazo não costumam ter alternativa a uma nova mudança de país, em busca dos escassos lugares disponíveis, ou a transferir-se para outra área laboral. Isto pode ser aceitável para pessoas que dispõem de meios financeiros para aguardar que surja o próximo cargo que lhes convenha, mas para muitos — eu incluída — isso não é possível.

Pessoalmente, enfrentei este precipício mais do que uma vez na minha carreira. Graças às experiências de muitos amigos próximos, colegas e pares, sei também que não fui a única a sentir uma carga emocional extraordinariamente pesada quando fui forçada a ponderar o abandono da investigação física de grande espectro e impulsionada pela curiosidade de que tanto gosto. Mas isto também me obrigou a pensar nas numerosas competências que possuo e que podia aplicar noutros domínios. Tinha competências em ciência dos dados, resolução de problemas, oratória e escrita. Possuía competências experimentais que podiam ser úteis na indústria e uma aptidão comprovada para levar a cabo projetos de longo prazo.

Comecei a reorganizar o meu *curriculum vitae* e a pesquisar sites de emprego. Com o tempo, pensava que poderia dar-me bem numa *start-up*, na política ou em consultoria. Na realidade, compreendi que podia enveredar por qualquer um desses rumos, gostando do que fazia e tendo um impacto no mundo. Aceitei que havia milhares de outras atividades mais bem remuneradas onde poderia ser bem-sucedida.

É um facto que a maior parte das pessoas doutoradas em física virá a abandonar a pesquisa académica. Um inquérito a 2700 ex-investigadores do CERN revelou que 63 por cento deles trabalham no sector privado em áreas como as tecnologias avançadas, a finança e as tecnologias de informação. As competências que possuem são muito procuradas nestes sectores: a capacidade de resolução de problemas, a programação, a análise de dados em grande escala, a comunicação em ciência e a colaboração internacional. No Reino Unido, há uma carência surpreendente de 173 mil pessoas com as chamadas aptidões STEM (Science, Technology, Engineering and Maths – Ciência, Tecnologia, Engenharia e Matemática), conquanto este país tenha a reputação de ser um líder global em ciência e tecnologia¹⁷. A necessidade deste género de talento não vai parar de crescer.

Quando comecei a procurar histórias de físicos de partículas que tinham utilizado as suas aptidões noutras áreas, não precisei de ir muito longe para encontrar alguns inovadores incríveis. Veja-se o exemplo de Elina Berglund, uma física doutorada que esteve envolvida na caça ao bosão de Higgs no CERN. Berglund apercebeu-se de que havia uma enorme lacuna no conhecimento sobre os

ciclos reprodutivos femininos, pelo que começou a registar os seus dados corporais, incluindo a temperatura. Não tardou a verificar que podia aplicar as suas aptidões em estatística e análise de dados para saber quando estava no período fértil, e a perceber que a sua ideia podia ajudar outras mulheres desejosas de um método natural de controlo dos ciclos hormonais. O resultado foi a *app* Natural Cycles, que tem agora mais de 1,5 milhões de utilizadoras em todo o mundo. Em 2020, esta *app* era a única aprovada pela Food and Drugs Administration dos Estados Unidos para utilização como contraceptivo — uma tecnologia que transforma a vida de muitas mulheres.

Existe agora uma relação comprovada entre a física de partículas — e outros domínios da física onde a curiosidade é a força motriz — e as *start-ups* tecnológicas, em particular as de Silicon Valley. Não são apenas os salários elevados que atraem os físicos para estes trabalhos; há também uma variedade quase infinita de problemas a resolver, assim que se espreita para lá das fronteiras do domínio da nossa especialidade original. Nos Estados Unidos, sobretudo, o caminho que vai dos programas de doutoramento em física a Silicon Valley foi já tão trilhado e é tão bem financiado, quando comparado com a investigação académica, que pode ser difícil para a física conseguir segurar os seus melhores doutorados.

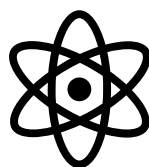
Poucos anos depois de completar o meu doutoramento, quando chegou o momento de decidir se ficava ou partia, resolvi que a única maneira de eu ficar na física seria com as condições que entendesse serem as melhores para mim. Não conseguia resolver os problemas externos dos contratos a curto prazo, do salário ou do

financiamento, mas podia controlar o ambiente em que me encontrava. Passei algum tempo a construir uma comunidade de físicos que pensavam como eu, sobretudo mulheres, para ter à minha volta pessoas que fossem parecidas comigo e para me sentir menos isolada. Aprendi a pedir aquilo de que precisava, o que me deu coragem para entrar nos gabinetes dos chefes do meu setor e solicitar apoio para a minha investigação — uma vez, até pedi que o meu próprio cargo fosse criado. E compensou. Resolvi trabalhar naquilo que me apaixonava, como comunicar com o público ou contribuir para melhorar a *research culture* [comportamentos, valores, expectativas, atitudes e normas dos sistemas de investigação], a par da minha própria investigação, mesmo que isso significasse debater-me contra um sistema que afirmava que eu não devia «perder tempo» nessas coisas. Não estava numa missão individual para mudar a física — que estaria condenada à partida —, mas esforcei-me para criar um ambiente em que me sentisse produtiva, bem-vinda e satisfeita. Sabia que, caso não resultasse, não teria problemas em afastar-me.

Afinal, fiquei. Juntamente com os meus colegas, construí um novo laboratório do zero, para uma pequena experiência que usa uma barreira iónica para simular os aceleradores de partículas. Procurava compreender de que modo os feixes de partículas se comportarão em colisionadores futuros. Recebi o meu primeiro estudante de doutoramento, e encomendámos o equipamento. Nunca construíra uma experiência do zero, e foi uma aprendizagem enorme. Não conseguia acreditar que tantas coisas pudessem correr mal, nem que se demorasse tanto tempo a integrar determinados componentes. Certa tarde, dois anos após a minha

decisão de ficar, estávamos nós de volta de um ruído eletrónico e de outros problemas básicos quando vimos pela primeira vez um pequeno *blip* surgir acima do ruído, no ecrã do osciloscópio. Capturámos e extraímos iões: era a nossa primeira realização importante. Naquela tarde, recebi autorização especial do laboratório para abrir uma garrafa de champanhe, que bebemos em copos de plástico. Não era propriamente uma proeza ao nível do bóson de Higgs, mas eu ainda mal conseguia acreditar no que acontecera. A nossa experiência fora bem-sucedida.

Recordando esse tempo, aquilo que mais me impressiona é perceber como fui afortunada por ter comigo gente de grande qualidade, não apenas durante esse período exigente da minha carreira, mas ao longo de toda a jornada, desde os meus primeiros professores, passando pelos mentores que tive pelo caminho, até ao apoio inabalável do meu orientador de doutoramento, dos meus colegas e das pessoas que, como vim depois a descobrir, me tinham defendido sem que eu o soubesse. Aprendi que a física é muito mais do que a investigação do modo como funciona o Universo e tudo o que ele contém. Esta é apenas a grande pergunta que nos congrega. Tudo na física concerne às pessoas. Parece evidente quando o expressamos desta maneira, não é?



Em nenhum outro aspeto isto se torna mais claro do que na incrível história do LHC, em que mais de dez mil cientistas

aprenderam a trabalhar em equipa para um objetivo comum, motivado por pura curiosidade. Tal proeza, só por si, valeu bem o investimento. Claro que a história não termina com o bóson de Higgs. Os físicos do LHC continuam a trabalhar arduamente em cada dia — tal como todos nós —, porque com novos dados, ideias e experiências, grandes ou pequenas, podem formular novas perguntas, aproximar-se mais das respostas e continuar a progredir na tentativa de compreender tudo o que existe.

Até agora, o LHC produziu um grande número de resultados interessantes e sugestivos, embora não tão significativos como a descoberta do bóson de Higgs. Todos os dias surgem novos resultados: na última década, o LHC revelou mais de 50 novos hádrões — partículas compostas por quarks —, que continuam a pôr à prova o nosso conhecimento da força forte. Alguns deles foram mesmo previstos pela teoria de Gell-Mann, mas só recentemente foram detetados. Os físicos do LHC descobriram entretanto numerosas partículas que consistem na união de quatro quarks (tetraquarks) ou cinco quarks (pentaquarks) e continuam a matutar nos pormenores do seu funcionamento. À natureza continua a fornecer partículas em abundância, todas elas contempladas pelo Modelo Padrão da física de partículas.

Conquanto estas novas partículas tenham peculiaridades que contribuem para aperfeiçoar o Modelo Padrão, a grande expectativa de descobrir novas partículas exóticas na gama de energias do LHC não se concretizou até ao momento. De certa forma, este facto é positivo: estamos a refutar teorias a um ritmo talvez nunca visto na história da física, o que favorece o surgimento de novas ideias

criativas e proporciona novos focos de atenção. Quando perguntei aos meus colegas da física de partículas experimental se se sentiam desapontados com esta situação — visto que muitos deles estavam deveras esperançosos de descobrir as novas partículas exóticas que os teóricos previam existirem fora do Modelo Padrão —, a maior parte deles mostrou-se de um otimismo surpreendente. Afinal, eles procuram algo que é real, independentemente das suas teorias favoritas. Agora, espera-os o trabalho árduo de examinar com minúcia a vasta quantidade de dados produzidos no LHC, a fim de desvendar os segredos que a natureza ainda esconde.

Não se pense, porém, que estamos apenas a acrescentar pormenores, ou que a viagem da física está praticamente completa e que o mais importante foi já descoberto. De modo nenhum. Precisamos, uma vez mais, de analisar as lacunas. Apesar do êxito incrível do Modelo Padrão, as nossas equações não conseguem reconciliar a gravidade com as outras forças. Não sabemos se existe um só Universo, ou se vivemos no chamado «multiverso». Sabemos que os neutrinos têm massa e podem mudar de forma, mas ninguém sabe porquê¹⁸. Não sabemos por que estamos rodeados de matéria e não de antimatéria. Não conhecemos o carácter da matéria escura que povoa o nosso Universo. Sob muitos aspetos, o bosão de Higgs é apenas o começo.

¹ Evans é também o único membro atual da Royal Society no meu domínio da física dos aceleradores.

² M. Krause, *CERN: How We Found the Higgs Boson*, Singapura, World Scientific, pp. 98-107.

³ Entrevista com Lyn Evans, *BBC Wales* (arquivo). Disponível online em <https://www.bbc.co.uk/wales/scifiles/interviewsub/liveevans.shtml>.

⁴ Krause, *CERN*.

⁵ Os bosões W e Z pesam cerca de 70 GeV.

-
- ⁶ Este número parece bastante específico, porque se baseia na massa do bóson de Higgs, ao qual estamos a chegar, espere um pouco!
- ⁷ Da autoria do físico David Miller, do University College London.
- ⁸ J. D. Shiers, *Data Management at CERN: current status and future trends*, Proceedings of IEEE 14th Symposium on Mass Storage Systems, 1995, pp. 174-81, doi: 10.1109/MASS.1995.528227.
- ⁹ Ver https://www.bondcap.com/pdf/Inter_net_Trends_2019.pdf.
- ¹⁰ O PNB *per capita* é 1369 dólares e a população de Caxemira consiste em 12,55 milhões, portanto o PNB total ronda os 17 mil milhões. Ver <https://thediomat.com/2020/08/perpetual-silence-kashmirs-economy-slumps-under-lockdown/>.
- ¹¹ «Tevatron experiments close in on Higgs particle», *Symmetry*, julho de 2011. Disponível online em <https://www.symmetrymagazine.org/breaking/2011/07/27/tevatron-experiments-close-in-on-higgs-particle>.
- ¹² Gianotti viria a ser a primeira mulher diretora-geral do CERN, cargo que continua a exercer à data da escrita deste livro.
- ¹³ Para pormenores, ver <https://seeiist.eu>.
- ¹⁴ Para informação sobre o portefólio de tecnologia do CERN, ver <https://kt.cern/technologies>.
- ¹⁵ Ver *The Impact of CERN*, CERN-Brochure-2016-005-Eng, dezembro de 2016. <https://home.cern/sites/home.web.cern.ch/files/2018-07/CERN-Brochure-2016-005-Eng.pdf>. Acesso em 11/10/2021. Ver também P. Castelnovo *et al.*, «The economic impact of technological procurement for large scale infrastructures: Evidence from the Large Hadron Collider, CERN paper, 2018. Disponível online em <https://cds.cern.ch/record/2632083/files/CERN-ACC-2018-0022.pdf>.
- ¹⁶ David Villegas *et al.*, «The role of grid computing technologies in cloud computing», in B. Fuhr (ed.), *Handbook of Cloud Computing*, Berlim, Springer Verlag, 2010, pp. 183-218.
- ¹⁷ P. Amison e N. Brown, Evaluation of the Benefits that the UK has derived from CERN, Technopolis Group, 2019.
- ¹⁸ A propósito, a massa do neutrino não explica a massa em falta no Universo.

CAPÍTULO 13

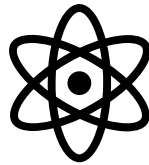
Experiências Futuras

Anualmente, perto de 1500 físicos e engenheiros reúnem-se na Conferência Internacional de Aceleradores de Partículas, para partilharem os seus resultados. Os seus projetos estendem-se dos colisionadores com cem quilómetros de extensão até aos mais diminutos aceleradores industriais. O local da conferência muda todos os anos, deslocando-se entre a Ásia, as Américas e a Europa. Porém, em maio de 2019 decorreu pela primeira vez em Melbourne, na Austrália. Tive a honra de ser convidada para proferir a palestra de abertura.

Antes da conferência, debati-me com o tema da palestra. O problema não era o tamanho da audiência. Já tinha discursado em frente de grupos maiores e sabia como lidar com os nervos. O que me causava ansiedade era a qualidade científica dos meus ouvintes. Esta era de longe a mais importante palestra que fora chamada a proferir na minha área profissional. Claro que eu podia seguir o exemplo de outros colegas e proporcionar uma visão global, como especialista, do estado do nosso domínio de estudo, com muitos pormenores técnicos acerca dos aceleradores de partículas. Contudo, quando comecei a escrever, o texto era muito diferente.

De início, apenas tencionava transmitir algumas reflexões. Não escrevi sobre os pormenores da física, mas sim sobre os aspetos mais humanos do nosso ramo, sobre o trabalho em equipa, a maneira como chegámos ao ponto atual e as lições que aprendemos. Discorri sobre a *research culture* e sobre a forma como podemos trabalhar em conjunto para enfrentar desafios futuros. Conforme desenvolvia os meus pensamentos, fui lentamente percebendo que não iria reescrever esta palestra. Tratava-se de um enorme risco profissional. Nas conferências, os físicos falam sobre a física, não sobre as pessoas. E se eu perdesse o respeito da minha comunidade ao pôr em segundo plano o meu conhecimento especializado, para dar relevo a esta história? Como professora recém-contratada, estava a arriscar bastante.

No dia da palestra ocupei nervosamente o meu lugar na mesa, cumprimentei o representante das autoridades locais e esperei que o presidente da conferência me apresentasse. Os meus *slides* já estavam prontos. Fechei os olhos e concentrei-me na minha respiração. Quando chegou o momento, subi as escadas para o palco e encarei a plateia. Sob o brilho das luzes pude ver o rosto de pessoas com quem colaborava, vindas da Europa, do Japão, dos Estados Unidos e da Austrália, desde os diretores de laboratório que conhecia apenas de nome até aos colegas com quem passara os turnos da noite a comer piza. Também ali se encontravam os meus novos alunos da Universidade de Melbourne, que nunca me tinham ouvido discursar. Respirei fundo e comecei a falar.



Descrevi o que tinha aprendido nesta viagem por 12 experiências no nosso ramo da ciência. Os organizadores tinham-me pedido que refletisse sobre as realizações do passado, mas também que falasse sobre aonde nos conduziria o futuro. Por isso, principiei pela minha reflexão sobre a nossa posição atual nesta viagem inspiradora e global pela totalidade do Universo para compreender o nosso mundo.

Não consigo deixar de traçar paralelismos entre o ponto de partida desta viagem no final do século XIX e aquele em que nos encontramos no domínio da física de partículas, no limiar da terceira década do século XXI. Talvez estejamos à beira de um período de transformação tão gigantesco como o que assistiu à descoberta do núcleo, do eletrão e de todo o mundo subatômico e quântico. Andamos em busca de uma versão do século XXI de Röntgen, a observar um clarão verde no ecrã do laboratório, ou do assombro de Rutherford perante as partículas defletidas pela folha de ouro. Em vez de um clarão num ecrã teremos por certo dados mais complexos num computador, mas a essência é igual. Procuramos algo que nos faça murmurar: «Humm... que estranho.» Porém, não podemos ficar simplesmente à espera de que estas coisas aconteçam.

Nem todas as descobertas resultam de acasos felizes. As pessoas fazem descobertas: e só apoiando aquelas que tomam a iniciativa

de montar experiências para sondar a natureza é que poderemos alcançar a fase seguinte do conhecimento. Felizmente, esta viagem está já em marcha. Milhares de cientistas de todo o mundo — incluindo muitos dos presentes na minha palestra — encontram-se a planear, construir e melhorar experiências, grandes e pequenas. A curiosidade leva-os aos limites do que é tecnologicamente possível e mais além.

Muitas das experiências propostas para a próxima geração são colaborações bem vastas, e por uma boa razão. As grandes perguntas que agora formulamos — qual é a natureza da matéria escura? Por que existe uma assimetria entre matéria e antimatéria no Universo? Existirá uma teoria de grande unificação que consiga descrever tudo na física? — não podem ser respondidas por um indivíduo, nem por uma pequena equipa trabalhando em isolamento. As perguntas tornaram-se demasiado grandes para isso. Em consequência, as experiências de que precisamos para lhes respondermos serão por certo grandes e também complexas.

A professora Daniela Bortoletto, diretora da Física de Partículas em Oxford, resume assim o estado da disciplina: «O Modelo Padrão das partículas explica apenas cerca de 5 por cento do teor de matéria e energia do Universo. Os restantes 95 por cento são compostos por aquilo que não conhecemos: matéria escura e energia escura. Como não dispomos de qualquer prova experimental que nos indique a origem da componente escura, creio que a melhor maneira de se avançar passa por estudos precisos do bóson de Higgs.»

Para tentarem descobrir a natureza do bóson de Higgs, Bortoletto e os seus colegas procuram perceber se o bóson de Higgs viola as leis da física que conhecemos. Talvez existam muitas partículas de Higgs diferentes que se comportem de maneiras estranhas. Se assim for, ou se o Higgs decair ou interagir de formas inesperadas, teremos encontrado um defeito, ou uma lacuna no conhecimento, no cerne do Modelo Padrão.

Os físicos já não perguntam «A matéria escura existe?» (pensamos que sim), mas «Qual é a natureza da matéria escura?» Ainda que para se avançar sejam necessárias teorias e experiências, a matéria escura levanta um desafio experimental singular. Não faltam teorias que descrevem a matéria escura, porém a única coisa que sabemos ao certo é que não interage. Podemos detetar a matéria escura quando observamos o seu fracasso em interagir sob a forma de «energia ausente», quer no LHC, quer em colisionadores futuros. Esta ideia recorda-nos a maneira como o mistério do decaimento beta nos conduziu aos neutrinos. Porém, enquanto para os neutrinos havia uma teoria que ajudou os experimentalistas a encontrá-los, o mesmo não acontece com a matéria escura: somos conduzidos pelos dados experimentais. Com 95 por cento da massa do Universo ainda por detetar, o desafio não podia ser maior.

A investigação destas questões exige uma «fábrica de Higgs» — um novo colisionador de partículas que consiga produzir vários milhares de bósons de Higgs —, juntamente com a invenção de uma nova geração de detetores de partículas de grande precisão, que é o aspeto que concentra os esforços de Bortoletto. O LHC não pode

proporcionar todas as respostas em relação à verdadeira natureza do Higgs. Por isso, quase todos os que trabalham neste domínio concordam que uma fábrica de Higgs tem de ser um colisionador de elétrons-positrões de alta energia, em que a energia de colisão se deve aproximar de 1 TeV. O que não reúne consenso é a forma da máquina — linear ou circular — ou a tecnologia em que se baseia. É provável que apenas possa existir um colisionador de elétrons-positrões transformado em fábrica de Higgs, por isso é imperativo escolher um deles.

O International Linear Collider (ILC), com 30 quilómetros de extensão, está pronto para ser construído no Japão, se os governos derem o seu aval — uma fase «pré-laboratório» foi aprovada em 2021. Outra opção é o Colisionador Linear Compacto, no qual o CERN trabalha há 20 anos¹. Entre os dois projetos há já uma colaboração no âmbito da Linear Collider Collaboration, agora dirigida por Lyn Evans, ex-gestor do projeto do LHC. Em alternativa a próxima grande máquina poderá ser um acelerador circular com cem quilómetros de circunferência, em estudo no CERN (Future Circular Collider, FCC) e na China (Circular Electron Positron Collider, CEPC), em que, além das colisões elétrons-positrões de energia elevada, os feixes de alta energia produzirão, ao longo do dia e todos os dias, 50 MW de radiação do sincrotrão indesejada — como vimos no Capítulo 7 —, enquanto circulam no anel. Precisamos desde já de desenhar e preparar estes colisionadores, para que um deles possa estar pronto quando o LHC concluir a sua operação, por volta de 2036.

O diretor do John Adams Institute for Accelerator Science, o professor Philip Burrows, crê que a versão linear, e em particular o ILC, é o *design* mais conseguido e aquele que com maior probabilidade nos dará mais depressa uma fábrica de Higgs. Ao contrário do que acontece com o *design* circular, o colisionador linear permite aperfeiçoamentos futuros, bastando prolongar o seu comprimento. Desse modo, aumenta a energia ao seu alcance, o que pode ser útil se começarem a aparecer partículas de matéria escura, partículas supersimétricas — de uma teoria que prevê que todas as partículas de matéria têm uma parceira «supersimétrica», mais pesada — ou outras partículas alheias ao Modelo Padrão. Entretanto, Bortoletto faz notar que a opção do colisionador linear não pode ser adaptada a um colisionador próton-próton, ao passo que investir num túnel circular permite a sua reutilização, tal como sucedeu com o LHC, que aproveitou o túnel do LEP. Em última análise, a decisão depende tanto da política, dos custos e das parcerias quanto da física. Seja qual for a escolha, Bortoletto e Burrows (ou, por essa altura, talvez os seus alunos!) lá estarão, prontos para trabalhar.

A um prazo mais longo, a obtenção de energias cada vez mais elevadas só é possível se o tamanho dos aceleradores de partículas continuar a crescer, mesmo considerando os avanços nos magnetos supercondutores e na tecnologia de radiofrequência. Enquanto alguns investigadores propõem a montagem de experiências na Lua ou no espaço, um progresso no domínio da física do plasma pode permitir-nos reduzir os aceleradores para um tamanho pelo menos mil vezes menor. Os materiais de que são feitas as cavidades de radiofrequência dos aceleradores de partículas — cobre e materiais

supercondutores — só conseguem suportar o campo elétrico até determinada intensidade, após a qual produzem faíscas ou se avariam. Este facto impõe um limite físico ao que podemos exigir às partículas, o qual, por sua vez, determina o comprimento total do acelerador. Ora, as equipas dos meus colegas de Oxford e do Imperial College London, a par de muitos outros em todo o mundo, procuram obter *aceleradores de plasma*.

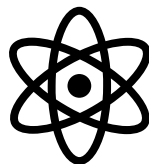
A ideia consiste em usar um laser muito potente — ou até outro feixe de partículas² — para gerar plasma, um estado da matéria em que os átomos estão já ionizados. Um plasma consegue suportar campos elétricos enormes, em que os eletrões ou outras partículas podem «surfear» e ganhar energia. Este fenómeno foi demonstrado em laboratório e conseguiu acelerar partículas com êxito, mas ainda não está pronto para ser utilizado numa experiência da física de partículas. A obtenção de feixes de qualidade elevada, e o respetivo controlo, vai demorar mais alguns anos.

Embora ainda seja prematuro pensar em aceleradores de plasma, trata-se de um projeto empolgante. Digo sempre aos meus alunos que, assim que os aceleradores de plasma estiverem suficientemente desenvolvidos, não me importo de abandonar o navio para me dedicar ao *design* de um deles. De momento, creio que serão utilizados em associação com as tecnologias mais convencionais, em vez de as substituírem, e já comecei a pensar em eventuais formas de os combinarmos.

No entanto, as descobertas não ficam suspensas enquanto inventamos os colisionadores do futuro. O LHC continua a ser

aperfeiçoado para fornecer cada vez mais dados. Já sabemos que o Modelo Padrão tem falhas intrínsecas: não contempla a gravidade. Não consegue explicar o porquê de haver mais matéria do que antimatéria no Universo. Não inclui a matéria escura nem a energia escura. Não explica também o porquê de os neutrinos terem massa. A teoria *tem* de ser mais completa.

Seria ingênuo pensar que as respostas a estas perguntas resultarão necessariamente dos colisionadores de partículas. Outro domínio da física poderá produzir resultados que nos proporcionem o próximo grande avanço. Experiências mais pequenas, centradas em questões mais específicas, poderão chegar lá primeiro, e os seus resultados serão aproveitados pelos colisionadores. Um exemplo é a procura da matéria escura com detetores que estão a ser construídos em vários locais do mundo. Na Austrália, a primeira experiência sobre matéria escura do hemisfério sul está neste momento em montagem no Stawell Underground Physics Laboratory (SUPL) situado um quilómetro abaixo do solo, numa antiga mina de ouro.



Os meus colegas da International Particle Accelerator Conference conheciam bem todos estes projetos. Foi por isso que resolvi falar sobre a maneira como o nosso domínio fez aumentar não apenas o nosso conhecimento da física de partículas, mas conduziu também a mudanças sociais. As 12 experiências que vimos neste livro

transmitem-nos lições sobre os modos de proceder. As histórias de Brookhaven, do Fermilab e do CERN, e a demanda pelo conhecimento da realidade invisível da matéria e das forças, proporcionam-nos um *insight* sobre a forma de lidar com as incógnitas que nos esperam no presente e no futuro.

Quando perguntei aos meus colegas o que poderia a sociedade aprender com a viagem da física de partículas, esperava um conjunto de respostas diversas. Mas estava enganada, pois todos responderam o mesmo: podemos aprender a colaborar. Empreendimentos complexos como a física de partículas levam-nos a inovar, a tentar — como é próprio dos humanos — criar ordem, compreender, reunir informação e buscar a sabedoria. Em última instância, tudo se resume à nossa compulsão para avançar continuamente em direção ao desconhecido. Lutamos por mais, por melhor, e, ainda que os nossos recursos físicos possam ser restritos, a capacidade humana para gerar novas ideias é quase ilimitada. É através da colaboração e de novas formas de trabalhar que podemos concretizar esta capacidade e estimular a criatividade de um modo inédito.

Quando penso no que constitui o nosso mundo «moderno», tenho uma imagem em mente. Penso no enorme progresso que a sociedade conheceu em praticamente todas as frentes. As novas invenções conduziram a um aumento da produtividade e tornaram os bens menos escassos. O crescimento levou a uma economia de soma positiva. Há mais pessoas na Terra, que vivem melhor do que antes. Mais pessoas recebem instrução e são alfabetizadas. Em 1930, apenas 30 por cento das pessoas com mais de 15 anos

sabiam ler e escrever; hoje, o número é 86 por cento a nível mundial. Desde 1990, uma média de 130 mil pessoas por dia saem da pobreza extrema, mesmo com o aumento incessante da população. Porém, apesar do enorme progresso do último século, mais de nove em cada dez pessoas de hoje não creem que o mundo esteja a ficar melhor³. Podem ter razão. Enfrentamos desafios inéditos: mudanças climáticas, biodiversidade ameaçada, escassez de água, necessidades energéticas, populações envelhecidas e, como é evidente, pandemias e doenças infecciosas. Com ameaças constantes e tão propaladas à nossa existência, nenhum dos média nos vai recordar diariamente de uma tendência de longa data, pela qual a vida dos humanos se foi tornando efetivamente melhor e mais extensa, porque tomamos este facto como certo e o subestimamos. O que é estranho, porque não há garantia de que viveremos mais e melhor do que os nossos antepassados.

Sou otimista. Creio que ultrapassaremos os desafios que se nos deparam enquanto espécie com soluções inovadoras, razão pela qual penso ser crucial que compreendamos o processo que cria conhecimentos e ideias. Se um tema tão esotérico como a física de partículas modificou o nosso mundo de maneira tão profunda, existem por certo muitas outras áreas de investigação — não apenas em ciência, mas em todas as áreas do saber — a que também não demos atenção. Esta investigação guiada pela curiosidade é exatamente o tipo de demanda que pode transformar o nosso futuro de maneiras ainda inimagináveis. Mais do que nunca, este é o momento de cultivarmos a capacidade de enfrentar o desconhecido e de trabalhar em conjunto para o bem de toda a humanidade.

Olhando em retrospectiva para as 12 experiências, verifico que, além de aprender a colaborar, existem três ingredientes fulcrais de que precisamos para fazer face aos desafios do futuro: a capacidade de fazer boas perguntas; uma cultura de curiosidade; e a liberdade para perseverar. Precisamos apenas de fazer a pergunta certa, no contexto certo e no instante certo. O segredo é fazer perguntas que nos deixem abertos à ideia de que podemos estar enganados e nos levem a pôr de lado os nossos preconceitos. Por muito que uma ideia nos satisfaça, as nossas perguntas devem ser formuladas de tal maneira que seja possível mudarmos de opinião. J.J. Thomson não perguntou «O eletrão existe?» para depois concluir que não existia, quando alguns resultados das suas experiências iniciais se mostraram inconsistentes com a sua hipótese. Uma boa pergunta deve penetrar no cerne do desconhecido. As boas perguntas, tais como «Qual é a verdadeira natureza dos raios catódicos?», suscitam muitas outras, mais pequenas, tais como «Os raios catódicos são encurvados por um campo elétrico?» Formular estas perguntas mais pequenas é essencial. Na realidade, foram elas que levaram Thomson a descobrir as inconsistências que lhe revelaram o caminho para seguir em frente. Só depois de responder a todas as perguntas pequenas é que obtive a resposta à pergunta grande. O resultado foi a descoberta do eletrão.

É também importante notar que não temos obrigatoriamente de responder a todas as perguntas que formulamos. As respostas a algumas delas poderão demorar séculos. Porém, as boas perguntas são motivadores poderosos: apesar de todas as proezas assombrosas que alcançámos ao procurar compreender a natureza

da matéria e das forças, não são as respostas que nos fazem continuar. São as perguntas.

O ambiente em que formulamos estas perguntas não é menos importante. Vimos o modo como a curiosidade pode conduzir a conquistas notáveis, mas com que se parece uma cultura que estimula a curiosidade? Assemelha-se às sessões de *brainstorming* organizadas por um amigo meu: nelas, é permitido contribuir para uma ideia, mas é proibido criticar. Recorda-me aquela vez em que um dos meus alunos de doutoramento se inspirou num vídeo do YouTube sobre o *design* de montanhas-russas com a ajuda da inteligência artificial para fazer o mesmo com os aceleradores de partículas e teve todo o meu apoio. Quando nascem, as ideias precisam de ser alimentadas. Wilson não tentou inventar um detetor de partículas, Röntgen não tentou inventar uma tecnologia médica e a missão do CERN não era inventar a World Wide Web. As suas ideias só desabrocharam porque eles trabalhavam numa cultura que incentivava a curiosidade humana.

Promover esta cultura é *difícil*. Com metas, objetivos, planos, acionistas, relatórios e prazos, quem tem tempo para isso? Porém, vale a pena. O gesto de procurar conhecimento revela paisagens mais espetaculares quando não temos um destino em vista.

Por último, precisamos de conceder a nós próprios — ou seja, a indivíduos, equipas, sociedade, humanidade — a liberdade de perseverar nos nossos empreendimentos. Não nos foi possível construir gradualmente o Modelo Padrão da física de partículas sem um grande número de falsas partidas, muita confusão e uma

acumulação morosa e frustrante de conhecimento ao longo de décadas. Fazer uma coisa pela primeira vez é incrivelmente difícil. Mas fazer uma coisa pela primeira vez que apenas um punhado de outros seres humanos compreende é ainda mais difícil. Quando afirmo que precisamos de cultivar a liberdade de perseverar, refiro-me mais à força de vontade do que à teimosia. Refiro-me a coisas tangíveis, como tempo, espaço e recursos.

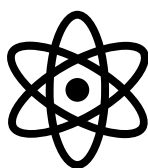
Precisamos de promover ambientes em que as pessoas podem satisfazer a sua curiosidade, correr riscos intelectuais e progredir. Vivemos um momento de grande oportunidade. Se conseguirmos aprender a valorizar a natureza criativa da ciência, a acarinhar a curiosidade e a promover quer a profundidade intelectual, quer a abertura de espírito dentro de nós próprios e dos jovens à nossa volta, não tenho dúvidas de que conseguiremos enfrentar o que nos espera. Porém, há um aspeto crítico em que não estamos a fazê-lo.

Ao longo deste livro vimos exemplos sucessivos das formas pelas quais o conhecimento de algumas das partes mais fundamentais da física conduziu a resultados tangíveis. Sabendo isto, pensaríamos que seria fácil tomar a decisão de financiar uma investigação com base no chamado potencial de impacto. Muitos governos escolheram fazê-lo, pelo menos em parte, mas amiúde só se interessam por resultados rápidos. Num domínio como o da física de partículas, com tamanha influência na sociedade, a qual se exerce de formas que não puderam ser previstas e ao longo de escalas temporais que são incompreensíveis para numerosos políticos, que podemos dizer acerca de um pensamento tão imediatista?

Se o foco em resultados rápidos tivesse sido o modelo, os laboratórios de Rutherford nunca teriam existido e a proposta de Robert Wilson para a construção do Tevatrão nunca teria passado do Congresso. O próprio Peter Higgs disse certa vez que, no atual sistema acadêmico, ele nem sequer teria um emprego⁴, visto não ter conseguido produzir artigos em número suficiente. No sistema de hoje teria sido duplamente excluído, já que não podia reivindicar um impacto a curto prazo no mundo real. Atualmente, esperamos hiperprodutividade, responsabilização e boa relação custo-benefício. Embora pareça grosseiro falar de curiosidade e de dinheiro quase ao mesmo nível, se quisermos produzir grandes inovações no futuro precisaremos de dinheiro.

Criar a liberdade para perseverar exige que reconheçamos o papel que a pesquisa guiada pela curiosidade desempenha na nossa sociedade. Trata-se de uma mudança profunda na maneira como encaramos o valor da ciência. Na verdade, eu estenderia esse argumento à forma como pensamos no valor da investigação em geral. Os humanos são — como afirma Hannah Arendt — seres que fazem perguntas. Como vimos repetidas vezes, a pessoa que realiza uma descoberta não é, muito provavelmente, a mais indicada a quem perguntar para que serve a sua descoberta, ou o que poderá advir da mesma. Aceitemos que é preciso apoiar as perguntas e a curiosidade, porque contribuem para o nosso desenvolvimento enquanto humanos, e não porque podem melhorar a situação económica do nosso país ou aumentar em 0,5 por cento a eficiência dos painéis solares — embora também o possam fazer. Não subestimemos potenciais descobertas por não sermos capazes de apreciar o seu valor antes de terem acontecido. Além disso,

precisamos de tornar esta atitude coletiva. Nada há de mais poderoso do que seres humanos unidos num empreendimento coletivo. O conjunto de experiências da última parte desta história poderia nunca ter acontecido se não existissem indivíduos que correram riscos e trabalharam em equipa ao longo de décadas. Imagina quão diferentes as nossas vidas seriam se as gerações anteriores não tivessem seguido este caminho?



Quando me ergui para falar naquele dia em Melbourne, toquei em muitos destes pontos. Para ser honesta, não me recordo de sair do palco, nem do que os oradores seguintes disseram. Quando chegou a pausa para o café, encaminhei-me para o balcão, mas não conseguia avançar mais de um metro de cada vez, pois era interpelada por pessoas que comentavam, com entusiasmo, algum aspeto da minha intervenção. Conhecia alguns deles, mas não a maioria. O presidente do comité de oradores veio ter comigo ao fim do dia e comentou animadamente as numerosas conversas que a minha palestra tinha suscitado na nossa comunidade.

Ao longo de anos de investigação, eu aprendera algo muito maior do que apenas física. Aprendera a seguir a minha curiosidade e a avançar para o desconhecido, a fazer boas perguntas e a persistir, mau grado as numerosas barreiras que se tinham levantado no meu caminho. Quando transmiti essa aprendizagem à minha comunidade, descobri que havia outras pessoas do meu ramo que

estavam comigo e que me aplaudiam. Era algo que eu nem sequer tinha percebido que me faltava: um sentido de pertença.

Exausta pela conferência, resolvi deixar a multidão na tarde da última sexta-feira e dirigi-me ao meu departamento. O silêncio da cave deu-me as boas-vindas. Os meus passos ressoaram no corredor de betão, ao passar por um mural onde se representava o *Big Bang* e junto a várias portas de madeira. Encostei o meu novo cartão de identificação da universidade ao leitor, empurrei a porta e entrei.

Deixei para trás as secretárias e caixas de cartão espalhadas, e fiquei junto à entrada do meu novo laboratório. As paredes são feitas de blocos de betão suficientemente grossos para proteger o mundo exterior dos feixes de partículas que costumavam ser — e serão de novo — criados neste lugar. Tenho grandes expectativas para este laboratório. Imagino o espaço de novo: paredes brancas, luzes de aviso a piscar, sinais de perigo amarelos, cabos negros e estruturas aceleradoras em cobre. Vejo estudantes, pessoal e colaboradores — a minha tribo — ocupados a trabalhar.

As perguntas que agora faço envolvem a física dos aceleradores de partículas, em que as necessidades paralelas dos físicos, por um lado, e da medicina e da indústria, por outro, me fazem regressar à mesa de trabalho, ao ponto em que física e invenção colidem. A minha mente está repleta de perguntas sobre a física dos feixes de partículas e sobre a sua dança rodopiante, não linear, de oscilações e interações eletromagnéticas. Posteriormente, chegaremos às perguntas técnicas, sobre custos e implementação, mas de

momento a minha curiosidade parte das interações do minúsculo, invisível mundo das partículas e liga-se a ideias que poderão melhorar as nossas vidas, ainda que num futuro bem distante. Este é o meu pequeno nicho no seio de um vasto espectro da física, da ciência, da viagem humana da pesquisa e do saber.

As experiências concebidas para compreender a matéria e as forças remontam a centenas de anos e o nosso conhecimento atual assenta em milhares, ou talvez dezenas de milhares, de experiências. Nesta viagem seguimos apenas um punhado delas. Estas experiências modelaram a forma como pensamos na natureza do Universo, criaram muitas das tecnologias que usamos no quotidiano e cocriaram o nosso mundo moderno e interconetado.

Aqui, no meu laboratório, estou à beira de uma conversa com o desconhecido, grata por dispor do tempo e do espaço em que essa conversa pode acontecer. Sei que neste laboratório o fracasso e a frustração estão sentados ao lado do êxito. Será necessária uma explosão de energia, curiosidade e criatividade para transformar este espaço de uma armação de blocos de betão numa fonte de novos saberes, mas também não quereria aplicar a minha energia em mais nenhum lado.

Não posso prometer mudar o mundo, mas pelo menos sabemos como proceder. Uma experiência de cada vez.

¹ Este projeto baseia-se na tecnologia de aceleração «banda-X» de alta frequência: um dos seus primeiros sistemas de ensaio está a ser instalado — quando escrevo — no meu novo laboratório na Universidade de Melbourne e fará crescer o programa de aceleradores com aplicações clínicas e industriais, além de contribuir para o desenvolvimento de futuros colisionadores lineares.

² No CERN, Edda Gschwendtner coordena a experiência AWAKE (Advanced Wakefield Experiment), em que obtém feixes de prótons com 400 GeV que usa para criar um canal de plasma para acelerar elétrons.

³ Este inquérito foi conduzido em 2015, antes da pandemia de COVID, da presidência de Trump e do Brexit. Disponível *online* em <https://ourworldindata.org/a-history-of-global-living-conditions-in-5-charts>.

⁴ Disponível *online* em <https://www.theguardian.com/science/2013/dec/06/peter-higgs-boson-academic-system>.

Agradecimentos

Embara o meu nome apareça na capa, este livro — tal como as experiências que descreve — apenas foi possível graças a muitas pessoas. Os meus sinceros agradecimentos vão para:

Os numerosos colegas, investigadores e especialistas que acederam a ser entrevistados, me mostraram os laboratórios ou me ajudaram nesta história: Rob Appleby, Elisabetta Barberio, Alan Barr, Daniella Bortoletto, Phillip Burrows, Harry Cliff, Frank Close, Sonia Contera, Les Gamel, Rob George, David Jamieson, Sneha Malde, Steve Myers, John Patterson, Larry Pinsky, Harry Quiney, Sergey Romanov, Werner Ruhm, Martin Seviour, Marco Schippers, Ian Shipsey, Geoff Taylor e Rachel Webster. Uma menção especial para Ray Volkas, físico teórico e meu apoiante, por estar sempre disponível para me ajudar. No entanto, deixo bem claro que todos os erros técnicos são da minha inteira responsabilidade;

Os numerosos mentores que permitiram que a minha viagem pela física seja uma realidade: Roger Rassool, que me ajudou a acreditar que podia prosseguir estudos neste ramo; e Ken Peach, o meu orientador de doutoramento, por sempre defender a minha comunicação de ciência a par da minha investigação, e por continuamente ver em mim um pouco mais do que eu vejo;

Chris Wellbelove, o meu agente, pela criatividade, persistência e paciência. Não podia escolher um guia mais perspicaz no caminho para me tornar escritora;

Os meus maravilhosos editores, Alexis e Edward, e as equipas da Bloomsbury e da Knopf. A vossa visão deste livro fez-me crescer em todos os aspetos. Obrigada por me ajudarem a contar esta história;

O fabuloso Oxford Writing Circle, por criar um espaço onde pude partilhar — de mãos trémulas — as primeiríssimas palavras desta história, e o London Writers Salon, pelas muito numerosas horas «sozinha, mas acompanhada» no nosso sagrado espaço virtual de escrita. Sois o meu não-muito-secreto truque de produtividade;

Os meus múltiplos colegas, colaboradores, pessoal administrativo e alunos, por serem tão compreensivos em relação às minhas repetidas ausências durante longos períodos para

escrever este livro. Um agradecimento especial aos meus brilhantes estudantes de investigação, que são uma fonte de inspiração permanente. Mal posso esperar para regressar ao laboratório ou, como diria a Lucy: «Vamos fisicar!»;

Alex de H., Ian R., Jan M. e Sarah R., pela vossa amizade firme ao longo deste processo. Kippy e Ross, meus pais, por darem uma importância tão radical à educação. E a minha avó, Enid, que aos cem anos de idade viveu durante grande parte do período da história. Jason e Grace, por acreditarem em mim e me apoiarem. Por último, a minha irmã gémea, Megan. Não há palavras que expressem a minha gratidão: verdadeiramente, és e serás sempre a mulher mais incrível da minha vida.