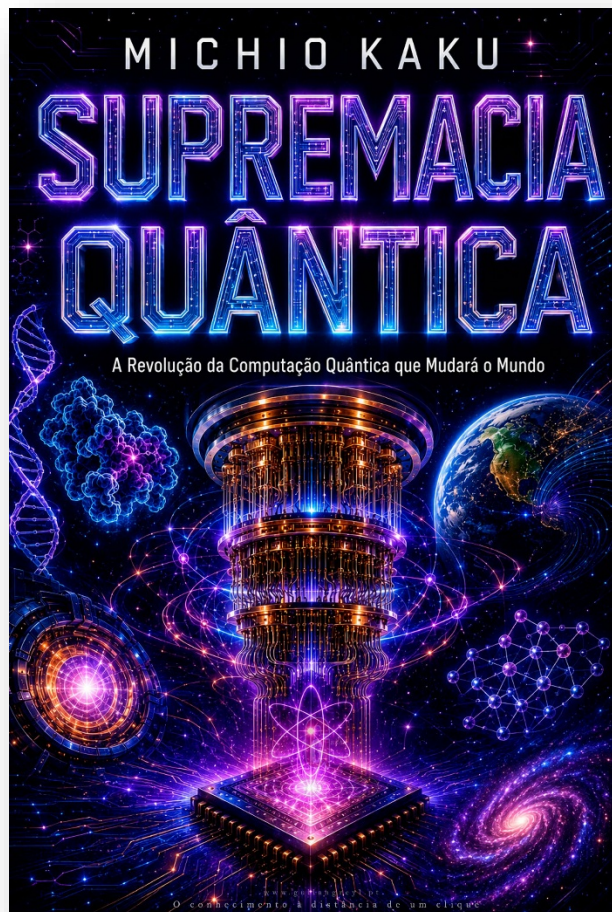


SUPREMACIA QUÂNTICA

A Revolução da Computação Quântica que Mudará o Mundo



Autor: Michio Kaku

Edição e Preparação Digital: Gullan Greyl

Edição original: Quantum Supremacy, 2023.

Edição portuguesa concluída em 30-11-2023



Livroteca Gullan Greyl

Sinopse

Em Supremacia Quântica, Michio Kaku leva-nos até ao limiar de uma nova era: o momento em que o velho império do silício começa a ceder perante máquinas capazes de usar os próprios átomos como instrumentos de cálculo. O computador quântico não surge aqui como simples evolução do computador digital, mas como uma rutura profunda — uma tecnologia capaz de explorar sobreposição, entrelaçamento e probabilidades quânticas para resolver problemas que os supercomputadores clássicos jamais conseguiriam enfrentar em tempo útil.

A viagem começa no fim da Lei de Moore e na crise da computação tradicional, passa por Turing, Feynman, Schrödinger, Everett e os muitos mundos, e avança para a corrida tecnológica entre empresas, governos e laboratórios que procuram dominar o próximo grande salto civilizacional. No centro está uma pergunta decisiva: quem controlará a computação quântica controlará também uma parte essencial do futuro?

Mas Kaku não fica pela máquina. Mostra como esta nova potência poderá transformar a medicina, decifrar proteínas, acelerar a descoberta de fármacos, combater doenças incuráveis, criar melhores baterias, revolucionar a agricultura, simular o clima, aproximar a fusão nuclear e abrir novas janelas sobre o próprio Universo. A computação quântica aparece, assim, como uma chave capaz de entrar nas camadas mais íntimas da matéria, da vida e da energia.

Supremacia Quântica é a história de uma fronteira em ignição: a passagem do cálculo binário para uma inteligência tecnológica capaz de pensar com as regras profundas da Natureza. Um livro sobre computadores, sim — mas sobretudo sobre a possibilidade de a humanidade aprender finalmente a simular o real a partir do seu nível mais fundamental.

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

PARTE UM	1
A Ascensão dos Computadores Quânticos	1
CAPÍTULO 1.....	2
Fim da Era do Silício.....	2
1. Supremacia Quântica.....	9
2. Fim da Lei de Moore	12
3. Por Que São Tão Potentes?	15
4. Travões aos Computadores Quânticos.....	17
5. Revolucionar a Economia	19
5.1 Motores de Busca	19
5.2 Otimização	20
5.3 Simulação	20
5.4 Fusão entre IA e Computadores Quânticos	22
6. Outras Aplicações dos Computadores Quânticos	22
7. Alimentar o Planeta	25
8. O Nascimento da Medicina Quântica	27
CAPÍTULO 2.....	33
Fim da Era Digital.....	33
1. Computadores Quânticos: A Simulação Definitiva.....	36
2. Babbage e a Máquina Diferencial.....	37
3. Estará a Matemática Completa?	41
4. Alan Turing: Pioneiro da Ciência Computacional	43
5. Os Computadores e a Guerra	48
6. Turing e a Criação da IA	51
CAPÍTULO 3.....	56
Ascensão do Quantum	56
1. Nascimento da Teoria Quântica	59
2. Nascimento da Equação de Onda.....	64
3. O Átomo Quântico	67
4. Ondas de Probabilidade.....	69
5. O Gato de Schrödinger.....	73
6. Micromundo vs. Macromundo	76
7. Entrelaçamento	79

8. A Tragédia da Guerra	83
CAPÍTULO 4.....	87
Alvorada dos Computadores Quânticos.....	87
1. O Nascimento do Transístor	89
2. Génio em Ação.....	92
3. O Nascimento da Nanotecnologia	93
4. O Integral de Caminho de Feynman	98
5. Soma Quântica sobre Caminhos.....	101
6. Máquina de Turing Quântica	104
7. Universos Paralelos.....	106
8. Muitos Mundos.....	109
9. Os Muitos Mundos de Everett.....	111
10. Renascimento dos Universos Paralelos	114
11. Universos Paralelos na Nossa Sala de Estar.....	115
12. Sumário da Teoria Quântica	119
13. A Descoberta de Shor	121
14. A Derrota do Algoritmo de Shor	125
15. Internet por Laser	126
CAPÍTULO 5.....	129
Começa a Corrida	129
1 - Computador Quântico Supercondutor.....	131
2 - Computador Quântico de Iões Presos.....	134
3 - Computadores Quânticos Fotónicos	136
4 - Computadores Fotónicos de Silício	139
5 - Computadores Quânticos Topológicos.....	141
6 - Computadores Quânticos D-Wave	143
PARTE DOIS	145
Computadores Quânticos e a Sociedade	145
CAPÍTULO 6.....	146
A Origem da Vida.....	146
1. Dois Avanços	147
2. O Que É a Vida?	150
3. Física e Biotecnologia.....	153
4. Três Fases na Biotecnologia.....	158
4.1 Fase Um: Cartografar o Genoma	158

4.2 Fase Dois: Determinar a Função dos Genes	158
4.3 Fase Três: Modificar e Melhorar o Genoma	158
5. O Paradoxo da Vida	159
6. Química Computacional e Biologia Quântica	162
CAPÍTULO 7.....	167
Um Mundo Mais Verde	167
1. A Mecânica Quântica da Fotossíntese.....	171
2. Fotossíntese Artificial	173
3. Folha Artificial	175
CAPÍTULO 8.....	181
Alimentar o Planeta.....	181
1. Excesso Populacional e Fome	183
2. Ciência para a Guerra e para a Paz	186
3. ATP: A Bateria da Natureza.....	188
4. Catálise: O Atalho da Natureza.....	190
CAPÍTULO 9.....	197
Dar Energia ao Mundo.....	197
1. Revolução Solar?.....	199
2. História da Bateria	200
3. A Revolução do Lítio	202
4. Para Além das Baterias de Iões de Lítio.....	204
5. A Indústria Automóvel e os Computadores Quânticos	209
PARTE TRÊS	212
Medicina Quântica	212
CAPÍTULO 10.....	213
Saúde Quântica.....	213
1. O Surgimento de Germes Resistentes aos Medicamentos	216
2. Como Funcionam os Antibióticos	217
3. O Papel da Medicina Quântica	218
4. Vírus Assassinos	220
5. A Pandemia de Covid	222
6. Sistema de Aviso Antecipado.....	224
7. Decifrar o Sistema Imunitário	227
8. O Vírus Ómicron.....	228
9. O Futuro	230

CAPÍTULO 11.....	231
Edição Genética e a Cura do Cancro.....	231
1. Biópsias Líquidas	234
2. Farejar Cancros	238
3. Imunoterapia	242
4. O Paradoxo do Sistema Imunitário.....	244
5. CRISPR	247
6. Terapia Genética CRISPR.....	251
6.1 Cancro	252
6.2 Anemia Falciforme	252
6.3 Sida.....	252
6.4 Fibrose Cística	253
6.5 Doença de Huntington	253
7. O Paradoxo de Peto	254
CAPÍTULO 12.....	258
IA e Computadores Quânticos.....	258
1. Máquinas de Aprendizagem Automática	263
2. Problema do Senso Comum	267
3. Enovelamento de Proteínas.....	269
4. O Nascimento da Biologia Computacional	272
4.1 Fase Um: Cartografar as Proteínas Dobradas.....	277
4.2 Fase Dois: Determinar a Função das Proteínas	278
4.3 Fase Três: Criar Novas Proteínas e Medicamentos.....	278
5. Priões e Doenças Incuráveis	280
6. Versões «Boa» e «Má» da Proteína Amiloide	284
7. ELA	286
8. Doença de Parkinson	288
CAPÍTULO 13.....	291
Imortalidade	291
1. Segunda Lei da Termodinâmica.....	293
2. O Que É o Envelhecimento?	294
3. Prever Quanto Tempo Podemos Viver	296
4. Reiniciar o Relógio Biológico.....	298
5. Restrição Calórica	300
6. A Chave para o Envelhecimento: Reparação do ADN	304

7. Reprogramar as Células para a Juventude	306
8. A Loja do Corpo Humano.....	311
9. Engenharia de Tecidos.....	312
10. O Papel dos Computadores Quânticos.....	315
11. Imortalidade Digital	318
PARTE QUATRO	323
Modelar o Mundo e o Universo.....	323
CAPÍTULO 14.....	324
Aquecimento Global.....	324
1. CO ₂ e Aquecimento Global	328
2. Previsões para o Futuro	330
3. O Metano como Gás de Estufa	332
4. Implicações Militares	333
5. Vórtice Polar	335
6. O Que Fazer?.....	336
6.1 Sequestro de carbono	337
6.2 Modificação Meteorológica	337
6.3 Eflorescência Algal	338
6.4 Nuvens de Chuva.....	338
6.5 Plantar Árvores.....	339
6.6 Boletim Meteorológico Virtual	339
7. Computadores Quânticos e Simulação Meteorológica	340
8. Incertezas.....	341
CAPÍTULO 15.....	345
Engarrafar o Sol	345
1. Por Que Brilha o Sol?	346
2. Vantagens da Fusão	347
3. Construir Um Reator de Fusão	350
4. Por quê a Demora?	352
5. ITER	353
6. Designs Concorrentes	357
7. Fusão a Laser.....	360
8. Problemas da Fusão.....	363
9. Fusão Quântica	364
CAPÍTULO 16.....	368

Simular o Universo	368
1. Asteroides Assassinos	371
2. Exoplanetas.....	375
3. ET no Espaço?	377
4. Evolução Estelar.....	380
5. Evento Carrington	382
6. Explosões de Raios Gama	386
7. Buracos Negros	389
8. Matéria Escura	391
9. Modelo Padrão de Partículas.....	394
10. Para Além do Modelo Padrão.....	397
11. Teoria das Cordas	398
12. Os Computadores Quânticos Podem Ter a Chave.....	401
CAPÍTULO 17.....	404
Um Dia No Ano 2050	404
1. Janeiro de 2050, 6 da manhã.....	404
Epílogo.....	419
1. Enigmas Quânticos	419
1.1 Deus Teve Realmente Uma Escolha na Criação do Universo?	419
1.2 O Universo É Uma Simulação?.....	419
1.3 Os Computadores Quânticos Computam em Universos Paralelos?	420
1.4 Será O Universo Um Computador Quântico?.....	420
2. Deus Teve Escolha?	420
3. O Universo Como Simulação	424
4. Universos Paralelos	427
5. Será o Universo um Computador Quântico?.....	432
Agradecimentos	437

SUPREMACIA QUÂNTICA

*A Revolução da Computação Quântica
que Mudará o Mundo*

Michio Kaku

PARTE UM

A Ascensão dos Computadores Quânticos

CAPÍTULO 1

Fim da Era do Silício

Aproxima-se uma revolução.

Em 2019 e 2020, o mundo da ciência foi abalado por duas bombas. Dois grupos anunciaram ter alcançado a supremacia quântica, o lendário ponto no qual um tipo de computador radicalmente novo, chamado computador quântico, conseguiria superar de forma decisiva um supercomputador digital comum em tarefas específicas. É o princípio de uma convulsão capaz de alterar o panorama da computação e virar de pernas para o ar todos os aspetos da nossa vida quotidiana.

Primeiro, a Google revelou que o seu computador quântico, o Sycamore, conseguia resolver em 200 segundos um problema matemático que demoraria 10.000 anos a resolver no supercomputador mais rápido do mundo. Segundo a publicação Technology Review do MIT, a Google considerou que tal era uma conquista extraordinária. Compararam-na ao lançamento do Sputnik ou ao primeiro voo dos irmãos Wright. Era «o limiar de uma nova Era de máquinas que fariam com que o computador mais potente dos nossos dias parecesse um ábaco».¹

Depois, o Instituto de Inovação Quântica na Academia Chinesa de Ciências foi um passo mais além. Alegaram que o seu computador quântico era cem bilhões de vezes mais veloz do que um supercomputador comum.

O vice-presidente da IBM, Bob Sutor, ao comentar a ascensão meteórica dos computadores quânticos, afirmou sem rodeios: «Creio que será a tecnologia de computação mais importante deste século.»²

Os computadores quânticos foram já denominados de «o Computador Final», um salto tecnológico decisivo com implicações profundas para todo o mundo: Ao invés de computarem com transístores minúsculos, computam com o objeto mais ínfimo possível, os próprios átomos, e assim conseguem facilmente superar a potência do nosso maior supercomputador. Os computadores quânticos podem introduzir uma Era totalmente nova na economia, na sociedade e na nossa forma de vida.

Porém, os computadores quânticos são mais do que apenas outro computador potente. São um novo tipo de computador capaz de atacar problemas que os computadores digitais nunca conseguiriam resolver, nem mesmo com uma quantidade infinita de tempo. Por exemplo, os computadores digitais nunca poderão calcular com exatidão como os átomos se combinam para criar reações químicas cruciais, especialmente aquelas reações que tornam possível a vida. Os computadores digitais só podem computar em fita digital, que consiste numa série de 0s e 1s, um sistema demasiado grosseiro para descrever as ondas delicadas de

elétrões a dançarem nas profundezas de uma molécula. Por exemplo, ao computar fastidiosamente os caminhos seguidos por um rato num labirinto, um computador digital tem de analisar morosamente cada caminho possível, um após outro. Um computador quântico, contudo, analisa *simultaneamente* todos os caminhos possíveis ao mesmo tempo, a uma velocidade estonteante.

Isso, por sua vez, reforçou uma rivalidade intensa entre gigantes da computação concorrentes, os quais correm agora para criar o computador quântico mais poderoso do mundo. Em 2021, a IBM revelou o seu próprio computador quântico, chamado Eagle, que assumiu a liderança, com maior capacidade de computação do que todos os modelos anteriores.

Mas esses recordes são como massa de tarte — feitos para serem quebrados.

Tendo em conta as profundas implicações desta revolução, não é surpreendente que muitas das principais corporações a nível mundial estejam a investir fortemente nesta nova tecnologia. Google, Microsoft, Intel, IBM, Rigetti e Honeywell estão todas a construir protótipos de computadores quânticos. Os líderes de Silicon Valley compreendem que, se não acompanharem esta revolução, depressa ficarão para trás.

A IBM, a Honeywell e a Rigetti Computing colocaram os seus computadores quânticos de primeira geração na Internet, para

agucar o apetite de um público curioso, de modo que as pessoas possam ter uma primeira exposição direta à computação quântica. Podemos testemunhar em primeira mão esta nova revolução quântica se nos ligarmos a um computador quântico na Internet. Por exemplo, a «IBM Q Experience», lançada em 2016, disponibiliza ao público, através da Internet e gratuitamente, 15 computadores quânticos. A Samsung e a JPMorgan Chase contam-se entre os seus utilizadores. Há já 2000 pessoas, desde estudantes a professores, a usá-los todos os meses.

Em Wall Street gerou-se um forte interesse por esta tecnologia. A IonQ foi a primeira grande companhia de computação quântica a tornar-se empresa pública, angariando 600 milhões de dólares na sua Oferta Pública de Venda em 2021. Ainda mais sensacional, a rivalidade é de tal forma intensa que uma nova *start-up*, a PsiQuantum, sem qualquer protótipo comercial no mercado nem historial de produtos anteriores, disparou de súbito em Wall Street para uma avaliação de 3,1 mil milhões de dólares, com a capacidade de captar 665 milhões de dólares em financiamento quase de um dia para o outro. Os analistas de negócios escreveram que raramente haviam visto algo assim, uma companhia nova a elevar-se a tais alturas nas asas da especulação febril e de manchetes sensacionais.

A Deloitte, uma empresa de consultoria e contabilidade, estima que o mercado para computadores quânticos deve alcançar as centenas de milhões de dólares ao longo da década de 2020 e as dezenas de milhares de milhões de dólares na de 2030. Ninguém sabe quando é que os computadores quânticos entrarão no mercado

comercial e alterarão o panorama económico, mas as previsões são constantemente revistas de acordo com a rapidez sem precedentes das descobertas científicas nessa área. Christopher Savoie, diretor executivo da Zapata Computing, ao falar sobre a ascensão meteórica dos computadores quânticos, diz: «Já não é uma questão de se, mas sim de *quando*.»³

Até o Congresso dos Estados Unidos manifestou um forte interesse em ajudar com o arranque desta nova tecnologia quântica. Ao perceber que outras nações estavam já a financiar generosamente a investigação na área dos computadores quânticos, em dezembro de 2018 o Congresso aprovou a Lei de Iniciativa Nacional Quântica para fornecer capital inicial e ajudar a avançar com novas investigações. Determinou a formação de dois a cinco Centros Nacionais de Investigação Científica de Informação Quântica com um financiamento anual de 80 milhões de dólares.

Em 2021, o governo dos Estados Unidos anunciou ainda um investimento de 625 milhões de dólares em tecnologias quânticas, a supervisionar pelo Departamento de Energia. Corporações gigantes como a Microsoft, a IBM e a Lockheed Martin contribuíram também para este projeto com uns adicionais 340 milhões.

A China e os Estados Unidos não são os únicos que usam fundos governamentais para acelerar esta tecnologia. O governo do Reino Unido está neste momento a construir o Centro Nacional de Computação Quântica, que servirá como unidade de pesquisa em computação quântica, a ser construído no Laboratório Harwell do Conselho de Serviços Científicos e Tecnológicos em Oxfordshire.

Incentivadas pelo governo, tinham sido fundadas 30 *start-ups* de computadores quânticos no Reino Unido até ao final de 2019.

Os analistas da indústria reconhecem que é uma jogada de bilhões de dólares. Não há quaisquer garantias nesta área tão competitiva. Apesar dos impressionantes avanços técnicos feitos pela Google e por outros, em anos recentes, um computador quântico funcional, capaz de resolver problemas do mundo real, encontra-se ainda a muitos anos de distância. Temos ainda perante nós uma montanha de trabalho árduo. Alguns críticos alegam mesmo que pode não passar de um empreendimento vão. No entanto, as companhias de computadores compreendem que, a menos que consigam pôr o pé na porta, esta pode bem fechar-se-lhes na cara.

Ivan Ostojic, sócio na firma de consultoria McKinsey, diz: «As empresas em indústrias onde o quantum tenha maior potencial de uma revolução total, devem envolver-se no quântico imediatamente.»⁴ Áreas como química, medicina, petróleo e gás, transportes, logística, banca, farmacêuticas e cibersegurança estão preparadas para mudanças revolucionárias. Acrescenta ele: «Em princípio, o quântico será relevante para todos os diretores executivos de informação, uma vez que pode acelerar soluções para um vasto leque de problemas. Essas companhias precisam de se tornar detentoras de funcionalidades quânticas.»

Vern Brownell, ex-diretor executivo da D-Wave Systems, uma companhia canadiana de computação quântica, observa:

«Acreditamos estar na iminência de poder oferecer funcionalidades que não são possíveis obter com a computação clássica.»

Muitos cientistas creem que estamos agora a entrar numa Era completamente nova, com ondas de choque comparáveis às criadas pela introdução do transístor e do *microchip*. Companhias sem ligações diretas à produção de computadores, como a gigante da indústria automóvel Daimler, proprietária da Mercedes-Benz, estão já a investir nesta nova tecnologia, adivinhando que os computadores quânticos podem abrir caminho a novos desenvolvimentos nas suas próprias indústrias. Julius Marcea, um executivo na empresa rival, BMW, escreveu: «Estamos empolgados para investigar o potencial transformador da computação quântica na indústria automóvel, e comprometidos em alargar os limites do desempenho da engenharia.»⁵ Outras grandes companhias, como a Volkswagen e a Airbus, criaram as suas próprias divisões de computação quântica para explorar de que forma isso pode revolucionar o seu negócio.

As companhias farmacêuticas observam também atentamente os desenvolvimentos nesta área, conscientes de que os computadores quânticos podem conseguir simular processos químicos e biológicos complexos que estão muito para além da capacidade de computadores digitais. Instalações enormes dedicadas à testagem de milhões de drogas podem um dia ser substituídas por «laboratórios virtuais» que testam essas mesmas drogas no ciberespaço. Há quem tenha manifestado receios de que isso possa talvez, um dia, substituir os químicos profissionais. Mas Derek Lowe, que gere um blogue sobre descoberta de substâncias,

diz: «As máquinas não vão substituir os químicos. Os químicos que usam as máquinas é que substituirão aqueles que não as usam.»⁶

Até o Grande Colisor de Hadrões nos arredores de Genebra, na Suíça, a maior máquina científica do mundo, que faz colidir prótons a 14 bilhões de elétrons-volt para recriar as condições nos primórdios do Universo, utiliza agora computadores quânticos para ajudar a analisar montanhas de dados. Num segundo, conseguem analisar até um bilhão de *bytes* gerados por cerca de mil milhões de colisões de partículas. Talvez um dia os computadores quânticos possam vir a desvendar os segredos da criação do Universo.

1. Supremacia Quântica

Em 2012, quando o físico John Preskill do Instituto de Tecnologia da Califórnia cunhou pela primeira vez a expressão «supremacia quântica», muitos cientistas abanaram a cabeça. Faltariam décadas, se não mesmo séculos, pensaram, até que os computadores quânticos conseguissem superar o desempenho de um computador digital. Afinal de contas, a computação em átomos individuais, em vez de em pastilhas de *chips* de silício, era considerada diabolicamente difícil. A mais ligeira vibração ou ruído pode afetar a delicada dança de átomos num computador quântico. Porém, estas proclamações assombrosas de supremacia quântica têm vindo a deitar por terra as previsões mais sombrias dos opositores. Agora, a preocupação começa a virar-se para a rapidez com que a área está a desenvolver-se.

Os abalos causados por estes feitos extraordinários sacudiram também administrações e agências de inteligência *top secret* por todo o mundo. Documentos revelados por denunciante revelaram que a CIA e a Agência de Segurança Nacional dos Estados Unidos acompanham de perto os desenvolvimentos neste campo. Isto porque os computadores quânticos são tão potentes que, em princípio, conseguiriam quebrar todos os cibercódigos conhecidos. O que significa que os segredos cuidadosamente protegidos pelos governos, que são as suas joias da coroa, contendo as informações mais confidenciais, estão vulneráveis a ataques, tal como os segredos mais bem guardados de corporações e até mesmo indivíduos. A situação é de tal forma urgente que até o Instituto Nacional de Normas e Tecnologia (NIST) dos Estados Unidos, que determina as políticas e normas nacionais, emitiu recentemente linhas de orientação para ajudar as grandes corporações e agências a formular planos para a transição inevitável desta nova Era. O NIST anunciou já que esperam que, até 2029, os computadores quânticos sejam capazes de quebrar a encriptação AES de 128-*bits*, o código utilizado por muitas companhias.

Ali El Kaafarani, num artigo para a *Forbes Magazine*, observou que «é uma perspetiva muito aterrorizadora para qualquer organização que tenha informações confidenciais para proteger».7

Os chineses gastaram dez mil milhões de dólares no seu Laboratório Nacional Científico de Informação Quântica porque estão determinados a estar na linha da frente desta área vital e em rápido desenvolvimento. As nações gastam dezenas de milhares de milhões para guardar cuidadosamente esses códigos. Um *hacker*,

armado com um computador quântico, poderia, em teoria, entrar em *qualquer* computador digital no planeta, afetando assim indústrias e até mesmo organizações militares. Toda a informação confidencial ficaria ao dispor de quem fizesse a oferta mais elevada. Os mercados financeiros também mergulhariam no caos se os computadores quânticos penetrassem no santuário interior de Wall Street. Os computadores quânticos podem ainda desbloquear a *blockchain*, criando alvoroço no mercado de *bitcoin*. A Deloitte calculou que cerca de 25 por cento das *bitcoins* estão potencialmente vulneráveis a *hacking* por um computador quântico.

«Aqueles que gerem projetos de *blockchain* estarão provavelmente a vigiar com algum nervosismo os progressos da computação quântica», conclui um relatório da CB Insights, uma companhia informática de *software* de dados.⁸

Assim, o que está em jogo é, nada mais, nada menos, a economia mundial, que está fortemente aliada à tecnologia digital. Os bancos em Wall Street usam computadores para registrar e seguir transações de milhares de milhões de dólares. Os engenheiros usam computadores para desenhar arranha-céus, pontes e foguetões. Os artistas dependem dos computadores para dar vida aos *blockbusters* de Hollywood. As companhias farmacêuticas usam computadores para desenvolver a próxima droga maravilha. As crianças precisam de computadores para jogar os mais recentes videojogos com os amigos. E dependemos de forma crucial dos telemóveis para ter notícias instantâneas de amigos, colegas e familiares. Todos nós passámos já pela experiência de entrar em pânico quando não encontramos o

telemóvel. Na verdade, é extremamente difícil nomear uma atividade humana que não tenha sido virada de pernas para o ar pelos computadores. Estamos tão dependentes deles que se, de alguma forma, todos os computadores no mundo deixassem subitamente de funcionar, a civilização mergulharia no caos. É por isso que os cientistas acompanham com tanta atenção os desenvolvimentos dos computadores quânticos.

2. Fim da Lei de Moore

O que está por trás de toda esta agitação e controvérsia?

A ascensão dos computadores quânticos é um sinal de que a Era do Silício se aproxima gradualmente do fim. No último meio século, a explosão da potência computacional tem sido descrita pela Lei de Moore, batizada com o nome do fundador da Intel, Gordon Moore. A Lei de Moore diz que a potência computacional duplica a cada 18 meses. Esta lei enganadoramente simples tem acompanhado o extraordinário aumento exponencial da potência computacional, algo sem precedentes na história humana. Não existe qualquer outra invenção que tenha tido um impacto tão universal em tão curto período de tempo.

Os computadores passaram por muitas fases ao longo da sua história, aumentando de cada vez a sua potência e causando importantes alterações sociais. Na verdade, a Lei de Moore pode ser aplicada já desde o século XIX, a Era dos computadores mecânicos. Nessa época, os engenheiros utilizavam cilindros giratórios, rodas

dentadas, engrenagens e rodas para efetuar simples operações aritméticas. Na viragem do século passado, estas calculadoras começaram a usar eletricidade, substituindo as engrenagens por relés e cabos. Durante a Segunda Guerra Mundial, os computadores utilizavam vastos conjuntos de tubos de vácuo para decifrar códigos governamentais secretos. Na época do pós-guerra, fez-se a transição de tubos de vácuo para transístores, que podiam ser miniaturizados para tamanhos microscópicos, facilitando avanços continuados em termos de velocidade e potência.

Na década de 50, os computadores *mainframe* só podiam ser adquiridos por grandes corporações e agências governamentais como o Pentágono e bancos internacionais. Eram potentes (por exemplo, o ENIAC conseguia fazer em 30 segundos aquilo que podia demorar 20 horas a um ser humano). Porém, eram também caros, volumosos, e ocupavam muitas vezes um piso inteiro de um edifício. O *microchip* veio revolucionar todo este processo, diminuindo de tamanho ao longo das décadas até que um *chip* típico, do tamanho de uma unha, pode hoje conter cerca de mil milhões de transístores. Nos nossos dias, os telemóveis usados pelas crianças para jogos são mais potentes do que uma sala cheia desses dinossauros massivos, em tempos usados pelo Pentágono. O telemóvel que trazemos no bolso excede a potência dos computadores utilizados durante a Guerra Fria, e no entanto tomamo-lo por garantido.

Tudo passa. Cada transição no desenvolvimento do computador tornou obsoleta a tecnologia anterior, num processo de destruição criativa. A Lei de Moore já está a abrandar e pode, a dada altura,

estacar. Isto porque os *microchips* são tão compactos que a camada mais fina de transístores tem uma espessura de cerca de 20 átomos. Quando chegarem aos cinco átomos de espessura, a localização dos eletrões torna-se incerta e estes podem escapar e provocar um curto-circuito no *chip*, ou gerar tanto calor que os *chips* derreterão. Por outras palavras, segundo as leis da física, a Lei de Moore tem, mais cedo ou mais tarde, de sucumbir, se continuarmos a utilizar essencialmente silício. Podemos estar a assistir ao fim da Era do Silício. O próximo salto no progresso pode ser a Era pós-Silício ou Era Quântica.

Como disse Sanjay Natarajan, da Intel: «Estamos convencidos de ter espremido tudo o que é possível espremer dessa arquitetura»⁹

Silicon Valley pode vir a tornar-se o próximo Cinturão da Ferrugem^{*}.

Embora as coisas pareçam calmas por enquanto, mais cedo ou mais tarde este novo futuro despontará. Como diz Hartmut Neven, diretor do laboratório de Inteligência Artificial da Google: «Parece que não está a acontecer nada, não está a acontecer nada, e depois, *oops*, de repente estamos num mundo diferente.»¹⁰

^{*} Rust Belt, em inglês, é uma região dos EUA que abrange estados do Nordeste, dos Grandes Lagos e do centro-oeste. A expressão ganhou relevância a partir da década de 80 quando a região, anteriormente conhecida como Manufacturing Belt («Cinturão da Manufatura») pela sua pujança industrial, iniciou o seu declínio económico e populacional. [N. do Ed]

3. Por Que São Tão Potentes?

O que torna os computadores quânticos tão potentes, ao ponto de lançar as nações do mundo numa corrida para dominar esta nova tecnologia?

Essencialmente, todos os computadores modernos se baseiam em informação digital, que pode ser codificada numa série de 0s e 1s. A unidade mais pequena de informação, um único dígito, chama-se *bit*. Esta sequência de 0s e 1s é introduzida num processador digital, que efetua o cálculo e produz então um resultado. Por exemplo, a sua ligação à Internet pode medir-se em termos de *bits* por segundo, ou bps, o que significa que mil milhões de *bits* são enviados para o seu computador a cada segundo, dando-lhe acesso instantâneo a filmes, *e-mails*, documentos, etc.

Contudo, em 1959, Richard Feynman, o físico galardoado com um Nobel, viu uma abordagem diferente à informação digital. Num ensaio profético e revolucionário intitulado «There's Plenty of Room at the Bottom» [Há muito espaço lá em baixo] e artigos subsequentes, perguntou: por que não substituir esta sequência de 0s e 1s por estados de átomos, criando assim um computador atómico? Por que não substituir os transístores pelo objeto mais pequeno possível, o átomo?

Os átomos são como piões. Num campo magnético, podem alinhar-se quer para cima, quer para baixo relativamente ao campo magnético, o que corresponde a um 0 ou a um 1. A potência de um

computador digital está relacionada com o número de estados (os 0s ou 1s) que há no computador.

Contudo, devido às estranhas leis do mundo subatômico, os átomos podem também girar em qualquer combinação dos dois. Por exemplo, podemos ter um estado em que o átomo gira para cima 10 por cento do tempo e gira para baixo 90 por cento do tempo. Ou gira para cima 65 por cento do tempo e gira para baixo 35 por cento do tempo. Na verdade, há um número infinito de formas como um átomo pode girar. Isto aumenta vastamente o número de estados possíveis. Assim, o átomo pode transportar muito mais informação, não apenas um *bit*, mas um *qubit*, ou seja, uma mistura simultânea dos estados para cima e para baixo. Os *bits* digitais só conseguem transportar um *bit* de informação de cada vez, o que limita a sua potência, mas os *qubits*, ou *bits* quânticos, têm uma potência quase ilimitada. Ao facto de, ao nível atômico, os objetos poderem existir simultaneamente em múltiplos estados, chama-se sobreposição. (Isto significa também que as familiares leis do senso comum são violadas de forma rotineira ao nível atômico. A essa escala, os elétrons podem estar em dois lugares ao mesmo tempo, o que não é verdade para objetos maiores.)

Adicionalmente, estes *qubits* podem interagir uns com os outros, o que não é possível com os *bits* comuns. A isto chama-se entrelaçamento. Enquanto os *bits* digitais têm estados independentes, de cada vez que adicionamos outro *qubit* ele interage com todos os *qubits* anteriores, duplicando assim o número de interações possíveis. Portanto os computadores quânticos são de modo inerente exponencialmente mais potentes do que os

computadores digitais, porque duplicamos o número de interações de cada vez que adicionamos mais um *qubit*.

Por exemplo, os computadores quânticos atuais podem ter mais de cem *qubits*. Isto significa que são 2^{100} vezes mais potentes do que um supercomputador com apenas um *qubit*.

O computador quântico da Google, o Sycamore, que foi o primeiro a alcançar a supremacia quântica, tem capacidade de processar 72 triliões de *bytes* de memória, com a sua potência de 53 *qubits*. Assim, um computador quântico como o Sycamore deixa muito para trás um computador convencional.

As implicações comerciais e científicas são enormes. Enquanto transitamos de uma economia mundial digital para uma economia quântica, o que está em jogo é de uma importância extraordinária.

4. Travões aos Computadores Quânticos

A próxima pergunta essencial é: o que nos impede de comercializar já hoje computadores quânticos potentes? Por que razão nenhum inventor mais empreendedor revelou ainda um computador quântico capaz de decifrar qualquer código conhecido?

O problema que os computadores quânticos enfrentam foi também previsto por Richard Feynman aquando da formulação inicial do conceito. Para que os computadores quânticos funcionem, os átomos têm de estar dispostos de forma muito precisa, de modo

que vibrem em uníssono. A isto chama-se coerência. No entanto, os átomos são objetos extraordinariamente pequenos e sensíveis. A mais ínfima impureza ou perturbação proveniente do mundo exterior pode fazer com que esse conjunto de átomos perca a coerência, arruinando todo o cálculo. Esta fragilidade é o principal problema dos computadores quânticos. Assim, a pergunta bilionária é: conseguiremos controlar a decoerência?

De modo a minimizar a contaminação proveniente do mundo exterior, os cientistas recorrem a equipamentos específicos de modo a baixar a temperatura para perto do zero absoluto, onde as vibrações indesejadas são reduzidas ao mínimo. Porém, para alcançar essas temperaturas, são necessárias bombas e tubagens especiais e dispendiosas.

Vemo-nos, no entanto, perante um mistério. A Mãe Natureza usa a mecânica quântica à temperatura ambiente sem qualquer problema. Por exemplo, o milagre da fotossíntese, um dos processos mais importantes na Terra, é um processo quântico, e, contudo, decorre a temperaturas normais. A Mãe Natureza não precisa de uma sala cheia de aparelhos exóticos, a funcionarem perto do zero absoluto, para executar a fotossíntese. Por motivos que não são bem compreendidos, no mundo natural é possível manter a coerência mesmo num dia de sol quente, em que as perturbações do mundo exterior deviam criar o caos ao nível atómico. Se pudéssemos um dia perceber como é que a Mãe Natureza faz a sua magia à temperatura ambiente, então talvez conseguíssemos dominar o *quantum* e, quiçá, a própria vida.

5. Revolucionar a Economia

Embora, a curto prazo, os computadores quânticos representem uma ameaça para a cibersegurança das nações, têm também vastas implicações práticas a longo prazo, detendo o poder de revolucionar a economia mundial, criar um futuro mais sustentável e introduzir uma Era de medicina quântica para ajudar a curar doenças até então incuráveis.

São muitas as áreas em que os computadores quânticos podem ultrapassar os computadores digitais convencionais:

5.1 Motores de Busca

No passado, a riqueza podia medir-se em termos de petróleo ou ouro.

Hoje, cada vez mais, mede-se em dados. As companhias costumavam deitar fora os seus próprios dados financeiros, mas agora esta informação é reconhecida como sendo mais valiosa do que metais preciosos. Porém, analisar montanhas de dados pode sobrecarregar um computador digital convencional. É aqui que entram em cena os computadores quânticos, para encontrar a agulha no palheiro. Os computadores quânticos serão capazes de analisar as finanças de uma companhia de modo a isolar o punhado de fatores específicos que a impede de crescer.

Na verdade, a JPMorgan Chase aliou-se recentemente à IBM e à Honeywell na análise dos seus dados, com o objetivo de fazer melhores previsões de risco e de incerteza financeira e aumentar a eficiência das suas operações.

5.2 Otimização

Depois de os computadores quânticos terem utilizado motores de busca para identificar os fatores cruciais nos dados, a próxima questão é como os ajustar de modo a maximizar certos fatores, tais como o lucro. No mínimo, as grandes corporações, universidades e agências governamentais utilizarão os computadores quânticos para minimizar as despesas e maximizar a eficiência e o lucro. Por exemplo, as receitas líquidas de uma companhia dependem de centenas de fatores, tais como salários, vendas, despesas e por aí fora, e todos eles mudam rapidamente com o tempo. Um computador tradicional digital seria incapaz de encontrar a combinação certa, nesta miríade de fatores, para maximizar a margem de lucro. Entretanto, uma empresa da área financeira terá interesse em usar computadores quânticos para prever o futuro de certos mercados financeiros que lidam com milhares de milhões de dólares em transações, diariamente. É aqui que os computadores quânticos podem ajudar, ao fornecer a potência computacional necessária para otimizar os resultados.

5.3 Simulação

Os computadores quânticos são também capazes de resolver equações complexas que estão para além da capacidade dos

computadores digitais. Por exemplo, as empresas de engenharia podem usar computadores quânticos para calcular a aerodinâmica de jatos, aviões e carros, com o objetivo de encontrar a forma ideal que reduz a fricção, minimiza os custos e maximiza a eficiência. Ou os governos podem usar computadores quânticos para prever o tempo, quer seja para determinar a trajetória de um furacão monstruoso, quer para calcular de que forma o aquecimento global afetará a economia e o nosso modo de vida daqui a décadas. Ou os cientistas recorrerão a computadores quânticos para encontrar a configuração ideal de ímanes em máquinas de fusão nuclear gigantes, de modo a rentabilizar o poder da fusão de hidrogénio e «engarrafar o Sol».

Porém, o maior benefício talvez seja usar os computadores quânticos para simular centenas de processos químicos cruciais. O sonho seria poder prever o desfecho de qualquer reação química ao nível atômico sem usar químico algum, apenas com computadores quânticos. Este novo ramo da ciência, a química computacional, determina as propriedades químicas, não através da experiência, mas simulando-as num computador quântico, o que pode um dia vir a eliminar testagens dispendiosas e demoradas. A biologia, a medicina e a química seriam reduzidas à mecânica quântica. Isso significa criar um «laboratório virtual» no qual podemos rapidamente testar novas drogas, terapias e curas na memória de um computador quântico, eliminando a necessidade de décadas de experimentação e erro e de testes laboratoriais lentos e fastidiosos. Em vez de levar a cabo milhares de experiências químicas complexas, dispendiosas e demoradas, poderíamos somente carregar no botão num computador quântico.

5.4 Fusão entre IA e Computadores Quânticos

A Inteligência Artificial (IA) destaca-se pela sua extraordinária capacidade de aprender com os erros, pelo que consegue desempenhar tarefas progressivamente mais difíceis. Já provou o seu valor na indústria e na medicina. Contudo, uma limitação da IA é que as vastas quantidades de dados que tem de processar podem facilmente ultrapassar os limites de um computador digital convencional. Todavia, a capacidade de analisar montanhas de dados é um dos pontos fortes dos computadores quânticos. Assim, a sinergia entre IA e computadores quânticos pode aumentar de forma significativa a sua potência para resolver todo o tipo de problemas.

6. Outras Aplicações dos Computadores Quânticos

Os computadores quânticos têm capacidade de vir a alterar indústrias inteiras. Por exemplo, os computadores quânticos podem, finalmente, introduzir a — há muito esperada — Era Solar. Há décadas que futuristas e visionários preveem que as energias renováveis substituirão gradualmente os combustíveis fósseis, solucionando o problema do efeito de estufa que causa o aquecimento do planeta. Exércitos destes pensadores e sonhadores têm vindo a enaltecer as virtudes das energias renováveis.

No entanto, a Era Solar continua adiada.

Embora os custos de turbinas eólicas e painéis solares tenham caído, estes representam ainda apenas uma reduzida fração da produção total de energia a nível mundial. A questão é: o que aconteceu? Todas as novas tecnologias têm de confrontar o mesmo aspeto crucial: custos. Após décadas a engrandecer as energias eólica e solar, os apoiantes têm de aceitar o facto de que continuam a ser um pouco mais dispendiosas, em média, do que os combustíveis fósseis. A razão é evidente. Quando o sol não brilha e os ventos não sopram, a tecnologia de energias renováveis fica ali parada, a ganhar pó.

O problema-chave da Era Solar é, muitas vezes, esquecido; trata-se da bateria. Mal-habitados a que a potência computacional cresça a uma velocidade exponencial, partimos inconscientemente do princípio de que o mesmo ritmo de desenvolvimento se aplica a toda a tecnologia eletrónica.

A potência computacional explodiu, em parte, porque podemos usar comprimentos de onda de radiação ultravioleta mais curtos para gravar transístores minúsculos num *chip* de silício. Porém, as baterias são diferentes; são confusas, utilizando uma série de produtos químicos exóticos numa interação complexa. A potência das baterias cresce lenta e fastidiosamente, por meio de experimentação e erro, e não por meio do uso sistemático de comprimentos de onda de luz UV cada vez mais curtos para fazer gravações. Além do mais, a energia armazenada numa bateria é uma ínfima fração da energia armazenada na gasolina.

Os computadores quânticos têm potencial para alterar esta situação. Poderão modelar milhares de possíveis reações químicas sem que tenham de ser testadas em laboratório, de modo a encontrar o processo mais eficiente para uma superbateria, introduzindo assim a Era Solar.

Companhias de serviços públicos e de automóveis já estão a recorrer aos computadores quânticos de primeira geração da IBM para atacar o problema das baterias. Pretendem aumentar a capacidade e velocidade de recarregamento da próxima geração de baterias de lítio-enxofre. Essa, todavia, é apenas uma das formas como o clima será afetado. Além disso, a ExxonMobil está a usar os computadores quânticos da IBM para criar novos produtos químicos, para processamento de baixa energia e captura de carbono. Em particular, querem que os computadores quânticos sejam capazes de simular materiais e determinar a sua natureza química, tal como a sua capacidade de aquecimento.

Jeremy O'Brien, fundador da PsiQuantum, realça que esta revolução não é para construir computadores mais rápidos. É, sim, para atacar problemas, como reações químicas e biológicas complexas, que nenhum computador convencional poderia resolver, por mais tempo que lhe déssemos.

Diz ele: «Não estamos a falar de fazer as coisas mais depressa ou melhor... estamos a falar de as conseguir fazer, ponto final... Estes problemas estão inevitavelmente para além do alcance de qualquer computador convencional que pudéssemos vir a construir... mesmo que pegássemos em todos os átomos de silício

no mundo e os transformássemos num supercomputador, ainda assim não conseguiríamos resolver estes problemas difíceis.»¹¹

7. Alimentar o Planeta

Outra aplicação crucial dos computadores quânticos poderá ser alimentar uma população mundial em crescimento. Certas bactérias conseguem, sem qualquer esforço, retirar nitrogénio do ar e convertê-lo em amoníaco, que por sua vez é transformado em produtos químicos para criar fertilizantes. Este processo de fixação de nitrogénio é a razão pela qual a vida prospera na Terra, possibilitando o crescimento de vegetação que alimenta humanos e animais. A Revolução Verde foi desencadeada quando os químicos duplicaram esta proeza pelo processo Haber-Bosch. Contudo, esse processo requer uma vasta quantidade de energia. Na verdade, o processo consome uns extraordinários 2 por cento de toda a produção energética mundial.

A ironia é essa. As bactérias fazem, de graça, algo que consome uma enorme fração da energia mundial.

A questão é: conseguirão os computadores quânticos solucionar esse problema da produção eficiente de fertilizantes, criando assim uma Segunda Revolução Verde? Se não ocorrer outra revolução na área da produção alimentar, alguns futuristas preveem uma catástrofe ecológica, à medida que se tornar cada vez mais difícil alimentar uma população mundial em constante expansão, o que

poderia causar fome generalizada e motins alimentares por todo o mundo.

Cientistas na Microsoft fizeram já algumas das primeiras tentativas de usar computadores quânticos para aumentar a produção de fertilizantes e desvendar o segredo da fixação de nitrogénio. No fim, os computadores quânticos podem ajudar a salvar a civilização humana de si própria. Outro milagre da natureza é a fotossíntese, pela qual a luz do sol e o dióxido de carbono são convertidos em oxigénio e glucose, que formam então a base de quase toda a vida animal. Sem a fotossíntese, a cadeia alimentar cairia por terra e a vida neste planeta depressa definharia.

Os cientistas passaram décadas a tentar identificar todos os passos por trás desse processo, molécula a molécula. Mas converter luz em açúcar é um processo de mecânica quântica. Após anos de trabalho, os cientistas isolaram os pontos onde os efeitos quânticos dominam o processo, e todos estão fora do alcance de computadores digitais. Assim, criar uma fotossíntese sintética com o potencial de ser ainda mais eficaz do que a natural continua a estar para além das capacidades dos nossos melhores químicos.

Os computadores quânticos talvez possam ajudar a criar uma fotossíntese sintética mais eficaz, ou, quem sabe, métodos totalmente novos de captar o poder da luz solar. Talvez o futuro do nosso abastecimento alimentar dependa disso.

8. O Nascimento da Medicina Quântica

Assim, os computadores quânticos têm a capacidade de rejuvenescer o ambiente e a vida vegetal. Mas podem também curar os doentes e moribundos. Não só os computadores quânticos são capazes de analisar simultaneamente a eficácia de milhões de potenciais medicamentos mais depressa do que qualquer computador convencional, como também de desvendar a natureza da própria doença.

Espera-se que os computadores quânticos respondam a perguntas como: o que faz com que células saudáveis se tornem de súbito, cancerosas, e como as travar? O que causa a doença de Alzheimer? Por que são incuráveis a doença de Parkinson e a ELA? Mais recentemente, o coronavírus provou ser capaz de mutações, mas até que ponto serão perigosos cada um destes vírus mutantes, e como reagirão ao tratamento?

Duas das grandes descobertas na história da medicina são os antibióticos e as vacinas. Todavia, os novos antibióticos são descobertos em grande medida por experimentação e erro, sem compreendermos precisamente como funcionam ao nível molecular, e as vacinas apenas estimulam o corpo humano a produzir substâncias químicas para atacar um vírus invasor. Em ambos os casos, os mecanismos moleculares exatos continuam a ser um mistério, e é possível que os computadores quânticos nos proporcionem uma perspetiva de como desenvolver melhores vacinas e antibióticos.

Quando falamos de compreender o corpo, o primeiro passo de gigante foi o Projeto do Genoma Humano, que elencou todos os três mil milhões de pares base e 20.000 genes que formam o mapa do corpo humano. No entanto, isto é apenas o princípio. O problema é que os computadores digitais são usados essencialmente para pesquisar em vastas bases de dados de códigos genéticos conhecidos, mas são impotentes quanto a explicar de forma precisa como o ADN e as proteínas executam os seus milagres dentro do corpo. As proteínas são objetos complexos, frequentemente compostas por milhares de átomos, que se dobram numa pequena bola, de formas específicas e inexplicáveis, quando põem em prática a sua magia molecular. Ao nível mais fundamental, toda a vida é mecânico-quântica, logo, fica para além das capacidades dos computadores digitais.

Mas os computadores quânticos abrirão caminho para a próxima fase, quando decifrarmos os mecanismos ao nível molecular que nos dirão como funcionam as proteínas, permitindo aos cientistas criar novos caminhos genéticos, novas terapias, novas curas para conquistar doenças até então incuráveis.

Por exemplo, algumas corporações farmacêuticas, incluindo empresas como a ProteinQure, a Digital Health 150, a Merck e a Biogen, estão já a montar centros de investigação para estudar de que forma os computadores quânticos afetarão a análise de medicamentos.

É assombroso para os cientistas como a Mãe Natureza conseguiu criar um tão vasto arsenal de mecanismos moleculares que tornam

possível o milagre da vida. Porém, estes mecanismos são um derivado do acaso e do trabalho da seleção natural aleatória ao longo de milhares de milhões de anos. É por isso que ainda sofremos com certas doenças incuráveis e com o processo de envelhecimento. Quando compreendermos o funcionamento destes mecanismos moleculares, poderemos usar computadores quânticos para os melhorar ou criar novas versões dos mesmos.

Por exemplo, com o ADN genómico, usamos computadores para identificar genes como o BRCA1 e o BRCA2, que têm fortes probabilidades de causar cancro da mama. No entanto, os computadores digitais são inúteis para determinar exatamente como é que estes genes defeituosos causam o cancro. E são também impotentes para travar o cancro depois de este se espalhar pelo corpo. Mas os computadores quânticos, ao decifram as complexidades moleculares do nosso sistema imunitário, podem conseguir criar novos medicamentos e terapias para combater estas doenças.

Outro exemplo é a doença de Alzheimer, que alguns acreditam ser a «doença do século», com o envelhecimento da população mundial. Através dos computadores digitais conseguimos demonstrar que há mutações em certos genes, como o gene ApoE4, que estão associadas à doença de Alzheimer. Contudo, os computadores digitais não conseguem explicar-nos porquê.

Uma das teorias principais é que a doença de Alzheimer é causada por priões, uma certa proteína amiloide incorretamente dobrada no cérebro. Quando a molécula renegada colide com outra

molécula da proteína, faz com que essa molécula se dobre também da maneira errada. Assim, a doença alastra por contacto, apesar de não haver envolvimento de vírus nem bactérias. Suspeita-se que os priões renegados possam ser os responsáveis por doenças como Alzheimer, Parkinson, ELA, e uma série de outras doenças incuráveis que afetam os mais velhos.

Assim, o problema da dobragem das proteínas é uma das grandes áreas não cartografadas da biologia. Na verdade, pode encerrar o segredo da própria vida. Porém, determinar exatamente como uma molécula de proteína se dobra, ultrapassa as capacidades de qualquer computador convencional. Os computadores quânticos, por outro lado, podem fornecer novos caminhos a partir dos quais se podem neutralizar as proteínas renegadas e oferecer novas terapias.

Além disso, a já mencionada fusão entre IA e computadores quânticos pode muito bem vir a ser o futuro da medicina. Programas de IA como o AlphaFold conseguiram já cartografar a estrutura atômica pormenorizada de uns espantosos 350.000 tipos diferentes de proteínas, incluindo o conjunto completo das proteínas que compõem o corpo humano. O próximo passo é usar os métodos únicos dos computadores quânticos para descobrir como é que estas proteínas fazem a sua magia, e usá-las para criar a próxima geração de medicamentos e terapias.

Os computadores quânticos estão já a ser ligados a redes neuronais para criar a próxima geração de máquinas com capacidade de aprendizagem, capazes de literalmente se

reinventarem a si próprias. O computador que tem na sua secretária, em contraste, nunca aprende. Não é mais potente hoje do que era o ano passado. Só recentemente, com novos avanços na aprendizagem profunda, é que os computadores começaram a dar os primeiros passos no reconhecimento de erros e aprendizagem. Os computadores quânticos poderiam acelerar exponencialmente esse processo e ter um impacto singular na medicina e na biologia.

O diretor executivo da Google, Sundar Pichai, compara a chegada dos computadores quânticos ao histórico voo dos irmãos Wright em 1903. O teste original não foi muito extraordinário, por si só, porque o voo durou apenas uns modestos 12 segundos. Contudo, este curto voo foi o fator impulsionador da aviação moderna, que, por sua vez, alterou o rumo da civilização humana.

Aquilo que está em jogo é, nem mais nem menos, o nosso futuro. Está tudo à disposição de quem conseguir construir e utilizar um computador quântico. Porém, para compreender verdadeiramente o impacto que esta revolução poderá vir a ter na nossa vida quotidiana, vale a pena rever algumas das corajosas tentativas feitas no passado de realizar o sonho de usar computadores para simular e compreender o mundo à nossa volta.

E tudo começou com uma misteriosa relíquia com dois mil anos, encontrada no fundo do Mediterrâneo.

-
- 1 Gordon Lichfield, «Inside the Race to Build the Best Quantum Computer on Earth», *MIT Technology Review*, 26 de fevereiro de 2020, 1-23.
 - 2 Yuval Boger, entrevista com o Dr. Robert Sutor, *The Qubit Guy's Podcast*, 27 de outubro de 2021; <https://www.classiq.io/insights/podcast-with-dr-robert-sutor>.
 - 3 Matt Swayne, «Zapata Chief Says Quantum Machine Learning Is a When, Not an If», *The Quantum Insider*, 16 de julho de 2020; <https://thequantuminsider.com/>.
 - 4 Daphne Leprince-Ringuet, «Quantum Computers Are Coming, Get Ready for Them to Change Everything», *ZD Net*, 2 de novembro de 2020; <https://www.zdnet.com/>.
 - 5 Dashveenjit Kaur, «BMW Embraces Quantum Computing to Enhance Supply Chain», *Techwire/Asia*, 1 de fevereiro 2021; <https://techwireasia.com/>.
 - 6 Cade Metz, «Making New Drugs with a Dose of Artificial Intelligence», *The New York Times*, 5 de fevereiro de 2019; <https://www.nytimes.com/>.
 - 7 Ali El Kaafarani, «Four Ways That Quantum Computers Can Change the World», *Forbes*, 30 de julho de 2021; <https://www.forbes.com/>.
 - 8 «How Quantum Computers Will Transform These 9 Industries», *CB Insights*, 23 de fevereiro de 2021; <https://www.cbinsights.com/>.
 - 9 Matthew Hutson, «The Future of Computing», *ScienceNews*; <http://www.sciencenews.org/century/computer-ai-algorithm-moore-law-ethics>.
 - 10 James Dargan, «Neven's Law: Paradigm Shift in Quantum Computers», *Hackernoon*, 1 de julho de 2019; <https://hackernoon.com/nevens-law-paradigm-shift-in-quantum-computers-e6c429ccd1fc>.
 - 11 Nicole Hemsoth, «With \$3.1 Billion Valuation, What's Ahead for PsiQuantum?», *The Next Platform*, 27 de julho de 2021; <http://www.nextplatform.com/2021/07/27/with-3-1b-valuation-whats-ahead-for-psiquantum/>.

CAPÍTULO 2

Fim da Era Digital

Do fundo do Mar Egeu emergiu um dos enigmas mais intrigantes e fascinantes do mundo antigo. Em 1901, alguns mergulhadores conseguiram recuperar um estranho artefacto perto da ilha de Anticítera. Por entre cacos de cerâmica, moedas, joias e estátuas espalhadas por um naufrágio, os mergulhadores encontraram um objeto curiosamente diferente. Ao princípio, parecia apenas uma pedra vulgar, incrustada de corais.

Porém, após terem sido removidas várias camadas de detritos, os arqueólogos começaram a aperceber-se de que tinham em mãos um tesouro único, extraordinariamente raro. O objeto estava repleto de engrenagens, rodas e estranhas inscrições, uma máquina de um *design* complexo e minucioso.

Após datação dos artefactos encontrados no naufrágio, foi estimado que o objeto teria sido criado entre 150 e 100 a.C. Alguns historiadores acreditam que estava a ser transportado de Rodes para Roma, com o intuito de ser oferecido a Júlio César para um desfile triunfal.

Em 2008, com recurso a tomografia de raio X e digitalização de superfície de alta resolução, os cientistas conseguiram penetrar no interior deste objeto intrigante. E ficaram chocados ao compreender que se encontravam perante um antigo aparelho mecânico inacreditavelmente avançado.

Em lado algum, nos registos antigos, se encontrava menção a um mecanismo tão sofisticado. Aperceberam-se de que aquela máquina magnífica devia ter sido o pináculo do conhecimento científico do mundo antigo. Era uma supernova brilhante que os fitava através dos milénios. Era *o computador mais antigo do mundo*, um aparelho que não voltaria a ser duplicado senão dois mil anos mais tarde.

Os cientistas começaram a construir reproduções mecânicas deste aparelho extraordinário. Com o girar de uma manivela, uma série de rodas e engrenagens complexas foi posta em movimento pela primeira vez em milhares de anos. O aparelho tinha, pelo menos, 37 engrenagens de bronze. Num dos conjuntos de engrenagens, eram calculados os movimentos da Lua e do Sol. Outro conjunto de engrenagens conseguia prever o próximo eclipse do Sol. O instrumento era tão sensível que até conseguia calcular pequenas irregularidades na órbita da Lua. Traduções das inscrições no aparelho registam os movimentos de Mercúrio, Vénus, Marte, Saturno e Júpiter, os planetas conhecidos dos antigos, mas crê-se que uma outra parte do instrumento, nunca encontrada, conseguia de facto calcular os movimentos dos planetas no firmamento.

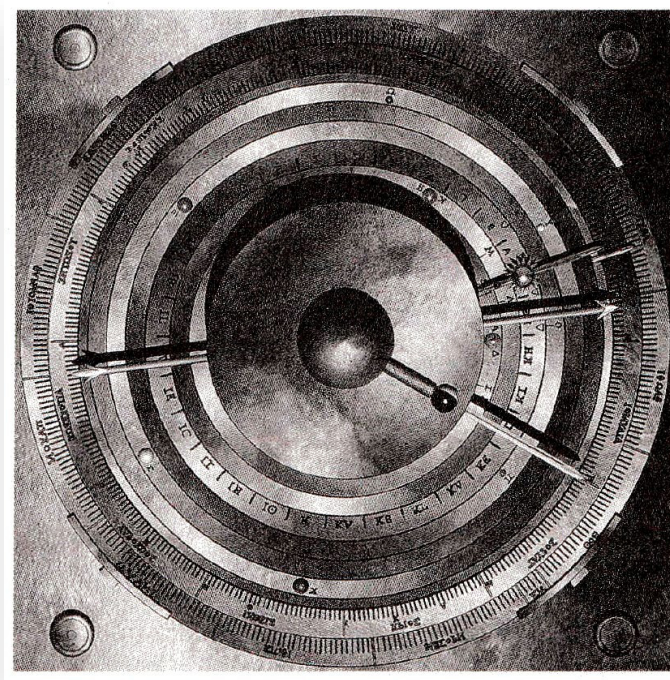


Figura 1: O mecanismo de Anticítera.

Há dois mil anos, os gregos criaram o Anticítera, o primeiro de uma longa linha evolucionária de computadores, aqui representado por um modelo baseado no aparelho original. Se o mecanismo de Anticítera representa o princípio da tecnologia de computação, o computador quântico pode vir a representar o ponto mais elevado da sua evolução.

Desde então, os cientistas criaram modelos elaborados do interior do aparelho, o que proporcionou aos historiadores uma perspectiva inaudita do conhecimento e da mente dos antigos. O aparelho foi precursor do nascimento de um ramo inteiramente novo da ciência, que recorre a instrumentos mecânicos para simular o Universo. Aquele era o computador analógico mais antigo do mundo — um aparelho capaz de fazer cálculos através de movimentos mecânicos contínuos.

Assim, o objetivo do primeiro computador do mundo era simular os corpos celestes, reproduzir os mistérios do cosmos num aparelho que uma pessoa podia segurar nas mãos. Em vez de se limitarem a admirar, com assombro, o céu noturno, esses cientistas antigos

queriam compreender o seu funcionamento pormenorizado, obtendo assim uma perspetiva sem precedentes do movimento dos corpos celestes no firmamento.

1. Computadores Quânticos: A Simulação Definitiva

Os arqueólogos descobriram que o Anticítera representava o pináculo das tentativas de simular o cosmos na Antiguidade. Na verdade, essa mesma ânsia ancestral por simular o mundo que nos rodeia é uma das forças motrizes por trás do computador quântico, que representa o derradeiro esforço nesta viagem de dois mil anos para simular tudo, desde o cosmos ao próprio átomo.

A simulação é um dos desejos humanos mais profundos. As crianças recorrem à simulação com figuras de brincar para compreender o comportamento humano. Quando brincam aos polícias e ladrões, professores e alunos, ou médicos e pacientes, as crianças estão a simular uma parte da sociedade adulta para compreender relações humanas complexas.

Infelizmente, só muitos séculos mais tarde os cientistas conseguiriam construir máquinas de complexidade suficiente para simular o nosso mundo tão bem como o mecanismo de Anticítera era capaz de fazer.

2. Babbage e a Máquina Diferencial

Com a queda do Império Romano, o progresso científico em muitas áreas, incluindo a simulação do Universo, estagnou.

Só no século XIX esse interesse foi gradualmente reavivado. Nessa altura, havia questões práticas e urgentes que só podiam ser respondidas por computadores mecânicos analógicos.

Por exemplo, os navegadores dependiam de mapas e cartas pormenorizadas para traçar as rotas dos seus navios. Precisavam de aparelhos para ajudar a que esses mapas fossem tão exatos quanto possível.

Eram também necessárias máquinas de crescente complexidade para acompanhar os negócios e o comércio, à medida que as pessoas começavam a acumular riqueza em quantidades cada vez maiores. Os contabilistas viam-se forçados a compilar à mão grandes tabelas matemáticas, de taxas de juro e hipotecárias. Porém, os humanos cometiam frequentemente erros dispendiosos e cruciais. Assim, havia um forte interesse pela criação de máquinas calculadoras mecânicas que não cometessem esses mesmos erros. Conforme as máquinas de calcular se tornavam mais complexas, surgiu uma competição informal entre inventores arrojados para ver quem conseguia construir a mais avançada.

Talvez um dos mais ambiciosos desses projetos tenha sido o liderado pelo excêntrico inventor e visionário inglês Charles

Babbage, muitas vezes chamado o Pai do Computador. Babbage fez incursões por uma variedade de áreas, incluindo a arte e até a política, mas os números sempre o fascinaram. Felizmente, nascera numa família abastada, e o pai, banqueiro, podia ajudá-lo a seguir muitos desses interesses distintos.

O sonho dele era criar a máquina de computação mais avançada do seu tempo, uma máquina que pudesse ser usada por banqueiros, engenheiros, marinheiros e forças militares para executar de modo infalível cálculos enfadonhos, mas essenciais. Babbage tinha dois objetivos. Como membro fundador da Real Sociedade Astronómica, tinha interesse em criar uma máquina capaz de seguir o movimento dos planetas e corpos astronómicos (seguindo, essencialmente, o mesmo trajeto pioneiro que os construtores do Anticítera). Tinha também a preocupação de produzir cartas de navegação precisas para a indústria marítima. A Inglaterra era uma grande potência marítima e erros nas cartas de navegação podiam originar desastres dispendiosos. A sua ideia era criar o computador mecânico mais potente do seu género, de modo a conseguir antecipar o movimento de tudo, fossem os planetas, os navios em mar alto ou as taxas de juro.

Mostrou-se bastante persuasivo no recrutamento de seguidores interessados em ajudá-lo com o progresso do seu ambicioso projeto. Entre esses seguidores contava-se Lady Ada Lovelace, uma aristocrata e filha de Lord Byron. Era também uma estudante dedicada de matemática, algo raro para as mulheres na época. Quando ela viu um pequeno modelo funcional do projeto de Babbage, ficou intrigada com aquele programa empolgante.

Lovelace ficou conhecida por ter ajudado Babbage a introduzir vários conceitos novos na computação. Regra geral, um computador mecânico precisava de um conjunto de engrenagens e rodas dentadas para, lenta e meticulosamente, calcular os números, um a um. Porém, para gerar tabelas completas com milhares de números matemáticos de uma vez (como logaritmos, taxas de juro e cartas de navegação) era necessário um conjunto de instruções para guiar a máquina através de muitas iterações. Por outras palavras, era preciso *software* para guiar a sequência de computações no *hardware*. Assim, ela escreveu uma série de instruções pormenorizadas pelas quais a máquina podia gerar sistematicamente aquilo a que se chama números de Bernoulli, algo essencial para os cálculos que efetuava.

Lovelace foi, de certa forma, a primeira programadora do mundo. Os historiadores concordam que Babbage estava provavelmente ciente da importância do *software* e programação, mas as notas pormenorizadas de Lovelace redigidas em 1843 representam o primeiro registo publicado de um programa de computador.

Ela reconheceu também que o computador não era somente capaz de manipular números, como Babbage pensava, mas podia também ser generalizado para descrever conceitos simbólicos num amplo leque de áreas. O autor Doron Swade escreve: «Ada viu algo que Babbage, de certa forma, não conseguiu ver. No mundo de Babbage, os seus motores eram limitados pelo número. O que Lovelace viu... foi que o número podia representar outras entidades que não a quantidade. Assim, depois de termos uma máquina para manipular números, se esses números representassem outras

coisas, letras, notas musicais, então a máquina podia manipular símbolos dos quais os números eram apenas um caso, segundo as regras.»¹

Como exemplo, Lovelace escreveu que o computador podia ser programado para criar peças musicais. Escreveu ela: «O motor podia compor peças de música elaboradas e científicas de qualquer grau de complexidade ou extensão»² Assim, o computador não servia apenas para analisar números, era mais do que uma máquina de calcular sofisticada. Podia ser usado para explorar também ciência, arte, música e cultura. Infelizmente, porém, antes que pudesse desenvolver estes conceitos revolucionários, Ada Lovelace morreu de cancro aos trinta e seis anos de idade.

Entretanto, uma vez que Babbage sofria de uma falta de fundos crônica e estava constantemente envolvido em disputas com outros, o seu sonho de criar o computador mecânico mais avançado do seu tempo nunca se concretizou. Quando ele morreu, muitos dos seus planos e ideias morreram consigo.

Todavia, desde então, os cientistas tentaram estudar exatamente quão avançadas eram as máquinas de Babbage. Os planos de um dos seus modelos inacabados continham 25.000 peças. Quando construído, pesaria quatro toneladas e teria dois metros e meio de altura. Ele estava tão avançado em relação ao seu tempo que essa máquina poderia ter manipulado mil números de 50 dígitos. Uma quantidade tão assombrosa de memória só seria duplicada por outra máquina em 1960.

Cerca de um século após a sua morte, engenheiros do Museu de Ciências de Londres, seguindo os seus *designs* em papel, conseguiram terminar um dos seus modelos e colocá-lo em exposição. E funcionava, tal como Babbage previra cem anos antes.

3. Estará a Matemática Completa?

Enquanto os engenheiros construíam computadores mecânicos de crescente complexidade para responder às exigências de um mundo cada vez mais industrial, os matemáticos puros faziam outra pergunta. Sempre fora um dos sonhos dos geómetras gregos demonstrar que todas as afirmações verdadeiras na matemática podiam ser rigorosamente provadas.

Extraordinariamente, contudo, esta simples ideia frustrou matemáticos ao longo de dois mil anos. Durante séculos, os estudantes da obra de Euclides, *Elementos*, debater-se-iam para provar teorema após teorema sobre objetos geométricos. Ao longo do tempo, pensadores brilhantes conseguiram provar um conjunto cada vez mais elaborado de afirmações verdadeiras. Ainda hoje, os matemáticos passam a vida inteira a compilar inúmeras afirmações verdadeiras que podem ser provadas matematicamente. Porém, no tempo de Babbage, começaram a fazer uma pergunta ainda mais fundamental: estará a matemática completa? As regras da matemática garantirão que todas as afirmações verdadeiras podem ser provadas, ou haverá afirmações verdadeiras capazes de escapar até às mentes mais excepcionais da raça humana porque, na verdade, são impossíveis de provar?

Em 1900, o grande matemático alemão David Hilbert elencou as questões matemáticas não provadas mais importantes da altura e desafiou os maiores matemáticos do mundo. Este extraordinário conjunto de questões por resolver guiaria então a agenda dos matemáticos durante o século seguinte à medida que, um a um, os teoremas iam sendo provados. Ao longo das décadas, vários jovens matemáticos encontrariam fama e glória ao conquistarem um dos teoremas inacabados de Hilbert.

Havia, no entanto, uma ironia. Um dos problemas por solucionar catalogados por Hilbert era o antigo problema de provar todas as afirmações verdadeiras em matemática a partir de um conjunto de axiomas propostos. Em 1931, numa conferência onde Hilbert discutia o seu programa, um jovem matemático austríaco, Kurt Gödel, provou que tal era impossível.

Ondas de choque propagaram-se pela comunidade matemática. Dois mil anos de pensamento grego estavam, completa e irrevogavelmente, destruídos. Matemáticos por todo o mundo viram-se reduzidos à mais perfeita incredulidade. Tinham de aceitar o facto de a matemática não ser o conjunto de teoremas perfeito, arrumado, completo e provável em tempos postulado pelos gregos. Até a matemática, que formava a base para compreender o mundo físico à nossa volta, era complicada e incompleta.

4. Alan Turing: Pioneiro da Ciência Computacional

Alguns anos mais tarde, um jovem matemático inglês, intrigado pelo famoso teorema da incompletude de Gödel, encontrou uma forma engenhosa de reformular toda a questão. E, com isso, alteraria para sempre o caminho da ciência computacional.

A capacidade excecional de Alan Turing foi reconhecida bem cedo. A diretora da escola primária que frequentou escreveria que, entre os seus alunos, tinha «meninos inteligentes e meninos trabalhadores, mas o Alan é um génio».³ Ficaria posteriormente conhecido como pai da ciência computacional e da inteligência artificial.

Turing possuía uma determinação feroz para dominar a matemática, apesar de forte oposição e dificuldades. Na verdade, o reitor tentaria ativamente desencorajar o seu interesse pela ciência, alegando que ele estava «a perder tempo numa escola pública». No entanto, esta oposição serviu apenas para inflamar ainda mais a sua determinação. Quando tinha catorze anos de idade, houve uma greve geral que paralisou grande parte do país, mas ele queria tanto estudar que percorreu quase cem quilómetros de bicicleta, sozinho, para estar na escola quando ela abrisse.

Em vez de construir máquinas de calcular cada vez mais complexas, como o motor diferencial de Babbage, Alan Turing acabou por fazer a si próprio uma pergunta diferente: haverá um limite matemático para o que um computador mecânico pode fazer?

Por outras palavras, poderá um computador provar tudo?

Para responder a esta questão, ele tinha de trazer rigor ao campo da ciência computacional que, até então, não era mais do que uma coleção solta de ideias desligadas e invenções de engenheiros excêntricos. Não existia uma maneira sistemática de discutir questões como o limite daquilo que é computável. Assim, em 1936, ele introduziu o conceito daquilo a que se chama hoje uma máquina de Turing universal, um aparelho enganadoramente simples que captava a essência da computação, permitindo que todo esse campo assentasse sobre uma firme base matemática. Hoje, as máquinas de Turing são a base de todos os computadores modernos. Tudo, desde os supercomputadores gigantes do Pentágono, ao telemóvel no seu bolso, são exemplos de máquinas de Turing. Não é exagero dizer que quase toda a sociedade moderna se desenvolveu a partir das máquinas de Turing.

Turing imaginou uma fita infinitamente longa, que continha uma série de quadrados ou células. Dentro de cada quadrado, podíamos colocar um 0 ou um 1, ou podíamos deixá-lo vazio.

Depois um processador lia a fita e podia executar apenas seis operações simples sobre ela. Basicamente, podia substituir um 0 por um 1, ou vice-versa, e deslocar o processador um quadrado para a esquerda ou para a direita:

1 - Pode ler o número no quadrado

2 -Pode escrever um número no quadrado

3 -Pode avançar um quadrado para a esquerda

4 -Pode avançar um quadrado para a direita

5 -Pode alterar o número no quadrado

6 -Pode parar

(A máquina de Turing é escrita em linguagem binária e não de base 10. Em linguagem binária, o número um é representado por 1, o número dois é representado por 10, o número três é representado por 11, o número quatro por 100, e assim sucessivamente. Existe também uma memória onde os números podem ser armazenados.) Depois o resultado numérico final emerge do processador como produto.

Por outras palavras, a máquina de Turing pode pegar num número e transformá-lo noutro, seguindo as ordens precisas do *software*. Turing, assim, reduziu a matemática a um jogo: ao substituir sistematicamente 0 por 1 e vice-versa, seria possível codificar toda a matemática.

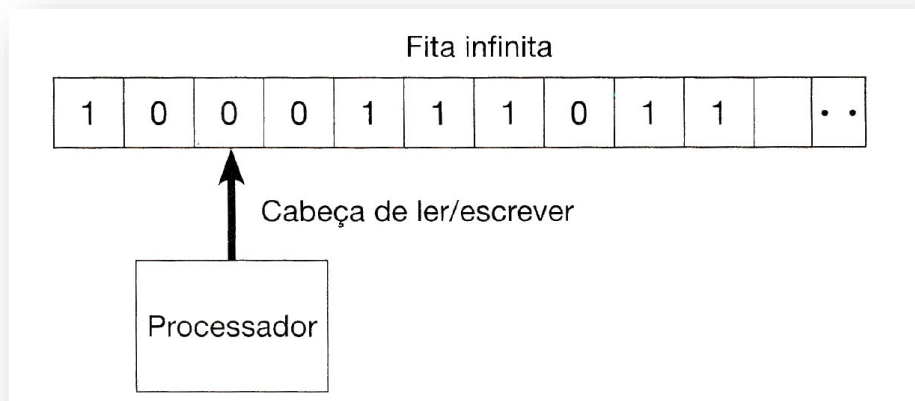


Figura 2: Máquina de Turing.

Uma máquina de Turing consiste (a) numa fita digital de inserção infinitamente longa, (b) numa fita digital de resultado, e (c) num processador que converte a informação inserida num resultado, de acordo com um conjunto fixo de regras. É a base de todos os computadores digitais modernos.

No artigo onde apresentou estas ideias, Turing mostrou, com um conjunto de instruções conciso, que seria possível utilizar a sua máquina para executar todo o tipo de manipulações aritméticas, ou seja, podia somar, subtrair, multiplicar e dividir. Usou então este resultado para provar alguns dos problemas mais difíceis da matemática, reformulando tudo do ponto de vista da computabilidade. A soma total de toda a matemática estava a ser reescrita do ponto de vista da computação.

Por exemplo, vejamos como $2 + 2 = 4$ se faz numa máquina de Turing, o que demonstra como é possível codificar toda a aritmética. Começa-se a fita com a inserção dada pelo número dois, ou 010. Depois avança-se para a célula do meio, onde há um 1, e substitui-se por um 0. Depois avança um passo para a esquerda, onde está um 0, e substitui-se por um 1. Na fita diz agora 100, que equivale a quatro. Se generalizarmos estes comandos, é possível executar qualquer operação que envolva adição, subtração e multiplicação.

Com um pouco mais de trabalho é também possível dividir números.

Turing fez então a si próprio uma pergunta simples, mas importante: poderia o infame teorema da incompletude de Gödel, que envolvia matemática de grau mais elevado, ser provado com a sua máquina de Turing, que era muito mais simples, mas, ainda assim, captava a essência da matemática?

Turing começou por definir aquilo que é computável. Disse, essencialmente, que um teorema é computável se puder ser provado numa quantidade de tempo finita por uma máquina de Turing. Se um teorema precisar de uma quantidade de tempo infinita numa máquina de Turing, então, para todos os efeitos, o teorema não é computável e não sabemos se esse teorema está correto ou não. Logo, não seria provável.

Em termos simples, Turing expressou a questão levantada por Gödel de forma concisa: existirão afirmações verdadeiras que não possam ser computadas numa quantidade de tempo finita por uma máquina de Turing, a partir de um conjunto de axiomas?

Tal como o trabalho de Gödel, Turing mostrou que a resposta é sim.

Uma vez mais, isso veio estilhaçar o antigo sonho de provar a completude da matemática, mas de uma forma intuitiva e simples. Significava que, mesmo com o computador mais potente do mundo,

nunca seria possível provar todas as afirmações verdadeiras na matemática numa quantidade finita de tempo a partir de um conjunto de axiomas.

5. Os Computadores e a Guerra

Era evidente que Turing provara ser um génio matemático do mais alto calibre. A sua pesquisa, contudo, foi interrompida pela Segunda Guerra Mundial. Para contribuir para o esforço de guerra, Turing foi recrutado para efetuar trabalho confidencial nas instalações militares britânicas em Bletchley Park, nos arredores de Londres. Aí, procuravam decodificar os códigos secretos dos nazis. Os cientistas nazis tinham criado uma máquina, chamada Enigma, capaz de pegar numa mensagem, reescrevê-la com um código impossível de decifrar, e depois enviar a mensagem codificada para a máquina de guerra nazi global. Nesse código eram transmitidos os conjuntos de instruções mais sensíveis do mundo: os planos de guerra das forças nazis, em particular das forças navais. O destino da civilização podia depender de decifrar o código da Enigma.

Turing e os colegas lançaram-se ao problema crucial desenhando máquinas de calcular capazes de decifrar sistematicamente esses códigos impenetráveis. O seu primeiro progresso, chamado Bombe, assemelhava-se de certa forma ao motor diferencial de Babbage. Em vez de utilizar mecanismos movidos a vapor, como máquinas anteriores, cujas rodas e engrenagens eram lentas, difíceis de fazer e encravavam com frequência, a Bombe funcionava com rotores, cilindros e relés, todos alimentados por eletricidade.

Turing, porém, estava envolvido também noutro projeto, o Colossus, com um *design* ainda mais engenhoso. Os historiadores creem que se tratou do primeiro *computador eletrônico digital programável* do mundo. Em vez de partes mecânicas, como o motor diferencial ou a Bombe, usaram tubos de vácuo, que conseguem enviar sinais elétricos quase à velocidade da luz. Os tubos de vácuo podem ser comparados com válvulas que controlam o fluxo de água. Ao rodar uma pequena válvula, é possível fechar o fluxo de água num cano muito maior, ou deixá-la correr sem impedimento. Isto, por sua vez, pode representar o número 0 ou 1. Assim, um sistema de canos de água e válvulas pode representar um computador digital, onde a água é como a corrente de eletricidade. Nas máquinas em Bletchley Park, um vasto número de tubos de vácuo podia executar cálculos digitais a velocidades extraordinárias, ao ligar e desligar a corrente de eletricidade nos tubos de vácuo. Assim, o trabalho de Turing e outros substituiu o computador analógico por um computador digital. Uma das versões do Colossus continha 2400 tubos de vácuo e ocupava uma sala inteira.

— Além de serem mais rápidos, os computadores digitais têm outra grande vantagem sobre os sistemas analógicos. Pense em usar uma fotocopidora para duplicar repetidamente uma imagem. De cada vez que recicla a imagem e a copia, perde alguma informação. Se reciclar a mesma imagem uma e outra vez, por fim ela acabará por ficar cada vez mais clara e indistinta, até que desaparece por completo. Assim, os sinais analógicos são propensos a introduzir erros de cada vez que a imagem é copiada.

(Agora, em vez disso, digitalize a imagem de modo a convertê-la numa série de 0s e 1s. Quando digitaliza a imagem pela primeira vez, perderá alguma informação. Contudo, uma imagem digital pode ser copiada vezes sem conta sem perder praticamente informação nenhuma a cada ciclo. Assim, os computadores digitais conseguem ser muitíssimo mais precisos do que os computadores analógicos.)

(Além disso, é fácil editar sinais digitais. Os sinais analógicos, como uma imagem, são extraordinariamente difíceis de alterar. Mas os sinais digitais podem ser alterados por um toque num botão, com recurso a simples algoritmos matemáticos.)

Sob a pressão imensa do tempo de guerra, Turing e a sua equipa conseguiram finalmente decifrar o código nazi, por volta de 1942, o que ajudou a derrotar a frota naval nazi no Atlântico. Pouco depois, os Aliados conseguiam penetrar nos planos mais secretos das forças militares nazis. Os Aliados podiam ouvir secretamente as instruções dos nazis para as suas forças e antecipar os seus planos de guerra. O Colossus ficou concluído em 1944, a tempo da invasão final da Normandia, para a qual os nazis não estavam adequadamente preparados. E isso selou o destino do império nazi.

Tratava-se de progressos de proporções monumentais, alguns dos quais foram imortalizados no filme de 2014, *O Jogo da Imitação*. Sem estes sucessos notáveis e cruciais, a guerra podia ter-se arrastado durante anos, causando sofrimento e miséria inimagináveis. Historiadores como Harry Hinsley calcularam que o trabalho de Turing e outros em Bletchley Park encurtou a duração

da guerra em cerca de dois anos e salvou mais de 14 milhões de vidas. O mapa do mundo, e as vidas de um número incalculável de inocentes, foram irrevogavelmente alterados por este trabalho pioneiro.

Nos Estados Unidos, os trabalhadores que construíram a bomba atômica foram celebrados e considerados heróis de guerra e prodígios, mas um destino diferente aguardava Turing no Reino Unido. Devido às leis nacionais de sigilo, os seus feitos ficaram classificados como confidenciais durante décadas e, assim, ninguém soube do seu enorme contributo para o esforço de guerra.

6. Turing e a Criação da IA

Depois da guerra, Turing regressou ao antigo problema que o intrigara na juventude: a inteligência artificial. Em 1950, iniciou o seu trabalho de referência sobre o tema com a frase: «Proponho levar em consideração a seguinte questão: serão as máquinas capazes de pensar?»

Ou, para colocar a questão de outra forma, será o cérebro uma espécie de máquina de Turing?

Alan Turing estava saturado de todas as discussões filosóficas que remontavam a séculos passados sobre o significado de consciência, de alma e daquilo que nos torna humanos. No final de contas, pensava ele, toda essa discussão era inútil, porque não havia nenhum teste ou prova padrão definitivos para a consciência.

Assim, Turing criou o famoso teste de Turing. Ponha-se um humano numa sala fechada e um robô noutra. Podemos fazer a ambos quaisquer perguntas, por escrito, e ler as suas respostas. O desafio é: seremos capazes de determinar em qual das salas está o humano? Ele chamava a este teste o jogo da imitação.

No seu artigo, escreveu: «Creio que dentro de aproximadamente cinquenta anos será possível programar computadores, com uma capacidade de armazenamento de cerca de 10^9 , para os fazer jogar o jogo da imitação tão bem que um interrogador comum não terá mais do que 70 por cento de hipóteses de fazer a identificação correta após cinco minutos de interrogatório»⁴

O teste de Turing substitui o debate filosófico interminável com um teste simples e reproduzível, para o qual há uma simples resposta de sim ou não. Ao contrário de uma questão filosófica, para a qual não existe muitas vezes resposta, este teste tem resolução.

Além do mais, evita a questão traiçoeira do «pensamento», ao comparar simplesmente com aquilo que os humanos são capazes de fazer. Não há necessidade de definir aquilo que entendemos como «consciência», «pensamento» ou «inteligência». Por outras palavras, se algo parece um pato e age como um pato, talvez *seja* um pato, independentemente de como o definirmos. Turing deu uma definição operacional de inteligência.

Até agora, nenhuma máquina conseguiu passar de forma consistente no teste de Turing. De poucos em poucos anos, fazem-se manchetes quando o teste de Turing é levado a cabo, mas de todas as vezes os juízes conseguiram distinguir entre um humano e uma máquina, ainda que esta possa mentir e inventar factos.

Porém, um incidente infeliz poria fim a todo o trabalho revolucionário de Turing.

Em 1952, alguém assaltou a residência de Turing. Quando a polícia foi investigar, encontraram evidências de que Turing era *gay*. Foi assim detido e condenado, ao abrigo da Lei de Alteração do Direito Penal de 1885. O castigo foi bastante pesado. Deram-lhe a escolher entre ser preso ou sujeitar-se a um tratamento hormonal. Quando escolheu este último, foi-lhe administrado dietilestilbestrol, uma forma sintética da hormona sexual feminina estrogénio, em resultado do qual lhe cresceram os seios e se tornou impotente. Os tratamentos controversos duraram um ano. Então, um dia, Turing foi encontrado morto em casa. Morreu de uma dose fatal do veneno cianeto. Disse-se que tinha ao seu lado uma maçã envenenada, meio comida, com algumas pessoas a especular que fora esse o método por ele eleito para se suicidar.

É uma tragédia que um dos criadores da revolução computacional, que ajudou a salvar milhões de vidas e a derrotar o fascismo, tenha, de certa forma, sido destruído pelo seu próprio país.

Porém, o seu legado sobrevive em cada computador digital no planeta. Hoje, todos os computadores no mundo devem a sua arquitetura à máquina de Turing. A economia mundial depende do trabalho pioneiro desse homem.

Isto, no entanto, é apenas o princípio da nossa história. O trabalho de Turing baseia-se em algo chamado determinismo, ou seja, a ideia de que o futuro é determinado antecipadamente. Significa que, se introduzíssemos um problema numa máquina de Turing, obteríamos sempre a mesma resposta. Tudo, neste sentido, é previsível.

Assim, se o Universo fosse uma máquina de Turing, todos os eventos futuros teriam sido determinados no instante em que o Universo nasceu.

Todavia, outra revolução na forma como entendemos o mundo viria derrubar esta ideia. O determinismo cairia por terra. Da mesma forma que Gödel e Turing ajudaram a mostrar que a matemática é incompleta, talvez os computadores do futuro tenham de lidar com a incerteza fundamental introduzida pela física.

Assim, os matemáticos focar-se-iam numa pergunta diferente: será possível construir uma máquina de Turing quântica?

¹ «Our Founding Figures: Ada Lovelace», Tetra Defense, 17 de abril de 2020; <https://arcticwolf.com/tetra-defense/>.

² «Ada Lovelace», Computer History Museum [Museu da História do Computador]; <https://www.computerhistory.org/babbage/adalovelace/>.

³ Colin Drury, «Alan Turing: The Father of Modern Computing Credited with Saving Millions of Lives», The Independent, 15 de julho de 2019; <http://www.independent.co.uk/news/uk/home-news/alan-turing-ps50-note-computers-maths-enigma-codebreaker-ai-test-a9005266.html>.

⁴ Alan Turing, «Computing Machinery and Intelligence», *Mind* 59 (1950): 433-60; https://courses.edx.org/asset-v1:MITx+24.09x+3T2015+type@asset+block/5_turing_computing_machinery_and_intelligence.pdf.

CAPÍTULO 3

Ascensão do Quantum

Max Planck, o criador da teoria quântica, era um homem de muitas contradições. Por um lado, era extremamente conservador. Talvez porque o pai era professor de Direito na Universidade de Kiel e a família tinha uma longa e distinta tradição de serviço público. Tanto o avô como o bisavô haviam sido professores de Teologia, e um dos seus tios era juiz.

Planck era cauteloso no trabalho, impecável em maneiras e um pilar da sociedade. A avaliar pelas aparências, este homem afável seria a última pessoa que julgaríamos capaz de vir a tornar-se um dos maiores revolucionários de sempre, deitando por terra todas as preciosas noções de séculos passados ao abrir as comportas ao *quantum*. Mas foi precisamente isso que ele fez.

Em 1900, os principais cientistas estavam firmemente convencidos de que o mundo à sua volta podia ser totalmente explicado pelo trabalho de Isaac Newton, cujas leis descreviam os movimentos do Universo, e de James Clerk Maxwell, que descobriu as leis da luz e do eletromagnetismo. Tudo, desde o movimento de planetas gigantes no espaço, a balas de canhão e relâmpagos, podia ser explicado por Newton e Maxwell. Dizia-se que o Gabinete de Patentes dos Estados Unidos chegara até a ponderar o

encerramento, porque tudo o que podia ser inventado já fora inventado.

Segundo Newton, o Universo era um relógio que trabalhava de acordo com as suas três leis do movimento, de forma precisa e predeterminada. A isto chamava-se determinismo newtoniano, e foi a teoria dominante durante séculos. (Por vezes é também chamado física clássica, para se distinguir da física quântica.)

Contudo, havia um problema aborrecido. Restavam ainda alguns fios soltos e, se os puxássemos, esta elaborada arquitetura newtoniana acabaria por se desmanchar.

Os artesãos da Antiguidade sabiam que, se aquecessem o barro a temperaturas suficientemente elevadas numa fornalha, ele emitiria um brilho intenso. Começaria por ficar vermelho incandescente, depois amarelo incandescente e finalmente de um tom branco-azulado incandescente. Vemo-lo de cada vez que acendemos um fósforo. A parte de cima da chama, a mais fria, é avermelhada. No centro, a chama é amarelada. E, nas condições certas, a parte inferior da chama é branca-azulada.

Os físicos tentaram derivar esta bem conhecida propriedade dos objetos quentes e fracassaram estrondosamente. Sabiam que o calor não era mais do que átomos em movimento. Quanto maior a temperatura de um objeto, mais depressa os átomos se movem. Sabiam também que os átomos têm eles próprios cargas elétricas. Se movimentarmos um átomo com carga a velocidade suficiente,

ele emana uma radiação eletromagnética (como rádio ou luz), segundo as leis de James Clerk Maxwell. A cor de um objeto quente indica a frequência da radiação.

Assim, usando a teoria de Newton aplicada ao átomo, e a teoria da luz de Maxwell, é possível calcular a luz emitida por um objeto quente. Até aqui, tudo muito bem.

Porém, quando o cálculo é realmente efetuado, depara-se-nos um desastre. Descobrimos que a energia emitida pode tornar-se infinita em frequências elevadas, o que é impossível. A isto chama-se a catástrofe de Rayleigh-Jeans e veio mostrar aos físicos que existia uma lacuna evidente na mecânica newtoniana.

Um dia, Planck tentou derivar a catástrofe de Rayleigh-Jeans para a sua aula de física, mas com um método estranho e inédito. Estava farto de o fazer sempre da mesma maneira antiquada e assim, por motivos unicamente pedagógicos, fez uma suposição bizarra. Supôs que a energia emitida por um átomo só podia encontrar-se em minúsculos pacotes discretos de energia, a que se chama *quanta*. Tratava-se de uma heresia, pois as equações de Newton afirmavam que a energia devia ser contínua, não em pacotes. Porém, quando Planck postulou que a energia ocorria em pacotes de um certo tamanho, encontrou precisamente a curva correta a ligar a temperatura e a energia para a luz.

Foi uma descoberta que ficaria para a história.

1. Nascimento da Teoria Quântica

Era o primeiro passo num longo processo que, por fim, acabaria por resultar no computador quântico.

A perspectiva revolucionária de Planck significava que a mecânica newtoniana estava incompleta e era necessária a emergência de uma nova física. Tudo o que julgávamos saber sobre o Universo teria de ser completamente reescrito.

Porém, sendo um conservador assumido, Planck avançou com a sua ideia cautelosamente, afirmando de modo diplomático que, se introduzíssemos esse truque dos pacotes de energia como exercício, seria possível reproduzir exatamente a curva de energia encontrada na natureza.

Para fazer o cálculo, teve de introduzir um número representativo do tamanho do *quantum* de energia. Chamou-lhe $\hbar$ (também conhecido como constante de Planck, $6,62... \times 10^{-34}$ joules-segundo), que é um número extraordinariamente pequeno. No nosso mundo, nunca vemos efeitos quânticos porque $\hbar$ é tão pequeno. Contudo, se pudéssemos de alguma forma variar o $\hbar$, seria possível passar de forma contínua do mundo quântico para o nosso mundo quotidiano. Quase como quem roda o botão sintonizador de um rádio, podíamos rodá-lo todo para baixo, de modo que $\hbar = 0$, e teríamos o mundo do senso comum de Newton, onde não existem efeitos quânticos. Mas se o rodássemos em sentido contrário, teríamos o mundo bizarro e subatômico do

quantum, um mundo que, como os físicos em breve viriam a descobrir, se assemelhava ao *Limiar da Realidade*.

Isto é também passível de ser aplicado a um computador. Se deixarmos que o $\hbar$ chegue a zero, temos a clássica máquina de Turing. Mas se deixarmos que o $\hbar$ aumente, então começam a vir ao de cima os efeitos quânticos e, aos poucos, a máquina de Turing clássica converte-se num computador quântico.

Embora a sua teoria se ajustasse indiscutivelmente aos dados experimentais e abrisse um ramo inteiramente novo da física, Planck foi perseguido durante anos por crentes obstinados e reacionários na ideia newtoniana clássica. Planck escreveu, descrevendo esta saraivada de oposição: «Uma nova verdade científica não triunfa por convencer os seus adversários e os fazer ver a luz, mas sim porque os adversários acabam por morrer e uma nova geração cresce familiarizada com ela.»¹

Porém, por mais feroz que fosse a oposição, as evidências começaram a acumular-se em confirmação da teoria quântica. Estava incontestavelmente correta.

Por exemplo, a luz, quando atinge um metal, pode remover um eletrão, criando uma pequena corrente elétrica, o que é conhecido como efeito fotoelétrico. É isso que possibilita que um painel solar absorva luz e a converta em eletricidade. (É também algo vulgarmente utilizado em muitos aparelhos, como as calculadoras solares, que trocam as pilhas por células solares, e as câmaras

digitais modernas, que convertem a luz do objeto em sinais elétricos.)

O homem que explicou finalmente esse efeito era um físico desconhecido e falido, que trabalhava sozinho num obscuro gabinete de patentes em Berna, Suíça. Em estudante, faltara a tantas aulas que os seus professores lhe escreveram cartas de recomendação pouco lisonjeiras, o que levou a que fosse rejeitado em todos os cargos no ensino a que se candidatou depois de se formar. Era frequente encontrar-se desempregado e passou por uma série de trabalhos variados, como explicador e vendedor. Chegou mesmo a escrever, numa carta aos pais, que talvez tivesse sido melhor se nunca tivesse nascido. Por fim, acabou como funcionário de nível inferior no gabinete de patentes. A maior parte das pessoas considerá-lo-ia um fracassado.

O homem que explicou o efeito fotoelétrico foi Albert Einstein, e fê-lo com recurso à teoria de Planck. Na sequência do trabalho de Planck, Einstein afirmou que a energia luminosa podia ocorrer em pacotes discretos ou *quanta* de energia (mais tarde, viriam a chamar-se fótons) capazes de remover eletrões de um metal.

Assim, começou a emergir um novo princípio físico. Einstein introduziu o conceito de «dualidade», ou seja, que a energia luminosa tem uma natureza dual. A luz podia agir como uma partícula, o fóton, ou como uma onda, como na ótica. De alguma maneira, a luz tinha duas formas possíveis.

Em 1924, um jovem estudante de doutoramento, Louis de Broglie, usando as ideias de Planck e Einstein, deu o próximo grande salto. Se a luz pode ocorrer tanto em forma de partícula como de onda, então por que não a matéria? Talvez os elétrons possuíssem também dualidade.

Tratava-se de uma afirmação herética, uma vez que se acreditava que a matéria era composta por partículas chamadas átomos, uma ideia introduzida por Demócrito dois mil anos antes. Porém, uma experiência inteligente acabaria por deitar por terra essa convicção.

Quando atiramos pedras a um lago, formam-se ondas que se expandem e colidem umas com as outras, criando assim na superfície do lago um padrão de interferência semelhante a uma teia. Isto explica as propriedades das ondas, mas acreditava-se que a matéria tinha por base partículas corpusculares, que não possuem um padrão de interferência como as ondas.

Mas agora tomemos duas folhas de papel paralelas. Na primeira folha, abre-se dois pequenos cortes e através dos cortes faz-se incidir um raio de luz. Uma vez que a luz tem propriedades ondulatórias, o que surge na segunda folha é um padrão distinto de linhas verticais claras e escuras. À medida que as ondas passam pelos dois cortes, interferem umas com as outras na segunda folha, amplificando-se e cancelando-se mutuamente, criando estas faixas conhecidas como padrões de interferência. Isso era bem conhecido.

Agora, modifique-se a experiência substituindo o raio de luz por um raio de elétrons. Se um raio de elétrons fosse disparado através dos dois cortes na primeira folha de papel, seria de esperar ver duas faixas luminosas distintas na outra folha. Isto porque se julgava que o elétron era uma partícula corpuscular, que passaria ou pelo primeiro corte ou pelo segundo, mas não por ambos.

Quando esta experiência foi reproduzida com elétrons, os investigadores encontraram um padrão ondulatório, semelhante ao efeito do raio de luz. Os elétrons estavam a comportar-se como se fossem ondas, não meras partículas corpusculares. Há muito que se pensava que os átomos eram a derradeira unidade de matéria. Agora, estavam a dissolver-se em ondas, como a luz. Estas experiências demonstravam que os átomos podiam agir como uma onda ou como uma partícula.

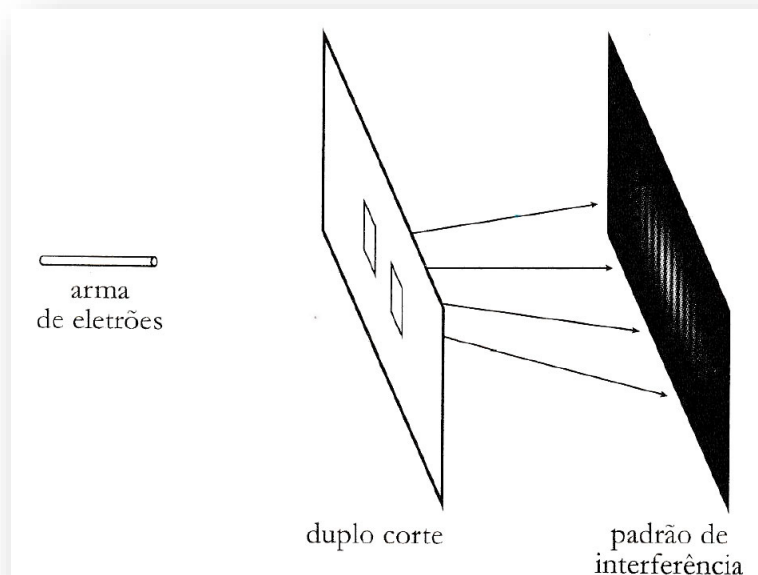


Figura 3: Experiência do duplo corte.

Se um raio de elétrons atingir uma barreira com dois cortes, em vez de formar uma imagem com dois cortes distintos, forma um padrão de interferência ondulatório complexo. Isto é também verdade se for disparado apenas um elétron. Em certo sentido, um elétron atravessou ambos os

buracos. Ainda hoje, os físicos debatem como pode um elétron estar em dois lugares ao mesmo tempo.

Um dia, o físico austríaco Erwin Schrödinger estava a discutir com um colega a ideia da matéria como onda. Mas, perguntou o colega, se a matéria pode agir como uma onda, então qual é a equação a que tem de obedecer?

Schrödinger ficou intrigado com a questão. Os físicos estavam familiarizados com ondas, uma vez que eram úteis no estudo das propriedades óticas da luz, e muitas vezes analisadas sob a forma de ondas do oceano ou ondas de som, na música. Assim, Schrödinger dedicou-se a procurar a equação de ondas para os elétrons. Era uma equação que viria revolucionar completamente o nosso entendimento do Universo. Em certo sentido, todo o Universo, com todos os seus elementos químicos, incluindo você e eu, somos soluções da equação de onda de Schrödinger.

2. Nascimento da Equação de Onda

Hoje, a equação de onda de Schrödinger é a base da teoria quântica, ensinada em qualquer curso de física avançada. Constitui o âmago da teoria quântica. Por vezes, passo um semestre inteiro na Universidade da Cidade de Nova Iorque a ensinar as implicações desta única equação.

Desde então, os historiadores têm-se esforçado por compreender o que Schrödinger estava a fazer no preciso instante em que descobriu a famosa equação, a base da teoria quântica.

Quem ou o que ajudou a inspirar uma das maiores criações do século?

Há muito que os biógrafos sabem que Schrödinger era conhecido por ter inúmeras namoradas. (Acreditava no amor livre e tinha um caderno onde registava todas as suas amantes, com símbolos secretos a indicar cada encontro. Muitas vezes surpreendia os visitantes por viajar acompanhado da mulher e da amante.)

Pela análise dos apontamentos de Schrödinger, os historiadores concordam que, no fim de semana em que ele descobriu a sua famosa equação, estava com uma das namoradas na Villa Herwig nos Alpes. Alguns historiadores consideraram-na a musa que inspirou a revolução quântica.

A equação de Schrödinger foi uma bomba. Constituiu um sucesso imediato e avassalador. Anteriormente, físicos como Ernest Rutherford julgavam que o átomo era como um sistema solar, com minúsculos eletrões corpusculares que giravam em torno de um núcleo. Todavia, esta imagem era demasiado simplista, pois não dizia nada sobre a estrutura do átomo e o porquê de haver tantos elementos.

Porém, se o eletrão fosse uma onda, então a onda formaria ressonâncias discretas de frequências definidas ao circular em torno do núcleo. Ao catalogar as ressonâncias que um eletrão podia fazer, encontrava-se um padrão ondulatório que encaixava na perfeição na descrição do átomo de hidrogénio.

Como é que isso funciona? Quando cantamos no duche, apenas algumas das ondas da nossa voz conseguem ressoar entre as paredes, o que produz um som agradável. De súbito, quando cantamos no duche, tornamo-nos grandes cantores de ópera. Outras frequências, que não encaixam corretamente no duche, acabam por morrer e se desvanecer. De forma semelhante, se tocarmos um tambor, ou um trompete, apenas certas frequências conseguem vibrar na superfície do tambor ou nos tubos do trompete. É esta a base da música.

Ao compararmos as ressonâncias previstas pelas ondas de Schrödinger com elementos concretos, encontrou-se uma correspondência direta extraordinária. Os físicos, que há décadas estavam paralisados na tentativa de compreender o átomo, eram agora capazes de espreitar para dentro do próprio átomo. Ao comparar estes padrões ondulatórios com a cerca de centena de elementos químicos encontrados na natureza por Dmitri Mendeleev e outros, era possível explicar as propriedades químicas dos elementos usando matemática pura.

Tratava-se de um feito assombroso. O físico Paul Dirac escreveria, profeticamente: «As leis fundamentais necessárias para o tratamento matemático de grande parte da física e de toda a química ficam, assim, completamente conhecidas, e a única dificuldade encontra-se no facto de a aplicação destas leis conduzir a equações demasiado complexas para serem resolvidas.»²

3. O Átomo Quântico

A tabela periódica dos elementos, meticulosamente compilada pelos químicos ao longo dos séculos, podia agora ser explicada apenas com uma equação, por meio da compreensão das ressonâncias de ondas de elétrons conforme elas orbitam o núcleo do átomo.

Para ver como a tabela periódica emerge da equação de Schrödinger, imaginemos o átomo como um hotel. Cada piso tem um número diferente de quartos, e cada quarto pode acolher até dois elétrons. Mais ainda, cada quarto tem de ser ocupado em determinada ordem, ou seja, o quarto do primeiro andar tem de estar ocupado antes que o segundo piso possa ser reservado. No primeiro piso, temos um quarto ou «orbital» chamado 1S, com capacidade para um ou dois elétrons. O quarto 1S corresponde ao hidrogénio, no caso de um elétron, e ao hélio, no caso de dois elétrons.

No segundo piso, temos dois tipos de quartos, chamados as orbitais 2S e 2P. No quarto 2S, podemos acomodar dois elétrons, mas temos também três quartos P, classificados como P_x , P_y e P_z , e cada um contém dois elétrons. Isto significa que podemos ter até oito elétrons no segundo piso. Estes quartos, quando ocupados, correspondem por sua vez a lítio, berílio, boro, carbono, nitrogénio, oxigénio, flúor e néon.

Quando um eletrão não está emparelhado no seu quarto, pode ser partilhado entre hotéis diferentes que tenham quartos disponíveis. Assim, quando dois átomos se aproximam um do outro, a onda de um eletrão desemparelhado pode ser partilhada entre átomos, e a onda do eletrão salta para trás e para a frente entre os dois. Isto cria uma ligação, formando uma molécula.

As leis da química podem ser explicadas à medida que enchamos os quartos de hotel. No nível mais baixo, se tivermos dois eletrões na orbital S, então a orbital 1S está cheia. Isso significa que o hélio, que tem apenas dois eletrões, não pode formar ligações químicas, portanto é quimicamente inerte e não forma moléculas. Da mesma forma, se tivermos oito eletrões no segundo nível, então preenchemos todas as orbitais, pelo que o néon também não pode formar moléculas. Desta forma, é possível explicar por que existem gases inertes como o hélio, o néon e o cripton.

Isso ajuda também a explicar a química da vida. O elemento orgânico mais importante é o carbono, que tem quatro ligações e, portanto, pode criar hidratos de carbono, que são os blocos de construção da vida. Se olharmos para a tabela, vemos que o carbono tem quatro orbitais vazias no segundo nível, o que lhe permite ligar-se a quatro outros átomos de oxigénio, hidrogénio, etc., para formar proteínas e até ADN. As moléculas do nosso corpo são derivados deste simples facto.

A questão é que, ao determinar quantos eletrões há em cada nível, é possível prever de forma simples e elegante muitas das propriedades químicas da tabela periódica, usando matemática

pura. Assim, toda a tabela periódica pode ser, em grande medida, prevista a partir dos primeiros princípios. Todos os mais de cem elementos da tabela podem ser grosseiramente descritos pelos elétrons em várias ressonâncias, em torno do núcleo, como se enchêssemos quartos de hotel, piso a piso.

Foi avassalador compreender que uma única equação podia explicar os elementos que compõem todo o Universo, incluindo a própria vida. De súbito, o Universo era mais simples do que qualquer pessoa pensava.

A química fora reduzida a física.

4. Ondas de Probabilidade

Por mais espetacular e poderosa que fosse a equação de Schrödinger, havia ainda uma questão importante, embora embaraçosa. Se o elétron era uma onda, o que está a ondular?

A solução dividiria ao meio a comunidade da física, virando os físicos uns contra os outros durante décadas. Desencadearia um dos debates mais controversos na história da ciência, desafiando a nossa própria noção de existência. Ainda hoje há conferências a debater todas as *nuances* matemáticas e implicações filosóficas dessa divisão. E um dos derivados do debate viria a ser o computador quântico.

O físico Max Born acendeu o rastilho dessa explosão quando propôs que a matéria consiste em partículas, *mas a probabilidade de encontrar essa partícula é dada por uma onda*.

Isto dividiu de imediato a comunidade da física em duas, com os fundadores da «velha» guarda de um lado (incluindo Planck, Einstein, de Broglie e Schrödinger, todos contra esta nova interpretação), e Werner Heisenberg e Niels Bohr do outro, criando assim a escola de mecânica quântica de Copenhaga.

Esta nova interpretação era ir longe demais, até mesmo para Einstein. Significava que podiam apenas calcular probabilidades, nunca certezas. Nunca saberíamos precisamente onde estava uma partícula; podíamos apenas calcular a probabilidade de que ali estivesse. Em certo sentido, os elétrons podem estar em dois lugares ao mesmo tempo. Werner Heisenberg, que propôs uma formulação alternativa mas equivalente da mecânica quântica, chamaria a isto o princípio da incerteza.

Toda a ciência estava a ser virada de pernas para o ar perante os seus olhos. Antes, os matemáticos haviam sido forçados a confrontar o teorema da incompletude, e agora os físicos tinham de confrontar o princípio da incerteza. A física, tal como a matemática, estava de certa forma incompleta.

Assim, com esta nova interpretação, os princípios da teoria quântica podiam finalmente ser expressos. Eis um resumo (muito simplificado) das bases da mecânica quântica:

- 1 -Começa-se com a função de onda $\Psi(x)$, que descreve um elétron localizado no ponto x .
- 2 -Insere-se a onda na equação de Schrödinger $H\Psi(x) = i(\hbar/\pi)\partial_t\Psi(x)$. (H , que é conhecido como hamiltoniano, corresponde à energia do sistema.)
- 3 -Cada solução desta equação é rotulada como um índice n , assim, em geral, $\Psi(x)$ é uma soma de sobreposição de todos estes estados múltiplos.
- 4 -Quando é efetuada uma medição, a função de onda «colapsa», deixando apenas um estado $\Psi(x)_n$, ou seja, todas as outras ondas são postas a zero. A probabilidade de encontrar o elétron neste estado é dada pelo valor absoluto de $\Psi(x)_n$.

Estas regras simples podem, em princípio, derivar tudo o que se conhece sobre química e biologia. O que é controverso quanto à mecânica quântica está contido nas terceira e quarta afirmações. A terceira afirmação diz que, no mundo subatômico, um elétron pode existir simultaneamente como a soma de diferentes estados, o que é impossível na mecânica newtoniana. Na verdade, antes que seja feita uma medição, o elétron existe, neste submundo, como uma coleção de estados diferentes.

Porém, a alegação mais crucial e chocante é a número quatro, que afirma que apenas depois de ser efetuada uma medição é que

a onda finalmente «colapsa» e produz a resposta certa, dando a probabilidade de encontrar o eletrão nesse estado. Não temos como saber em que estado o eletrão está enquanto não for efetuada uma medição.

A isto, chama-se o problema da medição.

Para refutar a última afirmação, Einstein diria: «Deus não joga aos dados com o Universo.» Porém, reza a lenda que Niels Bohr ripostou: «Pare de dizer a Deus o que pode ou não pode fazer.»

São precisamente os postulados 3 e 4 que tornam possíveis os computadores quânticos. O eletrão é agora descrito como a simultânea soma de diferentes estados quânticos, o que dá aos computadores quânticos a sua potência de cálculo. Enquanto os computadores clássicos apenas somam sobre 0s e 1s, os computadores quânticos somam sobre todos os estados quânticos $\Psi(x)_n$, entre 0 e 1, o que aumenta vastamente o número de estados e, por consequência, o seu alcance e potência.

Ironicamente, Schrödinger, cujas equações deram início ao movimento da mecânica quântica, começou a rejeitar esta versão da sua própria teoria. Lamentava o facto de ter tido alguma coisa que ver com ela. Considerava que um simples paradoxo, que demonstrava o absurdo desta interpretação radical, a destruiria para sempre, e tudo começou com um gato.

5. O Gato de Schrödinger

O gato de Schrödinger é o animal mais famoso do mundo da física. Schrödinger acreditava que podia derrubar de uma vez por todas, essa heresia. Imaginem, escreveu ele, que há um gato numa caixa fechada, que contém também um frasco de gás venenoso. O frasco está ligado a um martelo, que está ligado a um contador Geiger, ao lado de uma certa quantidade de urânio. Se um átomo do urânio se desintegrar, ativa o contador Geiger, que solta o martelo, libertando assim o veneno e matando o gato.

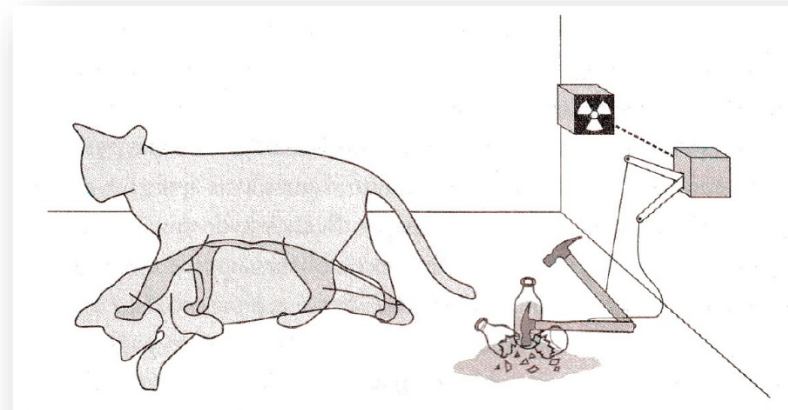


Figura 4: O gato de Schrödinger.

Na mecânica quântica, para descrever um gato fechado numa caixa com um frasco de gás venenoso, e um martelo ativado por um contador Geiger, é preciso adicionar a função de onda de um gato morto à de um gato vivo. Antes de abrir a caixa, o gato não está morto nem vivo. O gato encontra-se numa sobreposição de ambos os estados. Até hoje os físicos continuam a debater a questão de como pode o gato estar morto e vivo ao mesmo tempo.

Ora aqui está a questão que tem desconcertado os maiores físicos a nível mundial no último século: *Antes de abrirmos a caixa, o gato está morto ou vivo?*

Um newtoniano diria que a resposta é óbvia: o senso comum diz que o gato está vivo ou morto, mas não ambas as coisas. Só é possível haver um estado de cada vez. Mesmo antes de a caixa ser aberta, o destino do gato estava já predeterminado.

Contudo, Werner Heisenberg e Niels Bohr tinham uma interpretação radicalmente diferente.

Dizem eles que a melhor representação do gato é pela soma de duas ondas: a onda do gato vivo e a do gato morto. Quando a caixa ainda está fechada, o gato só pode existir como a sobreposição ou soma das duas ondas, representando simultaneamente um gato vivo e um gato morto.

Mas está o gato vivo ou morto? Enquanto a caixa estiver fechada, esta pergunta não faz qualquer sentido. *No micromundo, as coisas não existem em estados definidos, mas apenas como a soma de todos os estados possíveis.* Finalmente, quando a caixa se abrir e observarmos o gato, a onda colapsa miraculosamente e revela o gato como estando vivo ou morto, mas não ambos. Assim, o processo de medição une o micromundo e o macromundo.

Isto tem profundas implicações filosóficas. Os cientistas passaram muitos séculos a argumentar contra algo chamado solipsismo, a ideia, defendida por filósofos como George Berkeley, de que os objetos não existiam realmente enquanto não os observássemos. A filosofia em questão pode ser resumida como «Ser é ser percebido.» Se uma árvore caísse na floresta, mas não

estivesse lá ninguém para a ouvir cair, então talvez a árvore não tivesse realmente caído. A realidade, neste quadro, é uma idealização humana. Ou, como disse uma vez o poeta John Keats: «Nada é real até ser experimentado.»

A teoria quântica, porém, veio complicar esta situação. Na teoria quântica, antes de olharmos para uma árvore, ela pode existir em todos os estados possíveis, como por exemplo lenha, tábuas, cinzas, palitos, uma casa ou serradura. Contudo, quando olhamos efetivamente para a árvore, todas as ondas representativas destes estados colapsam miraculosamente num único objeto, a árvore comum.

Todavia, como um observador requer consciência, isso significa que, em certo sentido, a consciência determina a existência. Os seguidores de Newton ficaram chocados por o solipsismo estar de novo a insinuar-se na física.

Einstein detestava essa ideia. Tal como Newton, Einstein acreditava em «realidade objetiva», o que significa que o objeto existe em estados concretos e bem definidos, ou seja, não é possível estar em dois lados ao mesmo tempo. Isto é também conhecido como determinismo newtoniano, a ideia de que, tal como já vimos antes, é possível determinar exatamente o futuro usando as leis fundamentais da física.

Einstein troçava frequentemente da teoria quântica. Sempre que tinha visitas em casa, pedia-lhes que olhassem para a Lua. Será que a Lua existe, perguntava ele, porque um rato olha para ela?

6. Micromundo vs. Macromundo

O matemático John von Neumann, que ajudou a desenvolver a física da teoria quântica, acreditava na existência de uma «parede» invisível que separa o micromundo do macromundo. Cada um desses mundos obedecia a leis da física diferentes, mas era possível provar que se podia deslocar à vontade essa parede, para trás e para a frente, e o desfecho de qualquer experiência permaneceria igual. Por outras palavras, o micromundo e o macromundo obedeciam a dois conjuntos diferentes de leis da física, mas tal não afeta as medições porque não importa exatamente onde se opta por colocar a separação entre micro e macromundo.

Quando lhe pediam para esclarecer melhor o significado dessa parede, ele dizia: «Uma pessoa acaba por se habituar.»

Porém, por mais louca que parecesse ser a teoria quântica, o seu sucesso experimental era indiscutível. Muitas das suas previsões (ao prever as propriedades de eletrões e fótons naquilo a que se chama eletrodinâmica quântica) condiziam com os dados com uma precisão de uma parte em dez mil milhões, o que a tornava na teoria de maior sucesso de todos os tempos. O átomo, em tempos o objeto mais misterioso do Universo, revelava-nos de súbito os seus segredos mais profundos. A geração seguinte a acolher a teoria

quântica foi galardoada com dezenas de Prémios Nobel. Nem uma única experiência violou a teoria quântica.

O Universo era, inegavelmente, um Universo quântico.

Einstein, no entanto, resumiu os sucessos da teoria quântica desta maneira: «Quanto mais bem-sucedida se torna a teoria quântica, mais disparatada parece.»

Aquilo a que os críticos da mecânica quântica mais se opunham era essa separação artificial entre o macromundo em que vivemos e o estranho e bizarro mundo do *quantum*. Os críticos diziam que devia haver um contínuo entre o micromundo e o macromundo. Na realidade, não existe nenhuma «parede».

Se conseguíssemos hipoteticamente viver num mundo completamente quântico, isso significaria que tudo aquilo que sabemos sobre o senso comum estaria errado. Por exemplo:

- Podemos estar em dois sítios ao mesmo tempo.
- Podemos desaparecer e reaparecer noutro lado.
- Podemos atravessar paredes e penetrar em barreiras sem dificuldade, algo a que se chama «efeito de túnel».
- As pessoas que morreram no nosso Universo podem estar vivas noutro.

- Quando atravessamos uma sala, na verdade estamos a seguir simultaneamente, por mais bizarro que pareça, todos os infinitos caminhos possíveis através da sala.

Como diria Bohr: «Quem não se sentir chocado pela teoria quântica, é porque não a compreendeu.»

Tudo isto dá um jeitão a séries como *A Quinta Dimensão*. Porém, miraculosamente, é precisamente aquilo que os eletrões fazem, só que o fazem essencialmente no interior do átomo, onde não os conseguimos ver nessas acrobacias. É por isso que temos *lasers*, transístores, computadores digitais, a Internet. Isaac Newton ficaria chocado se conseguisse de alguma forma observar todas as contorções atômicas que os eletrões efetuam para tornar possíveis os computadores e a Internet. Mas o mundo moderno desabaria se baníssemos a teoria quântica e colocássemos a zero a constante de Planck. Todos os miraculosos aparelhos eletrónicos nas nossas salas de estar são possíveis precisamente porque os eletrões são capazes destes truques fantásticos.

No entanto, nunca vemos esses efeitos na nossa vida, porque somos formados por biliões e biliões de átomos, onde esses efeitos quânticos se equilibram e anulam, e porque o tamanho dessas flutuações quânticas é a constante de Planck $\hbar$, que é um número muito pequeno.

7. Entrelaçamento

Em 1930, Einstein estava farto. Na sexta Conferência de Solvay, em Bruxelas, Einstein decidiu desafiar diretamente Niels Bohr, o principal proponente da mecânica quântica. Seria o Embate de Titãs, com os maiores físicos da época a debaterem o destino da física e a natureza da realidade. O que estava em jogo era o significado da própria existência. O físico Paul Ehrenfest escreveria: «Nunca esquecerei a imagem dos dois adversários a saírem do clube da universidade. Einstein, uma figura majestosa, a caminhar calmamente, com um leve sorriso irónico, e Bohr a trotar ao seu lado, extremamente aborrecido.»³ Bohr ficou tão abalado que, mais tarde, foi visto a resmungar consigo próprio: «Einstein... Einstein... Einstein...»

O físico John Archibald Wheeler recordaria: «Foi o maior debate de que tenho conhecimento na história intelectual. Em trinta anos, não ouvi falar de um outro debate entre dois homens de estatura superior, durante um período de tempo tão longo, sobre uma questão tão profunda, com maiores consequências para a compreensão deste nosso estranho mundo.»⁴

Einstein bombardeou Bohr com os paradoxos da teoria quântica, um após outro. Foi um ataque implacável. Bohr ficava temporariamente aturdido com cada saraivada de críticas, mas no dia seguinte organizava os pensamentos e dava uma resposta convincente e à prova de bala. A dada altura, Einstein apanhou Bohr em mais um paradoxo relacionado com a luz e a gravidade. Parecia que Bohr estava finalmente derrotado. Porém, ironicamente, Bohr

conseguiu encontrar a falha no raciocínio de Einstein citando-lhe a sua própria teoria da gravidade.

O veredicto da maioria dos físicos foi que Bohr conseguira refutar com êxito todos os argumentos avançados por Einstein nessa famosa Conferência de Solvay. Mas Einstein, quiçá ferido por este revés, tentaria ainda uma vez mais deitar por terra a teoria quântica.

Cinco anos mais tarde, Einstein lançou o seu contra-ataque final. Com os seus estudantes Boris Podolsky e Nathan Rosen, fizeram uma última e corajosa tentativa de esmagar de uma vez por todas a teoria quântica. O artigo EPR, as iniciais dos seus autores, pretendia ser o golpe de misericórdia contra a teoria quântica.

Um derivado imprevisto deste desafio fatídico seria o computador quântico.

Imagine-se, disseram eles, dois elétrons coerentes entre si, o que significa que vibram em uníssono, ou seja, com a mesma frequência mas modificados por uma fase constante. É bem sabido que os elétrons têm rotação (motivo pelo qual existem os ímanes). Se tivermos dois elétrons com uma rotação total de zero, e se deixarmos um elétron girar, por exemplo, no sentido dos ponteiros do relógio, então os outros elétrons giram no sentido contrário porque a rotação líquida é zero.

Agora, separemos os dois elétrons. A soma das rotações dos dois elétrons tem de continuar a ser zero, mesmo que um dos elétrons se encontre agora no lado oposto da galáxia. Porém, não temos forma de saber como está a girar antes de efetuarmos uma medição. Estranhamente, contudo, se medirmos a rotação de um elétron e virmos que gira no sentido dos ponteiros do relógio, então sabemos instantaneamente que o seu par, do outro lado da galáxia, deve estar a girar no sentido contrário. Esta informação viajou instantaneamente entre os dois elétrons, mais depressa do que a velocidade da luz. Por outras palavras, ao separarmos estes dois elétrons, surge um cordão umbilical invisível entre eles, permitindo que a comunicação viaje através desse cordão mais depressa do que a velocidade da luz.



Figura 5: Entrelaçamento.

Quando dois átomos estão lado a lado, podem vibrar de forma coerente, em uníssono, com a mesma frequência, mas modificada por uma fase constante. Porém, se os separarmos e agitarmos um deles, mantêm a coerência e a informação da agitação pode viajar entre eles mais depressa do que a velocidade da luz. (Mas isto não viola a relatividade, uma vez que a informação que quebra a barreira da luz é aleatória.) É um dos motivos pelos quais os computadores quânticos são tão potentes, porque computam simultaneamente em todos estes estados mistos.

Mas, afirmava Einstein, uma vez que nada se pode deslocar mais depressa do que a velocidade da luz, isto violava a relatividade especial e, portanto, a mecânica quântica está incorreta. Esse era o argumento mortífero que refutava a teoria quântica, julgava Einstein. Encerrou a discussão. A «ação fantasmagórica à distância» criada pelo entrelaçamento não passava de uma ilusão, alegou.

Einstein acreditava ter desferido o golpe de misericórdia que esmagaria de uma vez por todas a teoria quântica. Apesar de todo o sucesso experimental da teoria quântica, o chamado paradoxo EPR ficou por resolver durante décadas, uma vez que era demasiado difícil de executar em laboratório. Com o passar dos anos, contudo, a experiência acabou finalmente por ser feita de várias formas, em 1949, 1975 e 1980, e de cada uma das vezes se provou que a teoria quântica estava correta.

(Quererá isto dizer, contudo, que a informação pode viajar mais depressa do que a luz, violando a relatividade especial? Aqui, foi Einstein quem riu por último. Não, embora a informação que viajou entre os dois eletrões tenha sido transmitida instantaneamente, era também informação aleatória e, por consequência, inútil. Isto significa que não é possível enviar códigos úteis, com uma mensagem, a velocidades superiores à da luz através da experiência EPR. Se analisarmos efetivamente o sinal EPR, encontraremos apenas uma algaraviada incoerente. Assim, a informação pode viajar instantaneamente entre partículas coerentes, mas informação útil, que transporte uma mensagem, não pode deslocar-se mais depressa do que a luz.)

Hoje, chama-se a este princípio entrelaçamento, a ideia de que, quando dois objetos são coerentes entre si (vibrando da mesma maneira), permanecem coerentes, mesmo que separados por vastas distâncias.

Isto tem importantes implicações nos computadores quânticos. Significa que, mesmo que os *qubits* num computador quântico se separem, podem ainda assim interagir uns com os outros, o que é responsável pela fantástica capacidade computacional dos computadores quânticos.

Chegamos assim à essência do porquê de os computadores quânticos serem tão únicos e úteis. Um computador digital comum, de certa forma, é como vários contabilistas a trabalharem independentemente num escritório, cada um a fazer os seus cálculos de forma separada, passando as respostas entre si. Um computador quântico, no entanto, é como uma sala cheia de contabilistas em interação, cada um a computar e, mais importante ainda, a comunicar simultaneamente com os outros por via do entrelaçamento. Dizemos assim que estão a resolver o problema juntos coerentemente.

8. A Tragédia da Guerra

Infelizmente, este vibrante debate intelectual foi interrompido pela maré crescente da guerra mundial. De súbito, as discussões eruditas sobre teoria quântica tornaram-se mortalmente sérias, quando tanto a Alemanha nazi como os Estados Unidos instituíram

programas intensivos para desenvolver a bomba atômica. A Segunda Guerra Mundial teria consequências devastadoras na comunidade da física.

Planck, ao assistir à migração em massa de físicos judeus da Alemanha, encontrou-se pessoalmente com Adolf Hitler e suplicou-lhe que pusesse cobro à perseguição aos físicos judeus, que estava a destruir a física na Alemanha. Hitler, contudo, enfureceu-se com Planck e gritou com ele.

Posteriormente, Planck diria que «é impossível falar com um homem assim». Infelizmente, um dos filhos de Planck, Erwin, envolver-se-ia mais tarde num plano para assassinar Hitler. Foi apanhado e torturado. Planck tentou salvar a vida do filho, apelando diretamente a Hitler. Não obstante, Erwin foi executado em 1945.

Os nazis puseram a cabeça de Einstein a prémio. O seu retrato foi publicado na capa de uma revista nazi, com a legenda «Ainda não enforcado». Einstein fugiu da Alemanha em 1933 e nunca mais voltou.

Erwin Schrödinger, ao ver um homem judeu ser espancado pelos nazis nas ruas de Berlim, tentou pôr fim ao ataque e acabou por ser ele próprio espancado pelas SS. Abalado, deixou a Alemanha e aceitou um cargo na Universidade de Oxford. Aí, contudo, causou controvérsia porque chegou com a mulher e a amante. Foi-lhe então oferecido um lugar em Princeton, mas os historiadores conjecturam

que o recusou devido à sua situação doméstica pouco ortodoxa. Por fim, acabou por se instalar na Irlanda.

Niels Bohr, um dos fundadores da mecânica quântica, teve de fugir para os Estados Unidos para salvar a vida, e quase morreu durante a fuga.

Werner Heisenberg, possivelmente o maior físico quântico da Alemanha, foi colocado pelos nazis à frente do trabalho de desenvolvimento da bomba atômica. Contudo, o seu laboratório teve de mudar várias vezes de local por ser bombardeado pelos Aliados. Depois da guerra, foi aprisionado pelos Aliados. (Felizmente, Heisenberg desconhecia um número essencial, a probabilidade de cisão do átomo do urânio, e por isso teve dificuldade em construir a bomba atômica e os nazis não chegaram a conseguir desenvolver uma arma nuclear.)

No trágico rescaldo da guerra, as pessoas começaram a compreender o poder enorme do *quantum*, o qual foi libertado nos céus sobre Hiroshima e Nagasaki. De súbito, a mecânica quântica não era apenas uma brincadeira dos físicos, mas sim algo capaz de desvendar os segredos do Universo e de ditar o destino da raça humana.

Porém, das cinzas da guerra, erguia-se no horizonte uma nova invenção quântica que viria alterar o próprio tecido da civilização moderna: o transistor. Talvez o poder enorme do átomo pudesse ser utilizado para alcançar a paz.

-
- 1 Peter Coy, «Science Advances One Funeral at a Time, the Latest Nobel Proves It», *Bloomberg*, 10 de outubro de 2017; <http://www.bloomberg.com/news/articles/2017-10-10/science-advances-one-funeral-at-a-time-the-latest-nobel-proves-it>.
 - 2 BrainyQuote; https://www.brainyquote.com/quotes/paul_dirac_279318.
 - 3 Jim Martorano, «The Greatest Heavyweight Fight of All Time», TAP into Yorktown, 24 de agosto de 2022; <https://www.tapinto.net/towns/yorktown/articles/the-greatest-heavyweight-fight-of-all-time>.
 - 4 Citado em Denis Brian, *Einstein* (Nova Iorque: Wiley, 1996), 516.

CAPÍTULO 4

Alvorada dos Computadores Quânticos

O transistor é um paradoxo.

Geralmente, quanto maior é uma invenção, mais poderosa é a mesma. Enormes jatos de dois andares transportam carradas de passageiros de um lado ao outro do mundo numa questão de horas. Os foguetões, hoje em dia, são invenções gigantescas capazes de enviar cargas de várias toneladas para Marte. O Grande Colisor de Hadrões, com os seus 27 quilómetros de comprimento, custou mais de dez mil milhões de dólares e pode um dia vir a desvendar o segredo do *Big Bang*. A sua circunferência é tão vasta que grande parte da cidade de Genebra caberia no interior do perímetro da máquina.

E, no entanto, o transistor, talvez a mais importante invenção do século XX, é tão pequeno que caberiam milhares de milhões deles numa das nossas unhas. Não é exagero dizer que veio revolucionar todos os aspetos da sociedade humana.

Assim, por vezes, quanto mais pequeno, melhor. Por exemplo, assente em cima dos nossos ombros temos o objeto mais complexo no Universo conhecido, o cérebro humano. Consiste em cem mil

milhões de neurónios, cada um deles ligado a cerca de 10.000 outros neurónios e, na sua complexidade, o cérebro humano excede tudo o que a ciência conhece.

Assim, tanto um *microchip* feito de milhares de milhões de transístores como o cérebro humano caberiam na nossa mão, e contudo são os objetos mais sofisticados que conhecemos.

Porquê? O seu tamanho incrivelmente reduzido esconde o facto de podermos armazenar e manipular dentro deles vastas quantidades de informação. Mais ainda, a forma como esta informação é armazenada assemelha-se a uma máquina de Turing, dando-lhes uma tremenda potência computacional. O *microchip* é o coração de um computador digital com uma fita de introdução finita (embora as máquinas de Turing, em princípio, possam ter uma fita infinita). E o cérebro é uma máquina capaz de aprendizagem, ou rede neuronal, que se modifica constantemente à medida que aprende coisas novas. Uma máquina de Turing também pode ser modificada de modo a ter capacidade de aprender, como uma rede neuronal.

No entanto, se a potência do transístor deriva do facto de ser microscópico, então a próxima pergunta é: até onde podemos reduzir o tamanho de um computador? Qual é o mais pequeno transístor?

1. O Nascimento do Transístor

Três físicos receberam o Prémio Nobel em 1956 pela criação deste aparelho maravilhoso: os cientistas da Bell Laboratories, John Bardeen, Walter Brattain e William Shockley. Hoje, uma réplica do primeiro transístor do mundo encontra-se em exposição numa vitrina no Museu Smithsonian em Washington. É um aparelho tosco, de aparência rudimentar, mas sabemos que delegações de cientistas de todo o mundo se aproximam desse transístor com uma reverência silenciosa e alguns até se curvam perante ele, como se fosse uma divindade. Bardeen, Brattain e Shockley usaram uma nova forma de matéria quântica, chamada semicondutor. (Os metais são condutores, o que permite a livre circulação de eletrões. Os materiais isoladores, como vidro, plástico ou borracha, não conduzem eletricidade. Os semicondutores encontram-se entre uma coisa e outra e conseguem tanto transportar como interromper a circulação de eletrões.)

O transístor explora esta propriedade crucial. É o sucessor do velho tubo de vácuo que foi utilizado de modo tão engenhoso por Turing e outros. Tal como já vimos, tanto um tubo de vácuo como um transístor podem ser de certa forma comparados a uma válvula que controla o fluxo de água num cano. Com uma pequena válvula, é possível controlar um fluxo de água muito maior a circular pelo cano. Podemos fechar a válvula, o que corresponde ao zero, ou deixá-la aberta, o que corresponde ao um. Assim, conseguimos controlar com precisão a circulação de água numa série complexa de canos. Se agora substituirmos a válvula por um transístor, e os

canos de água por fios que conduzem eletricidade, podemos criar um computador digital transistorizado.

Contudo, embora um transístor se assemelhe a um tubo de vácuo nesse sentido, as semelhanças ficam-se por aí. Os tubos de vácuo são conhecidos por serem rudimentares e temperamentais. (Quando era criança, lembro-me de ter de desmontar a minha velha televisão, remover todos os tubos à mão e testar meticulosamente cada um, no supermercado, para ver qual deles tinha rebentado.) Eram volumosos, pouco fiáveis e estragavam-se rapidamente.

Um transístor, por outro lado, feito de finas pastilhas de silício, é robusto, barato e de dimensões microscópicas. Podem ser produzidos em massa, da mesma forma que são feitas as *t-shirts* hoje em dia.

Normalmente, as *t-shirts* são produzidas a partir de um molde de plástico, no qual está recortada a imagem pretendida. O molde é colocado sobre a *t-shirt* e depois um spray de tinta pinta por cima do molde. Quando este é retirado, a imagem foi transferida para a *t-shirt*.

Um transístor é criado de forma semelhante. Primeiro, começa-se com um molde no qual foi recortada a imagem dos circuitos pretendidos. Depois o molde é colocado sobre a pastilha de silício. Aplica-se então um raio de radiação ultravioleta sobre o molde, para que a imagem no mesmo seja transferida para a pastilha de silício. O molde é então retirado e adiciona-se ácido. O *chip* de silício leva

um tratamento químico especial de modo que, quando o ácido é aplicado, queima na pastilha a imagem pretendida.

A vantagem é que estas imagens podem ser tão pequenas como o comprimento de onda da luz ultravioleta, que é apenas um pouco maior do que um átomo. O que significa que um *chip* típico, utilizado atualmente num computador, pode ter mil milhões de transístores. Hoje, a produção de transístores é um grande negócio que afeta as economias de nações inteiras. As fábricas de produção de transístores mais avançadas têm um custo de milhares de milhões de dólares.

Em certo sentido, um *microchip* pode ser comparado com as estradas numa grande cidade. A circulação constante de carros é como eletrões a percorrer os circuitos gravados. Os sinais de trânsito que regulam o fluxo do tráfego correspondem aos transístores. Um semáforo vermelho que interrompe o trânsito é como um 0, e um semáforo verde que permite a circulação é como um 1.

Quando gravamos mais e mais transístores num *chip*, é como se estivéssemos a encolher o tamanho de cada quarteirão da cidade para aumentar o número de carros e semáforos. No entanto, há um limite para o número de estradas que é possível enfiar em determinada área. A dada altura, o quarteirão é tão pequeno que os carros começam a espalhar-se para os passeios. Isto equivale a curto-circuitos, se as camadas de silício se tornarem demasiado finas.

À medida que a espessura dos componentes de um *chip* de silício se aproxima do tamanho de um átomo, entra em ação o princípio da incerteza de Heisenberg e as posições dos elétrons tornam-se incertas, o que faz com que escapem e causem um curto-circuito. Mais ainda, o calor gerado por tantos transístores acumulados no mesmo espaço é suficiente para fazer com que o *chip* derreta.

Por outras palavras, tudo passará, incluindo a Era do Silício. Podemos estar a assistir à alvorada de uma nova Era: a Era Quântica.

E foi um dos físicos mais famosos do século XX que abriu o caminho.

2. Génio em Ação

Richard Feynman era um indivíduo único. Provavelmente nunca existirá outro físico como ele.

Por um lado, Feynman era um *entertainer* carismático, que gostava de divertir o seu público com histórias chocantes do seu passado e das suas aventuras bizarras. Com um sotaque grosseiro, fazia lembrar um camionista enquanto contava histórias coloridas da sua vida.

Orgulhava-se de ser especialista em abrir todo o tipo de fechaduras e em arrombar cofres, tendo inclusive conseguido abrir o cofre que continha o segredo da bomba atómica quando

trabalhava em Los Alamos (causando com isso um alarme colossal). Sempre interessado em experiências novas e bizarras, uma vez fechou-se numa câmara hiperbárica para descobrir se conseguia sair do seu próprio corpo e ver-se a flutuar à distância. E adorava tocar bongos a qualquer hora.

Quem o ouvisse não podia acreditar que ele recebera o Prémio Nobel da Física em 1965 e era, provavelmente, um dos maiores físicos da sua geração, tendo criado os complexos alicerces de uma teoria relativista de eletrões em interação com fótons. Esta teoria, chamada eletrodinâmica quântica ou QED, tem uma precisão de uma parte em cem mil milhões; assim, de todas as várias medições quânticas que têm sido feitas, é a mais bem-sucedida. Os outros físicos bebiam todas as suas palavras, na esperança de absorverem os conhecimentos que poderiam conquistar-lhes também fama e glória.

3. O Nascimento da Nanotecnologia

Acima de tudo, Feynman era um visionário.

Feynman percebeu que os computadores estavam a ficar cada vez mais pequenos. Assim, fez a si próprio uma simples pergunta: até onde podemos reduzir o tamanho de um computador?

Ele percebeu que, no futuro, os transístores se tornariam tão pequenos que chegariam, por fim, ao tamanho de átomos. Na verdade, conjecturou ele, a fronteira seguinte da física podia ser criar

máquinas tão pequenas como átomos, desbravando assim o caminho para um campo em crescimento a que se chama hoje nanotecnologia.

Que limite impõe a mecânica quântica a pinças, martelos e chaves inglesas que sejam do tamanho de átomos? Qual é a derradeira limitação para um computador que computa em transístores do tamanho de átomos?

Feynman percebeu que, no reino atômico, são possíveis invenções novas e fantásticas. As atuais leis da física que usamos à macroescala tornam-se obsoletas à escala atômica, e temos de abrir a mente a possibilidades totalmente novas. Feynman deu voz às suas ideias pela primeira vez num discurso que deu na Sociedade Americana de Física na Caltech em 1959, intitulado «There's Plenty of Room at the Bottom» [Há muito espaço lá em baixo] antecipando assim o nascimento de uma nova ciência.

Nesse artigo pioneiro, ele perguntava: «Por que não podemos colocar todos os 24 volumes da Enciclopédia Britânica na cabeça de um alfinete?»

A ideia básica era simples: criar máquinas minúsculas capazes de «arrumar os átomos como quisermos». Qualquer ferramenta utilizada nas nossas oficinas seria miniaturizada até ao tamanho das partículas fundamentais. A Mãe Natureza manipula os átomos constantemente. Por que não poderíamos fazer o mesmo?

Resumiu a sua ideia de computadores quânticos da seguinte maneira: «A natureza não é clássica, caramba, e se quiserem fazer uma simulação da natureza, é melhor torná-la quântica.»

É uma observação profunda. Os computadores digitais clássicos, por mais potentes que sejam, nunca poderão simular com êxito um processo quântico. (Bob Sutor, vice-presidente da IBM, gosta de fazer esta comparação: para um computador clássico recriar uma simulação, de um-para-um, de uma simples molécula, como a cafeína, precisaria de 10^{48} *bits* de informação. Esse número astronómico é 10 por cento do número de átomos que compõem o planeta Terra. Assim, os computadores clássicos não podem simular nem mesmo moléculas simples.)

No seu artigo, Feynman introduziu uma série de ideias espantosas. Propôs um robô tão pequeno que poderia flutuar na corrente sanguínea de uma pessoa e tratar de problemas médicos. Feynman chamou-lhe «engolir o médico». Funcionaria como um glóbulo branco, percorrendo o corpo à procura de vírus e bactérias para liquidar. Efetuaría também cirurgias enquanto circulava pelo corpo. Assim, a medicina seria praticada pelo interior do corpo, não pelo exterior. Nunca seria preciso cortar a pele, evitando preocupações com dor e infeções, porque a cirurgia seria feita pelo interior.

Era uma visão profética, e ele chegou até a afirmar que um dia seria possível inventar um supertelelescópio para «ver» átomos. (Na verdade, viria a ser inventado mais tarde, em 1981, algumas

décadas depois de ele ter feito essa previsão, na forma de microscópios de varrimento por efeito túnel.)

A sua visão era tão fantástica que o discurso foi em grande medida ignorado durante as décadas seguintes. Uma pena, já que ele estava muito à frente da sua época. No entanto, hoje em dia, muitas das previsões de Feynman acabaram por se concretizar.

Ele até ofereceu um prémio de mil dólares a quem conseguisse inventar uma de duas coisas: o primeiro desafio era miniaturizar a página de um livro ao ponto de apenas um microscópio eletrónico a conseguir ver. O segundo prémio de mil dólares era para a criação de um motor elétrico que coubesse num cubo de 1/64 de polegada. (Dois inventores reivindicariam posteriormente ambos os prémios, apesar de não terem preenchido exatamente os requisitos do Concurso.)

Outra das suas previsões foi tornada possível com a descoberta de nanomateriais como o grafeno, que consiste numa folha de carbono de apenas um átomo de espessura. O grafeno foi descoberto por dois cientistas russos que trabalhavam em Manchester, Inglaterra, Andre Geim e Konstantin Novoselov, quando repararam que a fita-cola conseguia arrancar uma fina camada de grafite. Ao repetir várias vezes este processo perceberam que conseguiam arrancar uma única camada de carbono com um átomo de espessura. Por esta descoberta simples, mas admirável, receberam o Prémio Nobel em 2010. Uma vez que os átomos de carbono estão dispostos de forma tão compacta, numa disposição simétrica, é a substância mais forte conhecida da

ciência, mais forte até do que diamantes. Uma folha de grafeno é tão forte que se equilibrássemos um elefante na ponta de um lápis, e equilibrássemos o lápis numa folha de grafeno, esta não se rasgaria.

Pequenas quantidades de grafeno são fáceis de fabricar, mas a produção de grafeno puro em grande escala é extremamente difícil. Em teoria, porém, o grafeno puro seria forte o suficiente para construir um arranha-céus, ou uma ponte tão fina que seria invisível. Uma longa fibra de grafeno podia ser forte o suficiente para suportar um elevador espacial que nos levasse até ao espaço com o pressionar de um botão, como um elevador para os céus. (O elevador espacial estaria suspenso num cabo de grafeno que, como se rodássemos uma bola na ponta de um fio, nunca cai porque gira em volta da Terra devido à rotação do planeta.) Além disso, o grafeno é condutor de eletricidade. Na verdade, alguns dos mais pequenos transístores do mundo podem ser feitos de quantidades ínfimas de grafeno.

Feynman compreendeu também os extraordinários progressos que seriam possíveis com um computador quântico, que teria uma potência computacional enorme. Mais atrás, vimos que, se adicionarmos apenas um *qubit* a um computador quântico, a sua potência duplica. Assim, um computador feito de 300 átomos teria 2^{300} mais potência do que um computador quântico com um *qubit*.

4. O Integral de Caminho de Feynman

Outro dos sucessos de Feynman viria a alterar o rumo da física. Ele encontrou uma forma nova e surpreendente de reformular toda a teoria da mecânica quântica.

Tudo começou quando estava na escola secundária. Feynman adorava fazer cálculos e resolver problemas. Uma das suas imagens de marca era calcular rapidamente a resposta para um problema de várias formas diferentes. Se encalhava numa direção, sabia truques matemáticos para resolver o problema de outra forma. Ficou famoso por dizer que o objetivo de cada físico era «tentar provar o mais rapidamente possível que estamos errados». Por outras palavras, engolir o orgulho e admitir que aquilo que está a fazer pode ser um beco sem saída, e prová-lo o mais depressa possível de modo a poder avançar para a ideia seguinte.

(Enquanto físico de investigação, na verdade penso muitas vezes nesta afirmação. A dada altura, os físicos podem ser forçados a admitir que talvez a sua ideia preferida esteja errada, e que deviam ser rápidos a tentar uma nova abordagem.)

Uma vez que o jovem Feynman estava sempre à frente da sua turma em ciências, o professor procurava formas inteligentes de o manter entretido para que não se aborrecesse. O professor costumava desafiá-lo com lições de física curiosas, mas profundas.

Um dia, apresentou-lhe algo chamado o princípio da ação mínima, que permite uma reinterpretação radical de toda a física clássica. O professor disse-lhe que, se uma bola rebolar por uma encosta abaixo, há um número infinito de formas como pode rebolar, mas apenas um caminho que a bola realmente segue. Como sabe que caminho seguir?

Trezentos anos antes, Newton resolvera esta questão. Ele diria: calcule-se as forças que estão a agir sobre a bola em cada instante, e use-se as suas equações para determinar para onde ela irá no instante seguinte. Depois repita-se o processo. Se costurássemos todos esses instantes sucessivos no tempo, microssegundo após microssegundo, era possível determinar todo o trajeto da bola. Ainda hoje, trezentos anos mais tarde, é assim que os físicos preveem o movimento das estrelas, planetas, foguetões, balas de canhão e bolas de basebol. É a base fundamental da física newtoniana. Quase toda a física clássica é feita desta maneira. E a matemática de somar todos esses movimentos incrementais chama-se cálculo, também inventado por Newton.

Mas depois o professor introduziu uma forma bizarra de olhar para a questão. Disse-lhe para traçar *todos* os possíveis caminhos que a bola poderia seguir, por mais estranhos que fossem. Alguns destes caminhos podiam parecer absurdos, como fazer uma viagem à Lua ou a Marte. Alguns caminhos podiam mesmo ir até aos confins do Universo. Para cada um, calcule-se aquilo a que se chama a ação. (A ação é semelhante à energia do sistema. É a energia cinética menos a energia potencial.) Então o trajeto da bola será aquele que tem menor valor para a ação. Por outras palavras, a

bola, de alguma forma, «fareja» todos os caminhos possíveis, mesmo os mais loucos, e depois «decide» seguir o caminho de ação mínima.

Quando fazemos as contas, obtemos precisamente a mesma resposta que Newton. Feynman ficou estupefacto. Nessa simples demonstração, era possível resumir toda a física newtoniana sem equações diferenciais complicadas — bastava encontrar o caminho com a ação mínima. Feynman ficou deleitado porque agora tinha duas formas equivalentes de resolver toda a mecânica clássica.

Por outras palavras, no quadro newtoniano antigo, o trajeto de uma bola é determinado apenas pelas forças que agem sobre a bola naquele ponto preciso de espaço e tempo. Pontos distantes não afetam a bola de maneira nenhuma. Mas, neste novo quadro, a bola subitamente está «consciente» de todos os caminhos possíveis que pode seguir, e «decide» seguir aquele que minimiza a ação. Como pode a bola «saber» como analisar esses milhares de milhões de caminhos e seleccionar precisamente o correto?

(Por exemplo, por que é que uma bola cai para o chão? Newton diria que há uma força gravitacional a empurrar a bola para o chão, microssegundo a microssegundo. Outra explicação é dizer que a bola, de alguma forma, fareja todos os caminhos possíveis e depois decide seguir o caminho de ação ou energia mínima, que é para baixo, a direito.)

Anos mais tarde, quando Feynman estava a trabalhar no que viria a conquistar-lhe um Prémio Nobel, regressaria a esta abordagem da escola secundária. O princípio de ação mínima resultava com a física clássica, newtoniana. Por que não generalizar este estranho resultado à teoria quântica?

5. Soma Quântica sobre Caminhos

Feynman apercebeu-se de que, num computador quântico, isso teria uma potência computacional tremenda. Imagine-se um labirinto. Se um rato clássico fosse colocado num labirinto, tentaria fastidiosamente experimentar muitos caminhos possíveis, um após outro, em sequência, o que é extremamente lento. Contudo, se pusermos um rato quântico num labirinto, ele fareja simultaneamente todos os caminhos possíveis ao mesmo tempo. Se aplicado a um computador quântico, este princípio aumenta exponencialmente a sua potência.

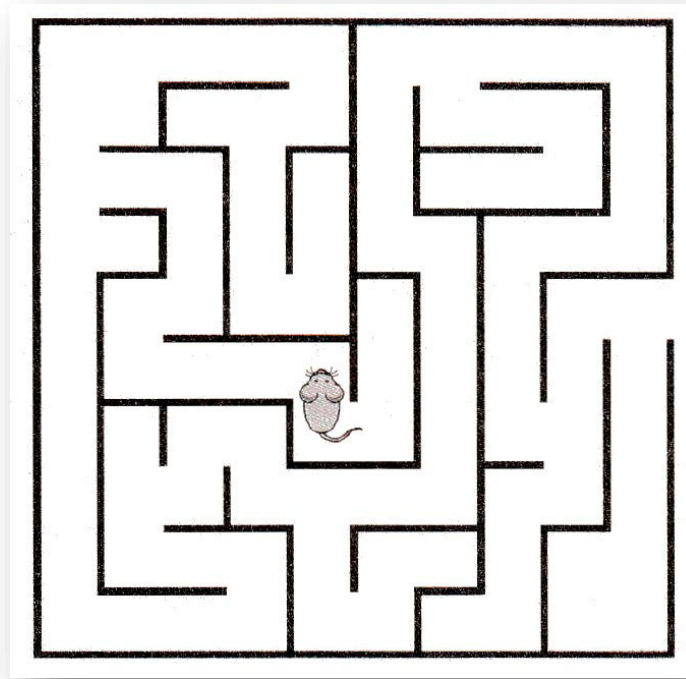


Figura 6: Soma sobre caminhos.

Um rato num labirinto clássico tem de decidir para que lado virar em cada passo, uma decisão de cada vez. Mas um rato quântico num labirinto pode, em certo sentido, analisar simultaneamente todos os caminhos possíveis. É um dos motivos pelos quais os computadores quânticos são exponencialmente mais potentes do que os computadores clássicos comuns.

Assim, Feynman reescreveu a teoria quântica em termos do princípio de ação mínima. Nesta visão, as partículas subatômicas «farejam» todos os caminhos possíveis. Em cada caminho, ele colocou um fator relacionado com a ação e a constante de Planck. Depois somou ou integrou todos os caminhos possíveis. A isto chama-se, hoje, a abordagem do integral de caminho, porque estamos a somar as contribuições de todos os caminhos que um objeto pode seguir.

Para seu choque, Feynman descobriu que podia derivar a equação de Schrödinger. Na verdade, descobriu que conseguia resumir toda a física quântica em termos desse simples princípio. Assim, décadas depois de Schrödinger apresentar a sua equação de

onda como que por magia, sem derivação, Feynman conseguiu unificar a totalidade da mecânica quântica, incluindo a equação de Schrödinger, usando esta abordagem do integral de caminho.

Geralmente, quando ensino mecânica quântica aos estudantes de doutoramento em física, começo por apresentar a equação de Schrödinger como se tivesse simplesmente surgido do nada, como que retirada da cartola de um mágico. Quando os estudantes me perguntam de onde veio essa equação, limito-me a encolher os ombros e digo que a equação simplesmente existe. No entanto, mais adiante no curso, quando discutimos finalmente os integrais de caminho, explico aos estudantes que toda a teoria quântica pode ser reformulada com recurso aos integrais de caminho de Feynman, ao somar a ação por todos os caminhos possíveis, por mais bizarros que sejam.

Não só uso os integrais de caminho de Feynman no meu trabalho profissional, como também penso neles em casa, por vezes, ao atravessar uma divisão. Quando caminho sobre a carpete, é uma sensação estranha e sinistra saber que muitas cópias de mim próprio estão a caminhar sobre a mesma carpete, e cada uma pensa que é a única pessoa a atravessar a sala. Algumas dessas cópias foram mesmo até Marte e voltaram.

Enquanto físico, trabalho com versões relativistas da equação de Schrödinger, que se chama teoria quântica de campo, ou seja, a teoria quântica das partículas subatômicas a altas energias. A primeira coisa que faço quando calculo a teoria quântica de campo é seguir Feynman e começar pela ação. Depois calculo todos os

caminhos possíveis para obter a equação de movimento. Assim, a abordagem de integral de caminho de Feynman, em certo sentido, engoliu toda a teoria quântica de campo.

Mas esta formulação não é apenas um truque; tem também profundas implicações para a vida na Terra. Vimos anteriormente que os computadores quânticos têm de ser mantidos perto do zero absoluto. Mas a Mãe Natureza consegue executar reações quânticas maravilhosas à temperatura ambiente (como a fotossíntese e a fixação de nitrogénio para fertilizantes). Na física clássica, há tanto ruído e atropelo de átomos à temperatura ambiente que muitos processos químicos deviam ser impossíveis nessas condições. Por outras palavras, a fotossíntese viola as leis de Newton.

Então como é que a Mãe Natureza resolve o problema da decoerência, o mais difícil dos problemas nos computadores quânticos, para possibilitar a fotossíntese à temperatura ambiente?

Somando todos os caminhos. Tal como Feynman mostrou, os eletrões conseguem «farejar» todos os caminhos possíveis para levar a cabo o seu trabalho miraculoso. Por outras palavras, a fotossíntese e, por consequência, a própria vida, podem ser um derivado da abordagem do integral de caminho de Feynman.

6. Máquina de Turing Quântica

Em 1981, Feynman destacou que apenas um computador quântico pode verdadeiramente simular um processo quântico.

Porém, não desenvolveu como poderia precisamente ser construído um computador quântico. A próxima pessoa a pegar no testemunho foi David Deutsch da Universidade de Oxford. Entre outros sucessos, ele conseguiu dar resposta à questão: será possível aplicar mecânica quântica a uma máquina de Turing? Feynman aludira a este problema, mas nunca escrevera as equações para uma máquina de Turing quântica. Deutsch viria a preencher todos os pormenores. Até concebeu um algoritmo capaz de ser executado nessa máquina de Turing hipotética.

Uma máquina de Turing, como já vimos, é um simples aparelho clássico, baseado num processador, que transforma o número numa fita de comprimento infinito noutro número e, assim, executa uma série de operações matemáticas. A beleza de uma máquina de Turing é que reúne todas as propriedades de um computador digital numa forma simples e compacta, que pode então ser rigorosamente estudada por matemáticos. O passo seguinte é adicionar a teoria quântica à invenção de Turing, o que permitiria aos cientistas estudar as propriedades bizarras dos computadores quânticos de forma rigorosa. Numa máquina de Turing quântica, pensou Deutsch, substitui-se um *bit* clássico por um *qubit* quântico. Isso introduz várias alterações importantes.

Primeiro, as manipulações básicas da máquina de Turing (por exemplo, substituir um 0 por um 1 e vice-versa, e avançar com a fita para a frente ou para trás) mantêm-se mais ou menos as mesmas. Mas os *bits* são radicalmente alterados. Já não são 0 ou 1. Na verdade, podem usar a bizarra propriedade quântica da sobreposição (a capacidade de estar em dois estados distintos ao

mesmo tempo) para criar um *qubit*, que pode assumir valores entre 0 e 1. E, como todos os *qubits* numa máquina de Turing quântica estão entrelaçados, o que acontece a um *qubit* influencia outros *qubits* mesmo que estejam afastados. Por fim, para obter um número no final do cálculo, é preciso «colapsar a onda», para que os *qubits* nos devolvam de novo uma coleção de 0s ou 1s. Assim, é possível extrair números e respostas reais do computador quântico.

Da mesma forma que Turing conseguiu trazer rigor ao campo dos computadores digitais com a introdução das regras precisas das máquinas de Turing, Deutsch ajudou a tornar rigorosas as bases dos computadores quânticos. Ao isolar a essência de como os *qubits* são manipulados, ajudou a uniformizar o trabalho nos computadores quânticos.

7. Universos Paralelos

Contudo, Deutsch não é conhecido apenas por desenvolver o conceito de computadores quânticos, mas também por levar a sério as profundas questões filosóficas por eles levantadas. Na habitual interpretação de Copenhaga da mecânica quântica, é preciso fazer uma observação para determinar finalmente onde um elétron está. Antes de ser efetuada uma observação, o elétron encontra-se numa mistura difusa de vários estados. Mas quando se mede o estado do elétron, a função de onda «colapsa» como que por magia num único estado físico. É assim que se extraem respostas numéricas de um computador quântico.

Porém, este «colapso» assombra os físicos quânticos há um século. Este processo de «colapso» da onda parece tão estranho, tão forçado e artificial, e, contudo, é o processo crucial que nos permite deixar o mundo quântico e entrar no nosso mundo macroscópico. Por que é que entra em ação apenas quando decidimos olhar para ele? É a ponte entre o micro e o macromundo, mas uma ponte com enormes buracos filosóficos.

Apesar disso, funciona. Ninguém o pode negar.

Todavia, é motivo de inquietação para muitos que todo o nosso conhecimento do mundo assente nestes alicerces tão incertos, como areia em movimento que pode, um dia, ser levada pelo vento. Ao longo das últimas décadas, foram apresentadas inúmeras propostas para clarificar o problema.

Em 1956, o estudante de doutoramento Hugh Everett fez aquela que será talvez a mais escandalosa dessas propostas. Recordemos aqui que a teoria quântica pode ser resumida em aproximadamente quatro princípios. O último é o ponto de contenção, onde «colapsamos» a função de onda para decidir em que estado o sistema se encontra. A proposta de Everett era ousada e controversa: a sua teoria diz apenas para *afastar a última afirmação que diz que a onda «colapsa», de modo que isso nunca aconteça*. Cada possível solução continua a existir na sua própria realidade, produzindo, como a teoria ficou conhecida, «muitos mundos».

Tal como um rio que se bifurca em muitos afluentes mais pequenos, as várias ondas do elétron continuam a propagar-se alegremente, dividindo-se e voltando a dividir-se, uma e outra vez, ramificando-se em outros Universos para todo o sempre. Por outras palavras, há um número infinito de universos paralelos, nenhum dos quais alguma vez colapsa. Cada ramificação deste multiverso parece tão real como qualquer outra, mas representam todos os estados quânticos possíveis.

Desta forma, o microcosmo e o macrocosmo obedecem às mesmas equações, uma vez que deixa de haver qualquer colapso ou «parede» a separá-los.

Por exemplo, imagine uma onda no oceano. Na realidade, ela é constituída por milhares de ondas mais pequenas. A interpretação de Copenhaga significa seleccionar apenas uma dessas ondas mais pequenas e pôr de lado o resto. Porém, a interpretação de Everett diz: deixemos todas as ondas existir. Assim, as ondas continuarão a ramificar-se em ondas mais pequenas, que por sua vez se ramificam ainda em mais ondas.

Esta ideia é muito conveniente. Não precisamos de nos preocupar com o «colapso» das ondas porque isso nunca acontece. Assim, esta formulação é mais simples do que a interpretação padrão de Copenhaga. É organizada, elegante e admiravelmente simples.

8. Muitos Mundos

Todavia, as teorias de Everett e Deutsch desafiam a natureza da própria realidade. A teoria dos muitos mundos derruba a nossa concepção da existência em si mesma. As suas consequências são avassaladoras.

Por exemplo, pense em todas as vezes em que teve de tomar uma decisão crucial na sua vida, por exemplo a que emprego se candidatar, com quem casar, ter ou não ter filhos. Uma pessoa pode passar horas, numa tarde de ócio, a pensar em todas as coisas que poderiam ter sido. A teoria dos muitos mundos diz que existe um universo paralelo com uma cópia de cada um de nós, a viver uma história de vida completamente diferente. Num Universo, a pessoa pode ser um bilionário a planear a sua próxima aventura extraordinária. Noutro Universo, a mesma pessoa pode ser um indigente que não sabe de onde virá a próxima refeição. Ou talvez tenha uma vida algures no meio, labutando num emprego aborrecido e enfadonho, com um rendimento certo, mas modesto e sem quaisquer perspetivas de futuro. Em cada Universo, insistirá que o seu Universo é que é o real, e todos os outros são falsos. Agora imagine isto ao nível quântico. Cada ação atómica individual divide o nosso Universo em múltiplos de si próprio.

No poema de Robert Frost, «*A Estrada Não Percorrida*», ele escreveu sobre algo em que todos já pensámos nas nossas fantasias. Perguntamo-nos o que poderia ter acontecido nas épocas da nossa vida em que efetuámos uma escolha essencial. Estas

decisões importantes podem afetar as nossas vidas daí em diante.
Escreveu ele:

Duas estradas divergiam num bosque dourado
E triste por não poder percorrer ambas
Sendo um só viajante, ali me demorei
Mirando uma delas, até onde a vista alcançava
Vendo-a curvar e desaparecer na vegetação.*

Ele termina o poema concluindo que a decisão teve consequências épicas na sua vida, que a estrada menos percorrida foi um ponto de viragem. Conclui:

Contá-lo-ei com um suspiro, no fim
Em alguma época longínqua:
Duas estradas divergiam num bosque e, eu...
Segui pela menos percorrida,
E isso fez toda a diferença.**

Isto estende-se não só à nossa vida, mas a todo o mundo. Na série televisiva *O Homem do Castelo Alto*, baseada no romance de Philip K. Dick, o Universo dividiu-se ao meio. Num Universo, um assassino tentou matar Franklin D. Roosevelt, mas a arma encravou e FDR sobreviveu e conduziu os Aliados à vitória na Segunda Guerra Mundial. Porém, noutro Universo, a arma funcionou bem e o presidente foi morto. O cargo é então ocupado por um vice-presidente fraco e os Estados Unidos são derrotados. Os nazis

* Tradução livre do poema original, *The Road Not Taken*.

** Ibid.

ocupam a Costa Leste dos Estados Unidos e o Exército Imperial Japonês apodera-se da Costa Oeste.

O que separa estes Universos divergentes e muito diferentes é uma única bala que ficou entalada no cano da arma. Mas as balas podem não disparar devido a imperfeições ínfimas no explosivo químico, talvez causadas por defeitos quânticos na estrutura molecular do explosivo. Assim, estes dois Universos podem estar separados por um evento quântico.

Infelizmente, a ideia de Everett era tão radical, tão fora deste mundo, que foi ignorada consistentemente pelos físicos durante décadas. Só recentemente assistiu a um ressurgimento, quando os físicos redescobriram o trabalho dele.¹

9. Os Muitos Mundos de Everett

Hugh Everett III nasceu em 1930, numa família com tradição militar. O pai, que ajudou a criá-lo após o seu divórcio, era tenente-coronel ao serviço de um general durante a Segunda Guerra Mundial. Depois da guerra, o pai ficou destacado na Alemanha Ocidental, onde Hugh se juntou a ele.

Desde cedo que demonstrou interesse pela física. Chegou mesmo a escrever uma carta a Einstein, que respondeu à sua pergunta sobre um antigo problema filosófico da seguinte maneira:

Caro Hugh,

Não existem forças irresistíveis e corpos inamovíveis. Porém, parece existir um rapaz muito teimoso que abriu caminho vitoriosamente através de estranhas dificuldades que ele próprio criou com esse intuito.

Atenciosamente,

Einstein

Em Princeton, dedicou-se finalmente aos seus interesses científicos, que se centravam em duas áreas. Primeira, como a ciência poderia afetar as questões militares, por exemplo, usando a teoria dos jogos para compreender a guerra. E a segunda era tentar compreender os paradoxos da mecânica quântica. O seu orientador de doutoramento era John Archibald Wheeler, o mesmo orientador de tese que foi mentor de Richard Feynman. Wheeler era um dos grandes nomes da física, e trabalhara com Bohr e Einstein.

Everett não estava satisfeito com a interpretação de Copenhaga tradicional da mecânica quântica, pela qual a função de onda «colapsa» misteriosamente e determina o estado do macromundo no qual vivemos.

A sua solução era radical e, ao mesmo tempo, simples e elegante. Wheeler apercebeu-se de imediato da importância do trabalho do seu estudante, mas era também um realista. Sabia que a teoria seria completamente arrasada pelo sistema estabelecido. Assim, em várias ocasiões, Wheeler pediu a Everett para atenuar a teoria de modo que não parecesse tão escandalosa. A ideia não agradava nada a Everett, mas como era apenas um estudante de doutoramento, acedeu a fazer essas revisões. Wheeler tentava por vezes discutir a teoria do seu estudante com outros físicos

preeminentes, mas obtinha, regra geral, uma reação pouco calorosa.

Em 1959, Wheeler conseguiu mesmo apresentar Everett ao próprio Niels Bohr, em Copenhaga. Era a última tentativa da parte de Wheeler para conseguir algum reconhecimento para o trabalho do seu estudante. Este, contudo, era como um cordeiro a entrar no covil do leão. O encontro foi um desastre. O físico belga Léon Rosenfeld, que estava presente, disse que Everett era «indescritivelmente estúpido e não compreendia as coisas mais simples da mecânica quântica».²

Everett recordaria mais tarde que este encontro estava «condenado ao inferno desde o princípio». Até mesmo Wheeler, que tentara dar à teoria de Everett uma oportunidade justa entre os físicos de topo, acabou por abandonar a teoria, dizendo que tinha «demasiada bagagem».

Com todos os grandes nomes da física aliados contra ele, era altamente improvável que conseguisse trabalho na área da física teórica, e assim Everett regressou aos seus estudos militares e conseguiu um lugar no Grupo de Avaliação de Sistemas de Armamento do Pentágono. Aí, fazia investigações secretas sobre mísseis Minuteman, guerra nuclear e poeiras radioativas, e sobre as aplicações militares da teoria dos jogos.

10. Renascimento dos Universos Paralelos

Entretanto, durante os anos em que trabalhou na área da guerra nuclear, as suas ideias foram-se infiltrando lentamente na comunidade da física. Um problema surgiu quando os físicos tentaram aplicar a mecânica quântica ao Universo inteiro, ou seja, criar uma teoria da gravidade quântica.

Na mecânica quântica, começamos com uma onda, que descreve como um eletrão pode estar em muitos estados paralelos ao mesmo tempo. No fim, o observador efetua uma medição a partir do exterior e colapsa a função de onda. Porém, quando aplicamos este processo ao Universo inteiro encontramos problemas.

Einstein visualizou o Universo como uma espécie de esfera em expansão. Nós vivemos na superfície desta esfera. A isto, chama-se a teoria do *Big Bang*. No entanto, se aplicarmos a teoria quântica a todo o Universo, isso significa que o Universo, tal como o eletrão, tem de existir em estados paralelos.

Assim, se tentarmos aplicar a sobreposição ao Universo inteiro, *acabaremos necessariamente com universos paralelos*, tal como Everett previu. Por outras palavras, o ponto de partida da mecânica quântica é que o eletrão pode estar em dois estados ao mesmo tempo. Quando aplicamos a mecânica quântica ao Universo inteiro, isso significa que o Universo tem também de existir em estados paralelos, isto é, em universos paralelos. Assim, os universos paralelos são inevitáveis.

Desta forma, quando tentamos descrever todo o Universo em termos quânticos, emergem necessariamente universos paralelos. Em vez de eletrões paralelos, temos agora universos paralelos.

Isto, todavia, deixa em aberto a próxima questão: poderemos visitar esses universos paralelos? Por que não vemos essa coleção infinita de universos paralelos, alguns dos quais talvez semelhantes ao nosso, enquanto outros podem ser bizarros e absurdos? (E uma questão que oigo muitas vezes é: significa isto que o Elvis está vivo noutro Universo? A ciência moderna diz: talvez.)

11. Universos Paralelos na Nossa Sala de Estar

Steve Weinberg, um físico galardoado com o Prémio Nobel, explicou-me uma vez como pensar na teoria dos muitos mundos de modo que não nos expluda a cabeça. Imagine, disse ele, estar sentado sossegado na sua sala de estar, com o ar repleto de ondas de rádio de várias estações de rádio de todo o mundo. Em princípio, há centenas de sinais de diversas estações de rádio na sua sala. No entanto, o seu rádio está sintonizado apenas numa frequência; só consegue apanhar uma estação, porque já não está a vibrar em sintonia com outras estações de rádio. Por outras palavras, o seu rádio está em «decoerência» com as outras ondas de rádio que encham o ar na sala. A sua sala de estar está cheia de estações de rádio diferentes, mas não as consegue ouvir porque não está sintonizado nelas, ou coerente com elas.

Agora, disse-me ele, substitua as ondas de rádio por ondas quânticas de elétrons e átomos. Na sua sala de estar, existem também as ondas de universos paralelos, isto é, as ondas de dinossauros, extraterrestres, piratas, vulcões. Contudo, não pode interagir com elas porque não se encontra coerente com elas. Já não vibra em uníssono com as ondas dos dinossauros. Esses universos paralelos não estão necessariamente no espaço sideral ou noutra dimensão. Podiam estar na sua sala de estar. Assim, é possível entrar num universo paralelo, mas, se calcularmos as probabilidades de que isso aconteça, percebemos que seria preciso aguardar uma quantidade de tempo astronómica para que tal sucedesse.

As pessoas que morreram no nosso Universo podem na verdade estar vivas e de boa saúde num universo paralelo, ali mesmo na nossa sala de estar. Porém, é praticamente impossível interagir com elas porque já não estamos coerentes com elas. Assim, o Elvis pode estar vivo, mas está a cantar os seus sucessos noutro universo paralelo.

A probabilidade de entrar nestes universos paralelos é quase zero. A palavra-chave é «quase». Na mecânica quântica, tudo é reduzido a uma probabilidade. Por exemplo, para os nossos estudantes de doutoramento, por vezes pedimos-lhes que calculem a probabilidade de acordarem em Marte no dia seguinte. Usando a física clássica, a resposta é nunca, porque não podemos escapar à barreira gravitacional que nos mantém presos à Terra. Porém, no mundo quântico, é possível calcular a probabilidade de «tunelar» e assim ultrapassar a barreira gravitacional e acordar em Marte.

(Quando fazemos efetivamente os cálculos, descobrimos que teríamos de esperar mais tempo do que o tempo de vida do Universo para que isso acontecesse, portanto o mais provável é que acorde na sua cama amanhã.)

David Deutsch leva estes conceitos desconcertantes muito a sério. Por que é que os computadores quânticos são tão potentes? pergunta. Porque os elétrões estão a calcular simultaneamente em universos paralelos. Estão a interagir e a interferir uns com os outros via entrelaçamento. Assim, depressa podem deixar para trás um computador tradicional que computa apenas num Universo.

Para o demonstrar, ele recorre a uma experiência com um *laser* portátil que guarda no seu escritório. Consiste unicamente numa folha de papel com dois buracos. Ele aponta um *laser* através de ambos os orifícios e encontra do outro lado um bonito padrão de interferência. Isto acontece porque a onda passou através de ambos os buracos em simultâneo, e interferiu consigo própria do outro lado, dando origem ao padrão de interferência.

Isso não é nada de novo.

Mas agora, diz ele, vamos reduzir a intensidade do raio *laser* até chegar quase a zero. No final, não teremos uma onda mas apenas um único fóton a passar através dos dois orifícios. Mas como pode um único fóton de luz passar por dois orifícios em simultâneo?

Pela interpretação de Copenhaga habitual, antes de medir o fóton ele existe na realidade como a soma de duas ondas, uma para cada orifício. Isolar um único fóton não tem significado enquanto não o medirmos. Assim que o medimos, sabemos por que buraco ele passou.

Everett não gostava deste panorama, porque significava que nunca seria possível responder à pergunta: por qual orifício entrou o fóton antes de o medirmos? Agora, apliquemos isto aos elétrons. Na teoria dos muitos mundos de Everett, o elétron é uma partícula corpuscular que, na verdade, passou apenas através de um buraco, mas havia um elétron gêmeo num universo paralelo que atravessou pelo outro buraco. Esses dois elétrons, em dois Universos diferentes, interagiram então um com o outro, por meio de entrelaçamento, para alterar a trajetória do elétron e criar o padrão de interferência.

Em conclusão, um único fóton pode passar através de apenas um orifício, e ainda assim criar um padrão de interferência porque o fóton consegue interagir com o seu homólogo que se desloca num universo paralelo.

(Extraordinariamente, os físicos ainda hoje discutem as várias interpretações do «colapso» da função de onda. Porém, hoje em dia, não são apenas os físicos, mas também os jovens que adoram esta ideia, porque muitos dos seus super-heróis preferidos da banda desenhada vivem no multiverso. Quando um super-herói está em apuros, por vezes o seu homólogo num universo paralelo vem em

seu auxílio. Assim, a mecânica quântica tornou-se um tema em voga até para os miúdos.)

12. Sumário da Teoria Quântica

Vamos agora apresentar um sumário de todas as características bizarras da teoria quântica que tornam possíveis os computadores quânticos.

- 1 - *Sobreposição*. Antes de observarmos um objeto, ele existe em muitos estados possíveis. Assim, um elétron pode estar em dois locais ao mesmo tempo. Isto aumenta extraordinariamente a potência de um computador, pois temos mais estados com os quais calcular.
- 2 - *Entrelaçamento*. Quando duas partículas estão coerentes e as separamos, podem ainda assim influenciar-se uma à outra. Esta interação tem lugar instantaneamente. Isto permite aos átomos comunicarem entre si, mesmo quando separados. Significa, portanto, que a potência computacional aumenta exponencialmente à medida que são adicionados cada vez mais *qubits* capazes de interagir uns com os outros, muito mais depressa do que os computadores comuns.
- 3 - *Soma sobre caminhos*. Quando uma partícula se move entre dois pontos, soma todos os possíveis caminhos que

ligam esses dois pontos. O caminho mais provável é o caminho clássico, não quântico, mas todos esses outros caminhos contribuem também para o trajeto quântico final da partícula. Isto significa que mesmo caminhos que são extremamente improváveis podem tornar-se reais. Talvez os trajetos das moléculas que criaram a vida se tenham tornado reais devido a este efeito, possibilitando assim a origem da vida.

4 - *Tunelamento*. Quando se lhe depara uma grande barreira energética, normalmente uma partícula não a consegue penetrar. Mas na mecânica quântica há uma probabilidade pequena, mas finita de podermos «tunelar» ou penetrar através da barreira. Talvez seja por isso que as complexas reações químicas da vida podem decorrer à temperatura ambiente, mesmo sem vastas quantidades de energia.

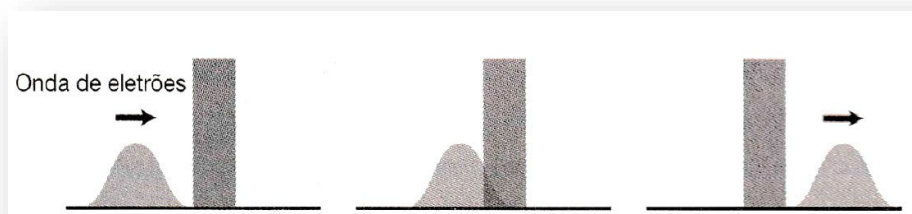


Figura 7: Tunelamento.

Normalmente, uma pessoa não consegue atravessar uma parede de tijolo. No entanto, na mecânica quântica, existe uma probabilidade pequena, mas finita de se poder «tunelar» através dela. No mundo subatômico, o tunelamento é algo comum e talvez explique como podem ocorrer as reações químicas exóticas que possibilitam a vida.

13. A Descoberta de Shor

Até à década de 90, os computadores quânticos eram ainda, em grande medida, um brinquedo de teóricos. Existiam nas mentes de um núcleo pequeno, mas brilhante de cientistas, de verdadeiros crentes e de acadêmicos.

Porém, o trabalho de Peter Shor na AT&T no início dos anos 90 veio mudar tudo. Longe de serem uma nota de rodapé pouco importante, discutidos nas pausas para café em tom casual, os computadores quânticos estavam subitamente na agenda de importantes governos em todo o mundo. De súbito, pedia-se a analistas de segurança, que não têm forçosamente necessidade de possuir formação em física, que decifrassem os mistérios da teoria quântica.

Qualquer pessoa que tenha visto um filme de James Bond sabe que o mundo, com tantos interesses concorrentes e até mesmo interesses nacionais hostis, está cheio de espiões e códigos secretos. Talvez seja um exagero de Hollywood, mas as joias da coroa destas agências de segurança são os códigos que usam para proteger os seus mais valiosos segredos nacionais. Recordamos que o sucesso de Turing a decifrar o código da máquina nazi Enigma foi um ponto de viragem histórico, tendo ajudado a abreviar a guerra e alterado o rumo da história humana.

Até então, o trabalho em computadores quânticos era altamente especulativo e do domínio dos engenheiros elétricos mais

esotéricos. Mas Shor mostrou que é possível um computador quântico decifrar qualquer código digital atualmente em uso, colocando assim em risco a economia mundial, que requer segredo absoluto quando envia milhares de milhões de dólares através da Internet.

O principal código para transmissões secretas chama-se padrão RSA e baseia-se na decomposição em fatores de um número muito grande. Por exemplo, começamos com dois números, cada um com cem dígitos. Se os multiplicarmos um pelo outro, obtemos um número com quase 200 dígitos. Multiplicar dois números é tarefa fácil.

Mas se alguém nos desse esse número de 200 dígitos como ponto de partida, e nos pedisse para o fatorizar (encontrar os dois números que, multiplicados um pelo outro, o obtêm como resultado) poderia demorar séculos, ou mais, para o fazer com um computador digital. A isto, chama-se uma função de sentido único. Numa direção, quando se multiplica os dois números, a função é trivial. Mas na outra direção é muito difícil. Tanto os computadores clássicos como os computadores quânticos conseguem fatorizar um grande número. Na verdade, um computador clássico consegue, em princípio, computar tudo o que um computador quântico consegue computar, e vice-versa, mas se os dados forem demasiado complexos, podem assoberbar os computadores clássicos.

A vantagem crucial de um computador quântico é o tempo. Embora tanto os computadores clássicos como os computadores quânticos possam executar certas tarefas, o tempo que os

computadores clássicos demoram a resolver um problema difícil pode torná-lo impraticável.

Assim, o tempo que um computador clássico demora a fatorizar um número grande é proibitivamente longo, tornando impraticável decifrar os nossos segredos. Mas um computador quântico pode desvendar o código após um dado período de tempo, ainda longo, mas talvez reduzido o suficiente para que seja praticável.

Desta forma, quando os *hackers* tentam entrar num computador, o computador pedir-lhes-á que fatorizem um número, talvez com 200 dígitos. Tendo em conta o tempo que esse processo demora, os *hackers* podem acabar por desistir. No entanto, se queremos que o destinatário pretendido leia a transmissão, basta que lhe sejam dados os dois números mais pequenos adiantadamente. Assim poderá desbloquear facilmente o programa de computador que protege a mensagem.

O algoritmo RSA parece seguro, para já, mas no futuro talvez seja possível, com os computadores quânticos, fatorizar esse número de 200 dígitos.

Para ver como isto funciona, examinemos o algoritmo de Shor. Ao longo dos séculos, os matemáticos criaram algoritmos para os ajudar a fatorizar um número nos seus fatores primos, ou seja, números cujos fatores são apenas 1 e eles próprios. Por exemplo, $16 = 2 \times 2 \times 2 \times 2$, uma vez que 2 só pode ser dividido por si próprio e por 1.

O algoritmo de Shor começa com estas técnicas padrão, conhecidas dos matemáticos clássicos para fatorizar um número arbitrário. Depois, mais para o fim do processo, executa-se aquilo a que se chama uma transformada de Fourier. Isto envolve somar sobre um fator complexo, pelo que o cálculo prossegue normalmente. Mas no caso quântico, temos de somar sobre muitos, muitos mais estados, e, portanto, temos de executar uma transformada de Fourier quântica. O resultado final mostra que o cálculo pode ser feito em tempo recorde porque temos muito mais estados com que trabalhar.

Por outras palavras, tanto um computador clássico como um computador quântico fatorizam essencialmente da mesma forma, exceto que o computador quântico computa sobre muitos estados em simultâneo, o que acelera grandemente o processo.

Tome-se N para representar o número que pretendemos fatorizar. Para um computador digital comum, a quantidade de tempo que leva a fatorizar um número aumenta exponencialmente, como $t \sim e^N$, vezes alguns fatores não importantes. Assim, o tempo de cálculo pode subir rapidamente para números astronómicos, comparáveis à idade do Universo. Tal faz com que a fatorização de um grande número seja possível, mas altamente impraticável num computador convencional.

Porém, se efetuarmos o mesmo cálculo com um computador quântico, o tempo para fatorizar aumenta apenas como $t \sim N^n$, ou seja, como um polinómio, porque os computadores quânticos são astronomicamente mais rápidos do que um computador digital.

14. A Derrota do Algoritmo de Shor

Assim que a comunidade de informações ganhou plena consciência das implicações deste avanço, começou a dar passos para lidar com ele.

Primeiro, o Instituto Nacional de Normas e Tecnologia, que determina as normas e padrões técnicos para o governo dos Estados Unidos, emitiu uma declaração sobre computadores quânticos, dizendo que a verdadeira ameaça dos computadores quânticos está ainda a muitos anos de distância. Todavia, a altura para começar a pensar neles é aqui e agora. No futuro, talvez seja tarde demais para adaptar toda uma indústria, de um momento para o outro, quando os computadores quânticos começarem a decifrar os nossos códigos.

A seguir, sugeriu uma simples medida que pode ser levada a cabo pelas companhias para responder parcialmente a essa ameaça. A forma mais fácil de lidar com o algoritmo de Shor é simplesmente aumentar o número que tem de ser fatorizado. Mais cedo ou mais tarde os computadores quânticos poderão ainda assim decifrar um código RSA modificado, mas isso atrasará qualquer *hacker* e talvez torne proibitivamente dispendioso fazê-lo.

Porém, a forma mais direta de abordar o problema é criar funções de sentido único mais sofisticadas. O algoritmo RSA é demasiado simples para ser um entrave a um computador quântico, e por isso o memorando do NIST mencionava vários novos

algoritmos mais complexos do que o código RSA original. Contudo, essas novas funções de sentido único não são fáceis de implementar. Resta saber se conseguirão travar os computadores quânticos.

O governo incentivou as companhias e agências a tomar medidas de preparação para este cataclismo digital. Nos Estados Unidos, o NIST emitiu um conjunto de linhas orientadoras sobre como criar as bases para combater esta nova ameaça à segurança nacional, Porém, se o pior acontecer, governos e grandes instituições podem utilizar um último recurso, que é recorrer à criptografia quântica para derrotar os computadores quânticos, ou seja, usar o poder do *quantum* contra si próprio.

15. Internet por Laser

No futuro, é possível que as mensagens confidenciais sejam enviadas por um canal de Internet separado, transportadas por raios *laser* e não por cabos elétricos. Os raios *laser* são polarizados, o que significa que as ondas vibram apenas num plano. Quando um criminoso tenta aceder ao raio *laser*, isto altera a direção da polarização do *laser*, o que é imediatamente detetado por um monitor. Desta forma é possível saber, pelas leis da teoria quântica, que alguém tentou aceder à comunicação em causa.

Assim, se um criminoso tentar intercetar uma transmissão, fará inevitavelmente soar os alarmes. No entanto, isto exige uma Internet separada, com base em *lasers*, para transportar os

segredos nacionais mais importantes, e essa pode ser uma solução dispendiosa.

Quer isto dizer que, no futuro, é possível que venham a existir duas camadas na Internet. Algumas organizações, como bancos, grandes corporações e governos, terão a possibilidade de pagar um valor acrescido para enviar mensagens por uma Internet à base de laser, garantidamente segura, enquanto todos os restantes usarão a Internet comum, que não tem essa camada extra e dispendiosa de proteção.

Este problema de segurança está também a levar ao surgimento de uma nova tecnologia chamada distribuição de chaves quânticas (QKD), que transfere chaves de encriptação utilizando *qubits* entrelaçados, de modo que seja imediatamente possível detetar se alguém tentou aceder à rede. A companhia japonesa Toshiba já previu que o método de QKD pode vir a gerar até três mil milhões de dólares de receitas no final da década.

Assim, por enquanto, é um jogo de espera. Muitos têm esperança de que a ameaça tenha sido exagerada. No entanto, tal não impediu as principais corporações a nível mundial de se lançarem numa corrida para ver que tecnologia dominará o futuro.

Se olharmos para além da ciberameaça, há mundos completamente novos a conquistar com os computadores quânticos, e as companhias debatem-se agora para obter a supremacia nesta tecnologia emergente e empolgante.

O vencedor pode bem vir a moldar o futuro.

¹ Ver Michio Kaku, *Parallel Worlds: The Science of Alternative Universes and Our Future in the Cosmos* (Nova Iorque: Anchor, 2006). Em português, *Mundos Paralelos, Uma Viagem Através da Criação, Dimensões Superiores e Futuro do Cosmos* (Lisboa: Bizâncio, 2006).

² Stefano Osnaghi, Fabio Freitas, Olival Freire Jr., «The Origin of the Everettian Heresy», *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 40, n.º 2 (2009): 17.

CAPÍTULO 5

Começa a Corrida

Alguns dos maiores nomes em Silicon Valley estão agora a apostar em qual dos cavalos vencerá esta corrida. É demasiado cedo para saber quem será, nesta altura, mas aquilo que está em jogo é, nada mais, nada menos, do que o futuro da economia mundial.

Para compreender como a corrida está a evoluir, é importante perceber que existe mais do que uma arquitetura computacional que funcionará. Recordemos que a máquina de Turing se baseia em princípios gerais que podem ser aplicados a um vasto leque de tecnologias. Assim, é possível fazer um computador digital de canos de água e válvulas. Os ingredientes essenciais são um sistema capaz de transportar informação digital caracterizada por uma série de 0s e 1s, e uma forma de processar essa informação.

Da mesma forma, os computadores quânticos têm também um vasto leque de *designs* possíveis. Basicamente, qualquer sistema quântico capaz de sobrepor estados de 0s e 1s e entrelaçá-los de modo que possam processar essa informação pode tornar-se um computador quântico. Elétrões e iões que girem para cima ou para baixo podem servir este propósito, ou fótons polarizados que girem no sentido dos ponteiros do relógio ou no sentido contrário. Uma

vez que a teoria quântica governa toda a matéria e energia no Universo, existem potencialmente milhares de formas de construir um computador quântico. Numa tarde de ócio, um físico pode conceber dezenas de formas de representar a sobreposição de 0s e 1s para criar um computador quântico completamente novo.

Então que aspeto têm esses vários *designs* e quais são as vantagens e desvantagens de cada um? Tal como já vimos, companhias e governos estão a investir milhares de milhões nesta tecnologia, e a opção de *design* escolhida pode influenciar quem virá a dominar esta corrida. Até agora, a IBM vai na frente do pelotão com 433 *qubits*, mas, tal como numa corrida de cavalos, a classificação exata pode mudar a qualquer momento.

Nome	Produtor	Qubits
Osprey	IBM	433
Jiuzhang	China	76
Bristlecone	Google	72
Sycamore	Google	53
Tangle Lake	Intel	49

Na altura de publicação deste livro, a IBM lançou o computador quântico de 433-*qubits*, Osprey, e apresentará o computador quântico de 1121-*qubits*, Condor, em 2023. Dario Gil, vice-presidente sénior e diretor da divisão de investigação da IBM, diz: «Acreditamos que conseguiremos alcançar uma demonstração da vantagem quântica — algo com valor prático — nos próximos anos. É essa a nossa missão.» Na verdade, a IBM declarou publicamente

que o seu objetivo é, eventualmente, construir um computador quântico de um milhão de *qubits*.¹

Então como funciona o *design* líder na indústria, e o que há em termos de concorrência?

1 - Computador Quântico Supercondutor

No presente, o computador quântico supercondutor estabeleceu a fasquia para a potência computacional. Em 2019, a Google foi a primeira companhia a lançar-se, anunciando que alcançara a supremacia quântica com o seu computador quântico supercondutor, o Sycamore.

Contudo, a IBM não vinha muito atrás e acabou mesmo por assumir a liderança com o seu processador quântico Eagle, que quebrou a barreira dos 100-*qubits* em 2021, tendo, desde então, desenvolvido o processador Osprey, de 433-*qubits*.

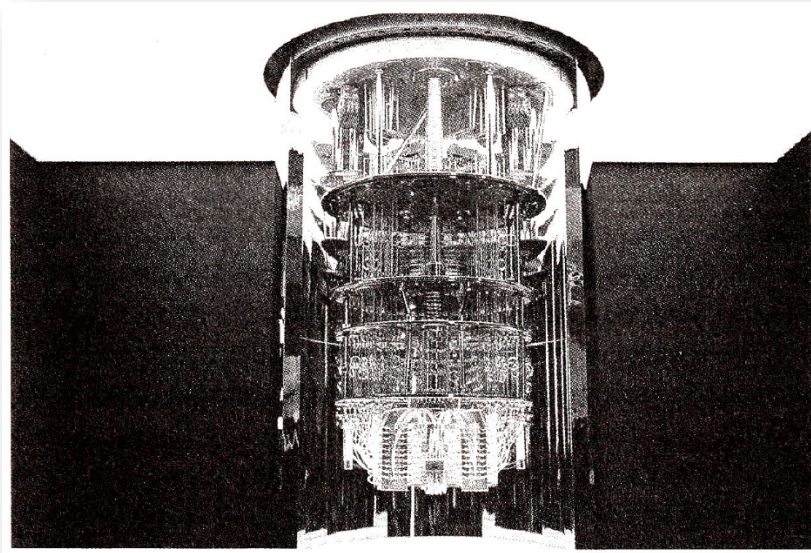


Figura 8: Computador quântico.

Um computador quântico, como aquele mostrado na imagem, assemelha-se frequentemente a um grande candelabro. A maior parte do *hardware* complexo nesta fotografia consiste em tubos e bombas necessários para arrefecer o núcleo até perto do zero absoluto. O coração propriamente dito de um computador quântico não é maior do que uma moeda e encontra-se na parte inferior da imagem.

Os computadores quânticos supercondutores têm uma grande vantagem: podem utilizar tecnologia já disponível, introduzida pela indústria do computador digital. As companhias de Silicon Valley tiveram décadas para aperfeiçoar a arte de gravar circuitos minúsculos em pastilhas de silício. Em cada *chip*, é possível representar os números 0 e 1 pela presença ou ausência de eletrões no circuito.

O computador quântico supercondutor assenta também nesta tecnologia. Ao reduzir a temperatura até uma fração de grau acima do zero absoluto, os circuitos tornam-se mecânico-quânticos, ou seja, tornam-se coerentes, pelo que a sobreposição de eletrões não é afetada. Então, ao unir vários circuitos, é possível entrelaçá-los de modo a tornar possível os cálculos quânticos.

Porém, a desvantagem desta abordagem é que torna necessário um conjunto elaborado de tubos e bombas para arrefecer a máquina. Isto eleva também os custos e introduz a possibilidade de novas complicações e erros. A mais ligeira vibração ou impureza podem quebrar a coerência dos circuitos. Uma pessoa a espirrar nas imediações pode arruinar uma experiência.

Os cientistas medem esta sensibilidade por algo a que chamam tempo de coerência, isto é, o período de tempo em que os átomos permanecem a vibrar coerentemente juntos. Em geral, quanto mais baixa a temperatura, mais lento o movimento dos átomos no ambiente e maior o tempo de coerência. Arrefecer as máquinas para temperaturas ainda mais baixas do que as que se encontram no espaço intergalático maximiza o tempo de coerência.

Todavia, como é impossível alcançar realmente o zero absoluto, é inevitável que se insinuem erros nos cálculos. Enquanto um computador digital comum não tem de se preocupar com isso, torna-se uma grande dor de cabeça com os computadores quânticos. Significa que não podemos confiar plenamente nos resultados. É um problema grave se o que está em jogo são transações de milhares de milhões de dólares.

Uma solução para esse problema é suplementar cada *qubit* num conjunto de *qubits*, o que cria redundância e reduz os erros no sistema. Por exemplo, digamos que um computador quântico faz um cálculo com três *qubits* a suplementar cada *qubit*, e produz a sequência de números 101; uma vez que os valores não coincidem todos, o mais provável é que o dígito central esteja errado e deva

ser substituído por um 1. A redundância pode reduzir os erros no resultado final, mas às custas de aumentar em muito o número de *qubits* no sistema.

Foi sugerido que talvez sejam necessários mil *qubits* para suplementar um único *qubit*, de modo que esta coleção de *qubits* possa corrigir os erros que se insinuem no cálculo. Isto significa, porém, que para um computador quântico de 1000-*qubits* precisaríamos de um milhão de *qubits*. É um número muito elevado, que levará a tecnologia ao limite, mas a Google calcula que será possível alcançar um processador de um milhão de *qubits* dentro de dez anos.

2 - Computador Quântico de Iões Presos

Outro concorrente é o computador quântico de iões presos. Quando pegamos num átomo neutro em termos elétricos e lhe retiramos alguns eletrões, obtemos um ião com carga positiva. É possível suspender um ião, preso numa série de campos elétricos e magnéticos, e ao introduzirmos múltiplos iões eles vibram como *qubits* coerentes. Por exemplo, se o eixo do eletrão gira para cima, então o estado é um 0. Se gira para baixo, é um 1. Assim, o resultado, devido aos estranhos efeitos do mundo quântico, é uma mistura sobreposta de dois estados.

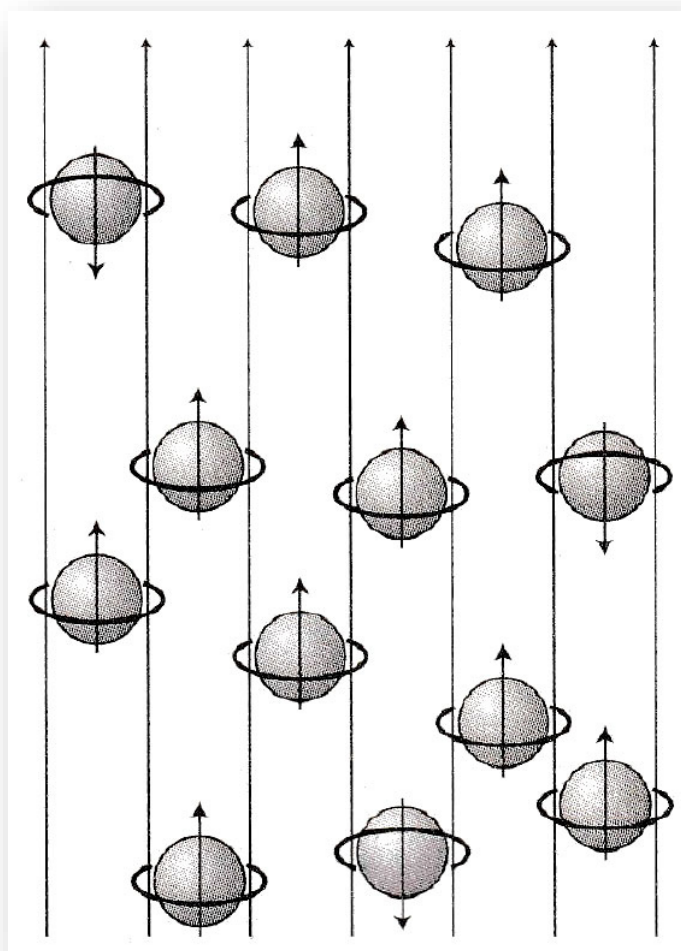


Figura 9: Computador quântico de íons.

Os átomos podem girar como um pião e alinhar-se num campo magnético. Se um átomo girar para cima, pode representar o número 0. Se girar para baixo, pode ser um 1. Mas os átomos podem também existir numa sobreposição destes dois estados. O cálculo é feito ao atingir estes átomos com um *laser*, que pode alterar as rotações e permutar os 0s e 1s, efetuando assim um cálculo.

Então é possível atingir estes íons com raios *laser* ou de micro-ondas, virando-os e causando uma alteração de estado. Estes raios, portanto, agem como um processador, transformando uma configuração de átomos noutra, tal como um CPU num computador digital alterna os transístores entre os estados ligado e desligado.

Esta é, assim, talvez a forma mais transparente de ver como um computador quântico emerge de uma coleção de eletrões

aleatórios. A Honeywell é uma das principais proponentes deste modelo.

Num computador quântico de iões presos, os átomos são mantidos num estado de quase-vácuo, suspensos por um complexo conjunto de campos elétricos e magnéticos que conseguem absorver movimentos aleatórios. O tempo de coerência pode, assim, ser muito mais longo do que num computador quântico supercondutor, e o computador de iões é capaz até de funcionar a temperaturas mais elevadas do que os seus rivais. Um problema, contudo, é o redimensionamento, ou seja, quando se tenta aumentar o número de *qubits*. O redimensionamento é bastante difícil, uma vez que é preciso reajustar continuamente os campos elétricos e magnéticos para manter a coerência, o que é um processo complexo.

3 - Computadores Quânticos Fotónicos

Pouco depois de a Google afirmar ter atingido a supremacia quântica, os chineses anunciaram ter quebrado uma barreira ainda maior, executando em 200 segundos um cálculo que levaria um computador digital a demorar 500 milhões de anos a resolver.

Quando o físico quântico Fabio Sciarrino da Universidade Sapienza em Roma ouviu as notícias, recordou: «A minha primeira impressão foi, uau!» Este computador quântico, ao invés de computar em eletrões, computa em raios de luz *laser*.²

O computador quântico fotónico explora o facto de a luz poder vibrar em diferentes direções, ou seja, em estados polarizados. Por exemplo, um raio de luz pode estar a vibrar verticalmente para cima e para baixo, ou talvez de lado, para a esquerda e para a direita. (Qualquer pessoa que compre óculos de sol com lentes polarizadas para reduzir o brilho do sol na praia está a aproveitar-se disto. Por exemplo, os seus óculos polarizados podem ter uma série de sulcos paralelos na direção vertical, que bloqueiam o sol a vibrar na direção horizontal.) Assim, os números 0 ou 1 podem ser representados pela luz a vibrar em diferentes direções polarizadas.

O computador quântico fotónico começa por disparar um raio *laser* para um divisor de raios, que é apenas um pedaço de vidro muito bem polido, num ângulo de 45 graus. Quando o atinge, o raio *laser* cinde-se em dois, com metade a seguir em frente e a outra metade sendo refletida de lado. O ponto importante, aqui, é que os dois raios são, cada um deles, coerentes, a vibrar em uníssono um com o outro.

Depois os dois raios coerentes podem atingir dois espelhos polidos, que refletem os dois raios de volta para um ponto comum, onde os dois fótons podem entrelaçar-se um no outro. Desta forma, é possível criar um *qubit*. Logo, o raio resultante é agora uma sobreposição de dois fótons entrelaçados. Agora imagine-se o tampo de uma mesa coberto de talvez centenas de divisores de raios e espelhos, que entrelaçam uma série de fótons coerentes. É assim que o computador quântico ótico executa os seus feitos miraculosos. O computador fotónico chinês conseguiu calcular com 76 fótons entrelaçados a moverem-se em cem canais.

Todavia, os computadores fotônicos têm uma desvantagem grave: são um conjunto deselegante de espelhos e divisores de raios que pode facilmente preencher um espaço amplo. Para cada problema, esse grupo complexo de espelhos e divisores de raios tem de ser reajustado em posição diferente. Não se trata de uma máquina para todos os fins, que possamos programar para efetuar cálculos instantâneos. Após cada cálculo, é preciso desmanchá-la e reorganizar os componentes com toda a precisão, algo que é moroso. Além do mais, uma vez que os fótons não interagem facilmente com outros fótons, é difícil criar *qubits* de complexidade crescente.

Contudo, há vários benefícios no uso de fótons em vez de elétrons num computador quântico. Enquanto os elétrons reagem fortemente com a matéria vulgar porque têm carga (e, daí, as perturbações provenientes do meio ambiente poderem ser bastante grandes), os fótons não têm carga, e, portanto, encontram muito menos ruído do ambiente. Na verdade, os raios de luz conseguem passar através de outros raios de luz, com perturbações mínimas. Os fótons são também muito mais rápidos do que elétrons, viajando dez vezes mais depressa do que os sinais elétricos.

Porém, a grande vantagem do computador fotônico, que poderá a dada altura pesar mais do que outros fatores, é que consegue funcionar à temperatura ambiente. Não são necessárias tubagens e bombas dispendiosas para reduzir a temperatura quase ao zero absoluto, algo que depressa faz disparar os custos.

Uma vez que os computadores fotónicos trabalham à temperatura ambiente, o seu tempo de coerência é bastante reduzido. No entanto, isso é contrabalançado pelo facto de os raios *laser* possuírem energia elevada, pelo que os cálculos podem ser feitos muito mais depressa do que o tempo de coerência, e assim as moléculas no ambiente parecem estar a mover-se em câmara lenta. Isso reduz a quantidade de erros criados por interações com o ambiente. A longo prazo, as vantagens de taxas de erro mais baixas e custos reduzidos podem ultrapassar as de outros *designs*.

Mais recentemente, uma *start-up* canadiana chamada Xanadu apresentou o seu computador quântico fotónico, que tem uma distinta vantagem. Baseia-se num *chip* minúsculo (e não numa mesa cheia de equipamento ótico) que manipula uma luz *laser* de infravermelhos através de um labirinto microscópico de divisores de raios. Ao contrário do *design* chinês, o *chip* da Xanadu é programável e o seu computador está disponível na Internet. Contudo, tem apenas oito *qubits*, e ainda requer alguns refrigeradores supercondutores. Porém, como disse Zachary Vernon da Xanadu: «Durante muito tempo, a área da fotónica foi considerada o parente pobre na corrida da computação quântica... Com estes resultados... começa a tornar-se claro que a fotónica não é um concorrente inferior, mas na realidade um dos líderes da competição.» O tempo o dirá.³

4 - Computadores Fotónicos de Silício

Recentemente, uma nova companhia juntou-se à corrida e causou considerável controvérsia. A PsiQuantum, uma *start-up*

recente, convenceu os investidores dos méritos do *design* do seu computador fotônico de silício e chocou Wall Street ao ser avaliada nuns extraordinários 3,1 mil milhões de dólares. Fê-lo sem sequer apresentar um protótipo ou um projeto de demonstração que comprovasse que realmente funcionava.

A grande vantagem dos computadores fotônicos de silício seria que podem usar métodos comprovados pela experiência e aperfeiçoados pela indústria dos semicondutores. Na verdade, a PsiQuantum está em sociedade com a GlobalFoundries, que é uma das três mais avançadas fabricantes de *chips* a nível mundial. Esta *joint venture* com uma companhia tecnológica estabelecida conquistou ao jovem empreendimento reconhecimento imediato em Wall Street.

Um dos motivos pelos quais a PsiQuantum gerou tanto interesse mediático, é porque apresentou o plano para o futuro mais ambicioso até ao momento. Afirmam que, em meados deste século, terão criado um computador ótico de silício de um milhão de *qubits* com aplicações práticas. Consideram que as empresas concorrentes, que se concentraram em computadores quânticos de cerca de cem *qubits*, estão a ser demasiado conservadoras por estarem a focar-se em avanços reduzidos e progressivos. Têm esperança de conseguir dar passos gigantescos no futuro, ultrapassando esses rivais mais cautelosos e tímidos.

Uma das chaves do seu programa é a natureza dual do silício. Não só pode ser utilizado para fabricar transístores e, assim, controlar o fluxo de eletrões, como pode também ser utilizado para

transmitir luz, uma vez que é transparente a certas frequências de radiação de infravermelhos. Esta natureza dual é crucial para o entrelaçamento de fótons.

Um grande atrativo é que resolve o problema da correção de erros. Uma vez que os erros se infiltram em qualquer cálculo devido a interações com o ambiente, pretende-se redundância incluída no sistema, com a criação de *qubits* redundantes. E, com um milhão de *qubits*, eles consideram que podem começar a controlar esses erros, para que seja possível efetuar no computador cálculos reais e práticos.

5 - Computadores Quânticos Topológicos

O candidato mais improvável nesta corrida é o *design* da Microsoft, que utiliza processadores topológicos.

Tal como já vimos, um dos principais problemas de vários dos *designs* anteriores é que a temperatura tem de ser mantida perto do zero absoluto. Porém, de acordo com a teoria quântica, há outra forma, além de iões presos e sistemas fotónicos, de criar um computador quântico. Um sistema pode permanecer estável à temperatura ambiente se mantiver certas propriedades topológicas especiais que sejam sempre preservadas. Pense num pedaço de corda circular com um nó. Se não pudermos cortar a corda, então, por mais que nos esforcemos, é impossível remover o nó. A topologia da corda (a forma, neste caso o nó) não pode ser alterada por qualquer manipulação exceto se for cortada. De forma

semelhante, os físicos tentaram encontrar sistemas físicos que preservem a topologia do sistema, seja qual for a temperatura. Se os encontrarem, isso reduziria em muito o custo e aumentaria a estabilidade de um computador quântico. Com um sistema desses, seria possível criar *qubits* coerentes a partir dessas configurações topológicas.

Em 2018, os físicos na Universidade de Tecnologia de Delft nos Países Baixos anunciaram ter descoberto um material com essas propriedades, nanofios de antimoneto de *índio*. Este material emergiu de uma complexa série de interações de muitas substâncias constituintes, e era, portanto, «emergente». Foi considerada uma quase-partícula de Majorana de modo zero. A comunicação social apregooou-a como um material mágico que permaneceria estável mesmo à temperatura ambiente. A Microsoft até abriu generosamente os cordões à bolsa e começou a montar um novo laboratório quântico no *campus*.

Precisamente quando parecia que tivera lugar um avanço de magnitude fantástica, outro grupo anunciou ter sido incapaz de duplicar os resultados. Após exame mais atento, o grupo da Delft anunciou que talvez se tivessem precipitado na interpretação dos resultados e retrataram-se das afirmações feitas.

A parada é tão elevada que até os físicos começam a acreditar nos seus próprios comunicados de imprensa. Contudo, continuam a ser estudados outros objetos topológicos, como os aniões, pelo que esta abordagem é ainda considerada viável.

6 - Computadores Quânticos D-Wave

Existe atualmente um último tipo de computação quântica, chamado recozimento quântico, a ser trabalhado pela companhia canadiana D-Wave. Embora não use o pleno poder dos computadores quânticos, a D-Wave afirma poder produzir máquinas capazes de alcançar os 5600 *qubits*, muito acima dos valores encontrados em outros *designs* concorrentes, e tem planos para oferecer computadores com mais de 7000 *qubits* dentro de poucos anos. Até agora, várias companhias conhecidas adquiriram computadores D-Wave, que estão a ser vendidos no mercado por valores entre os 10 e os 15 milhões de dólares. Estas companhias incluem a Lockheed Martin, a Volkswagen, a NEC no Japão, o Laboratório Nacional de Los Alamos e a NASA. Aparentemente, os computadores D-Wave destacam-se especialmente numa área, a otimização. Companhias interessadas em otimizar certos parâmetros do seu negócio (como reduzir o desperdício, maximizar a eficiência, aumentar o lucro) investiram nesta tecnologia. Os computadores D-Wave conseguem otimizar dados com recurso a campos elétricos e magnéticos para manipular as correntes em fios supercondutores, até alcançarem o seu estado energético mais baixo.

Em suma, existe uma competição intensa entre corporações e até governos para ganhar um avanço nesta nova tecnologia. O ritmo do progresso na área tem sido espantoso. Todas as grandes companhias de computadores têm o seu próprio programa de computadores quânticos. Os protótipos já estão a demonstrar o seu valor e até a serem comercializados.

Porém, o próximo grande desafio para os computadores quânticos é resolver problemas práticos do mundo real capazes de alterar a trajetória de indústrias inteiras. Os cientistas e engenheiros estão a concentrar-se em problemas que se encontram muito para além do alcance de computadores digitais. O objetivo é utilizar os computadores quânticos na resolução dos grandes problemas da ciência e da tecnologia.

Um dos focos da investigação é decifrar a mecânica quântica por trás da origem da vida, o que ajudará a desvendar o mistério da fotossíntese, a alimentar o planeta, a fornecer energia à sociedade e a curar doenças incuráveis.

¹ Stephen Nellis, «IBM Says Quantum Chip Could Beat Standard Chips in Two Years», Reuters, 15 de novembro de 2021; <https://www.reuters.com/>.

² Emily Conover, «The New Light-Based Quantum Computer Jiuzhang Has Achieved Quantum Supremacy», *Science News*, 3 de dezembro de 2020; <https://www.sciencenews.org/article/new-light-based-quantum-computer-jiuzhang-supremacy>.

³ «Xanadu Makes Photonic Quantum Chip Available Over Cloud Using Strawberry Fields & PennyLane Open-Source Tools Available on Github», *Inside Quantum Technology News*, 8 de março de 2024; <https://www.insidequantumtechnology.com/>.

PARTE DOIS

Computadores Quânticos e a Sociedade

CAPÍTULO 6

A Origem da Vida

Todas as culturas têm o seu mito preferido quanto ao princípio da vida. Sempre nos questionámos sobre o que poderia explicar a gloriosa abundância e diversidade na Terra. Na Bíblia, por exemplo, Deus criou os céus e a Terra em seis dias. Criou o homem à Sua imagem, feito do pó da terra, e depois conferiu-lhe o sopro da vida. Criou todas as plantas e animais para serem dominados por nós.

Na mitologia grega, ao princípio existia apenas o Caos informe e o nada, Porém, desse vazio imenso nasceram os deuses, como Gaia, deusa da Terra, Eros, a deusa do amor, e Éter, deus da luz. Da união entre Gaia e Úrano, o deus do céu noturno, surgiram então as criaturas que habitaram a Terra.

A origem da vida é, talvez, um dos maiores mistérios de todos os tempos. Esta questão dominou, como nenhuma outra, as discussões religiosas, filosóficas e científicas. Ao longo da história, muitos dos pensadores mais profundos acreditaram na existência de uma misteriosa «força vital», capaz de animar o que era inanimado. Muitos cientistas, na verdade, acreditavam em algo chamado geração espontânea, ou seja, que a vida podia surgir magicamente, por si mesma, em matéria inanimada.

No século XIX, os cientistas conseguiram encaixar muitas pistas sobre a origem da vida. Experiências meticulosas levadas a cabo por Louis Pasteur e outros mostraram de forma decisiva que a vida não podia ser gerada espontaneamente, como era crença comum. Ele demonstrou que, ao ferver água, era possível criar um meio ambiente estéril que impediria que os organismos se desenvolvessem de modo espontâneo.

Ainda hoje existem muitas lacunas no nosso entendimento de como a vida surgiu inicialmente na Terra, há quase quatro mil milhões de anos. Na verdade, os computadores digitais são inúteis para a análise dos processos biológicos e químicos fundamentais, ao nível atómico, que poderão esclarecer este problema. Até o mais simples processo molecular consegue superar por completo a capacidade de um computador digital. Contudo, a mecânica quântica talvez possa ajudar a explicar muitas dessas lacunas e a desvendar os mistérios da vida. Os computadores quânticos são perfeitamente talhados para esse problema e estão a começar a descobrir alguns dos segredos mais profundos da vida ao nível molecular.

1. Dois Avanços

Nos anos 50 tiveram lugar duas descobertas monumentais que estabeleceram a agenda para posteriores investigações quanto à origem da vida. A primeira aconteceu em 1952, quando um estudante de doutoramento, Stanley Miller, a trabalhar sob a orientação de Harold Urey na Universidade de Chicago, fez uma simples experiência. Começou com um frasco de água e adicionou-

lhe uma mistura tóxica de substâncias químicas que incluía metano, amoníaco, água, hidrogénio e outros compostos que ele julgava simularem a atmosfera agreste nos primórdios da Terra. De modo a adicionar energia ao sistema (simulando talvez relâmpagos ou a radiação ultravioleta do Sol), ele adicionou uma pequena faísca elétrica. E depois deixou a experiência durante uma semana.

Quando regressou, encontrou dentro do frasco um líquido vermelho. Após um exame cuidadoso, percebeu que a coloração era causada por aminoácidos, que são os constituintes básicos das proteínas no nosso corpo. Por outras palavras, os ingredientes básicos da vida formaram-se sem qualquer intervenção exterior.

Desde então, esta simples experiência foi repetida e modificada centenas de vezes, proporcionando aos cientistas uma perspetiva reveladora das antigas reações químicas que podem ter gerado a vida. É possível imaginar, por exemplo, que os químicos tóxicos existentes em respiradouros hidrotérmicos no fundo dos oceanos pudessem ter fornecido os elementos básicos necessários para criar os primeiros químicos da vida e que esses respiradouros vulcânicos podem ter então proporcionado a energia necessária para transformar tais químicos nos aminoácidos essenciais para a vida. De facto, algumas das células mais primitivas na Terra encontram-se perto desses respiradouros vulcânicos subaquáticos.

Hoje, sabemos como é fácil criar os blocos de construção da vida. Já foram encontrados aminoácidos em nuvens de gás distantes, a muitos anos-luz de nós, ou no interior de meteoritos vindos do espaço. Aminoácidos à base de carbono podem formar as sementes

da vida por todo o Universo. E tudo isto graças às simples propriedades aglutinantes de hidrogénio, carbono e oxigénio, tal como prevê a equação de Schrödinger.

Assim, deveria ser possível aplicar a mecânica quântica para descobrir, passo a passo, os processos quânticos que originaram a vida na Terra. A teoria quântica elementar ajuda-nos a compreender por que razão a experiência de Miller foi tão bem-sucedida, e pode indicar o caminho para descobertas mais profundas, no futuro.

Primeiro, utilizando a mecânica quântica, é possível calcular a energia necessária para quebrar as ligações químicas de metano, amoníaco, etc., de modo a criar aminoácidos. As equações da mecânica quântica mostram que uma faísca elétrica como a que Miller usou na sua experiência tem energia suficiente para o fazer. Mais ainda, mostra-nos que, se a energia de ativação necessária para quebrar essas ligações químicas fosse, de alguma forma, muito maior, a vida nunca teria surgido.

Segundo, vemos que o carbono tem seis eletrões. Dois encontram-se na orbital de primeiro nível, e os outros quatro encontram-se individualmente nos quatro espaços das orbitais do segundo nível. Isto deixa espaço para quatro ligações químicas. É raro encontrar um elemento com quatro ligações entre os elementos químicos da tabela periódica. Porém, as regras da mecânica quântica permitem que essa estrutura crie cadeias longas e complexas de carbono, oxigénio e hidrogénio, criando assim os aminoácidos.

Terceiro, estas reações químicas ocorrem na água, H_2O , que funciona como um cadinho onde as diferentes moléculas se encontram e formam elementos químicos mais complexos. Através da mecânica quântica, descobrimos que a molécula da água tem a forma de um L, e podemos calcular que os dois átomos de hidrogénio formam um ângulo de 104,5 graus relativamente um ao outro. Isto, por sua vez, significa que a molécula de água tem uma carga elétrica líquida distribuída de forma desigual pela molécula. E esta carga elétrica é grande o suficiente para quebrar as ligações fracas de outros elementos químicos, pelo que a água consegue dissolver muitos elementos químicos.

Desta forma, vemos que a mecânica quântica pode criar as condições para a vida. A questão seguinte, no entanto, é: poderemos ir além da experiência de Miller e ver se a teoria quântica pode criar ADN? E, para além disso, poderão os computadores quânticos ser aplicados ao genoma humano para decifrar os segredos de doenças e do envelhecimento?

2. O Que É a Vida?

O segundo avanço derivou diretamente da mecânica quântica. Em 1944, Erwin Schrödinger, já famoso pela sua equação de onda, escreveu uma obra seminal, *What Is Life?* [O que é a Vida?]. Nela, fez a extraordinária afirmação de que a vida em si mesma é um derivado da mecânica quântica, e que o mapa da vida está codificado numa molécula desconhecida. Numa Era em que muitos cientistas ainda acreditavam que uma misteriosa «força vital» animava toda a matéria viva, ele alegou que era possível explicar a

vida através de uma aplicação da mecânica quântica. Ao examinar soluções da sua equação de onda, conjecturou ele, a vida podia surgir da matemática pura, na forma de um código transmitido por essa molécula misteriosa.

Era uma ideia chocante. Porém, dois jovens cientistas, o físico Francis Crick e o biólogo James Watson, viram-na como um desafio. Se era possível encontrar a base da vida numa molécula, então a sua missão seria encontrar essa molécula e provar que ela transportava o código da vida.

«Desde o momento em que li *What Is Life?* de Schrödinger, que me senti muito motivado pela ideia de descobrir o segredo do gene», recorda Watson.¹

Concluíram que a molécula da vida, tal como fora idealizada por Schrödinger, devia estar escondida no material genético do núcleo da célula, grande parte do qual é formado por um químico chamado ADN. Porém, uma vez que as moléculas orgânicas como o ADN são tão minúsculas (ainda mais pequenas do que o comprimento de onda da luz visível), elas são invisíveis, e a tarefa parecia desencorajadora. Optaram por um método indireto, usando o processo baseado na teoria quântica da cristalografia de raio X, para encontrar essa molécula mítica.

Os raios X, ao contrário da luz visível, podem ter um comprimento de onda tão pequeno como os átomos. Se os raios X forem então disparados através de um cristal formado por biliões e

bilhões de moléculas dispostas num padrão simétrico, a difração dos raios X forma um padrão de interferência distinto, passível de ser fotografado. Numa análise meticulosa, um físico experiente consegue estudar as placas fotográficas e determinar que padrão cristalizado criou as imagens.

Ao olhar para as fotografias de raio X de ADN tiradas por Rosalind Franklin, Crick e Watson viram um padrão que identificaram como tendo sido criado por uma dupla hélice. Sabendo que a estrutura geral do ADN era uma dupla hélice, como duas escadas enroladas uma na outra, eles conseguiram montar toda a estrutura do ADN, átomo a átomo.

A mecânica quântica deu-lhes os ângulos formados pelas ligações contendo átomos de carbono, hidrogénio e oxigénio. Assim, como crianças a construir com peças de Lego, eles conseguiram reconstruir a estrutura atómica completa do ADN e explicar como este conseguia fazer cópias de si próprio e transmitir as instruções de todo o desenvolvimento biológico.

Isto, por sua vez, alterou a própria natureza da biologia e da medicina. No século anterior, Charles Darwin conseguira esboçar a *Árvore da Vida*, com todos os ramos a representar a rica diversidade de formas. Essa *Árvore da Vida* enorme fora colocada em movimento por uma única molécula. E, tal como Schrödinger imaginara, tudo isso podia ser deduzido como uma consequência da matemática.

Quando decifraram a molécula de ADN, descobriram que ela era composta por quatro aglomerados de átomos, chamados ácidos nucleicos. Estes quatro ácidos nucleicos, chamados A, C, T e G, estão dispostos numa sequência linear de modo a formar duas longas linhas paralelas, que se entrelaçam então como uma escada para criar a molécula de ADN. (Uma cadeia de ADN é invisível, mas se fosse desenrolada, esta única molécula mediria cerca de 1,80m.) Quando é altura de se reproduzirem, as duas cadeias de ADN desenrolam-se e separam-se em dois fios de ácidos nucleicos. Cada um desses fios funciona então como um molde, apanhando outros átomos pela ordem correta para que cada fio separado possa voltar a ser um fio duplo. E, assim, a vida consegue reproduzir-se.

Dispúnhamos agora da arquitetura pela qual criar a molécula de ADN usando a matemática da teoria quântica. Porém, determinar a forma básica da molécula de ADN era, de certa forma, a parte mais fácil. A parte difícil é decifrar os milhares de milhões de códigos escondidos no interior da molécula.

É como se tentássemos compreender a música e conseguíssemos finalmente martelar algumas notas nas teclas de um piano. Isso, porém, não nos transforma num Mozart. Aprender algumas notas é somente o princípio de uma longa viagem.

3. Física e Biotecnologia

Uma pessoa que esteve na vanguarda deste esforço para sequenciar todos os nossos genes foi o bioquímico galardoado com

o Prémio Nobel, Walter Gilbert. Quando o entrevistei, ele admitiu que esse campo de investigação não fazia parte dos seus planos originais. Na verdade, começou a trabalhar em Harvard como professor de Física, a estudar o comportamento de partículas subatómicas criadas em potentes aceleradores. Trabalhar em biologia não podia estar mais longe dos seus planos.

Porém, começou a mudar de ideias. Primeiro, apercebeu-se de como seria difícil tornar-se efetivo em Harvard, com tanta concorrência. O campo da física de partículas tinha muitos investigadores brilhantes com quem seria forçado a competir. Por um golpe do acaso, a mulher dele trabalhava com James Watson, que ele conhecera anteriormente, na Universidade de Cambridge, e assim estava familiarizado com o trabalho pioneiro a ser desenvolvido na nova área da biotecnologia, que na altura fervilhava com ideias e descobertas. Intrigado, deu por si a dividir o seu tempo entre as equações obscuras das partículas elementares e a meter as mãos na massa na área da biologia.

Fez assim a jogada mais arriscada da sua carreira.

Enquanto professor de Física, deu um salto brutal, trocando a física de partículas elementares pela biologia. Todavia o risco compensou, porque em 1980 recebeu o Prémio Nobel da Química. Entre outros feitos, foi um dos primeiros a desenvolver uma técnica rápida para ler a molécula de ADN, gene a gene.

Os seus antecedentes na área da física foram, na verdade, úteis. Tradicionalmente, a maioria dos departamentos de biologia estava preenchido com pessoas especializadas num animal ou planta. Algumas passavam a vida toda a descobrir e a dar nomes a espécies recém-descobertas. Porém, de súbito, começavam a ser feitos grandes avanços por físicos quânticos através de cálculos avançados. A fluência na linguagem abstrusa da mecânica quântica ajudou-o a fazer o avanço que alterou o nosso entendimento das bases moleculares da vida.

Ajudou então a criar ímpeto para o Projeto do Genoma Humano. Em 1986, durante uma palestra em Cold Spring Harbor, Nova Iorque, ele fez uma estimativa do custo desse empreendimento ambicioso e sem precedentes: três mil milhões de dólares. «O público ficou estupefacto», recordou Robert Cook-Deegan, autor de *The Gene Wars [A Guerra dos Genes]*. «As projeções de Gilbert provocaram um tumulto.» Muitas pessoas consideraram que este era um valor extraordinariamente baixo. Na altura em que ele fez essa previsão surpreendente, tinham sido sequenciados apenas meia dúzia de genes. Muitos cientistas julgavam até que o genoma humano estaria para sempre fora do nosso alcance.

Não obstante, esse valor seria o orçamento aprovado pelo Congresso dos Estados Unidos para o Projeto do Genoma Humano. A tecnologia estava a avançar tão rapidamente que o projeto ficou concluído antes do previsto e abaixo do orçamento, algo inédito em Washington. (Perguntei-lhe como chegou a esse número. Ele sabia que havia três mil milhões de pares de bases no nosso ADN e calculou que custaria cerca de um dólar sequenciar cada par.)

Gilbert previu até que, no futuro, «será possível ir a uma farmácia e obter a nossa sequência de ADN num CD, que poderemos analisar depois em casa no nosso Macintosh... poderemos tirar um CD do bolso e dizer: “Eis um ser humano: sou eu!”»

Uma pessoa que foi profundamente influenciada por tudo isto foi Francis Collins, o ex-diretor dos Institutos Nacionais de Saúde. É, atualmente, um dos médicos mais influentes na medicina. Milhões de pessoas viram-no na televisão a falar sobre os mais recentes desenvolvimentos durante a pandemia de covid-19.

Perguntei a Collins como se interessara por biologia, apesar de ter começado a sua especialização na área da química. Ele confessou-me que a biologia sempre lhe parecera muito «desorganizada», com tantos nomes arbitrários para tantos animais e plantas. Não havia lógica nenhuma, pensava ele. Na química, via ordem, disciplina e padrões que podiam ser estudados e duplicados. Assim, ensinava físico-química, usando a equação de Schrödinger para explicar o funcionamento interno das moléculas.

Contudo, acabou por perceber que estava na área errada. A físico-química estava bem estabelecida, com princípios e conceitos comprovados.

Começou então a reconsiderar a biologia. Enquanto, na biologia, os cientistas davam estranhos nomes gregos a insetos e animais obscuros, o campo da biotecnologia estava a rebentar de novas

ideias e conceitos inovadores. Era uma área não cartografada, território virgem para os recém-chegados.

Consultou outros, incluindo Walter Gilbert que lhe contou como fizera a transição da física de partículas elementares para o sequenciamento de ADN e encorajou Collins a fazer o mesmo.

Assim, Collins deu o salto e nunca se arrependeu. Recorda: «Compreendi, “Oh, meu Deus, é aqui que está a ter lugar a verdadeira época dourada.” Temia ver-me a ensinar termodinâmica a uma data de alunos que odiavam visceralmente o tema. E, na verdade, aquilo que se passava na biologia parecia a mecânica quântica nos anos 20... Fiquei completamente assombrado.»

Collins ganhou muito rapidamente reputação na área. Em 1989, descobriu a mutação genética responsável pela fibrose cística. Descobriu que é causada pela ausência de apenas três pares de bases no nosso ADN (do ATCTTT ao ATT).

Por fim, tornou-se o principal administrador médico do país. Levou, no entanto, o seu estilo pessoal para Washington. Ia trabalhar de motorizada. E nunca teve receio de assumir as suas crenças religiosas pessoais. Até escreveu um *bestseller*: *A linguagem de Deus: A ciência apresenta provas para a fé*.

4. Três Fases na Biotecnologia

Gilbert e Collins, em certo sentido, representam algumas das fases no desenvolvimento desta área.

4.1 Fase Um: Cartografar o Genoma

Na Fase Um, Walter Gilbert e outros conseguiram completar o Projeto do Genoma Humano, um dos mais importantes empreendimentos científicos de todos os tempos. No entanto, o catálogo do genoma humano é como um dicionário com 20.000 rubricas e nenhuma definição. Por si só, é um feito monumental, mas inútil.

4.2 Fase Dois: Determinar a Função dos Genes

Na Fase Dois, Francis Collins e outros tentaram preencher as definições desses genes. Ao sequenciarem doenças, tecidos, órgãos, etc., é possível compilar meticulosamente a forma como os genes funcionam. É um processo penosamente lento, mas, aos poucos, o dicionário está a compor-se.

4.3 Fase Três: Modificar e Melhorar o Genoma

Estamos agora a entrar gradualmente na Fase Três, em que podemos usar esse dicionário para nos tornarmos nós próprios escritores. Significa isto usar computadores quânticos para decifrar como os genes funcionam ao nível molecular, de modo a criar novas

terapias e novos instrumentos para atacar doenças incuráveis. Assim que compreendermos como elas infligem os seus estragos ao nível molecular, talvez possamos usar esse conhecimento com o objetivo de idealizar novas técnicas para neutralizar ou curar essas doenças.

5. O Paradoxo da Vida

Na tentativa de identificar a origem da vida, vemo-nos ainda perante um paradoxo flagrante. Como poderiam acontecimentos químicos aleatórios criar as moléculas extraordinariamente complexas da vida e num tão curto período de tempo?

Os geólogos acreditam que a Terra tem 4,6 mil milhões de anos. Durante quase mil milhões de anos, a Terra esteve liquefeita e demasiado quente para sustentar vida. Devido a repetidos impactos de meteoros e erupções vulcânicas, os antigos oceanos provavelmente ferveram e evaporaram-se em várias ocasiões, tornando impossível a existência de vida. Porém, há 3,8 mil milhões de anos, a Terra já arrefecera gradualmente o suficiente para permitir a formação de oceanos. Uma vez que se julga que o ADN teve origem há cerca de 3,7 mil milhões de anos, isso significa que em apenas 200 milhões de anos o ADN surgiu, do nada, incluindo os processos químicos que lhe permitem utilizar energia e reproduzir-se.

Alguns cientistas afirmaram não acreditar que tal tenha sido possível. Fred Hoyle, um dos grandes pioneiros da cosmologia,

sustentava que, tendo em conta a rapidez com que o ADN parecia ter surgido, não houvera pura e simplesmente tempo suficiente para que a vida se tivesse formado na Terra, pelo que devia ter vindo do espaço. Sabemos que há rochedos e nuvens de gás no espaço profundo que contêm aminoácidos, portanto talvez as origens da vida estivessem noutro lugar.

A isto chama-se teoria da panspermia e, recentemente, novas evidências reacenderam o interesse nela. Ao examinar o conteúdo mineral e as minúsculas bolhas de ar presas no interior de meteoritos, encontramos uma equivalência exata com as rochas encontradas em Marte pelas nossas sondas espaciais. Dos 60.000 meteoritos descobertos até agora, pelo menos 125 foram identificados de forma conclusiva como sendo provenientes de Marte.

Por exemplo, um meteoro chamado ALH 84001 caiu no Polo Sul há 13.000 anos. Terá sido provavelmente projetado para o espaço pelo impacto de um meteoro há 16 milhões de anos, e depois pairou à deriva até, por fim, aterrar na Terra. A análise microscópica do interior do meteoro mostra evidências de estruturas semelhantes a vermes. (Ainda hoje se debate se essas estruturas são antigas criaturas multicelulares fossilizadas ou um fenómeno natural.) Se as rochas conseguem viajar entre Marte e a Terra, por que não o ADN?

Acredita-se agora que pode haver dezenas de meteoros a pairar entre Marte, Vénus, a Lua e a Terra, onde os impactos meteóricos foram suficientemente potentes para projetar rochas para o espaço

que, a dada altura, acabaram por aterrar noutro planeta. Não podemos excluir a possibilidade de o ADN poder ter vindo de outro lugar que não a Terra.

Contudo, existe outra explicação para este mistério.

Tal como já vimos, a teoria quântica permite a existência de vários mecanismos que aceleram muitíssimo um processo químico. O integral de caminho discutido anteriormente soma todos os possíveis caminhos numa reação química, incluindo os mais improváveis. Caminhos que são efetivamente proibidos pelas habituais regras newtonianas podem na verdade ser possíveis pela mecânica quântica. Alguns deles poderiam levar à criação de estruturas moleculares complexas.

Sabemos também que as enzimas aceleram os processos químicos. São capazes de unir os elementos químicos de modo que reajam rapidamente, e depois reduzem o limiar de energia para poderem tunelar através da barreira energética. Isto significa que até reações químicas altamente improváveis podem tornar-se realidade. Reações que, aparentemente, violam o princípio da conservação de energia, podem ser permitidas ao abrigo da teoria quântica.

Assim, por outras palavras, a mecânica quântica pode ser a razão pela qual a vida começou tão cedo no planeta Terra. Com a chegada dos computadores quânticos, espera-se que possam vir a ser

colmatadas muitas das lacunas por preencher no nosso entendimento da vida.

6. Química Computacional e Biologia Quântica

Os rápidos avanços nos computadores quânticos estão a dar origem a novas ciências, chamadas química computacional e biologia quântica. Finalmente, os computadores quânticos estão a possibilitar a criação de modelos de moléculas realistas, oferecendo aos cientistas a capacidade de ver, átomo a átomo, nanossegundo a nanossegundo, como decorrem as reações químicas.

Por exemplo, imagine usar um livro de culinária para criar uma refeição. É conveniente seguir simplesmente as instruções, passo a passo, mas não fazemos ideia de como os sabores e ingredientes interagem para criar uma refeição deliciosa. Se nos afastarmos da receita, passa a ser uma questão de experimentação e erro, e de palpites. É moroso e conduz a demasiados becos sem saída. No entanto, é basicamente assim que se faz química hoje em dia.

Agora imagine que podia analisar todos os ingredientes ao nível molecular. Em princípio, seria possível criar receitas novas e deliciosas a partir dos primeiros princípios, sabendo como as moléculas interagem entre si. É esta a esperança que nos trazem os computadores quânticos, poder compreender a interação de genes, proteínas e químicos ao nível molecular.

A investigadora Jeannette M. Garcia da IBM diz: «À medida que as moléculas se tornam maiores, escapam muito rapidamente ao reino daquilo que é possível simular com computadores clássicos.»²

Garcia escreveu também que «prever com uma precisão total o comportamento até mesmo de moléculas simples está para além das capacidades dos computadores mais potentes. É aqui que a computação quântica oferece a possibilidade de fazermos avanços significativos nos próximos anos». Ela observa ainda que os computadores digitais só podem calcular de forma fiável o comportamento de apenas um ou dois eletrões. Para além disso, o cálculo ultrapassa as capacidades de qualquer computador clássico, a menos que se façam aproximações drásticas.³

Acrescenta ela ainda: «Os computadores quânticos encontram-se agora no ponto em que podem começar a modelar a energia e as propriedades de pequenas moléculas, como o hidreto de lítio — oferecendo a possibilidade de modelos que fornecerão caminhos mais claros para as descobertas do que aqueles de que dispomos hoje.»

Linghua Zhu, da Virginia Tech, diz: «Os átomos são quânticos, o computador é quântico, estamos a usar o *quantum* para simular o *quantum*. Quando usamos métodos clássicos, recorremos sempre a aproximações, mas com um computador quântico é possível saber exatamente como cada átomo está a interagir com os outros.»⁴

Por exemplo, imaginemos um artista a tentar fazer uma cópia da *Mona Lisa*. Se dermos ao artista apenas palitos, a imagem resultante será uma figura básica e rudimentar. As linhas retas não bastam para capturar a complexidade da forma humana. Porém, se lhe dermos uma caneta de ponta fina com várias cores, é possível criar um manancial de formas curvas capazes de formar uma cópia razoável do famoso quadro. Por outras palavras, são necessárias linhas curvas para simular linhas curvas. Da mesma forma, apenas um computador quântico pode capturar a complexidade de sistemas quânticos, como os elementos químicos e os blocos de construção da vida.

Para ver como isto funciona, regressemos à equação de onda de Schrödinger, mencionada no Capítulo Três. Se bem se lembram, introduzimos uma quantidade chamada H (o hamiltoniano) que representa a energia total do sistema objeto de estudo. Isso significa que, para moléculas grandes, essa quantidade consiste na soma de um grande número de termos, como:

- A energia cinética de cada eletrão e núcleos
- A energia eletrostática de cada partícula
- A interação entre todas as várias partículas
- Os efeitos da rotação

Se estivermos a estudar o sistema mais simples possível — o átomo de hidrogénio, com apenas um eletrão e um protão — então isto pode ser resolvido com exatidão em qualquer cadeira do primeiro ano do curso de Física. A derivação requer pouco mais do que cálculos que se aprendem no terceiro ano. Ainda assim, para um sistema tão simples, obtemos uma autêntica mina de resultados, por exemplo, todo o conjunto de níveis de energia do átomo de hidrogénio.

Porém, mesmo que tenhamos apenas dois eletrões, representando o átomo de hélio, as coisas complicam-se muito depressa, uma vez que temos agora interações complexas entre os dois eletrões. Para três eletrões ou mais, a questão depressa dispara e escapa ao controlo dos computadores digitais. Assim, é preciso fazer um grande número de aproximações para obter resultados razoavelmente precisos. Os computadores quânticos podem ser benéficos para isto.

Como exemplo, em 2020, anunciou-se que o computador da Google, Sycamore, estabelecera um novo recorde; era agora capaz de simular com exatidão uma cadeia de 12 átomos de hidrogénio utilizando 12 *qubits*.

«Estamos bastante empolgados com esse resultado, porque é mais do dobro do número de *qubits* e do número de eletrões em qualquer simulação química quântica anterior, e com o mesmo nível de precisão», diz Ryan Babbush, que fez parte da equipa que estabeleceu o novo recorde.⁵

O computador quântico conseguiu também modelar uma reação química envolvendo hidrogénio e nitrogénio, mesmo que a localização de um dos átomos de hidrogénio fosse alterada. Babbush acrescenta: «Mostra que, na verdade, este aparelho é um computador digital quântico completamente programável que pode ser usado para qualquer tarefa que se pretenda.»

Garcia conclui: «Os computadores de construção clássica não podem, pura e simplesmente, lidar com o nível de complexidade de substâncias tão vulgares como a cafeína.» Para ela, o futuro é quântico.

Porém, estes progressos iniciais apenas abriram o apetite dos cientistas quânticos. Estes estão mais do que prontos para atacar projetos cada vez mais ambiciosos, como a fotossíntese, que é a base da vida na Terra. O segredo de como usar a luz do Sol para criar a abundância de frutos e vegetais que vemos à nossa volta pode um dia vir a ser desvendado pelos computadores quânticos. Assim, o alvo seguinte pode ser a fotossíntese, um dos processos quânticos mais importantes do planeta.

¹ Walter Moore, *Schrödinger: Life and Thought* (Cambridge University Press, 1989), 403.

² Leah Crane, «Google Has Performed the Biggest Quantum Chemistry Simulation Ever», *New Scientist*, 12 de dezembro de 2019; <https://www.newscientist.com/article/2227244-google-has-performed-the-biggest-quantum-chemistry-simulation-ever/>.

³ Jeannette M. Garcia, «How Quantum Computing Could Remake Chemistry», *Scientific American*, 15 de março de 2021; <https://www.scientificamerican.com/article/how-quantum-computing-could-remake-chemistry/>.

⁴ Crane.

⁵ Ibid.

CAPÍTULO 7

Um Mundo Mais Verde

Quando me embrenho por uma floresta densa num dia luminoso de primavera, não consigo deixar de me sentir deslumbrado pela vegetação exuberante e viçosa que me rodeia, e pela explosão de flores delicadas por todo o lado. Para onde quer que olhe, vejo esse arco-íris de cores vivas. Vejo a vida a despontar em todas as direções, com as plantas a absorverem avidamente a luz solar e, de alguma forma, a converterem essa energia em tamanha abundância.

No entanto, fascina-me também saber que estou a assistir a um drama que se desenrola há mais de três mil milhões de anos, um processo que, literalmente, torna possível a existência de vida complexa na Terra. Aquilo que impulsiona a vida neste planeta é a fotossíntese, o processo enganadoramente simples pelo qual as plantas convertem dióxido de carbono, luz solar e água, em açúcar e oxigénio. É assombroso constatar que a fotossíntese cria 15.000 toneladas de biomassa por segundo, sendo responsável por cobrir a Terra de vegetação verde.

A vida seria inimaginável sem a fotossíntese e, contudo, de forma extraordinária e apesar de todos os nossos avanços na ciência, os biólogos ainda não têm a certeza de como ocorre

precisamente este processo vital. Alguns biólogos acreditam que, como a captura de um fóton de energia pela fotossíntese é quase 100 por cento eficaz, deve ser mecânico-quântico. (Todavia, se calcularmos a eficácia geral de transformar luz no produto final — combustível e biomassa —, que requer uma série de passos complexos e reações químicas intrincadas, então a eficácia final cai para 1 por cento.) Se, um dia, os computadores quânticos conseguissem resolver o segredo da fotossíntese, seria possível fabricar células fotovoltaicas com uma eficácia próxima da perfeição, tornando realidade a Era Solar. Poderíamos também aumentar a produção das colheitas para alimentar um planeta esfomeado. Talvez fosse possível modificar a fotossíntese para que as plantas medrassem mesmo em ambientes agrestes. Ou, se um dia iniciarmos a colonização de Marte, poderíamos modificar a fotossíntese de modo que a vegetação vicejasse no planeta vermelho.

Uma via de investigação extraordinária, a chamada fotossíntese artificial, pode um dia vir a dar-nos uma «folha artificial», uma forma mais versátil de fotossíntese capaz de tornar as plantas, em geral, mais eficientes. Por vezes esquecemo-nos de que a fotossíntese é o produto final de milhares de milhões de anos de processos totalmente aleatórios e caóticos, e que foi apenas por mero acaso que desenvolveu as suas propriedades notáveis. Assim, quando os computadores quânticos desvendarem o mistério da fotossíntese ao nível quântico, talvez seja possível melhorar e modificar a forma como as plantas crescem. Milhares de milhões de anos de evolução vegetal podem ser comprimidos em alguns meses, num computador quântico.

Por exemplo, Graham Fleming do Instituto Kavli de Energia e Nanociência em Berkeley diz: «Quero realmente saber como é que a natureza trabalha nos primeiros passos da fotossíntese. Então poderemos usar esse conhecimento para criar sistemas artificiais com todas as características positivas dos sistemas naturais e sem o fardo de terem de produzir sementes, sustentar a vida, ou defender-se contra insetos que querem comê-los.»¹

Ao longo da história, as plantas sempre foram um mistério. Pareciam florescer por si só e precisavam apenas de um pouco de água de vez em quando. Desde tempos antigos que se acreditava que as plantas, para crescer, comiam de alguma forma o solo. Só em meados do século XVII é que esta ideia se modificou. Jan van Helmont, um cientista belga, mediu o peso de uma planta com o respetivo solo. Para sua surpresa, descobriu que o peso do solo não se alterava ao longo do tempo. Concluiu assim que as plantas cresciam por causa da água.

Então, o químico Joseph Priestley conduziu experiências mais pormenorizadas, incluindo uma em que colocava uma planta num frasco de vidro, com uma vela acesa. Descobriu que a vela se extinguia rapidamente se estivesse sozinha, mas continuava a arder na presença da planta, uma vez que a planta consumia o dióxido de carbono no ar e fornecia oxigénio à vela.

Em inícios do século XIX, os biólogos começavam a encaixar as peças e a compreender que as plantas precisavam de luz solar, água e dióxido de carbono, e que produziam oxigénio nesse processo.

A fotossíntese é tão vital para a Terra que reformulou literalmente a atmosfera do planeta. Nos primórdios, quando a Terra se formou, a sua atmosfera era composta predominantemente por dióxido de carbono, proveniente da desgaseificação de antigos vulcões. Vemos o mesmo nas atmosferas de Marte e Vénus, que são formadas por dióxido de carbono quase puro devido aos seus vulcões.

Porém, quando a fotossíntese surgiu na Terra, converteu o dióxido de carbono no oxigénio que respiramos hoje. Assim, a cada respiração, sou recordado desta transição monumental que teve lugar há milhares de milhões de anos.

Nos anos 50, os cientistas completaram aquilo que ficou conhecido como ciclo de Calvin, os complexos processos químicos através dos quais o dióxido de carbono e a água se transformam em hidratos de carbono. Com recurso a várias técnicas, incluindo a análise com carbono-14, eles conseguiram seguir o movimento de certas substâncias químicas específicas à medida que viajavam pela planta.

Desta forma, os biólogos conseguiram ir compreendendo lentamente a história da vida das plantas. Todavia, um passo sempre lhes escapou. Como é que as plantas capturam a energia de fotões de luz? O que dá início a esta longa cadeia de acontecimentos, que começa com a captura da energia da luz solar? Até hoje, é um mistério. Porém, os computadores quânticos podem ajudar a desvendá-lo.

1. A Mecânica Quântica da Fotossíntese

Muitos cientistas acreditam que a fotossíntese é um processo quântico. Começa quando os fótons, pacotes discretos de luz, atingem uma folha que contém clorofila. Essa molécula especial absorve a luz vermelha e azul, mas não a verde, que é difundida de novo para o meio ambiente. Assim, a cor verde das plantas deve-se ao facto de o verde não ser absorvido. (Se a natureza tivesse criado plantas que absorvessem toda a luz possível, as plantas seriam pretas e não verdes.)

Quando a luz atinge uma folha, seria de esperar que se difundisse em todas as direções e se perdesse para sempre. Porém, é aqui que acontece a magia quântica. O fóton de luz afeta a clorofila, o que cria vibrações de energia na folha, chamadas excitações, que de alguma maneira se deslocam sobre a superfície da folha. Por fim, estas excitações entram naquilo a que se chama o centro de reação na superfície da folha, onde a energia do excitão é usada para converter o dióxido de carbono em oxigénio.

De acordo com a Segunda Lei da Termodinâmica, quando a energia se converte, de uma forma para outra, muita dessa energia perde-se no ambiente. Assim, seria de esperar que boa parte da energia do fóton se dissipasse ao atingir a molécula de clorofila e, assim, se perdesse durante este processo, como calor de escape.

Ao invés, miraculosamente, a energia do excitão é transportada para o centro de reação sem que haja praticamente nenhuma perda

de energia. Por razões que ainda não compreendemos, este processo tem uma eficácia de quase 100 por cento.

Este fenómeno, mediante o qual os fotões criam excitações que se acumulam nos centros de reação, é como se, num torneio de golfe, cada golfista atirasse uma bola aleatoriamente, em todas as direções. Depois, como que por magia, todas estas bolas mudariam de direção, de alguma forma, e acertariam à primeira no buraco, de todas as vezes. Não devia estar a acontecer, mas é algo que conseguimos de facto medir em laboratório.

Uma teoria diz que são os integrais de caminho que tornam possível esta viagem do excitão, uma ideia que, como vimos atrás, foi introduzida por Richard Feynman. Se bem se lembram, Feynman reescreveu as leis da teoria quântica em termos de caminhos. Quando um eletrão se move de um ponto a outro, «fareja» de alguma forma todos os caminhos possíveis entre esses dois pontos. Depois calcula uma probabilidade para cada trajeto. Assim, o eletrão está de certa forma «consciente» de todos os caminhos possíveis que unem esses dois pontos. Significa portanto que o eletrão «escolhe» o caminho de maior eficiência.

Existe aqui ainda um segundo mistério. O processo da fotossíntese decorre à temperatura ambiente, onde os movimentos aleatórios de átomos no ambiente deviam destruir qualquer coerência entre os excitações. Normalmente, os computadores quânticos têm de ser arrefecidos até perto do zero absoluto para minimizar estes movimentos caóticos, e, no entanto, as plantas

funcionam perfeitamente à temperatura ambiente. Como é possível?

2. Fotossíntese Artificial

Uma forma de provar ou refutar experimentalmente a existência de efeitos quânticos é procurar indicações de coerência, o sinal revelador de efeitos quânticos que se verifica quando os átomos vibram em uníssono. Normalmente esperar-se-ia encontrar uma confusão de vibrações individuais, sem som nem tom, mas se detetássemos algumas vibrações em fase com outras, isto assinalaria de imediato a presença de efeitos quânticos,

Em 2007, Graham Fleming declarou ter visto este fenómeno esquivo. Pôde anunciar a descoberta de coerência na fotossíntese porque estava a usar um espectroscópio multidimensional especial, ultrarrápido, capaz de gerar pulsos de luz com a duração de um femtossegundo (um milésimo de um bilionésimo de segundo). Precisou destes *lasers* excecionalmente rápidos para detetar raios de luz coerentes antes que as colisões aleatórias com o ambiente destruíssem a coerência. Do ponto de vista do *laser*, os átomos do ambiente estavam quase congelados no tempo e, portanto, podiam em grande medida ser ignorados. Conseguiu assim demonstrar que é possível as ondas de luz existirem simultaneamente em dois ou mais estados quânticos. Isso significa que a luz poderia explorar múltiplos caminhos ao mesmo tempo até ao centro de reação. Assim, explicar-se-ia como os excitações encontram o centro de reação quase 100 por cento das vezes.

K. Birgitta Whaley, colega de Fleming em Berkeley, acrescenta: «O excitão “escolhe” efetivamente o trajeto mais eficaz... de um menu quântico de caminhos possíveis. Isto requer que todos os estados possíveis da partícula viajante sejam sobrepostos num estado quântico singular e coerente por décimos de femtossegundos.»²

Pode explicar também como a fotossíntese tem lugar à temperatura ambiente, sem todos os canos e tubagens que se encontram num laboratório de física.

Os computadores quânticos são perfeitamente talhados para efetuar esses cálculos quânticos. Se esta abordagem com os integrais de caminho for válida, significa então que podemos alterar a dinâmica da fotossíntese para resolver uma variedade de problemas. Em lugar de efetuar milhares de experiências com plantas, o que demora uma quantidade desmesurada de tempo, essas experiências poderiam ser feitas de forma virtual.

Por exemplo, talvez fosse possível cultivar colheitas mais eficientes, ou produzir mais frutas e legumes, aumentando assim o rendimento dos agricultores.

Além disso, a alimentação humana depende crucialmente de meia dúzia de cereais, como o arroz e o trigo, pelo que uma praga súbita que ataque os nossos cereais poderia afetar toda a cadeia alimentar. Estaríamos impotentes se a produção de apenas um dos nossos alimentos de base fosse subitamente interrompida.

O novo foco dos cientistas na criação de uma «folha artificial» com fotossíntese artificial ajudar-nos-ia a estar menos dependentes deste importante processo natural.

3. Folha Artificial

Quando discutimos os maiores problemas do mundo, o CO_2 é, regra geral, descrito como um dos vilões da história. O CO_2 captura a energia do Sol e faz com que a Terra aqueça. E se conseguíssemos reciclar este gás de estufa de modo a torná-lo inofensivo? Talvez então pudéssemos criar produtos químicos com valor comercial a partir do CO_2 reciclado. Os cientistas propõem que a luz do Sol possa fazer exatamente isso. Esta nova tecnologia retiraria o CO_2 do ar, combinando-o então com luz solar e com água para criar combustível e outros produtos químicos valiosos, de certo modo como faria a folha de uma planta, mas de forma artificial. Queimar esse combustível criaria mais CO_2 , que se recombinaria então com luz solar e água para criar mais combustível, num processo contínuo de reciclagem, sem ganho líquido de CO_2 . Desta forma, o CO_2 , que tem sido apresentado como o vilão, torna-se um recurso útil.

Para que esta reciclagem funcionasse, passaria por dois passos.

Primeiro, a luz solar seria usada para decompor a água em hidrogénio e oxigénio. O hidrogénio produzido podia então ser utilizado em células de combustível para alimentar veículos movidos a hidrogénio limpo. Um dos problemas dos carros elétricos é que usam baterias que, por sua vez, vão buscar a energia

essencialmente a centrais que funcionam a carvão e petróleo. Embora a bateria elétrica consuma energia limpa, a eletricidade, originalmente, vem de indústrias poluidoras. Assim, existe atualmente um preço oculto na utilização de baterias elétricas. As células de combustível, por outro lado, queimam hidrogénio e oxigénio, o que produz água como resíduo. Assim, as células de combustível queimam de forma limpa, sem recorrer a combustíveis fósseis. Contudo, a infraestrutura industrial baseada nas células de combustível está muito menos desenvolvida, em comparação com a bateria elétrica.

Segundo, o hidrogénio produzido pela decomposição da água pode ser combinado com CO_2 para produzir combustível e hidrocarbonetos valiosos. Este combustível pode, por sua vez, ser queimado, voltando a produzir CO_2 , sendo este de novo recombinação com hidrogénio e, portanto, reciclado. Criar-se-ia assim um novo ciclo no qual o CO_2 poderia ser continuamente reutilizado sem que se acumulasse na atmosfera, estabilizando a quantidade existente deste gás de estufa e fornecendo, ao mesmo tempo, energia.

«O nosso objetivo é fechar o ciclo do combustível de carbono», diz Harry Atwater, diretor do Centro Conjunto de Fotossíntese Artificial JCAP), um ramo do Departamento de Energia que financia a fotossíntese artificial. «É um conceito audaz.»³

Se for bem-sucedido, provocaria uma alteração de paradigma na batalha contra o aquecimento global. O CO_2 passaria a ser visto apenas como uma engrenagem numa máquina mais vasta que

mantém a sociedade em movimento. Os computadores quânticos podem vir a desempenhar um papel decisivo no advento da reciclagem de carbono. Na revista Forbes, o investigador quântico Ali El Kaafarani diz que «os computadores quânticos podem conseguir acelerar a descoberta de novos catalisadores de CO₂ capazes de garantir uma reciclagem eficiente do dióxido de carbono, produzindo ao mesmo tempo gases úteis como o hidrogénio e o monóxido de carbono».⁴

Embora possa parecer um sonho, o primeiro passo nesse sentido foi dado em 1972, quando Akira Fujishima e Kenichi Honda demonstraram que a luz podia ser usada para dividir a água em hidrogénio e oxigénio, usando um elétrodo feito de dióxido de titânio e outro feito de platina. Embora tivesse uma eficiência de apenas 0,1 por cento, esta prova de princípio mostrou que era possível criar uma folha artificial.

Desde então, os químicos tentaram modificar essa experiência para reduzir os custos, uma vez que a platina é muito cara. No JCAP, por exemplo, os químicos conseguiram usar a luz para dividir a água com uma eficiência de 10 por cento, utilizando um elétrodo feito de um semicondutor e catalisadores feitos de níquel.

A parte mais difícil é, agora, completar o passo final e encontrar uma forma barata de combinar hidrogénio com CO₂ para criar combustível. Isso é difícil porque o CO₂ é uma molécula extraordinariamente estável. Daniel Nocera, um químico de Harvard, pensa ter encontrado uma forma viável de alcançar esse objetivo. Usa uma bactéria, *Ralstonia entropha*, que consegue

combinar hidrogénio com CO₂ para criar combustível e biomassa com uma eficiência de 11 por cento. Nocera diz: «Fizemos uma fotossíntese artificial que é dez a cem vezes melhor do que a natureza... Já não é, necessariamente, um problema de química. Nem sequer é um problema de tecnologia.» Para ele, o principal problema está resolvido. É agora apenas uma questão económica, ou seja, se a indústria e o governo apoiarão a reciclagem de CO₂, tendo em conta os custos.⁵

Pamela Silver, de Harvard, que trabalha neste projeto, diz que usar micróbios para completar o ciclo do carbono pode parecer estranho ao princípio, mas os micróbios são já usados, à escala industrial, para fermentar o açúcar na indústria vinícola.

Entretanto, Peidong Yang, químico na Universidade da Califórnia em Berkeley, usa também bactérias modificadas por bioengenharia, mas de modo diferente. Ele usa a luz para dividir a água em hidrogénio e oxigénio através de minúsculos nanofios semicondutores, e depois cultiva bactérias nesses nanofios, que utilizam então o hidrogénio para criar vários produtos químicos úteis como butanol e gás natural.

Os computadores quânticos podem levar essa tecnologia ao nível seguinte. Até agora, grande parte dos progressos na área têm sido alcançados através de experimentação e erro, o que exige centenas de experiências com produtos químicos exóticos. Por exemplo, o processo de usar hidrogénio para fixar o CO₂ em combustível é um processo molecular complexo, que requer a transferência de muitos eletrões e a quebra de muitas ligações. Os computadores quânticos

poderão replicar esses processos químicos numa simulação e permitir aos cientistas criar novos caminhos quânticos alternativos. Por exemplo, o CO_2 é o produto final de uma série de reações de oxidação. Os computadores quânticos poderão talvez modelar formas de quebrar as ligações do CO_2 de modo a efetuarem a recombinação com o hidrogénio para criar combustível.

Se os computadores quânticos possibilitarem esse passo final na criação da fotossíntese artificial e da folha artificial, tal pode abrir as portas a indústrias totalmente novas, capazes de fornecer formas inovadoras de células solares eficientes, formas de colheitas alternativas e novas formas de fotossíntese. Nesse processo, talvez seja possível usar os computadores quânticos para encontrar maneiras de reciclar o CO_2 , o que representaria um importante progresso no esforço para combater as alterações climáticas.

Assim, os computadores quânticos podem vir a desempenhar um papel crucial no domínio do poder da fotossíntese, que converte a energia da luz solar em comida e nutrientes. Porém, para que seja possível criar uma abundância de comida, o passo seguinte é ter fertilizante para alimentar as colheitas e as ajudar a medrar. Uma vez mais, os computadores quânticos poderão ter o papel decisivo na conclusão deste último passo, crucial para alimentar o planeta.

Ironicamente, o homem que esteve na vanguarda deste derradeiro passo, possibilitando alimentar milhares de milhões de pessoas e o advento da civilização moderna, é por vezes descrito não como um dos maiores cientistas de todos os tempos, mas como um criminoso de guerra.

-
- 1 Alan S. Brown, «Unraveling the Quantum Mysteries of Photosynthesis», Fundação Kavli, 15 de dezembro de 2020; www.kavlifoundation.org/news/unraveling-the-quantum-mysteries-of-photosynthesis.
 - 2 Peter Byrne, «In Pursuit of Quantum Biology with Birgitta Whaley», *Quanta Magazine*, 30 de julho de 2013; <https://www.quantamagazine.org/in-pursuit-of-quantum-biology-with-birgitta-whaley-20130730/>.
 - 3 Katherine Bourzac, «Will the Artificial Leaf Sprout to Combat Climate Change?», *Chemical & Engineering News*, 21 de novembro de 2016; <https://cen.acs.org/articles/94/i46/artificial-leaf-sprout-combat-climate.html>.
 - 4 Ali El Kaafarani, «Four Ways Quantum Computing Could Change the World», *Forbes*, 30 de julho de 2021; <http://www.forbes.com/sites/forbestechcouncil/2021/07/30/four-ways-quantum-computing-could-change-the-world/?sh=398352d14602>.
 - 5 Katharine Sanderson, «Artificial Leaves: Bionic Photosynthesis as Good as the Real Thing», *New Scientist*, 2 de março de 2022; <http://www.newscientist.com/article/mg25333762-600-artificial-leaves-bionic-photosynthesis-as-good-as-the-real-thing/>.

CAPÍTULO 8

Alimentar o Planeta

Na história moderna, houve um homem responsável por salvar mais vidas do que qualquer outra pessoa à face da Terra, e, contudo, o seu nome é basicamente desconhecido do grande público. Calcula-se, de forma bastante credível, que cerca de metade da humanidade está hoje viva graças às descobertas desse homem, e, no entanto, não existem biógrafos nem documentários a louvá-lo. Fritz Haber, um químico alemão, tocou nas vidas de todos os seres humanos no planeta. Haber foi o homem que descobriu como produzir fertilizantes artificiais. Cinquenta por cento de toda a comida que ingerimos está diretamente relacionada com a sua investigação pioneira, e, contudo, as contribuições por ele feitas raramente são celebradas pelos historiadores.

Haber lançou a Revolução Verde, desvendando os segredos da natureza e fabricando quantidades quase ilimitadas de fertilizantes que ajudam a alimentar o planeta hoje. Alterou a história do mundo quando descobriu o processo químico crucial pelo qual é possível extrair nitrogénio do ar para criar fertilizantes. Onde, até então, os camponeses tinham de trabalhar arduamente em solos áridos para mal conseguirem sobreviver, hoje em dia temos quilómetros de campos de colheitas verdejantes, até onde a vista alcança. Em vez

de nações esfaimadas, com campos secos e sem vida, temos quintas viçosas que produzem uma abundância tremenda.

Não obstante, o seu papel na história ficou maculado pelo facto de a sua descoberta extraordinária poder ser usada também para criar armas químicas devastadoras, incluindo explosivos potentes e gás venenoso. Embora milhares de milhões de pessoas neste planeta devam a sua existência a este homem, o seu trabalho matou também milhares, que pereceram devido à destruição que as suas descobertas causaram no campo de batalha.

Mais ainda, temos de viver com o facto de o processo Haber-Bosch, como ficou conhecida a técnica que ele desenvolveu, consumir tanta energia que coloca uma pressão enorme sobre o abastecimento energético, exacerbando a poluição e até as alterações climáticas.

O problema, contudo, é que em cem anos ninguém conseguiu melhorar o processo Haber-Bosch, por ser tão complicado ao nível molecular. A esperança é, portanto, que os computadores quânticos nos deem alternativas melhores, ou modificações ao Haber-Bosch, para que possamos alimentar o planeta sem consumir tanta energia e sem criar problemas ambientais.

Porém, para apreciar devidamente o trabalho pioneiro de Haber e a importância de as suas descobertas virem a ser melhoradas pelos computadores quânticos, é necessário compreender a enorme

contribuição que ele fez para escaparmos ao destino sombrio em tempos previsto por Malthus.

1. Excesso Populacional e Fome

Em 1798, Thomas Robert Malthus previu que, um dia, a população da raça humana excederia a comida disponível, o que resultaria em fome generalizada e mortes em massa. Para ele, todos os animais estavam envolvidos numa eterna luta de vida ou morte e, sempre que os seus números ultrapassassem a capacidade do *habitat*, muitos morreriam de fome. Os humanos não são diferentes. Também nós estamos limitados por esta lei inflexível, de que a humanidade só pode prosperar enquanto houver comida suficiente para a alimentar. Porém, uma vez que as populações têm crescido de forma exponencial, enquanto o abastecimento de comida avança apenas lentamente, é possível que, a dada altura, a população ultrapasse o abastecimento alimentar disponível. Isso significa a possibilidade de haver motins, fome generalizada e guerras brutais, com as nações a lutarem pelos recursos existentes.

No século XIX tornou-se cada vez mais evidente que esta temida profecia podia vir a tornar-se realidade. Embora a população humana se tivesse mantido relativamente estável (cerca de um milhão de pessoas), durante milhares de anos, na altura vivia-se uma explosão populacional de proporções inauditas. A chegada da Revolução Industrial e da Era da Máquina tornou possível uma expansão rápida da população.

(Vi uma ilustração gráfica disto quando andava na escola primária. Numa experiência, pegámos numa placa de Petri cheia de nutrientes e colocámos algumas bactérias no meio da placa. Em poucos dias, vimos que as bactérias se tinham multiplicado exponencialmente e criado uma grande colónia circular de células, mas depois o crescimento cessou subitamente. Por que teriam as bactérias parado de crescer? perguntei-me. Comecei então a entender que a colónia de bactérias crescera rapidamente ao consumir todos os nutrientes, e depois morrera em consequência de ter esgotado as reservas alimentares. Assim, esta luta de vida ou morte por alimento e crescimento, era uma luta malthusiana numa placa de Petri.)

Hoje em dia, o abastecimento mundial de comida depende fortemente dos fertilizantes. O ingrediente essencial do fertilizante é o nitrogénio, que se encontra nas nossas proteínas e moléculas de ADN. O nitrogénio, ironicamente, é o elemento químico mais abundante no ar que respiramos, formando quase 80 por cento deste. Por alguma razão misteriosa, bactérias simples, que crescem nas raízes das leguminosas (p. ex., de amendoins e feijões) conseguem extrair nitrogénio do ar e «fixá-lo» com moléculas de carbono, oxigénio e hidrogénio para criar amoníaco, o ingrediente essencial para o fabrico de fertilizante.

Essas bactérias, de alguma forma, dominaram um processo químico desconcertante. Embora bactérias comuns consigam sem qualquer esforço extrair nitrogénio do ar para criar fertilizantes essenciais à vida, os químicos ainda não foram capazes de duplicar a Mãe Natureza de forma tão eficiente.

A razão é que o nitrogénio que respiramos no ar é, na verdade, N_2 , ou seja, dois átomos de nitrogénio unidos de maneira extremamente resistente, com três ligações químicas covalentes. Essas ligações são tão fortes que não podem ser quebradas por processos químicos normais. Assim, os químicos veem-se limitados por este dilema obstinado. O ar que respiramos está cheio de nitrogénio vital, que, em princípio, torna possível o fabrico de fertilizante, mas que se encontra na forma errada e, portanto, é inútil.

É como a história do homem a morrer de sede num oceano de água salgada, rodeado de água, mas sem uma gota para beber.

É fácil ver o problema se olharmos para o átomo de Schrödinger. O nitrogénio tem sete eletrões, que podem preencher os dois espaços disponíveis nas orbitais 1S do primeiro nível de energia, e cinco eletrões no segundo nível. Para preencher todas as orbitais dos primeiros dois níveis, são precisos dez eletrões. (Se bem se lembra, os eletrões orbitam em pares e o primeiro piso do hotel tem um quarto que leva dois eletrões, e o segundo piso tem quatro quartos, cada um para dois eletrões.) Isto significa que, no segundo nível, há dois eletrões na orbital 2S, e os restantes três encontram-se, individualmente, nas orbitais P_x , P_y e P_z . Há, portanto, três eletrões desemparelhados. Quando combinados com um segundo átomo de nitrogénio, isto dá-nos três eletrões partilhados entre dois átomos, atingindo os dez eletrões necessários para preencher as primeiras duas orbitais e, mais importante ainda, dando-nos uma tripla ligação, que é extremamente forte.

2. Ciência para a Guerra e para a Paz

É aqui que entra em cena o trabalho de Fritz Haber. Já em criança ele tinha um fascínio pela química, fazendo muitas vezes experiências de moto próprio. O pai era um mercador próspero que importava tintas e pigmentos e Fritz costumava ajudar o pai na fábrica de químicos. Pertencia a uma geração de judeus europeus bem-sucedidos nos negócios e na ciência, mas acabaria por se converter ao cristianismo. Porém, acima de tudo, era um nacionalista, fortemente empenhado em ajudar a Alemanha com os seus conhecimentos de química.

Concentrou-se numa série de mistérios da química, incluindo como explorar o nitrogénio existente no ar e transformá-lo em produtos úteis, quer fertilizantes, quer explosivos. Viu que a única forma de dividir os dois átomos de hidrogénio era mediante a aplicação de uma pressão e temperatura enormes. Formulou a teoria de que, pela força bruta, era possível quebrar as ligações do nitrogénio. E fez história quando encontrou a combinação mágica certa no laboratório. Se aquecesse o nitrogénio gasoso que se encontrava no ar até 300°C e o comprimisse com a pressão de 200 a 300 vezes a pressão atmosférica, então conseguia finalmente quebrar a molécula de nitrogénio e recombiná-la com hidrogénio para formar amoníaco, que é NH_3 . Pela primeira vez na história, foi possível usar a química para alimentar uma população mundial em crescimento.

Receberia o Prémio Nobel em 1918 por este trabalho pioneiro. Hoje em dia, cerca de metade das moléculas de nitrogénio no nosso

corpo são uma consequência direta da descoberta de Haber, pelo que o legado duradouro por ele deixado ficou gravado nos nossos átomos. A população mundial ultrapassa atualmente os oito mil milhões de pessoas, e nunca conseguiríamos alimentar esta população sem o trabalho dele.

Porém, o processo em si devora tanta energia, necessária para comprimir o nitrogénio sob tamanha pressão e o aquecer a temperaturas tão elevadas, que consome 2 por cento da produção energética mundial.

Não era só em fertilizantes que Haber estava a pensar. Sendo um nacionalista alemão, foi apoiante entusiástico do exército alemão durante a Primeira Guerra Mundial, e a energia armazenada na molécula de nitrogénio podia ser aproveitada tanto para criar fertilizante vital, como explosivos letais. (Até mesmo terroristas amadores têm conhecimento desse processo. Uma bomba de fertilizante, capaz de arrasar um prédio inteiro, consiste em fertilizantes comuns, saturados de óleo combustível.) Assim, Haber usou outro derivado do seu processo, os nitratos, para contribuir para a vasta máquina de guerra alemã, criando armas químicas explosivas, além do gás venenoso que tiraria tantas vidas inocentes.

Assim, ironicamente, o homem cujo domínio da química expandiu a população mundial, condenou à morte milhares de inocentes. Ele é também conhecido como o Pai da Guerra Química.

Há, todavia, também um aspeto trágico na sua vida. A mulher de Haber, uma pacifista, viria a suicidar-se, talvez por se opor às investigações do marido na área da guerra química e do gás venenoso. Apesar das décadas de trabalho em apoio do governo e das forças militares alemãs, Haber sentiu a vaga de antissemitismo que varreu o país na década de 30. Embora fosse um judeu que se convertera ao cristianismo, deixou o país em busca de refúgio e acabaria por morrer devido a problemas de saúde em 1934. Durante a Segunda Guerra Mundial, o exército nazi utilizaria o gás Zyklon, um gás venenoso desenvolvido e aperfeiçoado por Haber, para matar muitos dos próprios familiares dele nos campos de concentração.

3. ATP: A Bateria da Natureza

Os cientistas, que estão ansiosos por poder aplicar os computadores quânticos ao problema de substituir o pouco eficiente processo Haber-Bosch, sabem que têm de compreender como é que a Mãe Natureza fixa o nitrogénio.

Para quebrar a ligação do nitrogénio, o método de Haber era aplicar temperaturas elevadas e uma pressão enorme a partir do exterior. É isso que o torna tão pouco eficiente. A natureza, contudo, fá-lo à temperatura ambiente, sem fornalhas de altas temperaturas nem compressores. Como é possível que uma mísera planta de amendoim faça aquilo que normalmente requer uma enorme fábrica química?

Na natureza, a fonte de energia fundamental encontra-se numa molécula chamada ATP (trifosfato de adenosina) que é a besta de carga da vida, a bateria da natureza. Sempre que fletimos os músculos, respiramos ou digerimos comida, estamos a usar a energia da ATP para alimentar os tecidos. A molécula ATP é tão elementar que se encontra em quase todas as formas de vida, indicando que evoluiu há milhares de milhões de anos. Sem a ATP, a maior parte da vida na Terra morreria.

A chave para compreender o segredo da molécula de ATP é analisar a sua estrutura. Esta molécula consiste em três grupos de fosfatos dispostos numa cadeia, cada grupo consistindo num átomo fosforoso rodeado por oxigénio e carbono. A energia da molécula é armazenada num eletrão localizado no último grupo de fosfato. Quando o corpo precisa de energia para executar as suas funções biológicas, usa a energia armazenada no eletrão do último grupo.

Ao analisar o processo de fixação de nitrogénio nas plantas, os químicos descobriram que são precisas 12 moléculas de ATP para fornecer a energia necessária para quebrar uma única molécula de N_2 . Vemos assim imediatamente o problema. Regra geral, os átomos simplesmente colidem entre si, um a um. Se tivermos vários átomos a colidir com vários outros átomos, vemos que isso tem de ocorrer por fases, porque os átomos colidem uns nos outros sequencialmente, não todos de uma vez. O processo da ATP a quebrar o N_2 passa assim por muitos, muitos passos intermédios.

Na natureza, aproveitar a energia de 12 moléculas de ATP a partir de colisões aleatórias pode levar anos. Obviamente, isso é

demasiado lento para tornar possível a vida. Assim, é necessário uma série de atalhos para acelerar bastante o processo.

Os computadores quânticos podem ajudar a resolver esse enigma. Poderiam decifrar este processo ao nível molecular e, talvez, melhorar o processo de fixação de nitrogénio ou encontrar um processo alternativo.

Como se pode ler na revista *CB Insights*: «Usar os supercomputadores atuais para identificar as melhores combinações catalíticas para produzir amoníaco demoraria séculos. Contudo, um computador quântico potente podia ser usado para analisar de forma muito mais eficiente as várias combinações catalíticas — mais uma aplicação da simulação de reações químicas — e ajudar a encontrar uma forma melhor de criar amoníaco.»¹

4. Catálise: O Atalho da Natureza

A chave, acreditam os cientistas, é algo chamado catálise, que será possível analisar com computadores quânticos. Uma catálise é como um espectador. Não participa diretamente num processo químico, mas de alguma forma, pela sua presença, facilita uma reação.

Normalmente, as reações químicas que se encontram no corpo são bastante lentas, demorando por vezes longos períodos de tempo. De vez em quando acontece algo mágico para acelerar esses processos, de modo a terem lugar em frações de segundo. É aqui

que entram os catalisadores. Para o processo de fixação de nitrogénio, há um catalisador chamado nitrogenase. Tal como um maestro, o seu objetivo é orquestrar os muitos passos necessários para combinar 12 moléculas de ATP com nitrogénio de modo a quebrar a tripla ligação. Assim, a nitrogenase é a chave para criar uma Segunda Revolução Verde. No entanto, infelizmente, os nossos computadores digitais são demasiado primitivos para desvendar os seus segredos. Um computador quântico, porém, pode estar perfeitamente talhado para esta importante tarefa.

Os agentes catalíticos, como a nitrogenase, funcionam em duas fases. Primeiro, unem dois reagentes. O catalisador e os reagentes encaixam como peças de um *puzzle*, permitindo que os dois reagentes se liguem. Segundo, a energia necessária para a ocorrência de uma reação, chamada energia de ativação, é por vezes demasiado elevada para que os reagentes interajam entre si. O catalisador, contudo, reduz a energia de ativação de modo que a reação possa ter lugar. Os reagentes podem então combinar-se para criar um novo químico, deixando o catalisador intacto.

Para compreender como funciona um catalisador, pense numa alcoviteira que tenta juntar um potencial casal, em que os elementos vivem em cidades diferentes. Normalmente, as hipóteses de um encontro puramente aleatório entre essas duas pessoas seriam muitíssimo reduzidas, uma vez que se movimentam em círculos completamente diferentes, separadas por muitos quilómetros. Porém, uma alcoviteira pode estabelecer contacto com ambas as partes e juntá-las, aumentando em grande medida as hipóteses de que algo aconteça entre elas. Quase todos os

processos químicos importantes no corpo são mediados por algum catalisador.

Vamos agora introduzir uma alcoviteira quântica, que se apercebe de que por vezes é preciso dar um empurrãozinho ao casal para que se forme uma ligação. Por exemplo, talvez uma das pessoas seja tímida, reticente ou nervosa. Algo os impede de quebrar o gelo. Por outras palavras, têm de ultrapassar uma barreira de ativação antes de poderem dar início à relação. É isso que a alcoviteira quântica faz, quebrar o gelo ou ajudá-los a ultrapassar a barreira que os separa. Chama-se a isto tunelamento, uma característica bizarra da teoria quântica pela qual é possível penetrar em barreiras aparentemente impenetráveis. O tunelamento é a razão pela qual elementos radioativos como o urânio conseguem emitir radiação, porque a radiação passa através de uma barreira nuclear para alcançar o mundo exterior. O processo de decaimento radioativo, que aquece o centro da Terra e impulsiona a deriva continental, fica a dever-se ao tunelamento. Assim, da próxima vez que vir a erupção de um vulcão gigante, o que está a ver é o poder do tunelamento quântico. Da mesma forma, as moléculas de ATP podem conseguir «tunelar» magicamente através dessa barreira energética para completar a reação química.

Veremos ainda que quase todas as reações-chave que tornam possível a vida, requerem catalisadores, e a própria origem da vida pode dever-se à mecânica quântica.

Infelizmente, a nitrogenase e a fixação de nitrogênio são tão complexas que o progresso, embora constante, tem sido lento. Apesar de os cientistas disporem agora de um diagrama molecular completo da molécula da nitrogenase, é tão complicado que ninguém sabe exatamente como funciona. Todo esse processo é tão problemático que não há a menor possibilidade de um computador digital desvendar os seus segredos. É aqui que os computadores quânticos poderão brilhar, preenchendo todos os passos que tornam isto possível.

Uma companhia que está a investigar este projeto ambicioso é a Microsoft. No encalço do sucesso de empreendimentos comerciais como a Xbox, a companhia tem-se debruçado sobre projetos mais arriscados, mas potencialmente lucrativos. Já em 2005 a Microsoft se interessava por projetos sem aplicações claras como os computadores quânticos. Nessa altura, a Microsoft criou uma companhia chamada Station Q para investigar problemas como a fixação de nitrogênio e a computação quântica.

«Creio que nos encontramos num ponto de inflexão no qual estamos prontos para passar da investigação ao desenvolvimento», diz Todd Holmdahl, vice-presidente do programa quântico da Microsoft. «É preciso correr um certo grau de risco para causar um grande impacto no mundo, e penso que estamos na altura em que há a oportunidade de o fazer.»²

Ele gosta de comparar a situação com a invenção do transistor. Na altura, os físicos andaram confusos durante algum tempo, à procura de aplicações práticas para a sua invenção. Alguns

julgavam que o transistor seria útil apenas para comunicar com navios em alto-mar. Da mesma forma, a criação do computador quântico da Microsoft, que o *New York Times* comparou com «ficção científica», pode também vir a transformar a sociedade de formas inesperadas.

A Microsoft é uma companhia que mal pode esperar por resolver o problema da fixação do nitrogénio. Já está a utilizar computadores quânticos de primeira geração para ver se é possível desvendar o mistério do processo. As implicações são profundas, com o potencial de criar uma Segunda Revolução Verde e alimentar uma população mundial em expansão com reduzidos custos energéticos. O insucesso, por outro lado, poderá ter efeitos colaterais desastrosos, como já vimos, conduzindo talvez a motins, fome e guerras.

Recentemente, a Microsoft viu-se perante um revés, quando alguns resultados experimentais em *qubits* topológicos não se revelaram corretos, mas para os verdadeiros crentes nos computadores quânticos tal não passa de uma contrariedade momentânea.

Na verdade, o diretor executivo da Microsoft, Sundar Pichai, afirmou recentemente que está convencido de que os computadores quânticos conseguirão melhorar o processo Haber no espaço de uma década.³

Os computadores quânticos serão essenciais para a análise deste importante processo químico de várias formas:

- Os computadores quânticos podem ajudar a clarificar este processo complexo, átomo a átomo, ao resolver a equação de onda das várias componentes no interior da nitrogenase. Isto ajudará a esclarecer os muitos passos em falta no processo de fixação de nitrogénio.
- Podem testar virtualmente várias formas de quebrar a ligação do N_2 , além da força bruta ou da catálise.
- Podem modelar o que aconteceria se substituíssemos vários átomos e proteínas por alternativas, para ver se, com outros químicos, é possível tornar o processo de fixação de nitrogénio mais eficiente, menos intensivo em termos energéticos e menos poluente.
- Os computadores quânticos podem testar vários novos catalisadores numa tentativa de acelerar o processo.
- Os computadores quânticos podem testar diferentes versões da nitrogenase, com diversas disposições de cadeias proteicas, para ver se é possível melhorar as suas propriedades catalíticas.

Assim, se a Microsoft e outras companhias conseguirem resolver o mistério da fixação de nitrogénio, isso teria um impacto enorme no abastecimento de comida. Porém, os cientistas têm outros sonhos para os computadores quânticos. Não querem somente resolver o problema de uma produção de comida energeticamente

eficiente, querem compreender a natureza da própria energia. Poderão os computadores quânticos resolver a crise energética?

¹ «What Is Quantum Computing? Definition, Industry Trends, & Benefits Explained», *CB Insights*, 7 de janeiro de 2021; https://www.cbinsights.com/research/report/quantum-computing/?utm_source=CB+Insights+Newsletter&utm_campaign=0df1cb4286-newsletter_general_Sat_20191115&utm_medium=email&utm=0_9dc0513989-0df1cb4286-88679829.

² Allison Lin, «Microsoft Doubles Down on Quantum Computing Bet», Microsoft, *The AI Blog*, 20 de novembro de 2016; <https://blogs.microsoft.com/ai/microsoft-doubles-quantum-computing-bet/>.

³ Stephen Gossett, «10 Quantum Computing Applications and Examples», *Built In*, 25 de março de 2020; <https://builtin.com/hardware/quantum-computing-applications>.

CAPÍTULO 9

Dar Energia ao Mundo

À primeira vista, poder-se-ia suspeitar de que os titãs da indústria do século XX, Thomas Edison e Henry Ford, eram rivais ferozes. Afinal de contas, Edison foi a incansável força motriz por trás da eletrificação da indústria e da sociedade. Com 1093 patentes registadas, revolucionou o nosso modo de vida com inúmeras invenções que vemos hoje como garantidas, alimentadas pela eletricidade. Já Ford, por outro lado, ganhou milhões com o Model T, que era movido a combustíveis fósseis. Ajudou a criar a infraestrutura industrial moderna, alicerçada no petróleo. Para ele, seria através da queima de petróleo e gasolina que o futuro avançaria.

Na realidade, Edison e Ford eram bons amigos. Aliás, quando era jovem, Ford idolatrava Edison. Durante anos tiraram férias juntos e apreciavam a companhia um do outro. Talvez se tenham aproximado tanto porque ambos criaram companhias de classe mundial através de pura força de vontade.

Para se divertirem, Edison e Ford faziam apostas, tentando adivinhar qual seria a fonte de energia que alimentaria o futuro. Edison preferia a bateria elétrica, enquanto Ford acreditava na gasolina. Para quem ouvisse esta aposta, a resposta podia parecer

incontestável. Decerto Edison venceria facilmente. As baterias elétricas eram silenciosas e seguras. O petróleo, em contraste, era ruidoso, tóxico e até mesmo perigoso. A ideia de ter um posto de abastecimento de gasolina de poucos em poucos quarteirões era considerada ridícula.

Em muitos aspetos, os críticos do petróleo estavam certos. Os vapores emitidos pelo motor de combustão interna podem causar doenças respiratórias e acelerar o aquecimento global, e os carros movidos a gasolina ainda hoje são ruidosos.

No entanto, acabaria por ser Ford o vencedor da aposta.

Porquê?

Para começar, a energia acumulada numa bateria é uma fração ínfima da energia contida num galão de gasolina. (As melhores baterias conseguem armazenar cerca de 200 horas-watt por quilograma de energia, enquanto a gasolina consegue armazenar 12.000 horas-watt.)

E quando se descobriram enormes jazidas de petróleo no Médio Oriente, no Texas e em outros locais, o preço da gasolina caiu a pique, colocando o automóvel ao alcance da classe média americana.

O sonho de Edison começou a ficar esquecido. A bateria elétrica, pouco eficiente, pouco prática e fraca, não conseguia competir com

o combustível barato de elevadas octanas criado para uma população esfaimada de energia.

Uma vez que a lei de Moore revolucionou a economia mundial com a potência computacional barata, há uma tendência para supor que tudo obedece a essa lei. Assim, achamos desconcertante que a eficiência da potência das baterias não tenha evoluído durante tantas décadas. Esquecemo-nos de que a lei de Moore só se aplica a *chips* de computador e que as reações químicas, como as que alimentam as baterias, são notoriamente impossíveis de prever. Antecipar novas reações químicas capazes de aumentar a eficiência de uma bateria é um empreendimento de monta.

Em vez de testar fastidiosamente centenas de diferentes produtos químicos para verificar o seu desempenho numa bateria, no futuro será muito mais fácil e barato simular esse desempenho com um computador quântico. Tal como as simulações que poderão ajudar a desvendar os segredos da fotossíntese ou da fixação natural do nitrogénio, a «química virtual» pode um dia vir a substituir nos laboratórios químicos o árduo método de experimentação e erro.

1. Revolução Solar?

Este desafio de aumentar o desempenho das baterias tem implicações económicas tremendas. Na década de 50, os futuristas previam que as nossas casas seriam um dia alimentadas por energia solar. Vastas quantidades de células solares,

complementadas por moinhos de vento potentes, captariam a energia do sol e do vento para fornecer energia fiável e barata. Energia gratuita. Esse era o sonho.

Contudo, a realidade não foi bem assim. Os custos da energia renovável têm vindo a baixar ao longo das décadas, mas a uma lentidão agonizante. A chegada da Era Solar tem demorado mais do que as pessoas antecipavam.

Em parte, o problema encontra-se nas limitações das baterias modernas. Quando o sol não brilha e o vento não sopra, a energia proveniente das fontes renováveis cai para zero. O elo mais fraco na cadeia da energia renovável é o armazenamento — como guardar energia para um dia de chuva. Enquanto a velocidade computacional aumenta de forma exponencial à medida que miniaturizamos sistematicamente os *chips* de silício, a potência das baterias só aumenta quando descobrimos novos rendimentos ou até novos compostos químicos. Atualmente, ainda se utilizam reações químicas que já eram conhecidas no século passado. Se fosse possível construir uma superbateria com eficiência e potência aumentadas, tal poderia acelerar grandemente a transição para um futuro de energia sem carbono e travar o aquecimento global.

2. História da Bateria

Se olharmos para trás, vemos que a história da bateria tem avançado a passo de caracol ao longo dos séculos. Em tempos antigos, já era bem sabido que se caminhássemos por cima de uma

carpete podíamos apanhar um choque elétrico ao tocar na maçaneta da porta. Isto, contudo, não era mais do que uma curiosidade, até que se fez história em 1786 quando o físico Luigi Galvani estava a esfregar um pedaço de metal contra as pernas decepadas de uma rã. Reparou, para sua grande surpresa, que as pernas se moveram por si só.

Foi uma descoberta crucial, porque os cientistas podiam agora demonstrar que a eletricidade conseguia causar o movimento dos nossos músculos. Num instante, os cientistas compreenderam que não era preciso recorrer a alguma «força vital» mítica para explicar como objetos inanimados se tornavam animados. A eletricidade era a chave para compreender como os nossos corpos podiam mover-se sem espíritos. Porém, os estudos pioneiros de Galvani sobre eletricidade inspiraram também um dos seus intrépidos colegas.

Em 1799, Alessandro Volta construiu a primeira bateria e mostrou que conseguia criar uma reação química que reproduzia esse efeito. Criar eletricidade em laboratório e a pedido era uma descoberta sensacional. A notícia espalhou-se rapidamente: era agora possível gerar esta estranha força à vontade.

Infelizmente, a bateria não mudou muito em mais de duzentos anos. A bateria mais simples começa com duas varas de metal, ou elétrodos, colocadas em recipientes distintos. Em ambos encontra-se um químico chamado eletrólito, que permite a ocorrência de uma reação química. A ligar os dois recipientes há um tubo, pelo qual os iões podem passar de um recipiente para o outro.

Por causa da reação química no eletrólito, os eletrões saem de um elétrodo, chamado ânodo, e passam para o outro elétrodo, chamado cátodo. O movimento das cargas elétricas tem de ser equilibrado, e assim, enquanto eletrões de carga negativa passam do ânodo para o cátodo, existe também um movimento de iões positivos através do tubo que liga os eletrólitos. O fluxo destas correntes cria eletricidade.

Este *design* básico não mudou em vários séculos. Aquilo que mudou foi, essencialmente, a composição química dos vários componentes. Os químicos fizeram experiências meticolosas com diferentes metais e eletrólitos de modo a maximizar a voltagem elétrica ou aumentar o conteúdo energético.

Uma vez que era convicção generalizada que não existia mercado para carros elétricos, a pressão para melhorar a tecnologia não era muita.

3. A Revolução do Lítio

Na Era do pós-guerra, a tecnologia das baterias era uma área estagnada. O progresso estacou porque havia relativamente pouca procura de veículos elétricos e aparelhos eletrónicos portáteis. Contudo, a crescente preocupação com o aquecimento global, bem como a explosão no mercado da eletrónica, despertaram um interesse renovado na investigação sobre a tecnologia de baterias.

Devido à ameaça da poluição e do aquecimento global, o público começou a exigir ação. Sob a pressão crescente no sentido da transição para carros elétricos, os inventores correram a criar baterias mais potentes. Gradualmente, as baterias foram-se tornando competitivas com a gasolina.

Uma história de sucesso foi a introdução da bateria de íões de lítio, que depressa conquistou o mercado. Estas baterias encontram-se hoje em quase todo o tipo de aparelhos eletrónicos, telemóveis, computadores e até em grandes jatos. Aquilo que as torna tão omnipresentes é o facto de terem maior capacidade energética do que qualquer outra bateria disponível e, no entanto, serem portáteis, compactas, fiáveis e eficientes. São o produto final de décadas de investigação, após análise meticulosa das propriedades elétricas de centenas de produtos químicos diferentes.

Aquilo que as torna tão convenientes é a natureza do átomo de lítio. Se olharmos para a tabela periódica dos elementos, vemos que é o mais leve de todos os metais, algo que se torna importante quando o que pretendemos obter é baterias leves para carros e aviões.

Vemos também que tem três eletrões na órbita do núcleo. Os primeiros dois eletrões preenchem o nível de energia mais baixo do átomo, o 1S, e por isso o terceiro eletrão, numa órbita superior, tem uma ligação fraca, o que o torna fácil de remover para dar energia à bateria. É uma das razões pelas quais é tão fácil gerar uma corrente elétrica com a bateria de lítio.

A bateria de íões de lítio é assim composta por um ânodo feito de grafite, um cátodo feito de óxido de cobalto de lítio, e um eletrólito feito de éter. O impacto das baterias de íões de lítio foi de tal forma revolucionário que o Prémio Nobel da Química foi atribuído a vários cientistas que as aperfeiçoaram: John B. Goodenough, M. Stanley Whittingham e Akira Yoshino.

Contudo, uma característica indesejável das baterias de íões de lítio é que, embora possuam a densidade energética mais elevada de qualquer bateria atualmente no mercado, ainda têm apenas 1 por cento da energia armazenada na gasolina. Se queremos entrar numa Era livre de carbono, precisamos de uma bateria com uma densidade energética mais próxima da do combustível fóssil com o qual rivaliza.

4. Para Além das Baterias de Íões de Lítio

Devido ao enorme sucesso comercial da bateria de íões de lítio, que se encontra hoje por todo o lado na sociedade moderna, está em curso uma busca frenética por um substituto ou uma melhoria para a geração seguinte de baterias. Uma vez mais, os engenheiros veem-se limitados pela abordagem de experimentação e erro.

Uma das candidatas é a bateria de lítio-ar. Ao contrário de outras baterias, que são completamente seladas, esta permite a entrada de ar. O oxigénio do ar interage com o lítio, libertando os eletrões da bateria (e criando peróxido de lítio).

A grande vantagem da bateria de lítio-ar é que a sua densidade energética é dez vezes superior à da bateria de íões de lítio, aproximando-se assim um pouco mais da densidade energética da gasolina. (Isto acontece porque o oxigénio é obtido do ar sem qualquer custo, em vez de ter de ser armazenado dentro da própria bateria.)

Apesar deste enorme reforço de densidade energética encontrado nas baterias de lítio-ar, uma série de problemas técnicos impede que essa bateria notável funcione na prática. Em particular, tem uma vida extremamente curta, de apenas cerca de dois meses. Os cientistas que têm fé nesta tecnologia acreditam que, através de experiências com dezenas de tipos de produtos químicos diferentes, será possível resolver muitos destes problemas técnicos.

Em 2022, o Instituto Nacional Japonês de Ciência de Materiais, trabalhando em conjunto com a companhia de investimentos SoftBank, anunciou um promissor novo tipo de bateria de lítio-ar com uma densidade energética muito superior à da bateria de íões de lítio comum. Contudo, os pormenores ainda não estão disponíveis para que possamos ver se conseguiram de facto ultrapassar a série de problemas com que esta tecnologia promissora se defrontava.

Um aborrecimento persistente para os proprietários de carros elétricos é o tempo que demora a carregar a bateria, que pode ir de várias horas a um dia inteiro. Assim, outra tecnologia a ser estudada é a SuperBattery, um sistema híbrido criado pela Skeleton

Technologies e pelo Instituto de Tecnologia Karlsruhe na Alemanha, que promete conseguir carregar um veículo elétrico em 15 segundos.

Por um lado, usa uma bateria de íões de lítio comum. Porém, aquilo que a torna inovadora é que a SuperBattery combina a bateria de íões de lítio com um capacitador para reduzir o tempo de carregamento. (Um capacitador armazena energia estática. Na sua forma mais simples, consiste em apenas duas placas paralelas, uma com carga positiva e outra com carga negativa. A grande vantagem dos capacitadores é que conseguem armazenar energia elétrica e depois libertá-la muito rapidamente.) O uso de supercapacitadores com o objetivo de oferecer carregamentos rápidos atraiu também outras empresas. A Tesla adquiriu recentemente a Maxwell Technologies para enveredar por esta via. Assim, esta tecnologia híbrida já se encontra no mercado e poderia melhorar muitíssimo a conveniência de possuir um carro elétrico.

Uma vez que as potenciais recompensas são enormes, vários grupos empreendedores estão a trabalhar arduamente na tecnologia que se sucederá às baterias de íões de lítio. Estas incluem as seguintes tecnologias experimentais:

- A NAWA Technologies afirma que o seu Eléctrodo de Carbono Ultrarrápido, com recurso a nanotecnologia, pode aumentar dez vezes a capacidade da bateria e aumentar cinco vezes a sua vida útil. Alega que a autonomia de um carro elétrico passaria para os mil quilómetros, com um tempo de carregamento de apenas

cinco minutos para alcançar os 80 por cento de carga de bateria.

- Cientistas na Universidade do Texas alegam que conseguirão remover um dos componentes mais indesejáveis das suas baterias, o cobalto. O cobalto é caro e tóxico e afirmam que é possível substituí-lo por manganésio e alumínio.
- O fabricante chinês de células de bateria, SVOLT, anunciou poder também substituir o cobalto das suas baterias. Afirmam conseguir aumentar a autonomia dos veículos elétricos para 800 quilómetros e melhorar a vida da bateria.
- Cientistas na Universidade do Leste da Finlândia desenvolveram uma bateria de íões de lítio com um ânodo híbrido, usando nanotubos de silício e carbono, que afirmam aumentar o desempenho da bateria.
- Outro grupo que está a debruçar-se sobre o potencial do silício é formado por cientistas da Universidade da Califórnia, em Riverside. Usam a bateria de íões de lítio básica, mas substituem o ânodo de grafite por silício.
- Os cientistas da Universidade de Monash, na Austrália, substituíram a bateria de íões de lítio por uma bateria de lítio-enxofre. Alegam que a sua bateria consegue

alimentar um *smartphone* durante cinco dias, ou um veículo elétrico durante mil quilómetros.

- A IBM Research, e outros, estão a estudar a substituição de bateria de iões de lítio, por água do mar. A IBM afirma que uma bateria de água do mar seria mais barata e teria uma densidade energética superior.

Embora tenham sido feitas melhorias graduais à bateria de iões de lítio, a estratégia básica, introduzida há duzentos anos por Volta, ainda se mantém. Espera-se que os computadores quânticos possam possibilitar aos cientistas a sistematização deste processo, tornando-o mais barato e mais eficiente, de modo que possam ser conduzidas virtualmente milhões de experiências.

O problema é que as reações químicas complexas que se encontram dentro de uma bateria não obedecem a uma lei simples, como a mecânica newtoniana. Mas os computadores quânticos poderão em princípio fazer o trabalho mais pesado, simulando reações químicas complexas sem ter de as executar efetivamente.

Não é, portanto, de admirar que a indústria automóvel esteja a investir em computadores quânticos para ver se será possível criar uma superbateria através de matemática pura. Uma bateria supereficiente poderia remover o principal estrangulamento que impede o advento da Era Solar: o armazenamento de eletricidade.

5. A Indústria Automóvel e os Computadores Quânticos

Uma companhia que vê o potencial dos computadores quânticos para revolucionar a sua indústria é a gigante automóvel, Daimler, a proprietária da Mercedes-Benz. Já em 2015 a Daimler tinha criado a Quantum Computing Initiative para se manter a par dos acontecimentos nesta área em rápido desenvolvimento.

Ben Boeser, que faz parte do grupo de Investigação e Desenvolvimento da Mercedes-Benz para a América do Norte, diz: «É uma atividade muito alicerçada na investigação, analisar as coisas que acontecerão daqui a dez ou quinze anos, mas queremos compreender os aspetos básicos na criação de um novo Universo — e, enquanto companhia, tencionamos fazer parte dele» A Daimler vê a computação quântica não só como uma curiosidade científica, mas como algo que contribuirá para os seus resultados financeiros.¹

Holger Mohn, editor da revista *online* da Daimler, aponta outros benefícios da computação quântica, além de encontrar novos *designs* de baterias. Escreve ele: «Pode tornar-se a melhor maneira de descobrir tecnologias novas e mais eficientes, de simular formas aerodinâmicas para melhor eficiência de combustível e uma condução mais suave, ou para otimizar processos de fabrico com uma miríade de variáveis.»² Em 2018, a Daimler reuniu uma rede de engenheiros de topo para trabalharem de perto com a Google e a IBM no desenvolvimento da tecnologia necessária para resolver alguns destes problemas desconcertantes. Eles estão já a escrever

códigos e a carregá-los para a nuvem, no sentido de se familiarizarem com a computação quântica.

Por exemplo, as equações básicas da aerodinâmica são bem conhecidas. Porém, ao invés de efetuar testes dispendiosos em túneis de vento para reduzir a fricção do ar sobre os carros, é muito mais barato e conveniente colocar os carros num «túnel de vento virtual», ou seja, testar a eficiência do *design* das viaturas na memória de um computador quântico. Isto permitirá uma análise rápida para reduzir a resistência.

A Airbus está a utilizar um computador quântico para criar um túnel de vento virtual com o intuito de calcular o caminho mais eficiente em termos de combustível para a subida e descida dos seus aviões. E a Volkswagen está também a recorrer a esta tecnologia para calcular o caminho ideal para autocarros e táxis numa cidade congestionada.

Desde 2018 que a BMW se virou para os computadores quânticos na tentativa de resolver uma série de problemas, utilizando para tal o mais recente computador quântico Honeywell. As vias que estão a estudar incluem:

- Criação de uma bateria automóvel melhor
- Determinar os melhores locais para instalar estações de carregamento elétrico

- Encontrar formas mais eficientes de adquirir os vários componentes dos carros BMW
- Aumentar o desempenho aerodinâmico e a segurança

Em particular, a BMW está a contar com os computadores quânticos para ajudar com programas de otimização, ou seja, reduzir custos e aumentar o desempenho.

Porém, os computadores quânticos não são úteis apenas para criar baterias e carros mais inovadores, mais baratos e mais potentes sem destruir o ambiente. Os computadores quânticos podem um dia vir a libertar-nos também dos perigos de doenças temidas e incuráveis que atormentam a humanidade desde a alvorada dos tempos. Vejamos agora como os computadores quânticos podem causar uma revolução na medicina.

A Fonte da Juventude, em lugar de ser uma nascente mítica de vida eterna, pode bem vir a revelar-se um computador quântico.

¹ Holger Mohn, «What's Behind Quantum Computing and Why Daimler Is Researching It», Mercedes-Benz Group, 20 de agosto de 2020; <https://group.mercedes-benz.com/company/magazine/technology-innovation/quantum-computing.html>.

² Ibid.

PARTE TRÊS

Medicina Quântica

CAPÍTULO 10

Saúde Quântica

Quanto tempo podemos viver?

Durante a maior parte da história da humanidade, a esperança de vida média dos seres humanos andou entre os vinte e os trinta anos. A vida era frequentemente curta e miserável. As pessoas viviam no medo constante da próxima peste ou fome.

Histórias da Bíblia e de outros textos antigos estão repletas de casos de pestilência e doença. Mais tarde, estas histórias encheram-se de órfãos e madrastas cruéis, porque era frequente que os pais não vivessem tempo suficiente para criar os próprios filhos.

Infelizmente, ao longo da história, os médicos eram pouco mais do que curandeiros e charlatães, oferecendo pomposamente «curas» que, em muitos casos, ainda deixavam o paciente em pior estado. Os ricos podiam pagar a médicos particulares, que guardavam ciosamente as suas poções inúteis, enquanto os pobres morriam frequentemente na miséria, em hospitais imundos e apinhados. (Tudo isto foi parodiado pelo dramaturgo francês Molière na peça hilariante *Le Médecin Malgré Lui*, ou *Médico Contra Vontade*, na qual um pobre camponês é confundido com um médico

conhecido e engana toda a gente com palavras elaboradas e inventadas em latim para dar conselhos médicos disparatados.)

Contudo, vários progressos históricos prolongaram a nossa esperança de vida. O primeiro foi a chegada de melhores condições sanitárias. As cidades antigas eram autênticas fossas de comida podre e dejetos humanos. Era normal as pessoas atirarem o lixo para o meio da rua. As estradas das cidades antigas assemelhavam-se a uma pista de obstáculos nauseabunda, terreno fértil para a proliferação de doenças. Porém, no século XIX, os cidadãos começaram a revoltar-se contra estas condições pouco higiénicas, o que levou à criação de um sistema de esgotos e melhores condições sanitárias, eliminando assim dezenas de doenças mortíferas transmitidas pela água e adicionando uns quinze ou vinte anos à nossa esperança de vida.

A revolução seguinte teve lugar por causa das guerras sangrentas que assolaram o continente europeu no século XIX. Havia tantos soldados a morrer de ferimentos sofridos em batalha que reis e monarcas decretaram que todas as curas que realmente resultassem seriam regamente recompensadas. De súbito, médicos ambiciosos, em vez de se limitarem a tentar impressionar os clientes ricos com mistelas inúteis, começaram a publicar artigos sobre terapias que ajudavam realmente os pacientes. As publicações médicas multiplicaram-se, documentando avanços baseados em prova experimental e não apenas na reputação do autor.

Com esta nova orientação entre médicos e cientistas, estava preparado o terreno para avanços revolucionários, como antibióticos e vacinas, que acabariam por vencer um bestiário de doenças mortíferas, adicionando talvez mais dez a quinze anos à esperança de vida média. Melhor nutrição, cirurgia, a Revolução Industrial e outros fatores contribuíram também para o aumento da esperança de vida. Assim, a esperança de vida média atual em muitos países encontra-se na casa dos setenta anos.

Infelizmente, muitos desses progressos na medicina moderna ficaram a dever-se à sorte e não a cuidadosa premeditação. Não houve nada de sistemático na descoberta de curas para essas doenças, que ocorreu, essencialmente, por acasos fortuitos.

Por exemplo, em 1928, quando Alexander Fleming observou inadvertidamente que as partículas do bolor do pão conseguiam matar bactérias que cresciam numa placa de Petri, desencadeou uma revolução nos cuidados de saúde. Os médicos, em lugar de verem os seus pacientes morrer de enfermidades comuns sem nada poder fazer por eles, podiam agora dar-lhes antibióticos como a penicilina que, pela primeira vez na história humana, conseguia realmente curar o paciente. Em pouco tempo tínhamos antibióticos contra a cólera, o tétano, a febre tifoide, a tuberculose e uma série de outras doenças. No entanto, a maioria destas curas foi encontrada por experimentação e erro.

1. O Surgimento de Germes Resistentes aos Medicamentos

Os antibióticos são tão eficazes, e receitados com tanta frequência, que os germes estão agora a dar luta. Não é uma questão académica, pois os germes resistentes aos medicamentos são um dos maiores problemas de saúde que a sociedade atual enfrenta. Doenças mortíferas que tinham já sido afastadas, como a tuberculose, estão a regressar lentamente, em formas virulentas e incuráveis. Estas «superbactérias» são muitas vezes imunes aos mais recentes antibióticos, deixando a população em geral indefesa perante elas.

Além disso, à medida que a humanidade se expande para áreas anteriormente inexploradas e desabitadas, expomo-nos a novas doenças contra as quais não possuímos imunidade. Assim, existe um manancial de doenças desconhecidas à espera para infetar a humanidade.

Há quem acredite que a utilização em grande escala de antibióticos nos animais acelerou esta tendência. As vacas, por exemplo, são terreno fértil para a proliferação de germes resistentes a medicamentos porque os criadores muitas vezes administram um excesso de antibióticos para aumentar a produção de leite e carne.

Uma vez que a ameaça representada por estas doenças pode voltar, e mais forte do que nunca, há a necessidade urgente de uma

nova geração de antibióticos suficientemente baratos para justificarem o custo. Infelizmente, há trinta anos que não se verifica qualquer desenvolvimento em novas classes de antibióticos. Os antibióticos que os nossos pais usavam são os mesmos que usamos hoje em dia. Um problema é que têm de ser experimentados milhares de químicos para isolar meia dúzia de medicamentos promissores. Por este método, custa cerca de dois a três milhares de milhões de dólares o desenvolvimento de uma nova classe de antibióticos.

2. Como Funcionam os Antibióticos

Com recurso à tecnologia moderna, os cientistas foram deduzindo gradualmente como funcionam certos tipos de antibióticos. A penicilina e a vancomicina, por exemplo, interferem com a produção de uma molécula chamada peptidoglicano, que é essencial para criar e fortalecer a parede celular das bactérias. Estes medicamentos, assim, fazem com que as paredes das bactérias se desfaçam.

Outra classe de medicamentos, chamados quinolonas, interfere com a química da reprodução das bactérias, de tal modo que o seu ADN deixa de funcionar como deve e, em consequência, não se reproduzem.

Outra, que inclui a tetraciclina, afeta a capacidade da bactéria sintetizar uma proteína essencial. Outra classe ainda impede as células de produzirem ácido fólico o que, por sua vez, interfere com

a capacidade da bactéria de controlar os químicos que atravessam a parede celular.

Dados estes avanços, a que se deve o estrangulamento?

Para começar, estes novos antibióticos demoram muito tempo a ser desenvolvidos, muitas vezes mais de dez anos. Têm de ser cuidadosamente testados para garantir a sua segurança, um processo moroso e dispendioso. E, depois de uma década de trabalho árduo, o produto final muitas vezes nem sequer paga as contas. O ponto crucial para muitas empresas farmacêuticas é que as vendas devem compensar o custo de produção desses medicamentos.

3. O Papel da Medicina Quântica

O problema é que, tal como o *design* das baterias desde o tempo de Volta, a estratégia básica não se alterou muito desde a época de Fleming. Basicamente, continuamos a testar cegamente os vários candidatos contra os germes no interior de uma placa de Petri. Hoje em dia, graças à automação, à robótica e às linhas de montagem mecanizadas, é possível expor milhares de placas de Petri com diferentes tipos de doenças a uma variedade de medicamentos promissores, ao mesmo tempo, num arremedo da abordagem básica de que Fleming foi pioneiro há cem anos.

Desde então, a nossa estratégia tem sido:

Testar substância promissora → determinar se mata bactérias → identificar o mecanismo

Os computadores quânticos podem vir a revolucionar completamente este processo e acelerar a busca de novos medicamentos salvadores de vidas. São potentes o suficiente para poderem um dia conduzir-nos sistematicamente a novas formas de destruir bactérias. Em vez de perder muito tempo a experimentar diferentes substâncias ao longo de muitas décadas, talvez consigamos criar rapidamente novos medicamentos na memória de um computador quântico.

Isto significa inverter a ordem da estratégia:

Identificar o mecanismo → determinar se mata bactérias → testar substância promissora

Se, por exemplo, o mecanismo básico pelo qual esses antibióticos conseguem matar os germes for desvendado ao nível molecular, é possível utilizar tal conhecimento para criar novos medicamentos. Isto significa que, primeiro, partimos do mecanismo que desejamos, como desfazer a parede celular das bactérias, e depois usamos os computadores quânticos para determinar como o fazer, ao identificar pontos fracos na parede das bactérias. A seguir, testamos então as diferentes substâncias capazes de executar essa função e, finalmente, podemos concentrar-nos nas poucas que efetivamente funcionam contra a bactéria.

Por exemplo, se quiséssemos modelar a molécula da penicilina com um computador convencional, deparar-se-nos-ia um problema inultrapassável. Para o fazer, seriam necessários 10^{86} *bits* de memória computacional, muito para além das capacidades de qualquer computador digital. No entanto, está dentro das capacidades de um computador quântico. Assim, tentar descobrir novos medicamentos pela análise do seu comportamento molecular pode vir a ser um dos principais alvos para os computadores quânticos.

4. Vírus Assassinos

Da mesma forma, a ciência moderna conseguiu atacar os vírus com vacinas, mas apenas até certo ponto. As vacinas funcionam indiretamente, ao estimularem o sistema imunitário do corpo, e não atacando de forma direta o vírus, pelo que o progresso para curar doenças causadas por vírus tem sido lento.

Um dos maiores assassinos da história é a varíola, que matou 300 milhões de pessoas só desde 1910. A varíola já era conhecida na Antiguidade. Sabia-se também que se alguém tivera a doença e recuperara, era possível triturar as crostas das suas lesões e administrá-las a uma pessoa saudável, através de cortes na pele. Essa pessoa ficaria inoculada contra a doença.

Em 1796, esta técnica foi refinada e usada com sucesso em Inglaterra. O médico Edward Jenner retirou pus de algumas mulheres ordenhadeiras que haviam recuperado da varíola bovina,

uma doença semelhante à varíola. Injetou então o pus em indivíduos saudáveis, que adquiriram imunidade contra a varíola.

Desde então, as vacinas têm sido usadas contra um grande número de doenças antes incuráveis, como a poliomielite, a hepatite B, o sarampo, a meningite, a papeira, o tétano, a febre amarela e muitas outras. Há milhares de possíveis vacinas que podem ter valor terapêutico, mas sem um entendimento de como o sistema imunitário do corpo funciona, à escala mais ínfima, é impossível testá-las a todas.

Em vez de testar cada vacina experimentalmente, poderíamos «testá-las» no interior de um computador quântico. A beleza deste método é que a busca por novas vacinas pode ter lugar rapidamente, de forma barata e eficiente, sem serem necessários ensaios clínicos complicados, morosos e caros.

No capítulo seguinte, exploraremos como os computadores quânticos podem modificar e reforçar os nossos sistemas imunitários, protegendo-nos contra o cancro e talvez até curando doenças atualmente incuráveis, como as doenças de Alzheimer e Parkinson. Primeiro, porém, há mais uma forma como os computadores quânticos podem ajudar a defender-nos contra o próximo vírus causador de uma pandemia global.

5. A Pandemia de Covid

Uma forma de ver o poder dos computadores quânticos é pensar na tragédia da pandemia de covid, que matou cerca de um milhão de pessoas nos Estados Unidos, até agora, e mergulhou milhares de milhões de pessoas por todo o mundo na aflição e numa situação económica difícil. Os computadores quânticos, porém, podem dar-nos um sistema de aviso antecipado para detetar vírus emergentes antes que estes causem uma pandemia mundial.

Sessenta por cento de todas as doenças, segundo se pensa, vem do reino animal. Assim, existe um vasto reservatório de novos germes capazes de gerar uma série de novas doenças. E, à medida que a civilização humana se expande para áreas anteriormente menos desenvolvidas, ficamos expostos a novos animais e respetivas doenças.

Por exemplo, através da análise genética, é possível determinar que o vírus da gripe tem origem, maioritariamente, nas aves. Muitos vírus da gripe emergem na Ásia, onde os agricultores praticam aquilo a que se chama policultura, que envolve viver na proximidade de porcos e aves. Embora o vírus tenha origem nas aves, os porcos comem frequentemente os dejetos das aves e os humanos comem os porcos. Assim, os suínos funcionam como uma misturadora, na qual se combina o ADN de aves e porcos para criar novos vírus.

Da mesma forma, o vírus da sida foi associado ao vírus da imunodeficiência símia (VIS), que infeta os primatas. Através da genética, os cientistas formularam a conjectura de que alguém em África comeu a carne de um primata, algures entre 1884 e 1924, que se combinou então com o ADN de um humano para criar o VIH, uma versão modificada do VIS capaz de atacar pessoas.

Com os avanços nos transportes, o aumento das viagens pelo globo veio acelerar a disseminação de doenças, como a peste na Idade Média. Os historiadores seguiram os rumos tomados pelos antigos marinheiros, de cidade em cidade, levando assim a peste até costas distantes. Ao comparar quando os navios atracavam em determinado porto com a ocorrência de surtos da doença, é possível ver como a peste se espalhou pelo Médio Oriente e Ásia, saltando de cidade em cidade. Hoje, temos aviões a jato que podem espalhar uma doença entre continentes numa questão de horas.

Assim, é apenas uma questão de tempo antes que o mundo seja apanhado por outra pandemia, espalhada pelas viagens internacionais.

Porém, graças aos extraordinários avanços na área da genómica, em 2020 os cientistas conseguiram sequenciar o material genético do vírus da covid-19 em poucas semanas. Isto permitiu a criação de vacinas que estimulariam o sistema imunitário do corpo a atacar o vírus. No entanto, isso era apenas ajustar o sistema imunitário para que conseguisse defender-se. Aquilo que faltava era uma forma sistemática de derrotar o próprio vírus mortífero.

6. Sistema de Aviso Antecipado

Há várias formas pelas quais os computadores quânticos podem ajudar a travar a próxima pandemia. No mínimo, precisamos de um sistema de aviso antecipado para detetar o vírus quando este surgir, em tempo real. A partir do momento em que surge uma nova versão do vírus da covid-19, são precisas semanas até se poder emitir um alerta. Durante esse período, o vírus pode escapar, sem que se dê por ele, para o ecossistema humano. Um atraso de poucas semanas pode permitir que o vírus alastre para milhões de pessoas.

Um método para rastrear epidemias é colocar sensores em sistemas de esgotos por todo o mundo. É fácil identificar um vírus ao analisar os esgotos, especialmente em zonas urbanas de maior densidade populacional. Testes rápidos de antigénio podem identificar a eclosão de um vírus em cerca de 15 minutos. Contudo, os dados provenientes de milhões de sistemas de esgotos facilmente ultrapassariam a capacidade dos computadores digitais. No entanto os computadores quânticos notabilizam-se por serem capazes de analisar montanhas de dados e encontrar a agulha no palheiro. Há já certas comunidades nos Estados Unidos que estão a introduzir sensores nas redes de esgotos como sistema de aviso antecipado.

Outro sistema de aviso antecipado foi demonstrado pela companhia Kinsa, que fabrica termómetros ligados à Internet. Ao examinar as febres que se declaram pelo país, é possível detetar anomalias importantes. Por exemplo, em março de 2020, os

hospitais no sul dos EUA foram inundados de estranhos relatos de milhares de pessoas atacadas por um novo vírus. Muitas morreram. Os hospitais estavam assoberbados.

Uma teoria diz que os festejos do Mardi Gras em finais de fevereiro de 2020, em Nova Orleães, foram um evento superdisseminador que expôs centenas de milhares de pessoas ao vírus sem que o soubessem. E, na verdade, ao analisar as leituras dos termómetros logo a seguir ao Mardi Gras, é possível ver um súbito pico nas temperaturas dos pacientes no Sul. Infelizmente, como os médicos não tinham experiência com o novo vírus, foram precisas semanas depois do Mardi Gras para alertar os médicos para a pandemia. Muitas pessoas morreram devido a este atraso crítico na identificação do vírus, cujo surgimento apanhou de surpresa todo o sistema de saúde.

De futuro, com uma vasta rede de instrumentos médicos como os termómetros e sensores ligados à Internet, poderá ser possível obter uma leitura instantânea da temperatura do que se passa em todo o país, analisada por computadores quânticos. Com um mero olhar ao mapa do país, identificaremos os pontos críticos que representam um potencial novo evento superdisseminador.

Outra forma de criar um sistema de aviso antecipado é utilizar as redes sociais, que, melhor do que qualquer outra coisa, nos permitem medir o pulso, em tempo real, ao que se passa pelo país. Por exemplo, os algoritmos do futuro estariam preparados para procurar publicações anómalas na Internet. Se, por exemplo, as pessoas começarem a dizer coisas como «Não consigo respirar» ou

«Não consigo cheirar», os computadores quânticos conseguem identificar estas frases anómalas. Os profissionais de saúde darão então seguimento a esses incidentes de modo a perceber se são causados por uma doença transmissível.

Da mesma forma, os computadores quânticos podem conseguir detetar surtos do vírus na altura em que ocorrem. É possível o desenvolvimento de sensores capazes de detetar aerossóis do vírus a flutuar no ar. No início da epidemia, as autoridades governamentais afirmaram que manter uma distância de dois metros das outras pessoas era suficiente para prevenir a disseminação do vírus. A transmissão, alegavam, ocorria essencialmente através de gotículas maiores, quando as pessoas tossiam ou espirravam.

Pensa-se agora que isso estava, provavelmente, incorreto. Estudos recentes do vírus mostram que as partículas aerossolizadas depois de um espirro, por exemplo, conseguem transportar o vírus através de seis metros ou mais. Na verdade, julga-se que uma das principais formas de proliferação do vírus é através de aerossóis gerados simplesmente por falar. Estar sentado ao lado de pessoas que estejam a cantar ou a falar alto, em espaços fechados, durante mais de 15 minutos, é uma forma de acelerar a disseminação do vírus.

Assim, de futuro, uma rede de sensores colocados em espaços fechados pode conseguir detetar aerossóis no ar e enviar os dados para computadores quânticos, que analisarão então esta vasta

quantidade de informação para identificar os primeiros sinais de aviso da próxima pandemia.

7. Decifrar o Sistema Imunitário

As vacinas provaram já que o sistema imunitário do próprio corpo é uma poderosa defesa contra doenças infecciosas. No entanto, os cientistas sabem muito pouco sobre a forma como esse sistema realmente funciona.

Ainda estamos a descobrir aspetos novos e surpreendentes do sistema imunitário. Por exemplo, os cientistas sabem agora que muitas doenças não atacam diretamente o corpo. A gripe espanhola de 1918 matou mais pessoas do que todas as que morreram na Primeira Guerra Mundial. Infelizmente, não foram conservadas quaisquer amostras do vírus, pelo que é difícil analisá-lo e determinar como matava as pessoas. Porém, há alguns anos, os cientistas tiveram oportunidade de visitar o Ártico e examinar os corpos de pessoas mortas pelo vírus e conservadas no pergelissolo.

Aquilo que encontraram é interessante. A doença não matava diretamente a sua vítima. O que fazia era sobre-estimular o sistema imunitário do próprio corpo, que começava então a inundar o corpo com substâncias químicas perigosas, numa tentativa de matar o vírus. Esta tempestade de citocinas era o que acabava por matar o paciente. Assim, o agente letal era, na realidade, o sistema imunitário descontrolado do próprio corpo.

Verificou-se uma história semelhante com a covid-19. Quando as pessoas são internadas, a situação, ao princípio, pode não parecer demasiado grave. Porém, nas fases mais avançadas da doença, quando é desencadeada a tempestade de citocinas, as substâncias químicas perigosas que invadem o corpo acabam por causar a falência dos órgãos. Se não for tratada, a condição leva muitas vezes à morte.

No futuro, os computadores quânticos podem dar-nos uma perspetiva inédita da biologia molecular do sistema imunitário, o que talvez nos mostre várias formas de desligar ou reduzir o sistema imunitário para que não nos mate em caso de infeção grave. Discutiremos o sistema imunitário de forma mais pormenorizada no próximo capítulo.

8. O Vírus Ómicron

Os computadores quânticos podem também revelar-se cruciais na determinação das propriedades de um vírus à medida que passa por mutações. Por exemplo, a variante ómicron da covid-19 surgiu por volta de novembro de 2021. O seu genoma foi sequenciado e fez disparar de imediato os alarmes. Tinha 50 mutações, o que o tornava mais transmissível do que o vírus Delta. No entanto, os cientistas não conseguiram determinar precisamente o grau de perigosidade que estas mutações lhe conferiam. Permitiriam que as proteínas *spike*, penetrassem nas células humanas muito mais depressa do que antes, espalhando assim o caos pela raça humana? Tudo o que podiam fazer era esperar e ver. De futuro, os computadores quânticos podem conseguir determinar quão letal é

determinado vírus, analisando as mutações nas suas proteínas *spike*, em vez de sermos forçados a esperar durante semanas e rezar pelo melhor.

Assim que conhecermos a estrutura deste e de outros vírus, será possível prever o seu trajeto. Os computadores digitais dos nossos dias são demasiado primitivos para simular de que forma um vírus como o ómicron poderia atacar o corpo humano. Porém, assim que conhecermos a estrutura molecular exata do vírus, poderemos usar computadores quânticos para simular os efeitos específicos do vírus no corpo, de modo a sabermos com antecedência a que ponto ele é perigoso e como o combater.

Felizmente, temos a evolução do nosso lado. Muitas doenças antigas que mataram uma grande parte da raça humana, como o vírus da gripe espanhola de 1918, provavelmente ainda se encontram entre nós, mas sob uma forma modificada, sendo agora uma doença endêmica e não pandêmica. Segundo a teoria evolucionária, as diferentes estirpes de um vírus competem entre si. Assim, existe uma pressão evolucionária para se tornarem mais infecciosos de modo a levarem a melhor sobre a concorrência. Por este motivo, cada geração de mutações pode ser mais infecciosa do que a anterior. No entanto, se o vírus matar demasiadas pessoas, não terá anfitriões suficientes para continuar a alastrar. Existe também, portanto, uma pressão evolucionária para ser menos mortífero.

Por outras palavras, para se manterem em circulação, muitos vírus evoluem de modo a tornarem-se mais infecciosos, mas menos

letais. É, pois, possível que tenhamos simplesmente de aprender a viver com o vírus da covid, embora numa forma menos mortífera.

9. O Futuro

Os antibióticos e as vacinas são as bases da medicina moderna. Porém, os antibióticos são descobertos geralmente por meio de experimentação e erro, e as vacinas apenas estimulam o sistema imunitário a criar anticorpos para combater um vírus. Um dos objetivos da medicina moderna é, por conseguinte, desenvolver novos antibióticos, e outro é compreender a resposta imunitária do corpo, a nossa primeira defesa contra os vírus e também contra um dos maiores assassinos de todos os tempos, o cancro. Se o mistério em torno do nosso sistema imunitário for resolvido com recurso a computadores quânticos, teremos então também uma forma de atacar algumas das grandes doenças incuráveis, como certas formas de cancro, as doenças de Alzheimer e Parkinson e a ELA. Estas doenças causam danos ao nível molecular, que apenas os computadores quânticos são capazes de decifrar e ajudar a combater. No capítulo seguinte, investigaremos como os computadores quânticos podem revelar novas perspectivas do nosso sistema imunitário e, possivelmente, vir até a fortalecê-lo.

CAPÍTULO 11

Edição Genética e a Cura do Cancro

Em 1971, com grande fanfarra, o presidente Richard Nixon anunciou a Guerra ao Cancro. A medicina moderna, declarou, poria finalmente fim a este grande flagelo.

Porém, anos mais tarde, quando os historiadores avaliaram esse esforço, o resultado foi claro: o cancro vencera. Sim, havia alguns progressos em termos do combate ao cancro por meio de cirurgia, quimioterapia e radiação, mas o número de mortes causadas pela doença permanecia obstinadamente elevado. O cancro é ainda a segunda maior causa de mortes nos Estados Unidos, a seguir às doenças cardiovasculares. A nível mundial, matou 9,5 milhões de pessoas em 2018.

O problema fundamental da Guerra ao Cancro é que os cientistas não sabiam o que o cancro realmente era. Debatia-se acaloradamente se esta temida doença era causada por um fator único ou por uma coleção confusa de fatores, como alimentação, poluição, genética, vírus, radiação, tabaco ou simplesmente azar.

Várias décadas mais tarde, os avanços nas áreas da genética e da biotecnologia revelaram finalmente a resposta. Ao nível mais

fundamental, o cancro é uma doença dos nossos genes, mas pode ser desencadeado por venenos ambientais, radiação e outros fatores — ou simplesmente por azar. Na verdade, o cancro não é de maneira nenhuma uma doença, mas sim milhares de tipos diferentes de mutações nos nossos genes. Temos hoje enciclopédias dos vários tipos de cancro, que fazem com que células saudáveis comecem subitamente a proliferar e matem o anfitrião.

O cancro é uma doença extraordinariamente diversificada e universal. Encontra-se em múmias com milhares de anos. A referência médica mais antiga remonta a 3000 a.C., no Egito. Mas o cancro não se encontra apenas nos seres humanos. Encontra-se por todo o reino animal. O cancro, de certa forma, é o preço que pagamos por ter formas de vida complexas na Terra.

Para criar uma forma de vida complexa, que envolve bilhões de células a executar complicadas reações químicas de modo sequencial, algumas células têm de morrer quando outras ocupam o seu lugar, permitindo assim que o corpo cresça e se desenvolva. Muitas das células de um bebé têm de morrer, mais cedo ou mais tarde, de modo a abrir caminho para as células de um adulto. O que significa que as células estão geneticamente programadas para morrer por necessidade, sacrificando-se para criar novos tecidos complexos e órgãos. Chama-se a isto apoptose.

Embora a morte celular programada seja parte do desenvolvimento saudável do corpo, por vezes há erros que podem desligar acidentalmente esses genes, pelo que a célula continua a reproduzir-se e a proliferar descontroladamente. Essas células não

conseguem parar de se reproduzir e, nesse sentido, as células cancerígenas são imortais. Na verdade, é por isso que nos matam, crescendo de forma descontrolada e criando tumores que acabam por interromper funções corporais essenciais.

Por outras palavras, as células cancerígenas são células normais que se esqueceram de como se morre.

São, normalmente, precisos muitos anos ou décadas para que se forme um cancro. Por exemplo, se sofreu queimaduras solares graves em criança, pode vir a ter um cancro da pele nesse mesmo local décadas mais tarde. Isto porque é necessária mais do que uma mutação para causar cancro. Frequentemente são necessários anos ou décadas para que se acumulem várias mutações, que finalmente desativarão a capacidade de a célula controlar a sua própria reprodução.

Mas, se o cancro é assim tão mortífero, por que é que a evolução não se livrou desses genes defeituosos há milhões de anos, por meio de seleção natural? A resposta é que o cancro se espalha maioritariamente depois de ultrapassados os nossos anos reprodutivos e, como tal, existe menor pressão evolucionária para eliminar os genes do cancro.

Esquecemo-nos por vezes de que a evolução progride através de seleção natural e acaso. Assim, embora os mecanismos moleculares que tornam possível a vida sejam, de facto, maravilhosos, eles são na realidade resultado de mutações aleatórias ao longo de milhares

de milhões de anos de experimentação e erro. Desta forma, não podemos esperar que o nosso corpo monte uma defesa perfeita contra doenças mortíferas. Tendo em conta o número assombroso de mutações envolvidas no cancro, talvez sejam necessários computadores quânticos para analisar essa montanha de informação e identificar as causas na base da doença. Os computadores quânticos estão idealmente aptos para atacar uma doença que se manifesta de tantas formas confusas. Podem até vir a dar-nos todo um novo campo de batalha no qual enfrentar doenças incuráveis como o cancro, as doenças de Alzheimer e Parkinson, a ELA e outras.

1. Biópsias Líquidas

Como sabemos se temos cancro? Infelizmente, muitas vezes não sabemos. Os sinais de cancro são, por vezes, ambíguos ou difíceis de detetar. Por exemplo, quando um tumor se forma, pode haver já milhares de milhões de células cancerígenas a crescerem no corpo. Quando é encontrado um tumor maligno, o médico recomendará imediatamente cirurgia, radiação ou quimioterapia. Por vezes, no entanto, é tarde demais.

Mas como seria se pudéssemos travar a disseminação do cancro, detetando células anómalas antes da formação de um tumor? Os computadores quânticos podem desempenhar um papel crucial nesse empreendimento.

Hoje, numa consulta de rotina, fazemos análises ao sangue e somos considerados saudáveis. Contudo, mais tarde, podem vir a manifestar-se sintomas reveladores do cancro. Podemos então perguntar, por que não é possível detetar o cancro numa simples análise ao sangue?

O motivo é que o nosso sistema imunitário, geralmente, não consegue detetar as células cancerígenas. Elas passam por baixo do radar. As células cancerígenas não são invasores do exterior, facilmente reconhecidos como tal pelo sistema imunitário. São as nossas próprias células, embora avariadas, e portanto conseguem passar despercebidas. Por isso, as análises ao sangue que estudam as reações imunitárias não reconhecem a presença de cancro.

Todavia, sabe-se já há mais de cem anos que os tumores cancerígenos largam células e moléculas para os fluidos corporais. Por exemplo, é possível detetar células e moléculas cancerígenas no sangue, na urina, no fluido cerebrospinal e até na saliva.

Infelizmente, isto só é possível quando há já milhares de milhões de células cancerígenas a crescer no corpo. Nessa altura, a cirurgia é geralmente necessária para remover o tumor. Porém, mais recentemente, a engenharia genética deu-nos finalmente a capacidade de detetar células cancerígenas a flutuar na corrente sanguínea ou noutros fluidos corporais. Um dia, este método poderá ser sensível o suficiente para detetar apenas algumas centenas de células cancerígenas, dando-nos anos para agir antes da formação de um tumor.

Contudo, só nos últimos anos foi possível criar um sistema antecipado de detecção de cancros para uma pessoa normal. Uma via de investigação promissora chama-se biópsia líquida, que é um método rápido, conveniente e versátil de detetar um cancro, e que pode vir a criar uma revolução nessa área.

«Em anos recentes, o desenvolvimento clínico de biópsias líquidas para o cancro, um instrumento de rastreio revolucionário, tem gerado grande otimismo», escrevem Liz Kwo e Jenna Aronson no *American Journal of Managed Care*.¹

Atualmente, as biópsias líquidas conseguem detetar até 50 tipos de cancro diferentes. Uma visita de rotina ao médico pode vir a possibilitar a detecção de cancros anos antes de estes se tornarem letais.

De futuro, até a sanita na nossa casa de banho pode ter a sensibilidade necessária para detetar sinais de células, enzimas e genes cancerígenos em circulação nos fluidos corporais, de modo que o cancro não seja mais mortífero do que uma constipação. De cada vez que for à casa de banho será automaticamente rastreado para a presença de cancro. A «sanita inteligente» pode vir a ser a nossa primeira linha de defesa.

Embora sejam milhares as mutações distintas causadoras de cancro, os computadores quânticos podem aprender a identificá-las de modo que uma simples análise ao sangue consiga detetar dezenas de possíveis cancros. Talvez o nosso genoma possa ser lido

diária ou semanalmente e analisado por computadores quânticos distantes para encontrar evidências de mutações prejudiciais. Não é uma cura para o cancro, mas permite-nos impedi-lo de alastrar, tornando-o assim não mais perigoso do que uma constipação comum.

Muitas pessoas fazem uma pergunta simples: «Por que é que não conseguimos curar uma constipação comum?» Na verdade, conseguimos. Porém, como existem mais de 300 tipos de rinovírus causadores de constipações, e como estes sofrem mutações constantes, não faz sentido desenvolver 300 vacinas para tentar acertar neste alvo em movimento contínuo. Limitamo-nos a viver com ele.

Pode ser esse o futuro da investigação do cancro. Em vez de ser uma sentença de morte, poderá vir a ser visto apenas como um aborrecimento. Uma vez que existem tantos genes cancerígenos, não será talvez prático criar curas para todos. No entanto, se conseguirmos detetá-los com computadores quânticos anos antes de se disseminarem, quando são apenas uma pequena colónia de umas centenas de células cancerígenas, então talvez seja possível travar a sua progressão.

Por outras palavras, no futuro, é possível que continuemos a ter cancro, mas talvez o cancro raramente mate alguém.

2. Farejar Cancros

Outra forma de apanhar o cancro nas suas fases iniciais pode ser a utilização de sensores para detetar os leves odores emitidos pelas células cancerígenas. Um dia, talvez o nosso telemóvel, com acessórios sensíveis a odores e ligado a um computador quântico na nuvem, possa ajudar a defender-nos não só contra o cancro mas contra uma variedade de outras doenças. Os computadores quânticos analisariam os resultados de milhões de «narizes robóticos» em todo o país para travar a progressão do cancro.

A análise de odores é uma técnica de diagnóstico comprovada. Por exemplo, há cães que estão a ser treinados para detetar o coronavírus em aeroportos. Enquanto os resultados de um típico teste PCR para deteção do vírus podem demorar alguns dias, cães com treino especial conseguem fazer uma identificação com uma precisão de aproximadamente 95 por cento em cerca de dez segundos. Isto está já a ser utilizado para rastrear os passageiros no aeroporto de Helsínquia e em outros locais.

Já foram treinados cães para identificar cancro do pulmão, da mama, dos ovários, da bexiga e da próstata. Na verdade, os cães têm uma taxa de sucesso de 99 por cento na deteção do cancro da próstata ao cheirarem uma amostra de urina do paciente. Num estudo, os cães conseguiram detetar cancro da mama com uma precisão de 88 por cento e cancro do pulmão com uma precisão de 99 por cento.

Isto é possível porque eles têm 220 milhões de recetores nasais olfativos, enquanto os humanos têm apenas cinco milhões. Assim, o olfato dos cães é muitíssimo mais apurado do que o dos humanos. De tal forma que conseguem detetar concentrações de uma parte por bilião, o equivalente a detetar uma única gota de líquido em 20 piscinas olímpicas. E a área do seu cérebro dedicada à análise dos cheiros é muito maior do que a área correspondente nos cérebros humanos.

Contudo, um inconveniente é que se demoram meses a treinar um cão para reconhecer o coronavírus ou cancro, e há uma quantidade limitada de cães treinados com essa especialização. Não poderíamos efetuar essas análises com a nossa tecnologia, a uma escala capaz de salvar milhões de vidas?

Pouco depois do 11 de Setembro, fui convidado por uma companhia de televisão para um almoço especial com o intuito de discutir as tecnologias do futuro. Tive o privilégio de me sentar ao lado de um oficial da DARPA (Agência de Projetos Avançados de Investigação para a Defesa), um ramo do Pentágono famoso pela invenção das tecnologias do futuro. A DARPA tem um longo historial de histórias de sucesso espetaculares, como a NASA, a Internet, o automóvel sem condutor e o bombardeiro furtivo.

Assim, fiz-lhe uma pergunta que sempre me incomodara: por que é que não podemos desenvolver sensores para detetar explosivos? Os cães conseguem executar facilmente proezas que nem as nossas máquinas mais avançadas conseguem.

Ele fez uma breve pausa e depois explicou-me lentamente a diferença entre os cães e os nossos sensores mais avançados. A DARPA, na verdade, estudara cuidadosamente essa questão e observara que os nervos olfativos dos cães são tão sensíveis que conseguem apanhar até moléculas individuais de certos odores. Os sensores artificiais desenvolvidos nos nossos melhores laboratórios não conseguiam sequer aproximar-se desse nível de sensibilidade.

Alguns anos depois dessa conversa, a DARPA patrocinou uma competição para ver se algum laboratório conseguia criar um nariz robótico semelhante ao de um cão.

Uma das pessoas que ouviu falar desse desafio foi Andreas Mershin, do MIT. Fascinava-o a capacidade quase miraculosa dos cães detetarem uma variedade de doenças e enfermidades. Mershin interessara-se pela questão enquanto estudava os métodos de deteção do cancro da bexiga. Um dos cães identificara de forma persistente determinado paciente como tendo cancro, apesar de este ter sido examinado várias vezes sem que fosse encontrado qualquer sinal disso. Havia alguma coisa errada. O cão nunca vacilou. Por fim, o paciente acedeu a novos exames e descobriu-se que tinha cancro da bexiga numa fase muito inicial, antes de poder ser detetado pelos exames laboratoriais normais.

Mershin queria replicar esse sucesso espantoso. O seu objetivo era criar um «nanonariz», com microsensores capazes de detetar o cancro e outras doenças e de alertar a pessoa através do telemóvel. Hoje, os cientistas do MIT e da Universidade Johns

Hopkins desenvolveram microssensores que são 200 vezes mais sensíveis do que o nariz de um cão.

Porém, como se trata ainda de uma tecnologia experimental, custa cerca de mil dólares analisar apenas uma amostra de urina para procurar cancro. Ainda assim, Mershin imagina um dia em que essa tecnologia será tão comum como as câmaras dos nossos telemóveis. Devido à quantidade avassaladora de dados que chegariam de centenas de milhões de telemóveis e sensores, apenas computadores quânticos teriam a capacidade de processar essa abundância de informação. Poderiam então usar inteligência artificial para analisar os sinais, localizar marcadores cancerígenos e enviar a informação de novo para a pessoa, talvez anos antes da formação de qualquer tumor.

De futuro, talvez haja várias formas de detetar o cancro, fácil e silenciosamente, antes que represente uma ameaça séria. As biópsias líquidas e os detetores de odores podem conseguir enviar dados para um computador quântico, que conseguirá então identificar dezenas de variedades de cancro. Na verdade, é mesmo possível que a palavra «tumor» venha a desaparecer do discurso médico habitual, da mesma forma que já não falamos em «sangrias» ou «sanguessugas» nesse contexto.

Todavia, o que acontece se o cancro já se formou? Poderão os computadores quânticos ajudar a curar o cancro depois de ele ter começado a atacar o corpo?

3. Imunoterapia

De momento, existem pelo menos três formas principais de atacar o cancro assim que este é detetado: cirurgia (para extrair o tumor), radiação (para matar as células cancerígenas com raios X ou raios de partículas) e quimioterapia (para envenenar as células cancerígenas). Porém, com o desenvolvimento da engenharia genética, uma nova forma de terapia começa a ser utilizada de forma generalizada: a imunoterapia. Há várias versões deste tratamento, mas, de uma maneira geral, todas tentam recrutar a ajuda do sistema imunitário do próprio corpo.

As células cancerígenas, como já discutimos, infelizmente não são facilmente identificadas pelo sistema imunitário do corpo. As células B e T, por exemplo, estão programadas para identificar e posteriormente matar um grande número de antigénios estranhos, mas as células cancerígenas não fazem parte da biblioteca de antigénios que os glóbulos brancos são capazes de reconhecer. Assim, passam por baixo do radar do nosso sistema imunitário. O truque é reforçar de modo artificial o poder do nosso próprio sistema imunitário para que consiga reconhecer e atacar o cancro.

Num dos métodos, o genoma do cancro é sequenciado de modo que os médicos saibam precisamente o tipo de cancro a ser estudado e como este se desenvolve. A seguir, são extraídos glóbulos brancos do sangue da pessoa enquanto os genes do cancro são processados. A informação genética do cancro é então introduzida nos glóbulos brancos através de um vírus (que foi tratado de modo a ser inofensivo). Desta forma, os glóbulos brancos

são reprogramados para identificar essas células cancerígenas. Por fim, os glóbulos brancos recalibrados voltam a ser injetados no corpo.

Até agora, este método tem-se mostrado muito promissor em termos de atacar formas incuráveis de cancro, mesmo em fases adiantadas, quando já se espalhou pelo corpo. Alguns pacientes, a quem fora dito não haver esperança para o seu caso, viram os seus cancros desaparecer de forma súbita e extraordinária.

A imunoterapia tem vindo a ser usada para o cancro da bexiga, do cérebro, da mama, do colo do útero, do cólon, do teto, do esófago, do rim, do fígado, do pulmão, linfático, melanoma, do ovário, do pâncreas, da próstata, dos ossos, do estômago e leucemia, com variados graus de sucesso.

Existem, no entanto, obstáculos. Este método só se encontra disponível para alguns cancros, e existem milhares de tipos diferentes. Por outro lado, como a genética dos glóbulos brancos é alterada artificialmente, por vezes a modificação não é perfeita. Isto pode causar efeitos secundários indesejados. Na verdade, esses efeitos podem por vezes ser fatais.

Os computadores quânticos, no entanto, podem ajudar a aperfeiçoar esta terapia. Em última análise os computadores quânticos estarão aptos a analisar esta enorme quantidade de dados em bruto para identificar a genética de cada célula cancerígena. Uma tarefa tão monumental estaria fora do alcance de

um computador clássico. Cada pessoa no país teria o seu genoma analisado, silenciosa e eficazmente, várias vezes por mês, através de uma análise dos seus fluidos corporais. Todo o genoma seria sequenciado, catalogando mais de 20.000 genes por pessoa. Isto seria então comparado com os milhares de possíveis genes do cancro que já foram estudados. Seria necessária uma vasta infraestrutura de computadores quânticos para analisar estas quantidades de dados em bruto. Os benefícios, no entanto, seriam enormes: a diminuição deste temido assassino.

4. O Paradoxo do Sistema Imunitário

Desde há muito que existe um mistério sobre o sistema imunitário. Para que o corpo possa destruir antigénios invasores, deve primeiro ser capaz de os identificar. Uma vez que existe um número essencialmente ilimitado de possíveis vírus e bactérias, como é que o sistema imunitário sabe a diferença entre os perigosos e os amistosos? Como é que sabe a diferença quando nunca se lhe deparou determinada doença antes? É como se a polícia soubesse quem prender numa multidão de pessoas que nunca viu antes.

De início, tal parece impossível. Existe, em princípio, um número infinito de tipos de doenças diferentes, pelo que não é claro de que modo o sistema imunitário é capaz de encontrar as certas, como que por magia.

Porém, a evolução criou uma maneira inteligente de resolver este problema. O glóbulo branco B, por exemplo, contém recetores de

antigénio em forma de Y projetados para o exterior da parede celular. O objetivo do glóbulo branco é prender as pontas do seu recetor Y a um antigénio perigoso, para que seja destruído ou fique marcado para destruição posterior. É assim que identifica antigénios ameaçadores.

Quando o glóbulo branco nasce, os códigos genéticos nas pontas dos recetores Y que correspondam aos recetores de antigénios específicos são misturados aleatoriamente. Esta é a chave. Assim, em princípio, quase todos os códigos que o corpo possa encontrar estão já contidos no interior dos vários recetores Y aleatórios, quer os bons, quer os maus. (Para termos uma noção de como um pequeno grupo de aminoácidos pode criar números enormes de códigos genéticos, vejamos um exemplo hipotético. Começamos pelo facto de que há 20 aminoácidos diferentes no corpo humano. Imaginemos que criávamos uma cadeia de dez aminoácidos, com 20 aminoácidos possíveis em cada espaço. Temos então $20 \times 20 \times 20 \times \dots = 20^{10}$ possíveis disposições de aminoácidos. Comparemos isto com o número efetivo de possíveis recetores B, que tem cerca de 10^{12} combinações possíveis. Este número astronómico contém quase todos os antigénios possíveis que poderá alguma vez encontrar.)

Contudo, depois de os recetores Y estarem aleatoriamente selecionados, os recetores que contêm os códigos genéticos dos aminoácidos do próprio corpo são gradualmente removidos. O que fica para trás são, assim, os recetores Y que contêm apenas o código genético dos antigénios perigosos. Desta forma, os recetores

Y podem atacar antigénios perigosos mesmo que nunca os tenham encontrado antes.

É como se a polícia tentasse encontrar um criminoso numa enorme multidão. Primeiro a polícia eliminaria todas as pessoas que já se sabia previamente serem inocentes. Saberla então que os criminosos só podiam estar entre aqueles que sobravam.

Uma vez que vivemos num oceano invisível de milhares de milhões de bactérias e vírus, o sistema funciona surpreendentemente bem. Contudo, por vezes, o tiro sai pela culatra. Por exemplo, acontece que, ao eliminar os códigos genéticos que se encontram no corpo, o corpo não os elimina a todos. Alguns dos códigos bons ficam então para trás e são atacados pelo sistema imunitário. Por outras palavras, a polícia não elimina todos os suspeitos inocentes e alguns inocentes ficam, acidentalmente, para trás. Assim, quando chega a altura de interrogar os suspeitos, alguns inocentes encontram-se entre eles.

Isto significa que o corpo se atacará a si mesmo, criando uma série de doenças autoimunes. Talvez seja por isto que temos artrite reumatoide, lúpus, diabetes tipo 1, esclerose múltipla, etc.

Por vezes acontece também o inverso. O sistema imunitário não só remove os códigos bons, como elimina também alguns códigos maus, por acidente. Nesses casos o sistema imunitário não consegue identificar os perigosos, que podem causar doenças.

É isso que pode acontecer por vezes com certos tipos de cancro, quando o corpo é incapaz de detetar os antigénios com os genes errados.

Todo o processo de identificação de antigénios perigosos é puramente um processo mecânico-quântico. Os computadores digitais são incapazes de reproduzir a complexa sequência de eventos que tem de ter lugar ao nível molecular para que o sistema imunitário funcione devidamente. No entanto, os computadores quânticos podem ter potência suficiente para desvendar, molécula a molécula, a forma como o sistema imunitário faz a sua magia.

5. CRISPR

As aplicações terapêuticas dos computadores quânticos podem ser aumentadas quando em combinação com uma nova tecnologia chamada CRISPR (repetições palindrómicas curtas agrupadas e regularmente interestaçadas), que permite aos cientistas cortar e colar genes. Os computadores quânticos podem ser usados para identificar e isolar doenças genéticas complexas, e a CRISPR pode ser usada para as curar.

Nos anos 80, gerou-se um enorme entusiasmo em relação à terapia genética, ou seja, reparar genes defeituosos. Há pelo menos 10.000 doenças genéticas conhecidas que afetam a raça humana. Acreditava-se que a ciência nos permitiria reescrever o código da vida, corrigindo os erros da Mãe Natureza. Dizia-se até que a terapia

genética podia possibilitar também a melhoria da raça humana, reforçando a nossa saúde e inteligência ao nível genético.

Grande parte da investigação inicial centrava-se num alvo fácil: atacar as doenças genéticas que são causadas por um erro em poucas letras do nosso genoma. Por exemplo, a anemia de células falciformes (que afeta muitos afro-americanos), a fibrose cística (que afeta muitos norte-europeus) e a doença de Tay-Sachs (que afeta as pessoas de origem judaica) são causadas por erros em apenas uma ou poucas letras do nosso genoma. Havia a esperança de que os médicos conseguissem curar estas doenças simplesmente reescrevendo o nosso código genético.

(Devido à endogamia, estas doenças genéticas eram tão predominantes nas famílias reais da Europa que os historiadores acreditam que afetaram mesmo a história mundial. O rei Jorge III de Inglaterra sofria de uma doença genética que o levou à loucura. Os historiadores têm especulado que talvez tenha sido essa loucura que conduziu à Revolução Americana. Também o filho de Nicolau II da Rússia sofria de hemofilia, que a família real acreditava só poder ser tratada pelo místico Rasputin. Isto paralisou a monarquia e adiou reformas muito necessárias, o que pode ter contribuído para a Revolução Russa de 1917.)

Estes ensaios de engenharia genética foram conduzidos de forma semelhante à imunoterapia. Primeiro, o gene pretendido era introduzido num vírus inofensivo, modificado de modo a não atacar o anfitrião. Depois, o vírus era injetado para infetar o paciente com o gene pretendido.

Infelizmente, depressa surgiram complicações. Por exemplo, o corpo reconhecia frequentemente o vírus e atacava-o, causando efeitos secundários indesejados para o paciente. Muitas das esperanças na terapia genética caíram por terra em 1999 quando um paciente morreu após um ensaio clínico. Os fundos começaram a secar. Os programas de investigação foram drasticamente reduzidos. Os ensaios foram interrompidos ou reexaminados.

Porém, mais recentemente, os investigadores fizeram progressos quando começaram a analisar mais atentamente a forma como a Mãe Natureza ataca os vírus. Por vezes, esquecemo-nos de que os vírus não atacam apenas pessoas, mas também bactérias. Assim, os médicos fizeram uma simples pergunta: como é que as bactérias se defendem do ataque dos vírus? Para sua grande surpresa, descobriram que, ao longo de milhões de anos, as bactérias criaram formas de cortar os genes do vírus invasor. Se um vírus tenta atacar uma bactéria, a bactéria, para contra-atacar, liberta uma vaga de químicos que dividem os genes do vírus em pontos exatos, travando assim a infeção. Este poderoso mecanismo foi isolado e depois usado para cortar códigos genéticos virais em determinados pontos. Emmanuelle Charpentier e Jennifer Doudna receberam o Nobel em 2020 pelo seu trabalho pioneiro no aperfeiçoamento desta tecnologia revolucionária.

Este processo tem sido comparado ao processamento de texto. Antigamente, as máquinas de escrever tinham de escrever cada letra sucessivamente, num processo demorado e repleto de erros. Mas com os processadores de texto, passou a ser possível escrever um programa que nos permitia editar manuscritos inteiros,

removendo e reorganizando as suas partes. Da mesma forma, um dia, talvez a tecnologia CRISPR possa ser aplicada à engenharia genética, cujo sucesso ao longo dos anos tem tido altos e baixos. Isto abriria as comportas da engenharia genética.

Um alvo particular da terapia genética pode vir a ser o gene p53. Quando sofre mutações, está envolvido em cerca de metade dos cancros mais comuns, como cancro da mama, do cólon, do fígado, do pulmão e dos ovários. Talvez uma razão pela qual esteja tão vulnerável a tornar-se canceroso seja o facto de ser um gene excepcionalmente longo e, assim, haver muitos sítios onde podem desenvolver-se nele as mutações. É um gene supressor de tumores, o que o torna crucial para travar o crescimento dos cancros. Por esse motivo, é frequentemente conhecido como «O Guardião do Genoma».

Todavia, quando sofre mutações, torna-se um dos genes subjacentes mais comuns nos cancros humanos. Na verdade, as mutações em determinados locais do mesmo estão muitas vezes correlacionadas com cancros específicos. Por exemplo, os fumadores de longa data desenvolvem frequentemente cancros em três mutações específicas ao longo do p53, o que pode ser usado para provar que o cancro do pulmão dessa pessoa deriva muito provavelmente do fumo de cigarros.

No futuro, usando os avanços na terapia genética e na CRISPR, talvez seja possível corrigir os erros no gene p53 com recurso a imunoterapia e computadores genéticos, curando assim muitas formas de cancro.

Recordamos que a imunoterapia tem efeitos secundários, incluindo, em casos raros, a morte do paciente. Parte da razão para que isto aconteça é que o corte e colagem dos genes cancerígenos não é exato. O p53, por exemplo, é um gene muito longo, pelo que os erros ao cortar este gene podem ser comuns. Os computadores quânticos ajudarão a reduzir esses efeitos secundários letais. Têm o potencial de decifrar e cartografar as moléculas no interior dos genes de uma certa célula cancerígena. Depois a CRISPR pode conseguir cortar o gene em pontos precisos com exatidão. Assim, mediante uma combinação de terapia genética, computadores quânticos e CRISPR, talvez seja possível cortar e unir genes com uma precisão inédita, reduzindo o problema dos efeitos secundários letais.

6. Terapia Genética CRISPR

Clara Rodríguez Fernández escreve na *Labiotech*: «Em teoria, a CRISPR poderia permitir-nos a edição de qualquer mutação genética, para curar qualquer doença de origem genética.» As doenças genéticas que envolvem uma única mutação estão a ser visadas em primeiro lugar. «Com mais de 10.000 doenças causadas por mutações num único gene humano, a CRISPR oferece esperança de cura para todas elas, através da correção do erro genético na origem das mesmas.» De futuro, conforme a tecnologia se for desenvolvendo, as doenças genéticas causadas por múltiplas mutações em vários genes poderão ser também estudadas.²

Por exemplo, eis uma lista de algumas das doenças genéticas que são atualmente tratadas pela CRISPR:

6.1 Cancro

Na Universidade da Pensilvânia, os cientistas conseguiram usar a CRISPR para remover três genes que permitem às células cancerígenas escapar ao sistema imunitário do corpo. Depois acrescentaram outro gene que pode ajudar o sistema imunitário a reconhecer tumores. Os cientistas descobriram que o método era seguro, mesmo quando usado em pacientes com cancro avançado.

Além do mais, a CRISPR Therapeutics está a efetuar um ensaio clínico em 130 pacientes com cancro do sangue. Esses pacientes estão a ser tratados com imunoterapia, que usa a CRISPR para modificar o seu ADN.

6.2 Anemia Falciforme

A CRISPR Therapeutics está também a colher células estaminais da medula em pacientes com anemia falciforme. A CRISPR altera então essas células para produzirem hemoglobina fetal. As células tratadas voltam depois a ser introduzidas no corpo.

6.3 Sida

Há um número reduzido de indivíduos que nasce com imunidade natural à sida devido a uma mutação no gene CCR5. Normalmente, a proteína produzida por este gene cria um ponto de entrada para o vírus da sida entrar numa célula. Contudo, nestes raros indivíduos, o gene CCR5 sofreu uma mutação que impede o vírus

da sida de penetrar na célula. Para as pessoas que não têm esta mutação, os cientistas estão a editar deliberadamente o gene CCR5 com a CRISPR para que o vírus não consiga entrar nas células.

6.4 Fibrose Cística

A fibrose cística é uma doença respiratória relativamente comum. Os indivíduos que sofrem desta doença raramente sobrevivem para além dos quarenta anos de idade. É causada por uma mutação no gene CFTR. Nos Países Baixos, os médicos conseguiram usar a CRISPR para reparar esse gene sem causar efeitos secundários. Outros grupos, como a Editas Medicine, a CRISPR Therapeutics e a Beam Therapeutics, estão também a planear tratar a fibrose cística com a CRISPR.

6.5 Doença de Huntington

Esta doença genética causa demência, doença mental, deficiências de cognição e outros sintomas debilitantes. Crê-se que algumas das pessoas perseguidas e acusadas de bruxaria nos julgamentos de Salem em 1692 sofriam desta doença. Resulta de uma repetição do gene de Huntington ao longo do ADN. Os cientistas no Hospital Pediátrico de Filadélfia estão a usar a CRISPR para tratar essa doença.

Embora doenças causadas por mutações mínimas sejam alvos relativamente fáceis para a CRISPR, doenças como a esquizofrenia podem envolver um maior número de mutações, além de interações

com o ambiente. Mais uma razão pela qual os computadores quânticos serão necessários.

Para compreender como estas mutações podem criar uma doença, ao nível celular, será preciso recorrer a toda a potência dos computadores quânticos. Depois de conhecermos o mecanismo molecular pelo qual certas proteínas causam doenças genéticas, poderemos então modificá-las ou encontrar tratamentos mais eficazes.

7. O Paradoxo de Peto

No entanto, isto traz também ao de cima um paradoxo relativamente ao cancro. O biólogo Richard Peto, de Oxford, observou algo curioso em relação aos elefantes. Devido ao seu grande tamanho, seria de esperar que tivessem mais cancros do que animais muito mais pequenos. Afinal de contas, uma massa maior significa que mais células estão constantemente a dividir-se e a introduzir a possibilidade de erros genéticos como o cancro. Porém, surpreendentemente, os elefantes têm uma taxa de incidência de cancro relativamente baixa. Isto ficou conhecido como paradoxo de Peto.

Ao analisarmos o reino animal, encontramos esta situação por todo o lado. A taxa de incidência de cancro não corresponde ao peso corporal. Mais tarde, veio a saber-se que os elefantes têm 20 cópias do gene p53, enquanto os humanos têm apenas uma. Pensa-se que estas cópias extra do p53 trabalham com outro gene chamado LIF

para dar aos elefantes uma vantagem contra o cancro. Assim, crê-se que genes como o p53 e o LIF contribuem para suprimir os cancros em animais grandes.

No entanto, a história pode não acabar aí. Por exemplo, as baleias têm apenas uma cópia do p53 e uma versão do LIF, e contudo a taxa de incidência de cancro entre as baleias é baixa. Isto significa que as baleias têm provavelmente outros genes, que os cientistas ainda não descobriram, que as protegem contra o cancro. Na verdade, pensa-se que pode existir um grande número de genes que impedem que os grandes animais sejam vítimas de taxas elevadas de cancro. Certos tubarões podem também ter alguma vantagem genética obtida através da evolução. Os tubarões-da-gronelândia podem viver até aos quinhentos anos, algo que é possível, provavelmente, graças a um gene ainda desconhecido.

«A esperança é que, sabendo como a evolução encontrou uma maneira de prevenir o cancro, possamos traduzir isso numa melhor prevenção contra o cancro. Todos os organismos que desenvolveram um tamanho corporal de grandes dimensões têm uma solução distinta para o paradoxo de Peto. Há uma série de descobertas à nossa espera na natureza, onde a natureza nos está a mostrar o caminho para prevenir o cancro», diz Carlo Maley, que estudou o gene p53 no reino animal. E os computadores quânticos podem revelar-se muito importantes na descoberta destes misteriosos genes anticancro.³

Há muitas formas pelas quais os computadores quânticos ajudariam na guerra contra o cancro. Um dia, as biópsias líquidas

podem vir a detetar células cancerígenas anos ou décadas antes da formação de tumores. Na verdade, um dia os computadores quânticos talvez possibilitem a existência de um gigantesco repositório nacional de dados genómicos atualizados ao minuto, usando as nossas casas de banho para rastrear toda a população em busca dos primeiros sinais de células cancerígenas.

No entanto, se o cancro chegar a formar-se, através dos computadores quânticos serão possíveis modificações ao nosso sistema imunitário que lhe darão a possibilidade de atacar centenas de tipos diferentes de cancro. Uma combinação de terapia genética, imunoterapia, computadores quânticos e CRISPR tem potencial de vir a cortar e editar os genes cancerígenos com uma extraordinária precisão molecular, ajudando a reduzir os efeitos secundários, frequentemente letais, da imunoterapia. Mais ainda, talvez um punhado de genes, como o p53, estejam envolvidos na grande maioria desses cancros, pelo que a terapia genética, combinada com novas perspetivas dadas pelos computadores quânticos, pode conseguir travá-los antes que se desenvolvam mais.

Todos estes avanços no tratamento do cancro, com as biópsias líquidas e a imunoterapia, levaram a que o presidente Joseph Biden anunciasse, em 2022, o Cancer Moonshot, uma iniciativa com o objetivo de reduzir a taxa de morte por cancro em pelo menos 50 por cento nos próximos vinte e cinco anos, a nível nacional. Tendo em conta os rápidos avanços na biotecnologia, é sem dúvida um objetivo possível.

Embora possamos um dia vir a ter a capacidade de curar completamente um número cada vez mais vasto de cancros, com recurso a esta tecnologia, é provável que continuemos a sofrer de algumas formas de cancro, simplesmente porque há várias maneiras de um cancro se poder formar. Porém, no futuro, talvez o cancro venha a ser tratado como uma constipação comum, um aborrecimento evitável. Todavia, outra poderosa combinação de novas tecnologias, que exploraremos no capítulo seguinte, talvez nos proporcione uma linha de defesa contra a doença. A inteligência artificial e os computadores quânticos poderão também dotar-nos da capacidade de criar proteínas sintéticas, das quais os nossos corpos são compostos. Juntos, poderão possibilitar-nos curar doenças incuráveis e reformular a própria vida.

¹ Liz Kwo and Jenna Aronson, «The Promise of Liquid Biopsies for Cancer Diagnosis», *American Journal of Managed Care*, 11 de outubro de 2021; www.ajmc.com/view/the-promise-of-liquid-biopsies-for-cancer-diagnosis.

² Clara Rodríguez Fernández, «Eight Diseases CRISPR Technology Could Cure», *Labitech*, 18 de outubro de 2021; <https://www.labitech.eu/best-biotech/crispr-technology-cure-disease/>.

³ Viviane Callier, «A Zombie Gene Protects Elephants from Cancer», *Quanta Magazine*, 7 de novembro de 2017; www.quantamagazine.org/a-zombie-gene-protects-elephants-from-cancer-2017107.

CAPÍTULO 12

IA e Computadores Quânticos

Serão as máquinas capazes de pensar?

Esta foi a pergunta que dominou a histórica Conferência de Dartmouth em 1956, na qual teve origem um campo totalmente novo da ciência, chamado «inteligência artificial». Começou com uma ousada proposta que dizia: «Far-se-á uma tentativa para descobrir como é que as máquinas usam a linguagem, formam abstrações e conceitos, resolvem o tipo de problemas agora reservados para os humanos e se melhoram a si próprias.» Previas-se ser «possível fazer avanços significativos... se um grupo cuidadosamente selecionado de cientistas trabalhar no assunto, em conjunto, durante um verão».¹

Muitos verões depois, alguns dos cientistas mais brilhantes do mundo continuam a trabalhar obstinadamente neste problema. Um dos líderes nessa conferência era o professor Marvin Minsky do MIT, que foi considerado o Pai da Inteligência Artificial.

Quando lhe perguntei sobre esse período, ele disse-me que foram tempos embriagantes. Parecia que em poucos anos seria possível criar uma máquina com inteligência correspondente à de

um ser humano. Talvez fosse apenas uma questão de tempo até que os robôs conseguissem passar no teste de Turing.

Parecia que todos os anos aconteciam progressos no campo da IA. Pela primeira vez, computadores digitais conseguiam jogar damas, e até vencer humanos em jogos simples. Havia computadores capazes de resolver problemas de álgebra ao nível de um jovem estudante. Criaram-se braços mecânicos que conseguiam identificar e apanhar blocos. No Instituto de Investigação de Stanford, os cientistas construíram o Shakey, um minicomputador em forma de caixa, montado sobre lagartas, com uma câmara em cima. Podia ser programado para se deslocar por uma divisão e identificar os objetos no seu caminho. Era capaz de se orientar sozinho e de evitar obstáculos. (O nome vinha do barulho e vibração da sua deslocação.)*

A comunicação social perdeu a cabeça. O homem mecânico estava a nascer defronte dos nossos olhos, gritaram. Os cabeçalhos nas revistas científicas anunciaram a chegada do robô doméstico, que poderia aspirar o chão, lavar a loiça e aliviar-nos das tarefas domésticas. Os robôs seriam um dia *baby-sitters* ou até membros de confiança da nossa família. Até a indústria militar abriu os cordões à bolsa para financiar robôs para utilização no campo de batalha, como o Smart Truck, que poderia um dia andar sem condutor, efetuar missões de reconhecimento por trás das linhas

* Shakey deriva de shake, tremer.

inimigas, socorrer soldados feridos e regressar à base, tudo de forma autónoma.

Os historiadores começaram a escrever que estávamos à beira de realizar um sonho antigo. O deus grego, Vulcano, criara uma frota de robôs para fazer trabalhos no seu castelo. Pandora, que abrisse uma caixa mágica e, sem o saber, libertara assim uma catástrofe sobre a raça humana, era na realidade um robô construído por Vulcano. E até o polímata Leonardo da Vinci, em 1495, construiu um cavaleiro mecânico capaz de movimentar os braços, levantar-se, sentar-se e erguer a viseira, operado por uma série de cabos e roldanas ocultos.

Mas depois instalou-se «o inverno da IA». Apesar de todos os comunicados de imprensa empolgados, a IA fora vendida à comunicação social de forma exagerada, e as nuvens negras do pessimismo surgiram. Os cientistas começaram a perceber que os seus aparelhos de IA eram como mágicos que só sabiam um truque. Cada um era capaz de efetuar apenas uma simples tarefa. Os robôs eram ainda aparelhos desastrados que mal conseguiam orientar-se numa sala. A ideia de criar uma máquina multifuncional que estivesse à altura da inteligência de um ser humano parecia inacreditavelmente avançada.

As forças militares começaram a perder interesse. O financiamento secou e os investidores perderam uma fortuna. Desde então, passámos por vários invernos da IA, em que o ciclo sucesso-fiasco gerava um entusiasmo enorme e publicidade descarada, apenas para voltar a desabar. Os cientistas foram

obrigados a encarar a dura realidade: a IA era mais difícil de desenvolver do que tinham julgado.

Tendo em conta que Marvin Minsky viu passar tantos invernos da IA, perguntei-lhe se tinha alguma previsão sobre quando um robô poderia alcançar uma inteligência equivalente ou superior à humana. Ele sorriu e disse-me que já se deixou desse tipo de previsão quanto ao futuro. Já não se dedica a estudar bolas de cristal. Foram demasiadas as vezes, admitiu, em que as pessoas se deixaram levar pelo entusiasmo.

O problema, explicou-me ele, é que os investigadores na área da IA sofrem de algo a que chamou «inveja da física», o desejo de encontrar um tema único, unificador e abrangente para a IA. Os físicos, disse ele, procuram uma teoria de campo unificada que dará uma imagem coerente e elegante do Universo, mas a IA é diferente. É uma manta de retalhos complexa, com demasiados caminhos divergentes e até contraditórios dados pela evolução.

É preciso explorar novas ideias e novas estratégias. Uma via promissora poderá ser a união da IA com os computadores quânticos, a fusão do poder destas duas disciplinas para atacar o problema da inteligência artificial. No passado, a IA estava colada aos computadores digitais, pelo que existiam limites frustrantes quanto ao que um computador podia fazer. Mas a IA e os computadores quânticos complementam-se mutuamente. A IA tem a capacidade de aprender tarefas novas e complexas, e os computadores quânticos podem fornecer-lhe a potência computacional de que precisa.

Um computador quântico pode ter uma potência formidável, mas não aprende necessariamente com os seus próprios erros. Porém, um computador quântico equipado com redes neuronais será capaz de melhorar os seus cálculos a cada iteração, podendo resolver problemas mais depressa e de modo mais eficiente através da descoberta de novas soluções. Da mesma forma, os sistemas de IA podem estar equipados para aprender com os seus erros, mas a capacidade computacional total de que dispõem é demasiado reduzida para resolver problemas de grande complexidade. Assim, uma IA apoiada pela potência computacional de um computador quântico poderia atacar problemas mais difíceis.

No fundo, a união de IA e computadores quânticos poderá vir a abrir vias totalmente novas de investigação. Talvez a chave da inteligência artificial se encontre na teoria quântica. Na verdade, a fusão de ambas pode revolucionar todos os ramos da ciência, alterar o nosso estilo de vida e modificar de forma radical a economia. A IA dar-nos-á a capacidade de criar máquinas capazes de aprendizagem e, assim, de copiar as competências humanas, enquanto os computadores quânticos podem fornecer a potência computacional para, finalmente, criar uma máquina inteligente.²

Tal como disse o diretor-executivo da Google, Sundar Pichai: «Penso que a IA pode acelerar a computação quântica e a computação quântica pode acelerar a IA»

1. Máquinas de Aprendizagem Automática

Um cientista que refletiu longamente sobre o futuro da IA é, ex-diretor do Laboratório de Inteligência Artificial do MIT, que foi fundado por Marvin Minsky.

Brooks acredita que a IA pode ter sido concebida de forma demasiado limitada. Por exemplo, disse-me, imaginemos uma mosca. A mosca consegue executar proezas de navegação extraordinárias, que ultrapassam as capacidades das nossas melhores máquinas. Por si só, é capaz de voar habilmente por uma divisão, manobrar, evitar obstáculos, localizar comida, encontrar parceiros para acasalar e esconder-se, tudo isto com um cérebro do tamanho da ponta de um alfinete. É verdadeiramente uma maravilha de engenharia biológica.

Como é possível? Como pode a Mãe Natureza criar uma máquina voadora capaz de envergonhar as nossas melhores aeronaves?

Ele começou a perceber que talvez a área da IA tivesse feito as perguntas erradas em 1956. Na altura, presumia-se que o cérebro era uma espécie de máquina de Turing, um computador digital. Se transcrevêssemos as regras completas do xadrez, da álgebra, de caminhar, etc., para um *software* gigantesco, e depois o introduzíssemos no computador digital, este começaria subitamente a pensar. «Pensar» fora reduzido a *software* e, assim, a estratégia básica era evidente: escrever *software* cada vez mais sofisticado para guiar a máquina.

Uma máquina de Turing, recordemos, tem um processador que executa as instruções que lhe são transmitidas. É apenas tão inteligente como a programação que implementa. Assim, um robô andante tem de ter todas as leis do movimento de Newton programadas nele para guiar os movimentos dos seus membros, microssegundo a microssegundo. Para tal, são necessários programas de computador gigantescos, com milhões de linhas de código, para algo tão simples como atravessar uma sala.

As máquinas de IA até então, disse-me Brooks, baseavam-se em programar todas as leis da lógica e do movimento desde o início, o que se veio a revelar uma tarefa árdua. Chamava-se a isto a abordagem «de cima para baixo», pela qual os robôs eram programados para dominar qualquer competência desde o princípio. Porém, os robôs desenhados desta forma eram patéticos. Se pegarmos no Shakey, ou num robô militar avançado da mesma época, e o colocarmos na floresta, o que é que ele faz? O mais provável é que se perca ou tombe. Não obstante, o mais pequeno inseto, com o seu cérebro minúsculo, consegue deslocar-se rapidamente pela mesma área, encontrar comida, parceiros para acasalar e abrigo, enquanto o nosso robô se debate, impotente, caído de costas.

Não foi assim que a Mãe Natureza concebeu as suas criaturas.

Na natureza, apercebeu-se Brooks, os animais não são programados para caminhar desde o início. Aprendem da maneira mais difícil, pondo uma perna em frente da outra, caindo e recomeçando. Experimentação e erro é o método da natureza.

Isto leva-nos também ao conselho que todos os professores de música dão ao aluno promissor. Como chegar ao Carnegie Hall? A resposta é: praticar, praticar, praticar.

Por outras palavras, a Mãe Natureza concebe criaturas que são máquinas de aprendizagem por reconhecimento de padrões, que recorrem a experimentação e erro para navegar o mundo. Cometem erros, mas a cada iteração aproximam-se mais do sucesso.

Esta é uma abordagem «de baixo para cima», e começa simplesmente por ir contra as coisas. Por exemplo, os bebés aprendem por imitação dos adultos. Se pusermos um gravador num berço durante a noite, ouviremos os bebés a balbuciar constantemente. O que estão a fazer, na realidade, é a praticar os sons que ouvem, uma e outra vez, até aprenderem a duplicá-los corretamente.

Assim, guiado por esta ideia, Brooks criou uma frota de «insetoides» ou *bugbots*. Estes aprendem a andar tal como a Mãe Natureza pretende, indo contra as coisas. Pouco tempo depois, havia robôs semelhantes a insetos a rastejar pelo chão no MIT, a colidir com as coisas, mas a ultrapassar rapidamente em inteligência os robôs desastrados, mais tradicionais, que seguem regras rígidas, mas esfolam as paredes ao passar. Porquê reinventar a roda?

Brooks disse-me: «Quando era miúdo, tinha um livro que descrevia o cérebro como uma rede telefónica. Livros anteriores descreviam-no como um sistema hidrodinâmico ou um motor a vapor. Depois, nos anos 60, tornou-se um computador digital. Nos anos 80, tornou-se um computador digital de computação paralela. Provavelmente existe por aí algum livro infantil que diz que o cérebro é tal e qual como a World Wide Web.»

Assim, talvez o cérebro seja, na realidade, uma máquina de aprendizagem por reconhecimento de padrões, baseada naquilo a que se chama redes neuronais. Em ciência computacional, as redes neuronais exploram algo conhecido como regra de Hebb. Uma versão desta regra diz que, ao repetir constantemente uma tarefa e aprendendo com erros anteriores, cada iteração se aproxima mais do caminho correto. Por outras palavras, os caminhos elétricos corretos para essa tarefa são reforçados, no cérebro do sistema de IA, após repetidas iterações.

Por exemplo, quando uma máquina de aprendizagem tenta identificar um gato, não lhe é dada a descrição matemática das características básicas de um gato. Ao invés, são-lhe mostradas dezenas de fotografias de gatos, em todo o tipo de situações — a dormir, a andar, a saltar, à caça, etc. Depois, o computador determina por si mesmo a aparência de um gato em diferentes ambientes, por meio de experimentação e erro. A isto chama-se aprendizagem profunda.

Os sucessos da abordagem de aprendizagem profunda são bastante notáveis. A AlphaGo da Google, uma IA criada para jogar

o antigo jogo de tabuleiro Go, conseguiu vencer o campeão mundial em 2017. Foi uma proeza extraordinária, uma vez que existem 10^{170} posições possíveis no tabuleiro de 19 x 19 do jogo. É mais do que todos os átomos no Universo conhecido. A AlphaGo aprendeu a jogar, não só ao defrontar os melhores jogadores humanos, mas também jogando contra si própria, quando conseguia concluir os jogos quase à velocidade da luz.

2. Problema do Senso Comum

As máquinas de aprendizagem ou redes neuronais podem vir a resolver um dos problemas mais persistentes da inteligência artificial: o «problema do senso comum». Coisas que os humanos tomam como certas, que até uma criança compreende, estão para além das capacidades dos nossos computadores mais avançados. Até um robô conseguir resolver o problema do senso comum, será incapaz de funcionar na sociedade humana.

Por exemplo, um computador digital pode não compreender um conjunto de observações simples, tais como:

- A água é molhada, e não seca
- As mães são mais velhas do que as filhas
- As cordas podem puxar, mas não empurrar
- Os paus podem empurrar, mas não puxar

Numa única tarde, é possível escrever dezenas de factos «óbvios» sobre o nosso mundo que estão para além da capacidade de compreensão dos computadores digitais. Isto porque os computadores não vivenciam o mundo como nós.

As crianças aprendem estes factos de senso comum porque vão de encontro a essas coisas. Aprendem ao fazer. Sabem que as mães são mais velhas do que as filhas porque o viram através da sua experiência. Mas um robô é uma tábua rasa, sem qualquer entendimento prévio do que o rodeia.

Tal como discutimos em relação à abordagem «de cima para baixo», os cientistas tentaram programar senso comum no *software* de um computador. Instantaneamente, este saberia como se movimentar e funcionar na sociedade humana. Contudo, todas as tentativas de o fazer terminaram em fracasso. Há, pura e simplesmente, demasiadas noções de senso comum, que até uma criança de quatro anos compreende, que se encontram fora do alcance dos nossos computadores digitais.

Assim, talvez a fusão das abordagens «de cima para baixo» e «de baixo para cima», e a fusão da IA com os computadores quânticos, possam vir a concretizar o sonho dos primeiros investigadores de IA e abrir caminho ao futuro.

À medida que a lei de Moore abranda, conforme vimos mais atrás, devido ao facto de os transístores estarem a aproximar-se do tamanho de átomos, os *microchips* serão inevitavelmente

substituídos por computadores mais avançados, como os computadores quânticos.

A IA, por sua vez, estagnou devido à falta de potência computacional. As suas capacidades em máquinas de aprendizagem, reconhecimento de padrões, motores de busca e robótica estão circunscritas por este limite. Os computadores quânticos podem acelerar de forma extraordinária o progresso em cada uma dessas áreas, pois conseguem processar simultaneamente vastas quantidades de informação. Enquanto os computadores digitais computam um *bit* de cada vez, os computadores quânticos computam uma série imensa de *qubits* ao mesmo tempo, ampliando exponencialmente a sua potência.

Assim, vemos como a IA e os computadores quânticos se podem beneficiar mutuamente. Os computadores quânticos têm a ganhar com a possibilidade de aprender novas tarefas, como numa rede neuronal, e a IA beneficiará da vasta potência computacional dos computadores quânticos.

3. Enovelamento de Proteínas

Os sistemas de aprendizagem profunda de IA estão agora a debruçar-se sobre um dos maiores problemas de toda a biologia e medicina: decodificar o segredo das moléculas de proteína. Embora o ADN contenha as instruções da vida, são as proteínas que na realidade fazem o trabalho de pôr o corpo a funcionar. Se compararmos o nosso corpo com um estaleiro de construção, o ADN

contém as plantas, mas as proteínas fazem o trabalho duro do capataz e dos construtores. Uma planta de nada serve sem um exército de operários que a ponha em prática.

As proteínas são as bestas de carga da biologia. Não só compõem os músculos que dão energia ao corpo, como também digerem a nossa comida, atacam os germes, regulam as funções corporais e executam muitas outras tarefas cruciais. Assim, os biólogos questionaram-se: como é que a molécula de proteína desempenha todas essas funções miraculosas?

Nas décadas de 50 e 60, os cientistas usaram cristalografia de raios X para cartografar a estrutura de várias moléculas de proteína, que são formadas por exatamente 20 aminoácidos dispostos em longas cadeias, criando novos complexos. Para sua grande surpresa, os cientistas descobriram que é precisamente o feitio da molécula de proteína que torna possível a sua magia. Os cientistas dizem que, neste caso, «a função segue a forma», ou seja, é a configuração de uma molécula de proteína, com todos os seus nós e torcidos intrincados, que cria as propriedades características dessa proteína.

Por exemplo, pensemos no vírus da covid-19, cujo formato sabemos ser comparável à coroa solar, com muitos espigões de proteína a projetarem-se da superfície. Esses espigões* são como chaves que abrem as «fechaduras» específicas localizadas na superfície das células dos nossos pulmões. Ao abrir essas

* No original, spike.

fechaduras, a proteína *spike* pode então injetar o seu material genético nas células dos nossos pulmões, onde rapidamente produz cópias de si própria, multiplicando-se. A célula morre e liberta então estes vírus mortíferos que vão infetar ainda mais células saudáveis nos pulmões. Estes espigões são o motivo pelo qual a economia mundial quase implodiu em 2020-22.

Assim, é a forma da proteína, mais do que qualquer outra coisa, que determina como a molécula se comporta. Se soubéssemos a forma de cada molécula de proteína, seria um passo gigantesco para entender como ela funciona.

A isto chama-se o «problema de enovelamento de proteínas», a tarefa de cartografar o formato de todas as proteínas importantes, e pode vir a desvendar o segredo de muitas doenças incuráveis.

A cristalografia de raio X tem-se revelado essencial na determinação da forma de uma molécula de proteína, mas trata-se de um processo demorado e enfadonho. Os cientistas começam por, primeiro, isolar e purificar quimicamente as proteínas que querem analisar, que têm então de ser cristalizadas. A proteína cristalizada é inserida numa máquina de difração de raio X, que dispara raios X através do cristal e forma um padrão de interferência numa película fotográfica. Ao princípio, a fotografia de raio X parece um emaranhado sem sentido de pontos e linhas. Porém, através de intuição, sorte e física, os cientistas tentam então decifrar a estrutura da proteína a partir das imagens de raio X.

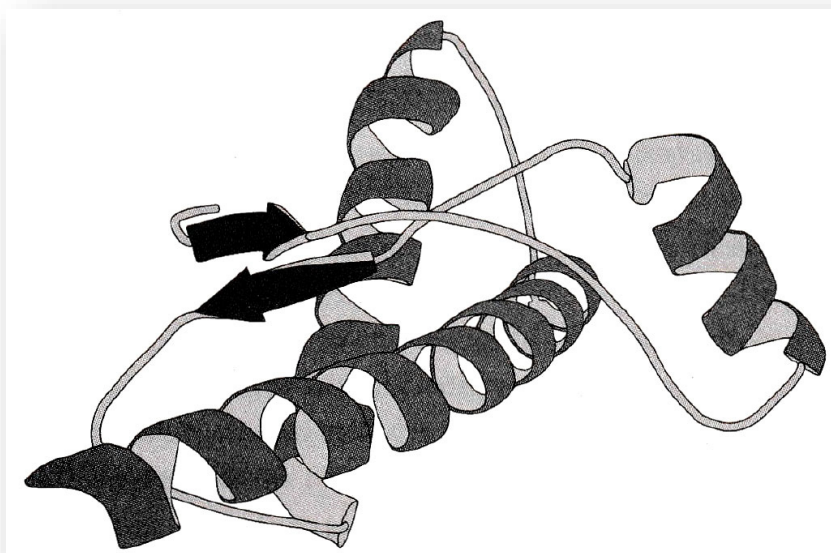


Figura 10: Enovelamento de proteínas.

As proteínas consistem numa longa cadeia de 20 aminoácidos, que pode dobrar-se de formas complexas. O formato da molécula de proteína dobrada sobre si própria determina como ela funciona. Os computadores quânticos talvez possibilitem aos cientistas analisar e depois criar proteínas completamente novas com propriedades estranhas, mas úteis, abrindo assim um novo ramo da biologia.

4. O Nascimento da Biologia Computacional

Assim, um dos objetivos de uma área emergente chamada biologia computacional é usar computadores para decifrar a estrutura 3D de uma proteína, olhando apenas para os seus constituintes químicos. Talvez todos os anos de trabalho árduo para compreender a estrutura de uma molécula de proteína pudessem passar a ser feitos com o pressionar de um botão num computador a executar um programa de IA.

Para ajudar a estimular a investigação nesta área difícil, mas crucial, os cientistas experimentaram uma nova estratégia. Criaram um concurso chamado CASP (Avaliação Crítica de Previsão de Estrutura), para ver quem tinha o melhor programa de computador

que resolvesse o problema da determinação da estrutura das proteínas.

Foi um ponto de viragem, uma vez que deu aos jovens cientistas um objetivo concreto e empolgante. Podiam conquistar fama e o reconhecimento dos seus pares utilizando a IA para solucionar o problema do enovelamento das proteínas, o que podia levar a terapias capazes de salvar milhares de vidas.

As regras do concurso eram simples. Os concorrentes recebiam pistas mínimas sobre a natureza de determinada proteína, como a sequência de aminoácidos. Depois cabia ao programa de computador preencher todos os detalhes sobre o modo como ela se dobra sobre si própria. Uma forma de abordar o problema era utilizar o princípio de ação mínima de que Richard Feynman foi pioneiro. Se bem se lembram, Feynman, ainda aluno de liceu, conseguiu determinar que caminho uma bola seguiria ao minimizar a sua ação (a energia cinética menos a energia potencial).

É possível aplicar o mesmo método às moléculas de proteínas. O objetivo é descobrir a configuração de aminoácidos que cria o estado mais baixo de energia. Este processo foi comparado a descer uma montanha para encontrar o ponto mais baixo de um vale. Primeiro, dá-se passos pequenos e hesitantes em todas as direções. A seguir, movemo-nos apenas na direção que reduz ligeiramente a nossa altura. Recomeçamos então o processo e damos o passo seguinte, para ver se é possível baixar ainda mais, e assim sucessivamente até chegar ao fundo do vale.

Da mesma forma, é possível descobrir que configuração de aminoácidos tem a energia mais baixa. Eis uma maneira de o fazer:

Antes de começar, são efetuadas uma série de aproximações. Uma vez que uma molécula tem muitas funções de onda a descrever eletrões e núcleos, todas a interagir entre si de modos complexos, o cálculo excede rapidamente a capacidade de um computador convencional. Assim, retiram-se alguns termos complexos, relativamente pequenos (por exemplo, a interação de eletrões com núcleos pesados, e certas interações entre eletrões), na esperança de que isso não crie demasiados erros.

Agora que o programa está preparado, o primeiro passo é ligar os aminoácidos uns aos outros numa longa cadeia. Isto cria um esqueleto ou «modelo de brincar» da possível estrutura da molécula de proteína. Uma vez que conhecemos os ângulos de ligação quando certos átomos se unem uns aos outros, isto dá-nos uma aproximação inicial, por alto, da possível estrutura da proteína.

Em segundo lugar, calcula-se a energia dessa configuração de aminoácidos, porque sabemos a energia das suas várias cargas e como as ligações podem mover-se.

Terceiro, torce-se e dobra-se essas ligações, para ver se a nova configuração aumenta ou diminui a energia da proteína. É o equivalente aos tais passos hesitantes na montanha, à procura do passo que baixa a nossa altura.

Quarto, afastam-se todas as configurações que aumentam a energia, conservando apenas aquelas que a baixam. O computador «aprende» por experimentação e erro como o movimento dos átomos pode reduzir a energia da molécula.

E, por fim, recomeça-se tudo de novo, torcendo as ligações químicas ou reorganizando os aminoácidos. A cada iteração, reduz-se a energia por meio de ajustes na localização e posição dos aminoácidos, até finalmente alcançar a configuração com a energia mais baixa. Normalmente, este processo de ajuste constante da posição dos átomos seria impossível para um computador digital. Porém, uma vez que se parte de uma série de aproximações, pondo de lado termos complexos que são relativamente pequenos, um computador consegue resolver a versão simplificada numa questão de horas ou dias.

De início, os resultados foram risíveis. Quando se comparava a forma da molécula prevista pelo computador com a forma concreta da molécula obtida através de cristalografia de raio X, verificou-se que os modelos de computador eram extraordinariamente diferentes. Porém, com o passar dos anos, os programas de aprendizagem tornaram-se mais potentes e os modelos foram ficando mais precisos.

Em 2021, os resultados foram espetaculares. Mesmo com todas estas aproximações, a companhia de computadores DeepMind, afiliada da Google, que desenvolveu o AlphaGo, anunciou que o seu programa de IA, chamado AlphaFold, decifrara a estrutura aproximada de um número assombroso de proteínas: 350.000.

Mais ainda, identificara 250.000 formas até então desconhecidas. Decifrou a estrutura 3D de todas as 20.000 proteínas listadas no Projeto do Genoma Humano. Até desvendou a estrutura de proteínas encontradas no rato, na mosca da fruta e na bactéria *E. coli*. Mais tarde, os criadores da DeepMind anunciaram que em breve publicariam uma base de dados de mais de cem milhões de proteínas, que viria a incluir todas as proteínas conhecidas da ciência.

O mais notável é que, mesmo com todas essas aproximações, os seus resultados finais são praticamente equivalentes aos da cristalografia de raio X. Apesar de terem afastado vários termos na equação de onda de Schrödinger, conseguiram obter resultados surpreendentemente bons.

«Estávamos encalhados neste problema — como é que as proteínas se dobram sobre si próprias — há quase cinquenta anos. Ver a DeepMind apresentar uma solução, depois de ter trabalhado pessoalmente no problema durante tanto tempo e depois de tantos avanços e recuos, sem saber se alguma vez lá chegaríamos, é um momento muito especial», diz John Moult, cofundador do CASP.³

Esta abundância de informação já teve consequências imediatas. Por exemplo, está a ser utilizada para identificar 26 proteínas diferentes encontradas no coronavírus, na esperança de descobrir os seus pontos fracos e criar novas vacinas. No futuro, deverá ser possível descobrir rapidamente a estrutura de milhares de proteínas cruciais. «Conseguimos criar proteínas neutralizadoras do coronavírus em poucos meses. Mas o nosso objetivo é fazer esse

tipo de coisa numa questão de semanas», diz David Baker do Instituto de Design de Proteínas na Universidade de Washington.⁴

Isto, no entanto, é apenas o princípio. Tal como já realçámos, a função segue a forma. Ou seja, o modo como as proteínas fazem o seu trabalho é determinado pela sua estrutura. Da mesma maneira que uma chave encaixa numa fechadura, uma proteína faz a sua magia ao, de alguma forma, encaixar noutra molécula.

Mas descobrir como as proteínas se dobram sobre si próprias foi a parte fácil. Agora começa a parte difícil, usar computadores quânticos para determinar a estrutura completa de uma proteína, sem as aproximações, e como uma proteína em particular se une a outras moléculas para desempenhar a sua função, quer seja fornecer energia, agir como catalisador, fundir-se com outras proteínas, unir-se a outras proteínas para criar novas estruturas, dividir outras moléculas e muito mais. Assim, o enovelamento das proteínas é apenas o primeiro passo de uma longa viagem que contém os segredos da própria vida.

No futuro, o entendimento do programa de enovelamento de proteínas progredirá em várias fases, semelhantes às fases na criação da genómica.

4.1 Fase Um: Cartografar as Proteínas Dobradas

Estamos neste momento na Fase Um, a criar um imenso dicionário com centenas de milhares de rubricas correspondentes

ao enovelamento de várias proteínas. Cada entrada neste dicionário é uma imagem dos átomos individuais que se combinam para formar uma proteína complexa. Esses diagramas, por sua vez, vêm do estudo de fotografias de raio X. Este livro gigantesco tem como que o nome correto de cada proteína, mas de resto está vazio, sem as definições. Baseia-se numa série de aproximações que permitem aos computadores digitais fazer esse cálculo. É bastante surpreendente que, com tantas aproximações, os cientistas consigam ainda assim obter resultados tão precisos.

4.2 Fase Dois: Determinar a Função das Proteínas

Na próxima fase, na qual estamos agora a entrar, os cientistas tentarão determinar como a forma geométrica da molécula de proteína determina a sua função. A IA e os computadores quânticos poderão identificar como certas estruturas atômicas numa proteína dobrada lhe permitem executar certas funções no corpo. Por fim, teremos uma descrição completa das funções corporais e como estas são controladas pelas proteínas.

4.3 Fase Três: Criar Novas Proteínas e Medicamentos

O derradeiro passo é usar esse dicionário para criar versões novas e melhoradas, que nos permitirão desenvolver novos medicamentos e terapias. Para tal, teremos de abandonar as aproximações e determinar a mecânica quântica concreta das moléculas. E só os computadores quânticos podem fazê-lo.

A evolução criou uma abundância de proteínas, através de interações puramente aleatórias, para executarem diversas tarefas. Contudo, precisou de milhares de milhões de anos para o fazer. Usando a memória de um computador quântico como «laboratório virtual», deverá ser possível melhorar a evolução e criar novas proteínas para aperfeiçoar a sua função no corpo.

Este processo tem um vasto leque de aplicações, incluindo a descoberta de drogas completamente novas. Para começar, algumas pessoas estão a estudar como isto ajudaria a limpar o meio ambiente. O exemplo mais simples de momento é o trabalho dos cientistas que trabalham para encontrar formas de decompor os 150 milhões de toneladas de garrafas de refrigerante que se encontram nos oceanos, nas lixeiras e no nosso quintal. A chave seria usar esta base de dados de proteínas para examinar a estrutura 3D de certas proteínas, as enzimas capazes de dividir moléculas de plástico, tornando-as inofensivas. Este trabalho está já a ser feito no Centro de Inovação de Enzimas na Universidade de Portsmouth, em Inglaterra.

Pode também ter aplicações médicas imediatas, já que várias doenças incuráveis estão relacionadas com proteínas mal dobradas. Uma via promissora é compreender a natureza dos priões, que estão potencialmente relacionados com uma série de doenças incuráveis que podem afetar as pessoas mais velhas, como as doenças de Alzheimer, de Parkinson e a ELA. Assim, a pista para encontrar curas para essas doenças incuráveis pode vir dos computadores quânticos.

As fronteiras da medicina, as doenças incuráveis, podem bem vir a ser a próxima frente de batalha para os computadores quânticos.

5. Priões e Doenças Incuráveis

Tradicionalmente, qualquer manual diz que as doenças são disseminadas por bactérias e vírus.

No entanto, é provável que a história não se fique por aí. Há vários séculos que sabemos que os animais estão sujeitos a doenças estranhas, distintas das que afetam os humanos. As ovelhas com tremor epizoótico comportam-se de forma estranha, esfregam as costas em postes e recusam-se a comer. É uma doença incurável e sempre fatal. A doença das vacas loucas (encefalopatia espongiforme bovina) é uma doença semelhante, que afeta o gado, e na qual os animais têm dificuldade em andar, ficam nervosos e até se tornam violentos.

Nos seres humanos, há uma doença exótica chamada kuru, que se encontra entre certas tribos na Nova Guiné. Aí, algumas tribos têm um ritual fúnebre que envolve comer o cérebro do morto. Alguns desses indivíduos começaram a sofrer de demência, alterações de humor, dificuldades de locomoção e outros sintomas, devido a uma nova doença que se encontrava no cérebro dos seus familiares.

Stanley B. Prusiner da Universidade da Califórnia em São Francisco foi contra a corrente do pensamento médico convencional

ao concluir que tudo isto era evidência de um novo tipo de doença. Em 1982, anunciou ter purificado e isolado a proteína que causava essa doença. Em 1997, recebeu o Prémio Nobel da Fisiologia ou Medicina pela descoberta dos priões.

Um prião é uma proteína que se dobrou da forma errada. Não se propagam da forma como as doenças alastram habitualmente, mas sim ao estabelecer contato com outras proteínas. Quando um prião entra em contato com uma molécula de proteína normal, o prião, de alguma maneira, força a proteína normal a dobrar-se de modo incorreto. Assim, a doença priónica espalha-se rapidamente pelo corpo.

Atualmente, embora exista ainda algum desacordo, há cientistas que acreditam que muitas das doenças fatais que atingem os idosos podem ser também causadas por priões. Entre elas, a doença de Alzheimer, que já foi considerada «a doença do século». Sabe-se que seis milhões de americanos sofrem de Alzheimer, muitos dos quais acima dos sessenta e cinco anos de idade. Um em cada três cidadãos seniores morre de Alzheimer ou demência. Neste momento, é a sexta principal causa de morte nos Estados Unidos e o número de casos continua a subir progressivamente. Calcula-se que cerca de metade das pessoas que vivem até depois dos oitenta anos poderão a dada altura sucumbir a esta doença.

A doença de Alzheimer é particularmente trágica porque ataca o que temos de mais pessoal e valioso: as memórias e a noção de quem somos. Ataca primeiro o cérebro em áreas perto do centro, como o hipocampo, que guarda as memórias de curto prazo. Assim,

os primeiros sinais de Alzheimer são esquecer o que acabou de acontecer. Podemos recordar com uma nitidez extraordinária coisas que aconteceram há sessenta anos, mas esquecemo-nos de coisas que aconteceram há seis minutos. Porém, com a progressão, alastra ao resto do cérebro, e até as memórias mais antigas se perdem nas areias do tempo. É sempre fatal.

A minha mãe morreu de Alzheimer. Foi devastador ver as suas memórias desaparecerem lentamente, até já não saber quem eu era.

Mais tarde, não sabia sequer quem ela própria era. Sabe-se que a doença de Alzheimer tem uma componente genética. As pessoas que têm uma mutação no gene APOE4 são mais suscetíveis à doença. Numa série da BBC-TV que apresentei, a câmara focou-se no meu rosto enquanto me perguntavam se estava disposto a fazer o teste ao APOE4 para saber se possuía uma tendência genética para a doença. O que diria eu se descobrisse que estava de facto condenado a sofrer de Alzheimer? Pensei nisso e por fim disse que queria ainda assim fazer o teste, porque é sempre melhor estar preparado para o futuro, o que quer que este nos reserve. (Felizmente, o meu teste foi negativo.)

Infelizmente, a causa exata da doença de Alzheimer é ainda desconhecida. A única forma de confirmar se alguém sofria de Alzheimer é através de uma autópsia. Os médicos descobrem frequentemente que os cérebros das pessoas com Alzheimer têm dois tipos de proteína «pegajosa», chamadas proteína beta-amiloide e proteína tau. Porém, há décadas que os médicos

debatem se estas proteínas pegajosas são a causa da doença de Alzheimer ou talvez apenas um produto derivado da doença, sem qualquer importância. O problema é que as autópsias mostraram que algumas pessoas têm grandes depósitos amiloides no cérebro apesar de não exibirem qualquer sintoma da doença. Assim, não existe uma relação causa-efeito direta entre a doença de Alzheimer e as placas amiloides, em muitos casos.

Uma pista para este mistério foi revelada recentemente. Alguns cientistas na Alemanha descobriram uma correlação direta entre pessoas com proteínas disformes e pessoas com doença de Alzheimer. Em 2019, fizeram a extraordinária revelação de que as pessoas com uma proteína amiloide mal dobrada no sangue, mesmo que ainda livres de sintomas, tinham uma probabilidade 23 vezes maior de vir a sofrer de Alzheimer. Era possível confirmar essa ligação até catorze anos antes de haver um diagnóstico clínico.

Isto significa que, talvez anos antes do desenvolvimento dos sintomas da doença de Alzheimer, uma simples análise ao sangue poderá dar-nos as probabilidades de virmos a sofrer da doença, ao rastrear a presença dessa proteína amiloide disforme.

Stanley Prusiner, numa investigação recente que dirigiu, disse: «Acredito que isto mostra, sem qualquer sombra de dúvida, que as proteínas beta-amiloide e tau são ambas priões, e que a doença de Alzheimer é um distúrbio de duplo prião na qual estas proteínas imprevisíveis, juntas, destroem o cérebro... Precisamos de uma mudança estrutural na investigação sobre a doença de Alzheimer.»⁵

Um dos autores do relatório, Klaus Gerwert, sublinhou que este avanço poderá levar a novos tratamentos para a doença de Alzheimer, para a qual não existe de momento tratamento algum: «A medida de beta-amiloide disforme no sangue pode, assim, dar um importante contributo para a descoberta de um medicamento contra a doença de Alzheimer.»⁶

Hermann Brenner, da Alemanha, outro dos autores, acrescentou ainda: «Todos depositamos agora as nossas esperanças na utilização de novas abordagens de tratamento durante a fase inicial da doença, ainda antes dos sintomas, de modo a dar passos preventivos.»⁷

6. Versões «Boa» e «Má» da Proteína Amiloide

Outra descoberta feita em 2021 pode dizer-nos precisamente como decorre esse processo. Na Universidade da Califórnia, os cientistas descobriram que é possível distinguir versões boas e más da proteína amiloide com um mero olhar à sua estrutura. Descobriram que as moléculas de proteína, por serem feitas de uma longa cadeia de aminoácidos enovelada, têm muitas vezes aglomerados de átomos que formam espirais numa direção ou noutra, ou no sentido dos ponteiros do relógio ou no sentido inverso.

Na proteína amiloide normal, o formato é «esquerdino», ou seja, as espirais e reviravoltas da molécula seguem uma orientação. Contudo, a outra proteína amiloide associada à doença de

Alzheimer é dextra. Se esta teoria se comprovar, que um certo tipo de proteína disforme é responsável pela doença de Alzheimer, pode representar um caminho completamente novo para a investigação.

Primeiro, temos de criar imagens pormenorizadas em 3D desses dois tipos de proteína amiloide. Usando computadores quânticos, será possível ver, ao nível atómico, precisamente como é que a molécula de Alzheimer disforme consegue propagar-se, ao colidir com moléculas saudáveis, e por que causa tantos danos no cérebro.

Depois, estudando a estrutura da proteína, poderemos determinar como afeta os neurónios do nosso sistema nervoso. Quando esse mecanismo for conhecido, abrem-se várias possibilidades. Uma delas é isolar os defeitos nessa proteína e usar terapia genética para criar uma versão correta do gene. Ou talvez, um dia, seja possível criar drogas capazes de bloquear o crescimento da proteína dextra, ou até ajudar a eliminá-la mais rapidamente do sistema.

Por exemplo, sabemos que essas moléculas disformes só existem no cérebro durante cerca de 48 horas antes de serem naturalmente expelidas. Quando compreendermos a estrutura molecular da proteína dextra, podemos criar outra molécula que agarre nessa molécula anormal e a desfaça, neutralizando-a de modo que já não seja perigosa, ou se una a ela para que seja expelida mais depressa do sistema. Os computadores quânticos podem ser úteis na descoberta dos pontos fracos da molécula.

Em suma, os computadores quânticos poderão identificar muitas abordagens, ao nível molecular, com potencial de neutralizar ou eliminar o prião mau, algo que não conseguimos ainda fazer com a abordagem de experimentação e erro e os computadores digitais.

7. ELA

Outro alvo para os computadores quânticos é a esclerose lateral amiotrófica (ELA), também conhecida como doença de Lou Gehrig, uma doença fatal que reduz o corpo a uma massa paralisada de tecidos e afeta pelo menos 16.000 pessoas só nos Estados Unidos. A mente permanece intacta, mas o corpo vai definhando. Esta doença ataca o sistema nervoso, desligando o cérebro dos músculos, em certo sentido, e acaba por causar a morte.

A vítima mais famosa desta doença foi o cosmólogo Stephen Hawking. O seu caso foi invulgar, uma vez que viveu até aos setenta e seis anos de idade, enquanto a maioria dos pacientes morre rapidamente. As vítimas desta temida doença vivem, regra geral, apenas dois a cinco anos após o diagnóstico.

Hawking convidou-me uma vez para dar uma palestra na Universidade de Cambridge sobre a teoria das cordas. Fiquei estupefacto quando o visitei em sua casa. Estava repleta de engenhocas que lhe permitiam funcionar apesar da doença debilitante. Tinha um aparelho mecânico no qual se colocava uma publicação sobre física, carregava-se num botão e o aparelho virava a página automaticamente.

Durante o tempo que tive o gosto de passar com ele, fiquei profundamente impressionado com a sua força de vontade e o seu desejo de ser produtivo e de participar na comunidade da física. Apesar de estar quase completamente paralisado, continuava determinado a prosseguir com a sua investigação e a interagir com o público. Essa determinação, perante os obstáculos monumentais que enfrentava, era um testamento da sua coragem e motivação.

A nível profissional, o seu trabalho estava relacionado com a aplicação da teoria quântica à teoria da gravidade de Einstein. A esperança é de que, um dia, a teoria quântica retribua o favor e encontre uma forma de os computadores quânticos poderem curar esta doença horrível. De momento, sabe-se pouco sobre ela porque é relativamente rara. Porém, o estudo do historial familiar dos pacientes mostra que há uma série de genes envolvidos.

Até ao momento, descobrimos cerca de 20 genes associados com a ELA, mas quatro deles estão presentes na maioria dos casos: C9orf72, SOD1, FUS e TARDBP. Quando estes genes se avariaram, estão associados à morte dos neurónios motores no tronco cerebral e medula.

O gene SOD1 é particularmente interessante.

Crê-se que os erros no dobramento das proteínas causados pelo SOD1 estão implicados na ELA. O gene SOD1 produz uma enzima chamada superóxido dismutase, que decompõe moléculas de oxigénio com carga, chamadas radicais superóxido, e que são

potencialmente perigosas. Porém, quando o SOD1 falha de alguma forma na eliminação desses radicais superóxido, as células nervosas podem ficar danificadas. Assim, os erros de dobragem da proteína criados pelo SOD1 podem ser um dos mecanismos que causa a morte dos neurónios.

Conhecer o caminho molecular seguido por estes genes defeituosos talvez seja a chave para curar a doença, e os computadores quânticos podem vir a desempenhar um papel crucial. Usando os genes como modelo, é possível recriar uma versão 3D da proteína defeituosa produzida por esse gene. Então, ao estudar a estrutura da proteína, determinar-se-á como esta afeta os neurónios no nosso sistema nervoso. Se conseguirmos determinar como a proteína defeituosa funciona, ao nível molecular, talvez seja possível encontrar uma cura.

8. Doença de Parkinson

Outra doença debilitante que envolve mutações em proteínas no cérebro é a doença de Parkinson, que afeta cerca de um milhão de pessoas só nos Estados Unidos. O representante mais famoso desta doença é Michael J. Fox, que usou o seu estatuto de celebridade para angariar mil milhões de dólares para a combater. Normalmente, a doença causa tremores incontroláveis nos membros, mas inclui também outros sintomas, como dificuldades de locomoção, perda do olfato e perturbações do sono.

Foram feitos alguns progressos quanto a esta doença. Os cientistas descobriram, por exemplo, que com exames imagiológicos do cérebro é possível identificar a localização exata onde os neurónios disparam de forma excessiva, causando por exemplo tremores nas mãos. Esta forma da doença de Parkinson pode então ser parcialmente tratada, mediante a introdução de uma agulha no cérebro onde se encontra a hiperatividade. Assim, ao neutralizar os neurónios que disparam de modo errático, é possível travar parte dos tremores.

Infelizmente, ainda não existe cura. Foram, todavia, isolados alguns dos genes associados à doença de Parkinson. É possível sintetizar as proteínas associadas a estes genes, cuja estrutura 3D poderá vir a ser decifrada por computadores quânticos. Dessa forma, talvez seja possível descobrir como as mutações nesse gene causam a doença de Parkinson, e clonar então a versão correta da proteína alterada e injetá-la de novo no corpo.

Assim, os computadores quânticos abrirão toda uma nova forma de abordagem a estas doenças incuráveis que afetam os mais velhos. Talvez possam atacar até um dos maiores problemas médicos de sempre: o envelhecimento. Se conseguirmos curar o processo de envelhecimento, curaremos simultaneamente uma série de doenças a ele associadas.

Se os computadores quânticos conseguirem um dia descobrir curas para os idosos, significará isso que não teremos de morrer nunca?

-
- 1 Gil Press, «Artificial Intelligence (AI) Defined», *Forbes*, 27 de agosto de 2017; <https://www.forbes.com/sites/gilpress/2017/08/27/artificial-intelligence-ai-defined/>.
 - 2 Stephen Gossett, «10 Quantum Computing Applications and Examples», *Built In*, 25 de março de 2020; <https://builtin.com/hardware/quantum-computing-applications>.
 - 3 «AlphaFold: A Solution to a 50-Year-Old Grand Challenge in Biology», DeepMind, 30 de novembro de 2020; <http://www.deepmind.com/blog/alphafold-a-solution-to-a-50-year-old-grand-challenge-in-biology>.
 - 4 Cade Metz, «London A.I. Lab Claims Breakthrough That Could Accelerate Drug Discovery», *The New York Times*, 30 de novembro de 2020; <https://www.nytimes.com/2020/11/30/technology/deepmind-ai-protein-folding.html>.
 - 5 Ron Leuty, «Controversial Alzheimer's Disease Theory Could Pinpoint New Drug Targets», *San Francisco Business Times*, 6 de maio de 2019; <http://www.bizjournals.com/sanfrancisco/news/2019/05/01/alzheimers-disease-prions-amyloid-ucsf-prusiner.html>.
 - 6 German Cancer Research Center, «Protein Misfolding as a Risk Marker for Alzheimer's Disease», *ScienceDaily*, 15 de outubro de 2019; www.sciencedaily.com/releases/2019/10/191015140243.htm.
 - 7 «Protein Misfolding as a Risk Marker for Alzheimer's Disease — Up to 14 Years Before the Diagnosis», Bionity.com, 17 de outubro de 2019; www.bionity.com/en/news/1163273/protein-misfolding-as-a-risk-marker-for-alzheimers-disease-up-to-14-years-before-the-diagnosis.html.

CAPÍTULO 13

Imortalidade

A mais antiga demanda de todas, que remonta até aos primórdios da pré-história, é a busca pela imortalidade. Por mais poderoso que seja um rei ou imperador, nenhum conseguiu eliminar as rugas que via no seu reflexo, sinal a antecipar a morte inevitável.

Uma das lendas mais antigas de que temos conhecimento, anterior até a partes da Bíblia, chama-se Épico de Gilgamesh (o antigo guerreiro da Mesopotâmia) e consiste numa crónica das suas proezas heroicas enquanto percorria o mundo antigo. Teve muitas aventuras corajosas e atravessou planícies e desertos, tendo até encontrado um sábio que testemunhara o Grande Dilúvio. Gilgamesh embarcou na sua viagem porque decidiu dedicar-se a uma missão grandiosa: encontrar o segredo da vida eterna. Por fim, encontrou a planta que era a fonte da imortalidade. Todavia, mesmo antes que pudesse comê-la, uma cobra arrebatou-lha subitamente das mãos e devorou-a. Os humanos não estavam destinados a ser imortais.

Na Bíblia, Deus baniu Adão e Eva do Jardim do Éden porque desobedeceram às Suas ordens e comeram a maçã proibida. Mas o que haveria de tão perigoso numa inocente maçã? Essa maçã era o fruto proibido do conhecimento.

Além disso, Deus temia que, ao comerem a maçã da árvore da vida, Adão e Eva se tornassem «como um de nós... e vivam para sempre» — ou seja, tornar-se-iam imortais.

O imperador Qin Shi Huang, o homem que acabaria por unir toda a China por volta de 200 a.C., era obcecado com a ideia de imortalidade. Reza uma lenda famosa que ele mandou a sua formidável frota naval em busca da lendária Fonte da Juventude. Deu-lhes apenas uma ordem: se não encontrarem a Fonte, escusam de voltar. Aparentemente, nunca encontraram a Fonte, mas, proibidos de voltar à China, acabaram por descobrir a Coreia e o Japão.

Segundo a mitologia grega, Aurora, a deusa da alvorada, apaixonou-se um dia por um mortal, Titono. Uma vez que os mortais acabavam por morrer um dia, Aurora implorou ao deus Zeus que concedesse a imortalidade ao seu amante. Zeus concedeu-lhe esse desejo. Porém, Aurora cometeu um erro fatal. Esqueceu-se de pedir também juventude eterna. Infelizmente, a cada ano que passava, Titono ficava mais velho e cada vez mais decrepito, sem nunca poder morrer. Assim, se pedirmos a imortalidade aos deuses, não podemos esquecer-nos nunca de lhes pedir também que nos mantenham jovens para sempre.

Hoje, armados com os avanços da medicina moderna, talvez tenha chegado a altura de revisitar este desejo ancestral, mas de uma nova perspetiva. Ao analisar as montanhas de dados genéticos sobre envelhecimento, e identificando a base molecular da própria vida, talvez seja possível usar os computadores quânticos para

resolver o problema do envelhecimento. Na verdade, os computadores quânticos poderão criar dois tipos de imortalidade, a imortalidade biológica e a imortalidade digital. Assim, talvez a Fonte da Juventude não seja uma fonte propriamente dita mas um programa de computador quântico.

1. Segunda Lei da Termodinâmica

Armados da física moderna, podemos olhar para esta antiga demanda de uma perspectiva atualizada. A física do envelhecimento pode ser explicada com recurso às leis da termodinâmica, ou seja, as leis do calor. Há três leis da termodinâmica. A Primeira Lei diz apenas que a quantidade total de matéria e energia é uma constante. Não podemos obter algo a partir de nada. A Segunda Lei diz que, num sistema fechado, o caos e a decomposição aumentam sempre. A Terceira Lei diz que é impossível alcançar uma temperatura de zero absoluto.

É Segunda Lei que domina as nossas vidas. Trata-se de uma lei da física que determina que tudo acabará, mais cedo ou mais tarde, por enferrujar, desintegrar-se e morrer. Isto significa que a entropia, que é uma medida do caos, aumenta sempre. Parece que esta lei de ferro proíbe a imortalidade porque, no fim, tudo se desfaz. A física parece incluir uma sentença de morte para toda a vida na Terra.

Porém, há uma lacuna na Segunda Lei. O facto de tudo ter de se desfazer só se aplica a um sistema fechado. Porém, num sistema

aberto, onde a energia possa penetrar vinda do mundo exterior, o aumento do caos pode inverter-se.

Por exemplo, de cada vez que nasce uma nova forma de vida, como um bebê, a entropia diminui. Uma nova forma de vida representa uma vasta quantidade de dados montados de forma precisa, até ao nível molecular. A vida, portanto, parece contradizer a Segunda Lei. Mas há energia a fluir, vinda do exterior, sob a forma de luz solar. Assim, a energia do Sol é responsável pela criação da vasta diversidade de vida na Terra e pela inversão da entropia local.

Desta forma, a imortalidade não viola as leis da física. Não há nada na Segunda Lei que proíba uma forma de vida de viver para sempre, desde que continue a haver energia vinda do exterior. No nosso caso, essa energia é a luz solar.

2. O Que É o Envelhecimento?

Então o que é o envelhecimento?

De acordo com a Segunda Lei, o envelhecimento é causado, essencialmente, pela acumulação de erros ao nível molecular, genético e celular. Mais cedo ou mais tarde, a Segunda Lei apanha-nos. Acumulam-se erros nas nossas células e ADN. As células da pele perdem a elasticidade e formam-se rugas. Os órgãos deixam de funcionar devidamente e entram em falência. Os neurónios falham e esquecemo-nos das coisas. Por vezes, desenvolvem-se cancros. Em suma, envelhecemos e acabamos por morrer.

Vemo-lo acontecer no reino animal, o que nos fornece indicações quanto ao envelhecimento. As borboletas vivem apenas alguns dias. Os ratos podem viver uns dois anos. Mas os elefantes vivem sessenta ou setenta anos. E o tubarão-da-gronelândia pode chegar aos quinhentos anos.

Qual é o denominador comum? Os animais mais pequenos perdem calor rapidamente, em comparação com os animais grandes. Assim, a taxa metabólica de um rato na sua correria para escapar a um predador é bastante elevada, em comparação com um elefante pachorrento a comer com toda a calma a sua refeição. No entanto, uma taxa metabólica mais elevada significa também uma taxa de oxidação mais elevada, o que acumula erros nos nossos órgãos.

O nosso carro é um bom exemplo disto. Onde é que ocorre o envelhecimento num carro? Essencialmente, no motor, onde temos oxidação devido à combustão de combustível, e também o desgaste das engrenagens em movimento. Mas onde é o motor da célula?

A maior parte da energia da célula tem origem na mitocôndria. Suspeitamos, portanto, que é na mitocôndria que se acumula grande parte dos danos do envelhecimento. É provável que seja possível inverter o envelhecimento se nos esquivarmos à Segunda Lei, adicionando energia vinda do exterior, sob a forma de um estilo de vida melhor e mais saudável, e também de engenharia genética para reparar os genes danificados.

Agora, imagine um carro abastecido com combustível de elevadas octanas. O carro funciona na perfeição. Até um carro mais antigo pode trabalhar melhor com gasolina de maior carga. Isto, por sua vez, é semelhante ao que as hormonas como o estrogénio e a testosterona fazem ao corpo humano. Em certo sentido, são como o elixir da vida, dando-nos energia e vitalidade para além dos nossos anos. Há quem acredite que o estrogénio é uma das razões pelas quais as mulheres vivem, em média, mais tempo do que os homens. No entanto, há um preço a pagar por essa quilometragem extra. E esse preço é o cancro. O desgaste extra significa também que se acumulam mais erros, entre eles os genes do cancro. Assim, em certo sentido, o cancro representa a Segunda Lei da Termodinâmica a acabar por nos apanhar.

Esses erros no nosso ADN acontecem constantemente. Lesões no ADN ao nível molecular, por exemplo, acontecem 25 a 115 vezes por minuto no nosso corpo, ou cerca de 36.000 a 160.000 vezes por célula, por dia. Temos também um mecanismo de reparação de ADN no corpo, mas o envelhecimento acelera quando esses mecanismos de reparação são sobrecarregados com a grande quantidade de erros no ADN. O envelhecimento tem lugar quando o acumular de erros excede a nossa capacidade de os reparar.

3. Prever Quanto Tempo Podemos Viver

Se o envelhecimento está relacionado com erros no ADN e nas células, talvez seja então possível alcançar um princípio numérico aproximado que preveja quanto tempo podemos viver.

O Instituto Wellcome Sanger em Cambridge, Inglaterra, levou a cabo um estudo intrigante. Se o envelhecimento está relacionado com danos genéticos, é possível prever que, quanto mais danos um animal tem, mais curta será a sua esperança de vida. E, de facto, esses cientistas de Cambridge encontraram uma relação inversa após analisarem 16 espécies de animais: quanto mais danos genéticos, mais curta a esperança de vida.

Encontraram correlações notáveis entre animais muito diferentes. O minúsculo rato-toupeira-nu sofre 93 mutações por ano e pode viver entre vinte e cinco e trinta anos. Por sua vez, a gigantesca girafa pode sofrer 99 mutações por ano ao longo de uma esperança de vida média de vinte e quatro anos. Se multiplicarmos estes dois números, o resultado é cerca de 2325 mutações totais para o rato-toupeira e 2376 para a girafa, valores extraordinariamente aproximados. Embora estes dois mamíferos sejam diferentes de formas significativas, acumulam aproximadamente o mesmo número de mutações ao longo da vida.

Isto dá-nos uma fórmula que pode prever, de forma aproximada, a esperança de vida dos seres humanos, através da análise dos dados de muitos animais. Quando analisaram os ratos, descobriram que tinham 793 mutações por ano, ao longo de uma esperança de vida média de 3,7 anos, num total de 2934,1 mutações totais.

Os números para os seres humanos são um pouco mais complicados, uma vez que variam entre culturas e localizações. Os humanos, segundo se crê, têm 47 mutações por ano. A maioria dos mamíferos, em média, sofre 3200 mutações ao longo da vida. Isso

significaria que, num primeiro palpite, os humanos teriam uma esperança de vida de cerca de setenta anos. (Com um conjunto de princípios-base diferente, é possível obter também um resultado a rondar os oitenta anos.)

Os resultados deste cálculo simples são extraordinários. Indicam a importância dos erros genéticos no ADN e células, apresentando-os como um dos principais fatores por trás do envelhecimento e, por fim, da morte.

Até agora, todos estes resultados foram obtidos em animais na natureza, no seu estado natural. Mas o que acontece quando sujeitamos os animais a diversas condições externas? Será possível alterar artificialmente a sua esperança de vida?

A resposta parece ser sim.

4. Reiniciar o Relógio Biológico

Com intervenção médica (por exemplo, engenharia genética, mudanças de estilo de vida) talvez seja possível alargar a esperança de vida humana ao corrigir os danos causados pela Segunda Lei.

Há várias possibilidades. Uma delas é reiniciar o «relógio biológico». Quando uma célula se reproduz, os cromossomas ficam ligeiramente mais curtos. Nas células da pele, após cerca de 60 reproduções, as células começam a envelhecer, o que se chama senescência, e acabam por morrer. Este número é conhecido como

o limite de Hayflick. É uma das razões pelas quais as células morrem, porque têm um relógio embutido que lhes diz quando o fazer.

Entrevistei uma vez Leonard Hayflick sobre o seu famoso limite. Ele mostrou-se contudo cauteloso, por considerar que algumas pessoas podiam tirar várias conclusões precipitadas sobre este relógio biológico. Estamos apenas a começar a compreender o processo de envelhecimento, disse-me ele. Lamentou o facto de o campo da biogerontologia, a ciência do envelhecimento, ter de lidar com tanta informação errada a circular entre o público, principalmente as modas alimentares.

O limite de Hayflick ocorre porque há uma espécie de proteção na extremidade do cromossoma, chamada telómero, que fica mais curta a cada reprodução. Porém, tal como acontece com as pontas dos nossos atacadores depois de demasiadas manipulações, a proteção desgasta-se e os atacadores começam a esgaçar. Após cerca de 60 reproduções, os telómeros gastam-se, o cromossoma esgaça e a célula entra em senescência e morte.

No entanto, também é possível «parar o relógio». Há uma enzima, chamada telomerase, capaz de impedir o encurtamento progressivo dos telómeros. À primeira vista, pensar-se-ia que esta pode ser a cura para o envelhecimento. Na verdade, os cientistas conseguiram aplicar a telomerase em células da pele humana, de modo que estas se dividam centenas de vezes e não apenas 60. Essa pesquisa permitiu-nos «imortalizar» pelo menos uma forma de vida.

Há, contudo, perigos envolvidos. Parece que as células cancerígenas também usam a telomerase para obter a imortalidade. Na verdade, foi detetada a presença de telomerase em 90 por cento de todos os tumores humanos. É preciso ter cuidado ao manipular os telómeros no corpo, para não convertermos acidentalmente células saudáveis em células cancerosas.

Assim, se alguma vez encontrarmos a Fonte da Juventude, a telomerase pode fazer parte da solução, mas apenas se conseguirmos curar os seus efeitos secundários. Os computadores quânticos podem conseguir resolver o mistério de como a telomerase faz com que uma célula se torne imortal, mas não cancerosa. Assim que este mecanismo molecular for descoberto, talvez seja possível modificar a célula de modo que tenha uma esperança de vida mais alargada.

5. Restrição Calórica

Apesar de todas as curas e terapias de charlatões que, ao longo dos séculos, alegaram ser capazes de nos prolongar a vida, um só método resistiu ao teste do tempo e parece resultar em todos os casos. A única forma comprovada de prolongar a esperança de vida de um animal é a restrição calórica. Por outras palavras, se ingerirmos 30 por cento menos calorias, podemos viver aproximadamente 30 por cento mais tempo, conforme o animal estudado. Esta regra geral foi posta à prova numa vasta série de espécies, desde insetos, ratos, cães e gatos, até aos macacos. Os animais que ingeriram menos calorias viveram mais tempo do que

os seus homólogos que se empanturraram. Têm menos doenças e sofrem menos frequentemente dos problemas da velhice, como cancro e endurecimento das artérias.

Embora isto tenha sido testado no reino animal, há um animal, contudo, que não foi até agora sujeito a uma análise sistemática neste sentido: o *Homo sapiens*. (Provavelmente porque vivemos muito tempo e nos queixaríamos se tivéssemos de nos sujeitar a uma dieta espartana, tão restrita que deixaria até um eremita esfomeado.) Ninguém sabe precisamente como isto funciona, mas uma teoria propõe que comer menos reduz a taxa de oxidação, abrandando assim o processo de envelhecimento.

Um resultado experimental que parece confirmar esta teoria encontra-se em vermes como o *C. elegans*. Quando estes vermes são geneticamente alterados de modo a reduzir a taxa de oxidação, a sua esperança de vida média é multiplicada muitas vezes. Na verdade, os cientistas deram a alguns destes genes nomes como Age-1 e Age-2.* Ao que parece, reduzir a taxa de oxidação ajuda as células a reparar os danos. Assim, parece fazer sentido que a restrição calórica funcione por diminuir a taxa de oxidação do corpo, o que reduz a acumulação de erros.

No entanto, isto deixa uma questão em aberto: por que é que alguns animais exibem comportamentos de restrição calórica, afinal? Comerão conscientemente menos para viver mais? (Uma teoria diz que os animais, no seu estado natural, têm duas opções.

* Age significa idade.

Por um lado, podem reproduzir-se e ter crias. Isto, porém, requer um abastecimento constante e abundante de comida, o que é raro. O mais comum é a maioria dos animais estar sempre num estado a raia a fome, constantemente à caça e à procura de comida. Assim, em tempos de maior escassez, que são mais a regra do que a exceção, os animais evoluíram de modo a comer menos, instintivamente, para conservar energia e viver mais tempo, até chegar a altura em que a comida é de novo abundante e poderão reproduzir-se.)

Os cientistas que estudaram a restrição calórica acreditam que pode funcionar através do produto químico resveratrol, que por sua vez é produzido pelo gene sirtuína. O resveratrol encontra-se no vinho tinto. (Isto criou uma minimoda em torno do resveratrol e do vinho tinto, mas ainda não é certo que o resveratrol possa de facto prolongar a vida humana.)

Porém, em 2022, estudos feitos na Universidade de Yale terão finalmente solucionado parte do enigma relativamente ao porquê de a restrição calórica realmente funcionar. Eles concentraram-se na glândula timo, localizada entre os pulmões, que fabrica células T, um ator importante entre os nossos glóbulos brancos, que ajuda a defender contra a doença. Repararam que essas células T provenientes do timo envelhecem mais depressa do que as células T normais. Por exemplo, quando chegamos aos quarenta anos de idade, 70 por cento do timo é apenas gordura não funcional. Vishwa Dep Dixit, um dos principais autores deste artigo, diz: «À medida que envelhecemos, começamos a sentir a ausência de novas células T porque aquelas que nos restam já não são grande coisa no

combate a novos agentes patogénicos. É um dos motivos pelos quais as pessoas idosas correm maior risco de adoecer.» Se for verdade, isto pode explicar por que motivo os idosos têm maior tendência para envelhecer e morrer.¹

Tendo em conta este resultado, efetuaram outra experiência que envolveu colocar um grupo de pessoas numa dieta de restrição calórica durante dois anos. Foi uma surpresa descobrir que, ao fim dos dois anos, este grupo tinha menos gordura e mais células funcionais na glândula tímica. Trata-se de um resultado extraordinário.

Dixit acrescenta: «O facto de este órgão poder ser rejuvenescido é, na minha opinião, assombroso, porque existem muito poucas evidências de que tal possa acontecer nos seres humanos. O facto de tal ser sequer possível é muito empolgante.»

O grupo de Yale começou a compreender que estavam à beira de algo importante. Em seguida, tinham de investigar a causa base: como é que, ao nível molecular, a restrição calórica fortalece o sistema imunitário?

Conseguiram por fim identificar uma proteína chamada PLA2G7, que está envolvida no processo de inflamação, outro fenómeno associado à idade. «Estas descobertas demonstram que a PLA2G7 é um dos motores dos efeitos da restrição calórica. Identificar estes motores ajuda-nos a compreender como o sistema metabólico e o sistema imunitário falam um com o outro, o que pode indicar-nos

potenciais alvos capazes de melhorar a função imunitária, reduzir a inflamação e, potencialmente, até prolongar uma vida saudável, diz Dixit.

O passo seguinte seria usar computadores quânticos para descobrir como, ao nível molecular, esta proteína reduz a inflamação e retarda o processo de envelhecimento. Quando compreendermos este processo, talvez seja possível manipular a PLA2G7 e colher os benefícios da restrição calórica sem termos de nos sujeitar a uma dieta rigorosa.

Dixit conclui afirmando que o seu estudo sobre as proteínas e genes relevantes pode alterar o rumo da investigação sobre o processo de envelhecimento. «Penso que nos dá esperança», diz.

6. A Chave para o Envelhecimento: Reparação do ADN

Todavia, isto levanta outra questão: como é que a restrição calórica repara os danos moleculares causados pela oxidação? A restrição calórica pode abrandar o processo de oxidação, possibilitando ao corpo reparar naturalmente os danos causados, mas como é que o corpo repara danos no ADN?

Esta questão está a ser estudada na Universidade de Rochester, onde os cientistas investigam se é possível compreender o mecanismo de reparação do ADN através da observação do reino animal. Mais especificamente, poderão os mecanismos de

reparação do ADN explicar por que motivo alguns animais vivem mais tempo? Existirá uma Fonte da Juventude genética?

Analisaram a esperança de vida de 18 espécies de roedores e encontraram algo interessante. Os ratos podem viver apenas dois a três anos, mas o castor e o rato-toupeira-nu vivem por vezes até à idade extraordinariamente avançada de vinte e cinco ou trinta anos. A teoria é que os roedores que vivem mais tempo têm um mecanismo de reparação de ADN mais forte do que os roedores de vida curta.

Para investigar esta possibilidade, concentraram-se no gene sirtuína-6, que está envolvido na reparação de ADN e ao qual se chama por vezes o «gene da longevidade». Descobriram que nem todas as proteínas da sirtuína-6 são iguais. Há cinco tipos diferentes de proteínas criadas pela sirtuína-6, e cada uma tem diferentes níveis de atividade. Observaram também que os castores têm proteínas de sirtuína-6 mais potentes do que as proteínas criadas pelos ratos, exceção feita ao rato-toupeira-nu. Pode ser essa, alegaram, a razão para a longa vida dos castores.

Para provar a sua teoria, injetaram as várias proteínas da sirtuína-6 em diferentes animais para ver se afetava a sua esperança de vida. As moscas da fruta com a proteína de sirtuína-6 de castor viviam mais tempo do que as moscas da fruta nas quais fora injetada a proteína de rato.

Encontraram um efeito semelhante nas células humanas. As células que receberam a proteína sirtuína-6 do castor sofriam menos danos no ADN do que as células com a proteína do rato. Vera Gorbunova, uma das investigadoras, diz: «Se as doenças ocorrem por causa de ADN que se torna desorganizado com a idade, podemos usar investigações como esta para definir intervenções capazes de adiar o cancro e outras doenças degenerativas.»²

Isto é importante, porque reparar os danos no ADN regulados por genes como a sirtuína-6 pode ser a chave para inverter o processo de envelhecimento. Poderemos então usar computadores quânticos para determinar precisamente de que forma é que a sirtuína-6 consegue melhorar os mecanismos de reparação de ADN ao nível molecular.

Quando este processo for desvendado, talvez seja possível encontrar maneiras de o acelerar, ou de encontrar novos caminhos moleculares capazes de estimular os mecanismos de reparação de ADN. Assim, se os danos de ADN são um dos motores do processo de envelhecimento, é crucial compreender como pode ser invertido, ao nível molecular, através da utilização de computadores quânticos.

7. Reprogramar as Células para a Juventude

O perigo, no entanto, é que existe muita charlatanice quando falamos de tentar viver mais tempo. Há sempre a «moda do mês»: a mais recente vitamina, planta ou «cura miraculosa». Contudo, há

uma organização séria que tem recebido muita publicidade no que diz respeito ao processo de envelhecimento.

O multimilionário russo Yuri Milner, que fez fortuna com o Facebook e o Mail.ru, reuniu um grupo de acadêmicos galardoados de topo para estudar a questão da inversão do envelhecimento. Ele é uma figura conhecida em Silicon Valley, dando três milhões de dólares por ano no seu Breakthrough Prize para físicos, biólogos e matemáticos excepcionais.

As atenções estão viradas para um novo grupo chamado Altos Labs, que pretende usar a ciência de «reprogramação» para, talvez, rejuvenescer células envelhecidas. Até Jeff Bezos se conta entre os investidores abastados que fazem fila para apoiar a Altos. Segundo um artigo publicado pela Altos, a companhia, apesar de muito recente, já angariou 270 milhões de dólares.

De acordo com a *Technology Review* do MIT, a ideia por trás deste projeto é reprogramar o ADN de células envelhecidas de modo que regressem a uma forma anterior. Isto foi testado, experimentalmente, pelo japonês galardoado com o Nobel, Shinya Yamanaka, que será presidente do conselho científico da Altos.

Yamanaka é uma autoridade mundial em células estaminais, que são as mães de todas as células. As células estaminais embrionárias têm a extraordinária capacidade de conseguirem transformar-se em qualquer célula do corpo humano. O que Yamanaka descobriu foi uma forma de reprogramar células adultas de modo a reverterem

ao seu estado embrionário, para que possam, em teoria, criar órgãos completamente novos do zero.

A pergunta-chave é: será possível reprogramar uma célula envelhecida de modo que seja de novo jovem? O que está por trás do interesse na Altos é que a resposta é, aparentemente, sim — sob certas circunstâncias, há quatro proteínas (chamadas agora de fatores de Yamanaka) que conseguem executar o processo de reprogramação.

Em certo sentido, a reprogramação de células envelhecidas é algo comum. Basta pensar em como a Mãe Natureza pode pegar nas células de um adulto e reprogramá-las para que se transformem nas células estaminais de um embrião. Portanto, a reprogramação não é ficção científica; é um facto da vida. Este processo de rejuvenescimento acontece em cada geração, quando o embrião é concebido.

Não é portanto de admirar que várias *start-ups*, sempre atentas à próxima grande revolução, tenham saltado para este comboio, incluindo a Life Biosciences, a Turn Biotechnologies, a AgeX Therapeutics e a Shift Bioscience. «Se vemos algo à distância que parece uma montanha de ouro, é melhor correremos depressa», diz Martin Borch Jensen, da Gordian Biotechnologies. Na verdade, ele está a financiar com 20 milhões de dólares para acelerar a investigação.³

David Sinclair, professor em Harvard, disse: «Há centenas de milhões de dólares a serem angariados para investir em reprogramação, com o intuito específico de rejuvenescer todo o corpo humano ou partes dele.» Sinclair conseguiu usar esta técnica de reprogramação de células para devolver a visão a ratos. Acrescenta: «No meu laboratório, estamos a estudar um a um os principais órgãos e tecidos, por exemplo a pele, os músculos e o cérebro, para ver quais conseguimos rejuvenescer.»⁴

Alejandro Ocampo da Universidade de Lausanne na Suíça diz: «Podemos pegar numa célula de uma pessoa de oitenta anos e, *in vitro*, reverter essa idade até aos quarenta anos. Não há nenhuma outra tecnologia capaz de o fazer.»⁵

Um grupo independente na Universidade de Wisconsin-Madison trabalhou com amostras de fluido sinovial (um líquido espesso que se encontra nas articulações do corpo) que contém certas células estaminais chamadas MSCs (células estromais mesenquimais). Já se sabia anteriormente que é possível reprogramar as células MSC para se tornarem mais novas. Mas a forma como este rejuvenescimento ocorre é desconhecida.

Conseguiram então preencher muitos dos passos em falta. As células MSC convertem-se em células estaminais pluripotentes induzidas (chamadas iPSCs), e reconvertem-se de novo em células MSC. Depois desta viagem de ida e volta, os cientistas descobriram que as células MSC reprocessadas foram rejuvenescidas. Mais importante ainda, conseguiram identificar o caminho químico específico que levava as células MSC nesta viagem. Havia uma série

de proteínas envolvidas neste processo, chamadas GATA6, SHH e FOXP.

Trata-se de avanços extraordinários que se julgavam em tempos serem impossíveis. Assim, os cientistas começam a compreender como as células envelhecidas podem tornar-se de novo jovens.

Porém, há motivos para sermos cautelosos. Já vimos anteriormente que os métodos para atrasar ou inverter o envelhecimento incluem efeitos secundários como o cancro. O estrogénio pode manter as mulheres férteis durante muitos anos, até à menopausa, mas o cancro é um dos efeitos secundários possíveis dessa hormona. Da mesma forma, a telomerase pode parar o relógio do envelhecimento celular, mas introduz também um risco acrescido de cancro.

Um dos perigos da reprogramação das células é, igualmente, o cancro. A investigação tem de prosseguir cuidadosamente, para não descarrilar por efeitos secundários perigosos. Os computadores quânticos podem revelar-se úteis neste esforço. Primeiro, ao conseguirem decifrar o processo de rejuvenescimento ao nível molecular e descobrir os segredos por trás das células estaminais embrionárias; segundo, para controlar alguns dos efeitos secundários deste processo, como o cancro.

8. A Loja do Corpo Humano

Outra experiência despertou o interesse no rejuvenescimento celular.

Na abordagem original de Yamanaka, as células da pele eram expostas aos quatro fatores de Yamanaka durante 50 dias para reverterem a um estado embrionário. Contudo, os cientistas no Instituto Babraham em Cambridge, Inglaterra, expuseram essas células durante meros 13 dias e depois deixaram-nas crescer normalmente.

As células de pele originais foram retiradas a uma mulher de cinquenta e três anos de idade. Os cientistas ficaram chocados ao descobrir que as células de pele rejuvenescidas aparentavam pertencer a uma pessoa de 23, e comportavam-se como tal.

«Lembro-me do dia em que recebi os resultados e não quis acreditar que algumas das células eram trinta anos mais jovens do que deviam ser... Foi um dia muito empolgante», disse Diljeet Gill, um dos cientistas que conduziram o estudo.⁶

Os resultados são sensacionais. Se este resultado se confirmar, representa, aparentemente, a única ocasião na história da medicina em que os cientistas conseguiram, com êxito, rejuvenescer células envelhecidas, de modo que estas se comportassem como se fossem décadas mais novas.

No entanto, os cientistas envolvidos no estudo tiveram o cuidado de mencionar possíveis efeitos secundários. Devido às enormes alterações genéticas envolvidas no rejuvenescimento, tal como acontece com tantos tratamentos promissores, o cancro continua a ser uma consequência possível. Assim, toda esta abordagem tem de prosseguir com grande cautela.

No entanto, existe uma segunda forma de criar órgãos jovens, sem o perigo do cancro: a engenharia de tecidos, onde os cientistas literalmente constroem peças humanas do zero.

9. Engenharia de Tecidos

Se uma célula adulta regressar a um estado embrionário, rejuvenesce, de facto, mas apenas ao nível celular. Significa isso que não se pode rejuvenescer todo o corpo e viver para sempre. Quer apenas dizer que certas linhagens de células se tornam imortais, pelo que órgãos específicos podem ser regenerados, mas não o corpo inteiro.

Um dos motivos para que assim seja é que as células estaminais, se as deixarmos por sua conta, criam por vezes uma massa informe de tecido aleatório. As células estaminais necessitam frequentemente de indicações das células vizinhas para crescerem corretamente, em sequência, e criarem o órgão final.

A solução para este problema pode ser a engenharia de tecidos, que significa colocar células estaminais numa espécie de molde para que cresçam de modo organizado.

Esta abordagem está a ser liderada por Anthony Atala, da Universidade de Wake Forest na Carolina do Norte, e outros. Tive a honra de entrevistar Atala para a BBC-TV. Ao percorrer o seu laboratório, fiquei estupefacto por ver grandes frascos com órgãos humanos, como fígados, rins e corações. Quase me senti como se tivesse entrado num filme de ficção científica.

Perguntei-lhe como é feita a sua investigação. Ele disse-me que, primeiro, cria um molde especial, feito de fibras de plástico minúsculas, na forma do órgão que pretende cultivar. Depois introduz no molde células do órgão retiradas do paciente. Em seguida, aplica um *cocktail* de fatores de crescimento para estimular essas células. As células começam a crescer nas fibras do molde. Por fim, o molde, que é biodegradável, desaparece e deixa para trás uma cópia quase perfeita do órgão. O órgão artificial é então colocado no interior do corpo do paciente, onde começa a funcionar. Uma vez que as células são feitas a partir dos tecidos do próprio paciente, não existe mecanismo de rejeição, que é um dos principais problemas enfrentados no transplante de órgãos. Não há também risco de cancro, uma vez que não se manipula a genética delicada no interior da célula.

Ele disse-me que a maior parte dos órgãos que foram construídos com sucesso consistem em apenas alguns tipos de células. Isto inclui pele, osso, cartilagem, vasos sanguíneos, bexigas, válvulas

cardíacas e traqueias. O fígado é mais difícil, disse-me, porque consiste em vários tipos diferentes de células. E o rim, por consistir em centenas de pequenos tubos e filtros, ainda é um trabalho em curso.

A sua abordagem pode também ser combinada com células estaminais, para que um dia venha a ser possível regenerar órgãos inteiros do corpo à medida que se vão desgastando. Por exemplo, uma vez que as doenças cardiovasculares são a principal causa de morte nos Estados Unidos, talvez um dia seja possível cultivar um coração inteiro em laboratório. Seria como criar uma «loja do corpo humano».

Há outros grupos a fazer experiências com impressão 3D para criar órgãos humanos. Da mesma forma que uma impressora de computador pode disparar gotículas de tinta minúsculas para formar uma imagem, pode ser modificada para disparar células cardíacas humanas individuais, criando assim tecido cardíaco, célula a célula. Se o rejuvenescimento de células for bem-sucedido na criação de linhagens de células jovens, então a engenharia de tecidos poderá cultivar qualquer órgão do corpo com recurso a células estaminais.

E, assim, evitaremos o problema que Titono enfrentou.

10. O Papel dos Computadores Quânticos

Os computadores quânticos podem ter um impacto direto nestes empreendimentos. No futuro próximo, a maior parte da população humana terá o seu genoma sequenciado e incluído num banco de genes global gigante. Este imenso armazém de informação genética será avassalador para um computador digital convencional, mas analisar quantidades incríveis de dados é precisamente o tipo de tarefa em que os computadores quânticos se destacam. Isto pode permitir aos cientistas isolar os genes afetados pelo processo de envelhecimento.

Por exemplo, os cientistas já conseguem analisar os genes dos jovens e dos idosos e compará-los. Assim, foram identificados cerca de cem genes onde parece estar concentrado o envelhecimento. Muitos desses genes, ao que parece, estão envolvidos no processo de oxidação. De futuro, os computadores quânticos analisarão uma massa ainda maior de dados genéticos, o que nos ajudará a compreender onde se acumula a maior parte dos erros genéticos e celulares, mas também que genes podem efetivamente controlar aspetos do processo de envelhecimento.

Os computadores quânticos não só podem isolar os genes onde tem lugar a maior parte do envelhecimento, como podem também fazer o oposto: isolar os genes que se encontrem em pessoas excecionalmente velhas, mas saudáveis. Os demógrafos sabem que existem os «supervelhos», ou seja, indivíduos que parecem ter vencido as probabilidades, levando uma vida saudável e robusta muito mais longa do que seria de esperar. Assim, os computadores

quânticos, analisando esta massa de dados em bruto, talvez encontrem os genes que indicam um sistema imunitário excepcionalmente saudável que permite aos mais velhos alcançar uma idade avançada, evitando as doenças que os poderiam derrubar.

Claro que existem também indivíduos que envelhecem tão rapidamente que morrem de velhice em crianças. Doenças como a síndrome de Werner e a progéria são um pesadelo, com as crianças a envelhecerem praticamente perante os nossos olhos. Estas pessoas raramente vivem para além dos vinte ou trinta anos. Os estudos demonstram que, entre outros problemas, têm telómeros curtos, o que pode contribuir parcialmente para o envelhecimento acelerado. (Da mesma forma, estudos com judeus asquenazes encontraram o oposto, que os indivíduos de vida mais longa tinham uma versão hiperativa da telomerase, o que pode explicar a vida longa.)

Além do mais, testes em pessoas acima dos cem anos mostram que estas têm um nível significativamente mais elevado de proteína de reparação do ADN, chamada poli (ADP-ribose) polimerase (PARP), do que os indivíduos mais jovens entre os vinte e os setenta anos. Isto indica que os indivíduos que vivem mais tempo têm mecanismos de reparação de ADN mais fortes para inverter os danos genéticos e, em consequência, vivem mais tempo. Esses centenários têm também células que se assemelham a células retiradas de pessoas muito mais jovens, indicando que o envelhecimento abrandou. Isto, por sua vez, talvez explique o curioso facto de aqueles que chegam aos oitenta terem uma

probabilidade acima do normal de chegar aos noventa e mais além. Talvez porque as pessoas com sistemas imunitários fracos morrem antes de chegar aos oitenta, enquanto aquelas que sobrevivem até lá têm mecanismos de reparação de ADN mais fortes, capazes de lhes prolongar a vida até aos noventa ou mais.

Assim, os computadores quânticos podem conseguir isolar genes essenciais em várias categorias:

- Nos idosos que são excecionalmente saudáveis para a idade
- Em indivíduos com sistemas imunitários capazes de combater doenças comuns, prolongando assim a vida
- Em indivíduos que acumularam erros nos seus genes que aceleraram o envelhecimento
- Em indivíduos que se desviam de forma significativa da norma, como aqueles que envelheceram extraordinariamente depressa devido a doenças como síndrome de Werner e progéria

Quando os genes associados ao envelhecimento forem isolados, talvez a CRISPR consiga reparar muitos deles. O objetivo é reparar os genes onde tem lugar a maior parte do envelhecimento, usando computadores quânticos para isolar os mecanismos moleculares exatos desse processo.

De futuro, talvez venha a ser desenvolvido um *cocktail* de diferentes drogas e terapias que consiga abrandar e possivelmente até reverter o envelhecimento. O efeito combinado de diferentes intervenções médicas, a agir de forma concertada, pode ser capaz de fazer andar para trás os ponteiros do tempo.

A chave é que os computadores quânticos conseguirão atacar o processo de envelhecimento no lugar em que ocorre: ao nível molecular.

11. Imortalidade Digital

Além da imortalidade biológica, existe a possibilidade real de virmos a alcançar a imortalidade digital através dos computadores quânticos.

A maior parte dos nossos antepassados viveu e morreu sem deixar traços da sua existência. Talvez haja uma linha nos registos de alguma igreja ou templo a documentar onde nasceram e uma segunda linha a documentar onde morreram. Ou talvez exista uma lápide partida num cemitério deserto com o nome de um dos nossos antepassados.

E nada mais.

Uma vida inteira de memórias e experiências preciosas reduzida a duas linhas num livro e uma pedra gravada. As pessoas que usam o ADN para estudar a sua linhagem chegam frequentemente à

conclusão de que os rastros depressa desaparecem ao fim de um século ou por volta disso. Toda a sua história familiar é reduzida a pó depois de uma ou duas gerações.

Hoje, porém, deixamos uma pegada digital formidável. Só as nossas transações com cartões de crédito podem dar um vislumbre razoável da nossa história e personalidade, daquilo que gostamos e não gostamos. Cada compra, férias, eventos desportivos ou presentes são registados em algum computador. Sem sequer nos darmos conta disso, a nossa pegada digital cria um reflexo de quem somos. No futuro, esta abundância de informação pode dar-nos uma recriação digital da nossa personalidade.

Há já quem fale em ressuscitar figuras históricas e indivíduos conhecidos através de um processo de digitalização que os disponibilizará ao público. Hoje, podemos ir à biblioteca procurar uma biografia de Winston Churchill. No futuro, poderemos talvez falar com ele. Todas as suas cartas, memórias, biografias, entrevistas, etc. serão digitalizadas e disponibilizadas. Poderemos falar com uma imagem holográfica do ex-primeiro ministro e passar uma tarde agradável numa conversa reveladora com ele.

Pessoalmente, adoraria poder conversar com Einstein, fazer-lhe perguntas sobre os seus objetivos, aquilo que alcançou, e a sua filosofia da ciência. O que pensaria ele, se visse que as suas teorias deram origem a grandes disciplinas científicas como o *Big Bang*, os buracos negros, as ondas gravitacionais, a teoria de campo unificado, entre outras? O que pensaria de como a teoria quântica evoluiu com o tempo? Einstein deixou uma coleção

extraordinariamente vasta de cartas e correspondência pessoal que revelam o seu verdadeiro carácter e pensamentos.

É possível que, mais cedo ou mais tarde, qualquer pessoa normal possa alcançar também a imortalidade digital. Em 2021, William Shatner, estrela da série televisiva *Caminho das Estrelas*, alcançou uma forma de imortalidade digital. Perante uma câmara, durante quatro dias, respondeu a centenas de perguntas pessoais sobre a sua vida, os seus objetivos, a sua filosofia. Depois um programa de computador analisou todo esse material e organizou-o cronologicamente, por tema, por local, etc. No futuro, poderemos fazer perguntas pessoais diretamente a esse Shatner digitalizado e ele responderá de forma coerente e racional, como se estivesse a falar connosco na nossa sala.

No futuro, nem será preciso sentarmo-nos em frente de uma câmara de filmar para sermos digitalizados. Inconscientemente, sem sequer pensarmos nisso, usamos as câmaras dos nossos telemóveis para registar as nossas vidas e atividades quotidianas. Na verdade, muitos adolescentes criaram já uma enorme pegada digital ao documentarem as suas partidas, piadas e palhaçadas (algumas das quais viverão para todo o sempre na Internet).

Normalmente, pensamos na nossa vida como uma série de acidentes, coincidências e experiências aleatórias. Porém, com IA melhorada, conseguiremos um dia editar esta abundância de memórias e arrumá-las por uma determinada ordem. E os computadores quânticos ajudarão a organizar esse material,

utilizando motores de busca para encontrar partes em falta e editando a narrativa.

De certa forma, o nosso eu digital nunca morrerá.

Assim, talvez o nosso legado precioso de memórias pessoais, e aquilo que alcançamos, não tenha de se dissipar e dispersar com as areias do tempo depois da nossa morte. Talvez os computadores quânticos nos possam conceder uma forma de imortalidade.

Em suma, os cientistas começam agora a identificar alguns dos caminhos envolvidos no prolongamento da vida humana. Ainda é um mistério, contudo, como esses caminhos efetivamente funcionam ao nível molecular. Por exemplo, como é que certas proteínas aceleram a reparação molecular do ADN? Os computadores quânticos podem desempenhar um papel decisivo, porque apenas um sistema quântico será capaz de explicar completamente outro sistema quântico como as interações moleculares funcionam. Quando conhecermos os mecanismos exatos de coisas como a reparação de ADN, talvez possamos melhorá-los para adiar ou mesmo travar o processo de envelhecimento.

Os computadores quânticos podem também dar-nos a capacidade de viver para sempre digitalmente. Em combinação com a inteligência artificial, deverá ser-nos possível criar uma cópia digital de nós próprios que reflita de forma fiel quem somos. Já estão a ser dados passos para aperfeiçoar esse processo.

Porém, a próxima fronteira para os computadores quânticos não é apenas a aplicação da mecânica quântica ao espaço interior do nosso corpo, mas aplicar os computadores quânticos ao mundo exterior, resolvendo problemas prementes como o aquecimento global, aproveitar o poder do Sol e decifrar os mistérios do mundo à nossa volta.

O próximo objetivo é usar os computadores quânticos para compreender o Universo.

¹ Mallory Locklear, «Calorie Restriction Trial Reveals Key Factors in Enhancing Human Health», *Yale News*, 10 de fevereiro de 2022; <http://www.news.yale.edu/2022/02/10/calorie-restriction-trial-reveals-key-factors-enhancing-human-health>. (Não funciona)

² Kashmira Gander, «"Longevity Gene" That Helps Repair DNA and Extend Life Span Could One Day Prevent Age-Related Diseases in Humans», *Newsweek*, 23 de abril de 2019; <http://www.newsweek.com/longevity-gene-helps-repair-dna-and-extend-lifespan-could-one-day-prevent-age-1403257>.

³ Antonio Regalado, «Meet Altos Labs, Silicon Valley's Latest Wild Bet on Living Forever», *MIT Technology Review*, 4 de setembro de 2021; <http://www.technologyreview.com/2021/09/04/1034364/altos-labs-silicon-valleys-jeff-bezos-milner-bet-living-forever/>.

⁴ Ibid.

⁵ Antonio Regalado, «Meet Altos Labs, Silicon Valley's Latest Wild Bet on Living Forever», *MIT Technology Review*, 4 de setembro de 2021; <https://www.technologyreview.com/2021/09/04/1034364/altos-labs-silicon-valleys-jeff-bezos-milner-bet-living-forever/>.

⁶ Allana Akhtar, «Scientists Rejuvenated the Skin of a 53 Year Old Woman to That of a 23 Year Old's in a Groundbreaking Experiment», *Yahoo News*, 8 de abril de 2022; <http://www.yahoo.com/news/scientists-rejuvenated-skin-53-old-175044826.html>.

PARTE QUATRO

Modelar o Mundo e o Universo

CAPÍTULO 14

Aquecimento Global

Dei uma vez uma palestra na Universidade de Reiquiavique, a capital da Islândia.

Conforme o avião se aproximava do aeroporto, olhei para aquela paisagem vulcânica e árida, quase totalmente desprovida de vegetação. Pareceu-me estar a voltar atrás no tempo. A área nas imediações do aeroporto era tão desolada que se tornava o local perfeito para espreitar para o passado, milhões de anos antes.

Posteriormente, ofereceram-me uma visita guiada à universidade e achei interessantíssimo ver a investigação de núcleos de gelo, que possibilita fazer uma crónica das condições meteorológicas ao longo de milhares de anos.

O laboratório deles ficava numa grande sala que fazia lembrar uma arca frigorífica gigante e era igualmente fria. Reparei que havia algumas varas de metal compridas dispostas sobre uma mesa. As varas tinham pouco menos de quatro centímetros de diâmetro e vários metros de comprimento, e cada uma delas continha uma amostra de gelo retirada das profundezas. Algumas das varas estavam abertas e via-se que continham longos cilindros de gelo

branco. Arrepiei-me ao compreender que estava a ver gelo que caíra sobre o Ártico milhares de anos antes. Era uma cápsula do tempo que remontava a uma altura muito antes de haver registos históricos.

Ao observar cuidadosamente esses núcleos de gelo, consegui ver uma série de faixas horizontais finas e castanhas ao longo do gelo. Os cientistas disseram-me que cada uma dessas faixas fora criada pela fuligem e cinzas libertadas por antigas erupções vulcânicas.

Ao medir o espaço entre as várias faixas, era possível determinar a sua idade, comparando-as com as erupções vulcânicas conhecidas.

Disseram-me também que no interior dos núcleos de gelo existem bolhas de ar microscópicas que são como um instantâneo da atmosfera há milhares de anos. Ao determinar o seu conteúdo químico, é fácil determinar a quantidade de CO_2 que existia na altura.

(Calcular a temperatura de quando os núcleos de gelo se formaram é mais difícil, e faz-se de modo indireto. A água consiste em hidrogénio e oxigénio, como H_2O . No entanto existe uma versão mais pesada de água, na qual os átomos O-16 e H-1 são substituídos por um isótopo com neutrões extra, criando assim O-18 e H-2. A versão mais pesada de H_2O evapora-se mais depressa quando o tempo está relativamente quente. Assim, ao medir a razão entre as moléculas de água mais pesadas e a molécula

normal, é possível calcular a temperatura de quando o gelo se formou. Quanto mais água pesada existir, mais frio estava na altura da queda inicial de neve.)

Por fim, vi os resultados daquele trabalho, moroso, mas revelador. Num gráfico, a temperatura e o conteúdo de CO₂ ao longo dos séculos eram como um par de montanhas-russas, subindo e descendo em uníssono. É evidente que havia uma correlação forte e importante entre a temperatura do planeta e o conteúdo de CO₂ no ar. (Hoje, esses núcleos de gelo podem ir ainda mais longe no tempo. Em 2017, os cientistas conseguiram extrair núcleos de gelo na Antártica que tinham 2,7 milhões de anos, proporcionando aos cientistas acesso à história até então desconhecida do nosso planeta.)

Várias coisas me impressionaram ao analisar aquele gráfico. Primeiro, verificam-se alterações brutais de temperatura. Pensamos na Terra como algo muito estável. No entanto, de vez em quando, somos recordados de que ela é um objeto dinâmico, com grandes flutuações de temperatura e clima.

Segundo, sabemos que o último período glacial terminou há cerca de 10.000 anos, quando grande parte da América do Norte estava sepultada sob quase 800 metros de gelo sólido. Porém, desde então, tem-se verificado um aquecimento gradual da atmosfera, o que possibilitou o desenvolvimento da civilização humana. Uma vez que provavelmente teremos outro período glacial daqui a mais ou menos 10.000 anos, isso significa que o desenvolvimento da civilização humana ocorreu porque, por

coincidência, entrámos num período interglacial entre dois períodos glaciares. Sem esse degelo, ainda viveríamos em pequenos bandos nómadas de caçadores-recoletores, a vaguear pelo gelo, desesperadamente à procura de comida.

Contudo, o que me chamou mais a atenção foi o facto de se ter verificado uma subida lenta e gradual da temperatura desde o final do último período glacial, há 10.000 anos, mas depois um salto brusco nos últimos cem anos, o que coincide com a chegada da Revolução Industrial e o início da queima de combustíveis fósseis.

Na verdade, através de uma análise das temperaturas no planeta, os cientistas concluíram que os anos de 2016 e 2020 ficaram registados como os mais quentes de sempre, desde que há registos históricos. Aliás, o período entre 1983 e 2012 foi o período de trinta anos mais quente dos últimos 1400 anos. Assim, este recente aquecimento da Terra não é causado pelo aquecimento normal do período interglacial, mas sim uma situação altamente anormal. O principal candidato para a causa da mesma, entre muitos fatores, é o desenvolvimento da civilização humana.

O nosso futuro pode estar dependente da capacidade de prever padrões meteorológicos e delinear rumos de ação realistas. Estamos já a forçar os limites daquilo que os computadores convencionais conseguem alcançar, e por isso precisaremos de recorrer a computadores quânticos para nos darem uma medida precisa do aquecimento global e «boletins meteorológicos virtuais» de possíveis futuros, permitindo-nos variar certos parâmetros e perceber como afetarão o clima.

Um desses boletins meteorológicos virtuais pode bem guardar a chave para o futuro da civilização humana.

Como escreve Ali El Kaafarani na revista *Forbes*: «Os computadores quânticos encerram também um potencial imenso de uma perspectiva ambiental, e os especialistas preveem que, através de simulações quânticas, eles terão um papel muito importante para ajudar as nações a cumprirem os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas.¹

1. CO₂ e Aquecimento Global

Acima de tudo, precisamos de medições exatas do efeito de estufa e de saber como a atividade humana para ele contribui.

A luz do Sol consegue penetrar facilmente na atmosfera da Terra. Porém, quando se reflete na superfície do planeta, perde energia e torna-se calor de radiação infravermelha. E uma vez que a radiação infravermelha não penetra muito bem no CO₂, o calor fica preso na Terra, aquecendo-a assim. 80 por cento da energia a nível mundial, em 2018, veio da queima de combustíveis fósseis, que produz CO₂ como derivado. Assim, o súbito aumento de temperatura no último século é provavelmente causado por vários fatores, especialmente a acumulação de CO₂ em resultado da Revolução Industrial.

O rápido aquecimento da Terra nos últimos cem anos tem sido também confirmado por uma fonte completamente diferente, não a partir do espaço interior, de núcleos de gelo subterrâneos, mas a

partir do espaço exterior. Desse ponto vantajoso, os efeitos do aquecimento global são bastante dramáticos em termos visuais.

Por exemplo, os satélites meteorológicos da NASA conseguem calcular a quantidade total de energia que a Terra recebe do Sol. Esses satélites são também capazes de determinar a quantidade total de energia que a Terra envia de novo para o espaço. Se a Terra estivesse em equilíbrio, essa entrada e saída de energia seriam aproximadamente equivalentes. Depois de cuidadosamente pesados todos os fatores, vemos que a Terra absorve mais energia do que aquela que irradia de novo para o espaço, causando assim um aquecimento. Se analisarmos então a quantidade líquida de energia capturada pela Terra, verificamos que é mais ou menos a mesma que a quantidade de energia gerada pela atividade humana. Assim, o principal responsável por este recente aumento no aquecimento do planeta parece ser a atividade humana.

Fotografias de satélite revelam as consequências desse aquecimento. As fotografias de hoje podem ser comparadas com outras tiradas há décadas, revelando as alterações nítidas na geologia da Terra. Vemos que todos os principais glaciares diminuíram ao longo das décadas.

Desde a década de 50 que o Polo Norte é visitado por submarinos. Determinaram que o gelo durante os meses de inverno se tornou 50 por cento mais fino nos últimos cinquenta anos, diminuindo em espessura cerca de 1 por cento por ano. (As crianças, no futuro, talvez não percebam por que é que os pais dizem que o Pai Natal vem do Polo Norte, quando já não existir

praticamente gelo polar nenhum.) Segundo os cientistas da NASA, em meados deste século o oceano Ártico estará completamente livre de gelo durante o verão.

A atividade dos furacões pode também mudar. Estes começam por ser um vento tropical ao largo da costa de África e migram depois através do oceano Atlântico. Assim que chegam às Caraíbas, são como bolas de bólingue. Se acertarem precisamente no ângulo certo, conseguem entrar pelas águas quentes do Golfo do México e depois crescer de intensidade até se tornarem tempestades monstruosas. A intensidade, frequência e duração dos furacões que atingem a Costa Oeste dos Estados Unidos aumentaram desde a década de 80, provavelmente devido a aumentos da temperatura da água. Assim, é provável que vejamos furacões cada vez mais intensos e devastadores no futuro.

2. Previsões para o Futuro

As projeções de computador para o futuro do clima terrestre são bastante desoladoras. Os níveis da água do mar aumentaram globalmente 20 centímetros desde 1880. (Isto acontece porque a temperatura dos oceanos está a aumentar, o que faz com que o volume total da água dos oceanos se expanda.) Muito provavelmente, subirão entre 30 centímetros e 2,4 metros até ao ano de 2100. Os mapas mundiais para o período entre 2050 e 2100 mostram uma alteração dramática nas áreas costeiras.

«O aumento do nível do mar devido às alterações climáticas é um risco claro e presente para os Estados Unidos, hoje e nas próximas décadas e séculos», declara um relatório da NASA e da NOAA, a Administração Nacional Oceânica e Atmosférica.²

Porém, para cada centímetro que se perde verticalmente, as áreas costeiras podem perder um metro horizontalmente em termos de linha costeira utilizável. Assim, o próprio mapa da Terra está a mudar gradualmente. Mais ainda, os níveis do mar continuarão a subir até ao século XXII, devido à enorme quantidade de calor que já circula na atmosfera. No mínimo, isto significa que as áreas costeiras sofrerão cheias em larga escala, à medida que as ondas dos oceanos começarem a avançar para além de diques e barreiras.

Bill Nelson, administrador da NASA, comenta em relação ao recente relatório meteorológico da NASA/NOAA: «Este relatório apoia estudos anteriores e confirma aquilo que há muito sabemos: os níveis do mar continuam a subir a uma velocidade alarmante, pondo em perigo comunidades por todo o mundo... É necessária ação urgente para mitigar uma crise climática já em curso.»³

As cidades costeiras por todo o mundo terão de lidar com a subida das águas. Veneza já fica submersa em certas alturas do ano. Partes de Nova Orleães já se encontram abaixo do nível do mar. Todas as cidades costeiras precisarão de planos para lidar com a subida do nível do mar nas próximas décadas, tais como comportas, diques, represas, zonas de evacuação, sistemas de aviso de furacão e por aí fora.

3. O Metano como Gás de Estufa

O metano é atualmente acima de 30 vezes mais potente do que o dióxido de carbono como gás de estufa. O perigo é que as regiões do Ártico perto do Canadá e da Rússia, que contêm vastas extensões de tundra, podem estar a derreter, libertando gás metano.

Dei uma vez uma palestra em Krasnoyarsk, na Sibéria. Os residentes no local disseram-me que na verdade não estão preocupados com o aquecimento global, já que isso significaria que as suas casas não estariam constantemente congeladas. Contaram-me também um facto curioso: carcaças enormes de mamutes, que morreram há dezenas de milhares de anos, estão a emergir do gelo à medida que as temperaturas sobem.

Embora os residentes locais da Sibéria possam não se importar com o tempo mais ameno, o verdadeiro perigo é para o resto do globo, onde a libertação do gás metano pode causar um efeito em cascata descontrolado. Quanto mais a Terra aquecer, mais a tundra derrete e liberta metano. O metano, por sua vez, aquece ainda mais a Terra e o ciclo recomeça. Assim, quanto mais a tundra derrete, mais o nosso planeta aquece. Uma vez que o metano é um gás de estufa potente, isso significa que muitas projeções de computador para o futuro podem na verdade estar a subestimar a verdadeira magnitude do aquecimento global.

4. Implicações Militares

Vemos os efeitos do aquecimento global em todo o lado. Os agricultores, por exemplo, estão em sintonia com os ciclos das estações e têm perfeita consciência de que os verões são, em média, uma semana mais longos do que antigamente. Isto afeta a altura de plantar as sementes e que plantas cultivar nesse ano.

Vários insetos, como os mosquitos, estão também a avançar para norte, talvez levando consigo doenças tropicais como o vírus do Nilo Ocidental.

Uma vez que a energia que circula com o tempo está a aumentar, isso significa alterações meteorológicas mais violentas, e não apenas uma subida progressiva das temperaturas. Assim, podemos esperar que incêndios florestais, secas e cheias se tornem cada vez mais comuns. A expressão «tempestades seculares» descrevia em tempos eventos muito raros, mas violentos, que agora parecem ocorrer cada vez com mais frequência. Em 2022, a Europa e os Estados Unidos foram atingidos por temperaturas particularmente elevadas que bateram recordes em boa parte do planeta, criando incêndios florestais enormes, o desaparecimento de lagos e mortes por desidratação, entre outras consequências graves.

De forma assustadora, os polos, que exercem uma influência enorme no tempo, aqueceram mais depressa do que outras regiões do planeta. A quantidade de degelo na Gronelândia, só nos últimos

vinte anos, criou água líquida que seria suficiente para cobrir toda a área dos Estados Unidos com meio metro de água.

Entretanto, desenvolveram-se nos lençóis de gelo da Antártica rios subterrâneos de neve derretida. Parece agora evidente que os polos não são tão estáveis como em tempos se acreditou.

Um relatório recente da NASA/NOAA debruçou-se sobre o possível colapso do Glaciar Thwaites na Antártica, conhecido como o «glaciar do Juízo Final. «A plataforma de gelo oriental provavelmente vai estilhaçar-se em centenas de icebergues. Pode simplesmente acontecer de repente», diz Erin Pettit, glacióloga na Universidade Estatal do Oregon.⁴

Isto tem também implicações geopolíticas e militares. O Pentágono delineou uma vez o pior cenário possível, caso o aquecimento global se torne descontrolado. Identificou um dos pontos quentes mais mortíferos: a fronteira entre a Índia e o Bangladesh. Com a subida do nível das águas e as cheias devastadoras, o aquecimento global pode, um dia, forçar milhões de pessoas no Bangladesh a fugir e forçar as fronteiras com a Índia. Esta massa de pessoas desesperadas poderia facilmente dominar os guardas fronteiriços. Haveria então uma pressão crescente sobre o governo indiano para rechaçar vagas e vagas de refugiados que tentavam escapar às cheias. Em último recurso, as forças militares indianas podiam receber ordens para recorrer a armas nucleares para proteção das suas fronteiras.

Este era o cenário mais pessimista, mas ilustra de modo gráfico o que poderá acontecer se as coisas se descontrolarem.

5. Vórtice Polar

Algumas pessoas apontam para as recentes tempestades de neve monstruosas que assolaram grandes áreas dos Estados Unidos como indicador de que a ameaça do aquecimento global é grandemente exagerada.

Todavia, é preciso olhar para a razão para esta instabilidade no tempo de inverno. Sempre que há uma tempestade de inverno enorme, os boletins meteorológicos seguem o movimento da corrente de jato no seu trajeto descendente desde o Alasca e do Canadá, trazendo consigo o tempo gelado.

A corrente de jato, por sua vez, acompanha os movimentos do vórtice polar, um estreito cilindro rotativo de ar superfrio centrado sobre o Polo Norte. Recentemente, fotografias de satélite do vórtice polar mostram que está a tornar-se instável, deslocando-se mais e lançando a corrente de jato mais para sul, criando assim essas anomalias de tempo frio.

Alguns meteorologistas sugeriram que a instabilidade do vórtice pode ser explicada pelo aquecimento global. Normalmente, o vórtice polar é relativamente estável e não se desloca muito. Isto porque a diferença de temperatura entre o vórtice polar e as latitudes inferiores é relativamente ampla, o que aumenta a força

do vórtice polar e o torna mais estável. Porém, se as temperaturas das regiões polares subirem mais depressa do que nos climas mais temperados, a diferença de temperatura diminui, reduzindo a força do vórtice. Isto, por sua vez, empurra a corrente de jato mais para sul, criando padrões meteorológicos anormais até ao Texas e ao México.

Assim, ironicamente, o aquecimento global pode ser responsável por algum tempo gélido no Sul.

6. O Que Fazer?

Então o que podemos fazer a esse respeito?

Podemos ter esperança de que as energias renováveis e as medidas de conservação vão reduzindo gradualmente a dependência da nossa civilização relativamente aos combustíveis fósseis. Talvez uma superbateria ajudasse a introduzir uma Era Solar com carros elétricos mais eficientes. Talvez as nações comecem a levar a sério o combate ao problema. E talvez, em meados do século, a energia de fusão esteja ativa.

Porém, se tudo o mais falhar, um plano de recurso é tentar recorrer a geoengenharia para resolver o problema. Estas são soluções a serem usadas no pior cenário possível.

6.1 Sequestro de carbono

A abordagem mais conservadora é o sequestro de carbono, ou seja, separar o CO_2 na refinaria de petróleo e depois enterrá-lo no solo. Em pequena escala, até já foi ensaiado. Outra ideia é separar o CO_2 e eliminá-lo, misturando-o com basalto encontrado em rochas vulcânicas. A ideia é séria, mas o problema é económico. O sequestro de carbono custa dinheiro e uma companhia tem de justificar tal empreendimento. Assim, muitas companhias estão a optar por uma posição de «esperar para ver» quanto ao sequestro de carbono. Ainda não há certezas de que funcione e se será alguma vez economicamente viável.

6.2 Modificação Meteorológica

Quando o Monte de Santa Helena entrou em erupção, em 1980, os cientistas conseguiram calcular a quantidade de cinza vulcânica que foi projetada para o ambiente, e qual o seu efeito subsequente na temperatura. O escurecimento da atmosfera no rescaldo da erupção, ao que parece, refletiu mais luz solar de novo para o espaço, causando um efeito de arrefecimento. Poder-se-ia calcular quanta matéria particular seria necessária para uma redução global da temperatura.

No entanto, há perigos associados. Dada a escala da operação, seria muito difícil testar a ideia. E mesmo que uma erupção vulcânica baixe temporariamente a temperatura em alguns graus, é insuficiente para evitar uma catástrofe climática em grande escala.

6.3 Eflorescência Algal

Outra possibilidade é fertilizar os oceanos, o que pode absorver CO₂. As algas, por exemplo, alimentam-se de ferro. E, por sua vez, as algas absorvem CO₂. Assim, se fertilizássemos os oceanos com ferro, poderia ser possível usar as algas para conter o CO₂. O problema neste caso é estarmos a brincar com formas de vida que não controlamos. As algas não são estáticas, e podem reproduzir-se de modos imprevistos. E não é possível mandar para a sucata uma forma de vida como se faria com um carro avariado.

6.4 Nuvens de Chuva

Outros sugeriram modificar o tempo com recurso a uma técnica antiga: cristais de iodeto de prata. Enquanto os povos na Antiguidade tentavam chamar a chuva com danças e encantamentos, várias nações e forças militares tentaram-no através do lançamento de químicos na atmosfera. Os cristais de iodeto de prata, por exemplo, podem acelerar a condensação de vapor de água, talvez induzindo as nuvens de chuva a formar trovoadas. Acredita-se que este método foi investigado pela CIA durante a guerra do Vietname, como forma de derrotar as tropas inimigas durante a época de monções, ao causar cheias que os forçassem a abandonar os seus santuários.

Outra variação chama-se *cloud brightening*, ou fertilizar as nuvens de modo que reflitam mais energia solar de volta para o espaço.

Infelizmente, as modificações meteorológicas são sempre muito locais, influenciando apenas uma pequena área, quando a superfície da Terra é muito grande. E os resultados de fertilização de nuvens de chuva não têm sido muito bons. É uma técnica muito imprevisível.

6.5 Plantar Árvores

Pode ser possível alterar geneticamente as plantas de modo que absorvam mais CO₂ do que o normal. Esta será talvez a abordagem mais segura e razoável, mas é duvidoso que seja possível remover CO₂ suficiente para inverter o aquecimento global em todo o planeta. E uma vez que grande parte dos terrenos florestais do planeta é controlada por uma manta de retalhos de nações, cada uma das quais com os seus interesses, seria necessária a vontade política de muitos países, a trabalharem juntos, para embarcar num plano tão ambicioso.

6.6 Boletim Meteorológico Virtual

Tendo em conta a enormidade daquilo que está em jogo, espera-se que os computadores quânticos possam calcular a melhor opção. A tarefa mais importante é compilar todos os dados para formular previsões o mais exatas possível.

7. Computadores Quânticos e Simulação Meteorológica

Todos os modelos meteorológicos de computador começam por dividir a superfície da Terra em pequenos quadrados ou grelhas de células. Na década de 90, os modelos de computador começaram com grelhas de células de cerca de 500 quilómetros de lado. Com o aumento da potência computacional, este tamanho tem vindo sempre a diminuir. (Para o Quarto Relatório de Avaliação do IPCC, o Painel Intergovernamental sobre Alterações, Climáticas, em 2007, o tamanho das grelhas de células era de 109 quilómetros.)⁵

A seguir, estas grelhas são alargadas para a terceira dimensão, tornando-se blocos quadrados que descrevem as várias camadas da atmosfera. Normalmente, a atmosfera é dividida em dez blocos verticais.

Depois de toda a superfície e a atmosfera da Terra estarem divididas nestes blocos discretos, o computador analisa então os parâmetros no interior de cada bloco (humidade, luz solar, temperatura, pressão atmosférica, etc.). Utilizando as equações termodinâmicas conhecidas para a atmosfera e energia, calculam então como a temperatura e a humidade variam ao longo de células adjacentes, até toda a Terra estar abrangida.

Desta forma, os cientistas podem dar-nos uma estimativa aproximada do tempo no futuro. Para verificar os resultados, estes podem ser «testados» por aquilo a que se chama previsão inversa.

O programa de computador pode correr para trás no tempo e ver-se, a partir do comportamento atual das condições meteorológicas, é possível «prever» o tempo no passado, altura em que as condições meteorológicas eram conhecidas com exatidão.

A previsão inversa tem mostrado que estes modelos de computador, embora não sejam perfeitos, conseguem «prever» corretamente o padrão meteorológico global nos últimos cinquenta anos. No entanto o volume de dados é enorme, levando ao limite as capacidades dos computadores normais. Uma vez que os computadores digitais acabarão por ser ultrapassados pela crescente complexidade da tarefa, aquilo de que precisamos é de transitar para computadores quânticos.

8. Incertezas

Por mais potente que seja o nosso programa de computador, há sempre o problema dos fatores desconhecidos e inesperados, difíceis de modelar. Talvez a incerteza mais séria seja a presença de nuvens, que podem refletir a luz solar de volta para o espaço, reduzindo assim um pouco o efeito de estufa. Uma vez que até 70 por cento da superfície da Terra está, em média, coberta por nuvens, este é um fator importante.

O problema é que a formação de nuvens muda de minuto para minuto, tornando assim muito incertas as previsões a longo prazo. As nuvens são imediatamente afetadas por alterações rápidas na temperatura, na humidade, na pressão do ar, nas correntes de

vento e outros fatores. Os meteorologistas, para compensar esta incerteza, fazem uma estimativa grosseira daquilo que julgam que será a atividade das nuvens, tendo em conta os dados do passado.

Outra fonte de incerteza é a já mencionada corrente de jato. Quando vemos o boletim meteorológico, as fotografias de satélite perto do Ártico mostram uma massa de ar frio que se desloca em torno do globo, regra geral confinada ao Norte, mas que pode por vezes descer até ao México. Uma vez que é difícil prever qual será o trajeto exato seguido pela corrente de jato, os meteorologistas fazem uma estimativa aproximada das alterações de temperatura causadas pela corrente de jato.

A questão é que há um limite para aquilo que os computadores digitais podem fazer, tendo em conta as incertezas. Os computadores quânticos, contudo, poderão resolver as maiores origens de incerteza. Primeiro, os computadores quânticos conseguem calcular o que acontecerá, se reduzirmos o tamanho dos blocos para tornar as previsões mais exatas. O tempo pode mudar rapidamente ao longo de um ou dois quilómetros, e, apesar disso, estes blocos têm muitos quilómetros de lado, o que introduz erros. Um computador quântico, contudo, será capaz de lidar com um bloco de tamanho muito mais reduzido.

Segundo, estes modelos estimam fatores como a corrente de jato e as nuvens em níveis fixos. Os computadores quânticos terão a capacidade de incluir quantidades variáveis para esses parâmetros, de modo que seja possível alterá-los com o mero rodar

de um botão. Assim, os computadores quânticos poderão construir boletins meteorológicos virtuais com parâmetros variáveis cruciais.

Temos noção dos limites daquilo que se pode fazer com os computadores convencionais quando vemos na televisão o trajeto calculado de um furacão. Surgem no ecrã estimativas feitas por diferentes modelos de computador, e é possível ver o quanto diferem umas das outras. Previsões importantes feitas por programas de computador diferentes, por exemplo quando e onde é que o furacão entrará em terra e até onde penetrará, diferem muitas vezes em centenas de quilómetros.

Porém, estas incertezas, que custam muitas vezes milhões de dólares e as vidas de inocentes, serão grandemente reduzidas quando fizermos a transição para os computadores quânticos.

Melhores boletins meteorológicos, gerados por computadores quânticos, dar-nos-ão projeções melhores, o que nos ajudará a preparar para possíveis cenários.

No entanto, uma vez que a queima de combustíveis fósseis é um dos principais fatores por trás do aquecimento global, é importante investigar fontes de energia alternativas. Uma fonte de energia barata e importante no futuro pode vir a ser a energia de fusão, ou seja, aproveitar a energia do Sol na Terra. E a chave para a energia de fusão pode ser a computação quântica.

-
- 1 Ali El Kaafarani, «Four Ways Quantum Computing Could Change the World», *Forbes*, 30 de julho de 2021; <http://www.forbes.com/sites/forbestechcouncil/2021/07/30/four-ways-quantum-computing-could-change-the-world/?sh=398352d14602>.
 - 2 Doyle Rice, «Rising Waters: Climate Change Could Push a Century's Worth of Sea Rise in US by 2050, Report Says», *USA Today*, 15 de fevereiro de 2022; <https://www.usatoday.com/story/news/nation/2022/02/15/ussea-rise-climate-change-noaa-report/6797438001/>.
 - 3 «U.S. Coastline to See up to a Foot of Sea Level Rise by 2050» National Oceanic and Atmospheric Administration, 15 de fevereiro de 2022; <https://www.noaa.gov/news-release/us-coastline-to-see-up-to-foot-of-sea-level-rise-by-2050>.
 - 4 David Knowles, «Antarctica's "Doomsday Glacier" Is Facing Threat of Imminent Collapse, Scientists Warn, Yahoo News, 14 de dezembro de 2021; <https://news.yahoo.com/antarcticas-doomsday-glacier-is-facing-threat-of-imminent-collapse-scientists-warn-220236266.html>.
 - 5 Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas, *Climate Change 2007 Synthesis Report: A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; <http://www.ipcc.ch>.

CAPÍTULO 15

Engarrafar o Sol

Desde tempos antigos que as pessoas veneravam o Sol como aquele que traz vida, esperança e prosperidade. Os gregos acreditavam que Hélios, o deus do Sol, atravessava orgulhosamente o céu no seu carro luminoso puxado por cavalos, iluminando o mundo e levando calor e conforto aos mortais lá em baixo.

Porém, mais recentemente, os cientistas tentaram capturar o segredo do Sol e trazer para a Terra a sua energia ilimitada. O principal candidato para o conseguir fazer chama-se fusão, que algumas pessoas dizem ser como engarrafar o Sol. Em teoria, parece ser a solução ideal para todos os nossos problemas energéticos. Conseguiria gerar energia ilimitada para sempre, sem muitos dos problemas associados aos combustíveis fósseis e à energia nuclear. E, uma vez que é neutra em carbono, pode salvar-nos do aquecimento global.

Parece um sonho realizado.

Infelizmente, os físicos apregoaram demais esta tecnologia. Há uma piada que diz que de vinte em vinte anos os físicos afirmam que a energia de fusão será realidade daí a vinte anos. Atualmente,

no entanto, as principais nações industriais proclamam que a energia de fusão está finalmente ao nosso alcance e que estará à altura das promessas de fornecer energia ilimitada praticamente de graça.

Hoje em dia, os reatores de fusão ainda são tão caros e complexos que a comercialização desta tecnologia está provavelmente a algumas décadas no futuro. Contudo, com a chegada dos computadores quânticos, muitos cientistas esperam que alguns dos problemas persistentes que impedem a produção de energia de fusão possam ser resolvidos, abrindo caminho a que os reatores de fusão se tornem uma realidade — prática e económica. Os computadores quânticos poderão vir a revelar-se uma tecnologia crucial para ajudar a trazer a energia de fusão para as nossas casas e cidades.

A esperança é que a energia de fusão venha a ser comercializada antes que o aquecimento global aqueça o planeta de modo irreversível.

1. Por Que Brilha o Sol?

As pessoas sempre questionaram o que alimenta o Sol. A sua energia parece ilimitada e até mesmo divina. Houve quem especulasse que o Sol devia ser uma espécie de fornalha gigantesca no céu. Porém, um simples cálculo mostra que a queima de combustível duraria apenas alguns séculos ou milénios, e também

que, no vácuo do espaço, qualquer fogo se extinguiria imediatamente.

Então por que brilha o Sol?

O segredo do Sol foi finalmente desvendado pela famosa equação de Einstein, $E = mc^2$. Os físicos perceberam que o Sol, maioritariamente composto por hidrogénio, ia buscar a sua imensa energia ao fundir os núcleos de hidrogénio para formar hélio. Quando se comparou o peso do hidrogénio original com o peso do hélio, faltava uma massa ínfima. Uma pequena fração da massa original perdia-se no processo de fusão. Este défice de massa, na fórmula de Einstein, torna-se a energia imensa que ilumina o sistema solar.

O público ganhou consciência da enorme potência que o átomo de hidrogénio encerra quando esta foi libertada pela detonação da bomba de hidrogénio. Um pedaço do Sol, de certa forma, foi trazido para a Terra, com implicações de enorme significado.

2. Vantagens da Fusão

Existem atualmente duas formas de libertar este fogo nuclear. Podemos unir o hidrogénio, via fusão, para formar hélio, ou podemos separar o átomo de urânio ou plutónio para libertar a energia nuclear, via fissão. Em cada um dos processos, quando comparamos o peso dos ingredientes com o peso do produto final,

verificamos que desapareceu uma porção ínfima de massa, que se encontra na forma de energia nuclear.

Embora todas as centrais nucleares comerciais obtenham a sua energia através de fissão nuclear, a fusão tem algumas vantagens notáveis.

Primeiro, ao contrário das centrais de fissão, a fusão não cria quantidades copiosas de resíduos nucleares mortíferos. Num reator de fissão, o núcleo do urânio divide-se, libertando energia, mas pode também criar uma cascata de centenas de produtos de fissão radioativos, como isótopo de estrôncio, iodo-131, cézio-137, e outros. Alguns destes resíduos radioativos serão radioativos durante milhões de anos, e requerem lixeiras nucleares gigantescas que terão de ser protegidas durante muito tempo. Uma única central de fissão comercial, por exemplo, gera 30 toneladas de resíduos nucleares de alta atividade em apenas um ano. Os aterros de resíduos nucleares são como mausoléus gigantescos. A nível mundial existem 370.000 toneladas de resíduos de fissão mortíferos que têm de ser cuidadosamente monitorizados.

As centrais de fusão, pelo contrário, produzem como resíduo o gás hélio, que na realidade tem valor comercial. Parte do aço irradiado numa central de fusão pode também tornar-se radioativo após décadas de uso, mas seria facilmente eliminado e enterrado.

Em segundo lugar, ao contrário das centrais de fissão, as centrais de fusão não podem sofrer acidentes nucleares. Numa central de

fissão, os resíduos continuam a gerar grandes quantidades de calor mesmo quando o reator é desligado. Quando se perde a água de arrefecimento, num acidente numa central nuclear de fissão, a temperatura pode disparar até o reator atingir os 2760 °C e começar a derreter, criando explosões desastrosas. Em Chernobyl, em 1986, por exemplo, explosões de vapor e hidrogénio rebentaram com o telhado do reator, libertando cerca de 25 por cento dos materiais radioativos do núcleo para a atmosfera e sobre a Europa. Foi o mais grave acidente nuclear comercial da história.

Em contraste, se um reator de fusão sofrer um acidente, o processo de fusão simplesmente é interrompido. Deixa de se gerar calor e o acidente passou.

Em terceiro lugar, o combustível para um reator de fusão é ilimitado. O urânio, por outro lado, é um recurso limitado e requer todo um ciclo de mineração, tratamento e enriquecimento para produzir combustível de urânio utilizável. Já o hidrogénio, pode ser extraído da água do mar.

Em quarto lugar, a fusão é muito eficiente na libertação da energia do átomo. Um grama de hidrogénio pesado pode produzir 90.000 quilowatts de energia elétrica, o equivalente a 11 toneladas de carvão.

Por último, as centrais de fusão e de fissão não criam dióxido de carbono e, portanto, não vêm exacerbar o aquecimento global.

3. Construir Um Reator de Fusão

São dois os ingredientes básicos para uma máquina de fusão. Primeiro, é preciso uma fonte de hidrogénio aquecido a muitos milhões de graus — na verdade, a uma temperatura mais quente do que o Sol — para o transformar em plasma, que é o quarto estado da matéria (depois de sólidos, líquidos e gases). Um plasma é um gás tão quente que alguns dos eletrões lhe foram arrancados. É a forma de matéria mais comum no Universo, da qual são feitas as estrelas, o gás interestelar e até os relâmpagos.

Segundo, é preciso uma forma de conter o plasma aquecido. Nas estrelas, a gravidade comprime o gás. Mas na Terra a gravidade é demasiado fraca para o fazer, pelo que usamos campos elétricos e magnéticos.

O *design* mais popular de um reator de fusão chama-se *tokamak* e é um *design* russo. Começa com um cilindro, completamente rodeado por bobinas de fio. Os dois extremos do cilindro unem-se, formando um *donut*. Depois, injeta-se gás hidrogénio no *donut* e em seguida lança-se uma corrente elétrica através do cilindro, que aquece o gás a temperaturas muito elevadas. Para conter esse plasma quente, são transmitidas quantidades gigantescas de energia elétrica às bobinas que rodeiam o *donut*, contendo assim o plasma com um poderoso campo magnético e impedindo-o de atingir as paredes do reator.

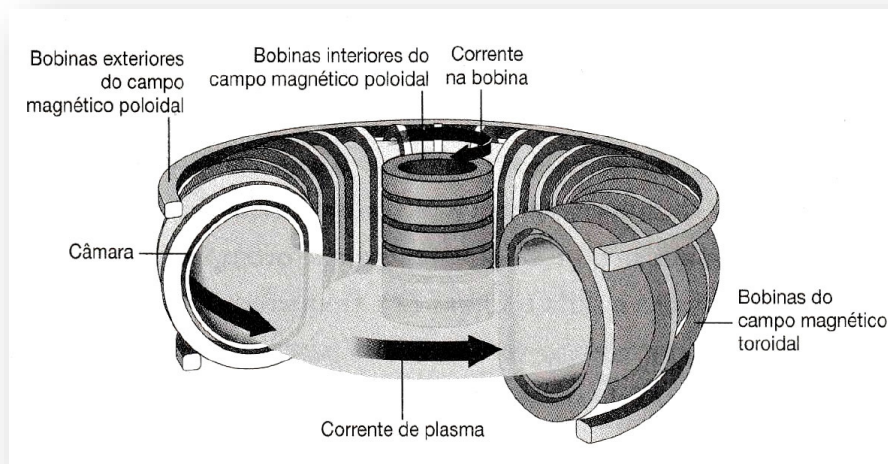


Figura 11: Tokamak.

Num reator de fusão, as bobinas envolvem uma câmara em forma de *donut*, criando um poderoso campo magnético que confina um plasma superaquecido. A chave do *tokamak* é aquecer o gás de modo que essa fusão liberte vastas quantidades de energia. No futuro, os computadores quânticos poderão ser usados para alterar e até mesmo melhorar a configuração exata do campo magnético, aumentando assim a sua potência e eficiência e reduzindo em muito os custos.

Finalmente, depois de a fusão começar, os núcleos de hidrogénio combinam-se para formar hélio, libertando vastas quantidades de energia. Num dos *designs*, fundem-se dois isótopos de hidrogénio, deutério e trítio, criando energia, hélio e um neutrão. Esse neutrão, por sua vez, transporta a energia de fusão para fora do reator, onde atinge um cobertor de material em volta do *tokamak*.

Este cobertor, geralmente feito de berílio, cobre e aço, aquece, fazendo com que a água nos canos do cobertor ferva. O vapor assim criado empurra as pás de uma turbina, fazendo girar ímanes gigantes. Este campo magnético, por sua vez, pressiona os eletrões na turbina, gerando a eletricidade que acabará na sua sala.

4. Por quê a Demora?

Com todas estas vantagens à nossa espera, o que está por trás dos atrasos da energia de fusão? Passaram setenta anos desde a construção das primeiras centrais de fusão, por quê a demora? O problema não tem que ver com a física, mas sim com engenharia.

O gás hidrogénio tem de ser aquecido a muitos milhões de graus, mais quente do que o Sol, para que os núcleos de hidrogénio se combinem para formar hélio e libertar energia. Porém, aquecer um gás a essas temperaturas é difícil. O gás fica frequentemente instável e a reação de fusão interrompe-se. Os físicos passaram décadas a tentar conter o hidrogénio de modo que fosse possível aquecê-lo a essas temperaturas estelares.

Em retrospectiva, os físicos compreendem agora como é relativamente fácil para a natureza libertar energia de fusão no coração de uma estrela. As estrelas começam por ser uma bola de hidrogénio que é comprimida uniformemente pela gravidade. À medida que essa bola se torna cada vez mais pequena, as temperaturas sobem até atingirem os muitos milhões de graus e o hidrogénio começar a fundir-se e a estrela se incendiar.

Veja-se que este processo ocorre naturalmente, por si só, porque a gravidade é monopolar, ou seja, parte-se de um polo (e não dois), pelo que a bola de gás original colapsa sobre si própria, sob a sua própria gravidade. Em resultado, as estrelas são relativamente

fáceis de formar e é por isso que vemos milhares de milhões delas com os nossos telescópios.

Contudo, a eletricidade e o magnetismo são diferentes. São bipolares. Um íman, por exemplo, tem sempre um polo norte e um polo sul. Não podemos usar um martelo para isolar um dos polos. Se partirmos um íman ao meio, o que obtemos são dois ímanes mais pequenos, cada um deles com o seu polo norte e o seu polo sul.

Assim, eis o problema. É extraordinariamente difícil criar um campo magnético potente o suficiente para comprimir o gás hidrogénio superaquecido, em forma de um *donut*, durante tempo suficiente para criar fusão. Para compreendermos este grau de dificuldade, imagine-se um balão comprido, daqueles que se usam para fazer animais. Agora, una as extremidades do balão de modo a formar um *donut*. Depois tente espremê-lo uniformemente. Por mais que aperte o balão, o ar consegue sempre deslocar-se para outra parte. É extraordinariamente difícil apertá-lo de modo que o ar no interior se comprima uniformemente.

5. ITER

Com o fim da Guerra Fria e a conclusão de que construir um reator de fusão era proibitivamente dispendioso, as nações do mundo começaram a reunir recursos para o aproveitamento pacífico do átomo. Em 1979, ganhou força nos corredores do poder a intenção de construir um reator de fusão internacional. Os

presidentes, Ronald Reagan e Mikhail Gorbachov, encontraram-se e ajudaram a firmar o acordo.

O ITER (Reator Internacional Termonuclear Experimental) é um exemplo desta colaboração internacional. Há 35 nações envolvidas no financiamento deste ambicioso projeto, incluindo a União Europeia, os Estados Unidos, o Japão e a Coreia.

Para medir a eficiência de um reator de fusão, os físicos introduziram a quantidade denominada Q , que é a energia gerada pelo reator, dividida pela energia que consome. Quando $Q = 1$, atingimos o balanço energético, produzindo tanta energia como consome. De momento, o recorde mundial para uma central de fusão ronda $Q = 0,7$. As projeções apontam para que o ITER atinja o balanço energético em 2025. Porém, foi criado para, a dada altura, alcançar $Q = 10$, gerando muito mais energia do que aquela que consome.

O ITER é uma máquina monstruosa, que pesa mais de 5000 toneladas, sendo um dos instrumentos científicos mais sofisticados de todos os tempos, a par da Estação Espacial Internacional e do Grande Colisor de Hadrões. Em comparação com anteriores reatores de fusão, o ITER tem o dobro do tamanho e é 16 vezes mais pesado. O seu toro é gigantesco, com quase 20 metros de diâmetro e 11 metros de altura. Para confinar o plasma, os seus ímanes geram um campo magnético 280.000 vezes mais forte do que o campo magnético da Terra.

O ITER é o projeto de fusão mais ambicioso do mundo. Foi pensado para produzir 450 milhões de watts de energia líquidos, mas não será ligado à rede elétrica. Será ligado para testes em 2025 e talvez esteja a funcionar em pleno em 2035. Se for bem-sucedido, abrirá caminho ao reator de fusão de próxima geração, chamado DEMO, que se pensa estar concluído até ao ano de 2050. O DEMO pretende alcançar $Q = 25$ e produzir dois gigawatts de energia.

Assim, o objetivo é ter energia de fusão comercial antes do meio do século. Contudo, os analistas realçam que a energia de fusão não resolverá de imediato a crise do aquecimento global. «A fusão não é uma solução para chegarmos a 2050 com neutralidade total. É uma solução para alimentar a sociedade na segunda metade do século», diz Jon Amos, correspondente científico da BBC News.¹

A chave para o funcionamento do ITER são os enormes campos magnéticos, tornados possíveis por algo chamado supercondutividade, que é o ponto em que toda a resistência elétrica desaparece a temperaturas superbaixas, possibilitando assim campos magnéticos mais fortes. Reduzir a temperatura até perto do zero absoluto reduz a resistência à eletricidade, elimina o calor residual e aumenta a eficiência do campo magnético.

A supercondutividade foi descoberta pela primeira vez em 1911, quando se arrefeceu o mercúrio até 4,2 °K, perto do zero absoluto. Na altura, acreditava-se que os movimentos atômicos aleatórios ficariam praticamente estáticos no zero absoluto, pelo que os eletrões poderiam por fim viajar livremente sem qualquer

resistência. Assim, era considerado estranho que várias substâncias se tornassem supercondutoras a temperaturas mais elevadas. Era um mistério.

Seria apenas em 1957 que John Bardeen, Leon Cooper e John Schrieffer finalmente criariam uma teoria quântica da supercondutividade. Eles descobriram que, sob certas condições, os elétrons podem formar aquilo a que se chama pares de Cooper e depois deslizar pela superfície de um supercondutor sem qualquer resistência. A teoria previa que a temperatura máxima para um supercondutor era 40 °K.

Mesmo antes de os ímanes do ITER serem ligados, versões semelhantes, mas mais pequenas do ITER provaram que o *design* básico do *tokamak* está correto. O design do ITER sofreu um tremendo avanço em 2022, quando se anunciou que duas versões mais pequenas do mesmo, uma nos arredores de Oxford, na Inglaterra, e outra na China, tinham conseguido estabelecer um novo recorde.

O reator de fusão de Oxford, chamado JET (Toro Europeu Conjunto) conseguiu alcançar $Q = 0,33$ durante cinco segundos, batendo o recorde que esse mesmo reator estabelecera vinte e quatro anos antes. É aproximadamente o equivalente a 11 megawatts de energia, ou energia suficiente para aquecer 60 chaleiras de água.

«As experiências do JET deixam-nos um passo mais perto da energia de fusão», diz Joe Milnes, um dos diretores do laboratório. «Demonstrámos que conseguimos criar uma miniestrela no interior da nossa máquina e mantê-la durante cinco segundos e obter um elevado desempenho, o que nos leva realmente para um outro mundo.»²

Arthur Turrell, uma autoridade em energia de fusão, diz: «É um marco porque eles conseguiram demonstrar a maior quantidade de energia produzida por reações de fusão em qualquer aparelho na história.»³

Contudo, os chineses anunciaram, alguns meses depois, terem conseguido sustentar a fusão durante 17 minutos ao aquecer o plasma até 158 milhões de graus Celsius. O seu reator de fusão, chamado EAST (*Tokamak Supercondutor Experimental Avançado*), baseia-se, tal como o seu homólogo britânico, no *design* original do *tokamak*, o que indica que o ITER está, provavelmente, no caminho certo.

6. Designs Concorrentes

Tendo em conta a importância do que está em jogo, e porque os campos magnéticos são notoriamente difíceis de manipular, têm sido propostas muitas ideias novas para conter o plasma. Na verdade, há cerca de 25 novas empresas a apresentar a sua versão de um reator de fusão.

Em geral, todos os *designs* de *tokamak* de fusão usam supercondutores, criados pelo arrefecimento das bobinas até perto do zero absoluto, ponto em que a resistência elétrica quase desaparece. Porém, em 1986, encontrou-se por meio de experimentação e erro uma nova classe de supercondutores, o que foi uma descoberta sensacional. Consegue alcançar a fase de supercondução à amena temperatura de 77 °K. (Esta nova classe de supercondutores, chamados supercondutores a alta temperatura, baseava-se no arrefecimento de cerâmicas como óxido de ítrio, bário e cobre.) Foi uma notícia assombrosa, porque significava que havia sido descoberta uma nova teoria quântica de supercondutores, e que a cerâmica podia tornar-se supercondutora com nitrogénio líquido comum. É importante porque o nitrogénio líquido custa praticamente o mesmo que o leite e, portanto, seria possível baixar consideravelmente o custo dos superímanes. (O gelo seco, ou dióxido de carbono solidificado, custa cerca de dois dólares o quilo. O nitrogénio líquido custa aproximadamente oito dólares o quilo. O hélio líquido, que é o que a maior parte dos supercondutores usa como refrigerante, custa 200 dólares o quilo.)

Pode não parecer uma melhoria muito significativa para as pessoas comuns, mas para um físico abre uma mina de oportunidades. Uma vez que o componente mais complexo de um reator de fusão são os ímanes, isto altera todo o aspeto económico e, por consequência, as perspetivas da tecnologia.

Embora a descoberta dos supercondutores cerâmicos tenha chegado demasiado tarde para ser incorporada no ITER, abriu a

possibilidade de usar essa tecnologia para a geração seguinte de reatores de fusão.

Um projeto promissor que utiliza este novo método é o reator SPARC, que foi anunciado em 2018 e atraiu rapidamente a atenção (e a carteira) de multimilionários famosos como Bill Gates e Richard Branson, permitindo ao SPARC angariar mais de 250 milhões de dólares num curto espaço de tempo. (O que, em comparação com os 21 mil milhões que já foram gastos no ITER, não passa de trocos.)

O reator ultrapassou um marco muito significativo em 2021, quando testou com sucesso os seus ímanes supercondutores a altas temperaturas, capazes de gerar um campo magnético 40.000 vezes mais forte do que o campo magnético da Terra.

«Este íman vai alterar a trajetória tanto da ciência como da energia de fusão e, estamos convictos disso, mais cedo ou mais tarde o panorama energético a nível mundial, diz Dennis Whyte do MIT.⁴ «É muito importante. Não é mera publicidade, é a realidade», diz Andrew Holland, diretor executivo da Associação da Indústria de Fusão.⁵ O SPARC pode alcançar o balanço energético $Q = 1$ em 2025, mais ao menos em simultâneo com o ITER, mas por uma fração do custo e do tempo.

O SPARC por si só não vai gerar energia elétrica comercial. Porém, o seu sucessor, o reator ARC, poderá fazê-lo. Se tiver êxito, deve deslocar o centro de gravidade da investigação sobre fusão,

forçando a próxima geração de reatores de fusão a adotar as tecnologias mais recentes, tais como avanços em supercondutores de altas temperaturas e talvez computadores quânticos, que seriam necessários para melhorar a estabilidade crucial do campo magnético para que consiga conter o plasma.

No entanto, a ciência dos supercondutores ficou bastante baralhada com a recente notícia de que fora finalmente alcançado um supercondutor de temperatura ambiente. Normalmente, a criação de um supercondutor de temperatura ambiente seria anunciada como o Santo Graal da física de baixa temperatura, o produto final de décadas de trabalho árduo. Todavia esta descoberta tinha um enorme problema. Os físicos criaram finalmente um supercondutor de temperatura ambiente, mas apenas se o comprimirmos a 2,6 milhões de vezes a pressão atmosférica. Até a mais simples experiência, com essas pressões astronômicas, requer maquinaria altamente especializada, que nem toda a gente tem. Assim, os físicos optaram por esperar para ver se é possível reduzir essa pressão de modo que os supercondutores de temperatura ambiente possam vir a tornar-se uma alternativa útil.

7. Fusão a Laser

O Departamento de Energia dos Estados Unidos optou por seguir uma abordagem completamente diferente, utilizando raios *laser* gigantescos em vez de ímanes potentes para aquecer o hidrogénio. Num programa de televisão que apresentei na BBC-TV, visitei a NIF (Infraestrutura Nacional de Ignições), uma instalação enorme no

Laboratório Nacional de Livermore na Califórnia, que custou 3,5 mil milhões de dólares.

Uma vez que se trata de uma instalação militar onde são criadas ogivas nucleares, tive de passar por várias verificações de segurança antes de poder visitar as instalações. Por fim, passei pelos últimos guardas armados e fui conduzido à sala de controlo da NIF. Mesmo depois de ver as plantas da NIF em papel, é esmagador quando vemos em pessoa o tamanho assombroso da máquina. É verdadeiramente gigantesca, do tamanho de três campos de futebol americano, com dez andares de altura, reduzindo qualquer pessoa que dela se aproxime à sua insignificância.

À distância, vi o trajeto seguido pelos 192 raios *laser* de alta potência, que estão entre os mais potentes do planeta. Quando estes raios *laser* são disparados, durante uma ínfima fração de segundo, atingem 192 espelhos. Cada um destes espelhos está cuidadosamente posicionado para refletir o raio sobre o alvo, que é uma pequena bolinha do tamanho de uma ervilha contendo deutereto de lítio, que é rico em hidrogénio.

Isto faz com que a superfície da bolinha se vaporize e desfaça, elevando a temperatura a dezenas de milhões de graus. Quando aquecida e comprimida a esse nível, ocorre a fusão e são emitidos os neutrões que o indicam.

O objetivo, eventualmente, é gerar energia comercial através da fusão a *laser*. Quando o alvo é vaporizado, são emitidos neutrões,

que serão depois enviados através de um cobertor. Tal como no *tokamak*, espera-se que esses neutrões de alta energia transfiram a energia para o cobertor, que aquece e ferve água, que é então conduzida para uma turbina para gerar energia comercial.

Em 2021, a NIF alcançou um marco importante. Conseguiu produzir dez mil biliões de watts de energia em cem bilionésimos de segundo, a cem milhões de graus Kelvin, batendo o anterior recorde. Comprimiu a bolinha de combustível a 350 mil milhões de vezes a pressão atmosférica.

E finalmente, em dezembro de 2022, a NIF fez cabeçalhos em todo o mundo com a sensacional notícia de que conseguira, pela primeira vez na história, alcançar Q maior do que 1, ou seja, gerou mais energia do que aquela que consumiu. Foi realmente um evento histórico, indicando que a fusão era um objetivo possível de alcançar. Porém, os físicos acautelaram também de que este era apenas o primeiro passo. O segundo seria aumentar a escala do reator de modo a poder alimentar uma cidade inteira. Depois disso, teria de ser reproduzido de modo lucrativo e espalhado pelo mundo. Resta saber se a NIF conseguirá ser comercializada de modo a criar quantidades práticas de energia. Entretanto, o *design* do *tokamak* continua a ser o mais avançado e o mais comum.

8. Problemas da Fusão

Embora a energia de fusão tenha capacidade de alterar a forma como consumimos energia na Terra, problemas persistentes têm levado a falsas esperanças e sonhos despedaçados.

Muitos esforços anteriores para aproveitar a energia de fusão foram desapontantes. Desde a década de 50 houve mais de cem reatores de fusão, mas nenhum deles produziu mais energia do que aquela que consumiu. Muitos acabaram por ser abandonados. Um problema fundamental é a configuração toroidal (em forma de *donut*) do *design* do *tokamak*. Resolve um problema (a capacidade de conter o plasma a elevadas temperaturas) mas causa outro (instabilidade).

Por causa da natureza toroidal do campo magnético, é difícil sustentar um processo de fusão estável durante tempo suficiente para cumprir o critério de Lawson, que requer uma certa temperatura, densidade e duração para criar a reação de fusão.

Se houver irregularidades minúsculas no campo magnético do *tokamak*, o plasma pode tornar-se instável.

O problema é agravado pela interação entre o plasma e o campo magnético. Mesmo que o campo magnético externo possa, inicialmente, conter o plasma, o próprio plasma tem o seu campo magnético, que pode interagir com o campo magnético maior do reator e tornar-se instável.

O facto de as equações do plasma e do campo magnético estarem fortemente ligadas, cria efeitos de cascata. Se houver uma ligeira irregularidade nas linhas do campo magnético no interior do *donut*, isso, por sua vez, pode causar irregularidades no plasma dentro do *donut*. Porém, como o plasma tem o seu próprio campo magnético, pode ainda reforçar a irregularidade original. Assim, pode verificar-se um efeito de bola de neve, com a irregularidade a tornar-se cada vez maior de cada vez que os dois campos magnéticos se reforçam mutuamente. Essas irregularidades tornam-se por vezes tão grandes que podem tocar nas paredes do reator e abrir efetivamente um buraco nelas. Assim, esta é a razão fundamental pela qual tem sido tão difícil satisfazer os critérios de Lawson e sustentar o processo de fusão estável tempo suficiente para criar um reator autossustentável.

9. Fusão Quântica

É aqui que entram em cena os computadores quânticos. As equações do campo magnético e do plasma são ambas conhecidas. O problema é que estas duas equações estão unidas uma à outra e, portanto, interagem de modos complexos. Pequenas oscilações imprevisíveis podem, subitamente, ser ampliadas. Porém, enquanto os computadores digitais têm dificuldade em computar nessa situação, os computadores quânticos serão capazes de efetuar cálculos nestas condições complexas.

Hoje, se um reator de fusão tiver o *design* errado, é proibitivamente difícil começar de novo e redesenhar o reator do zero. Contudo, se todas as equações estiverem dentro de um

computador quântico, torna-se uma simples questão de usar o computador quântico para calcular se o *design* é o ideal ou se poderá haver *designs* mais estáveis ou eficientes.

Alterar os parâmetros num programa de computador quântico é drasticamente mais barato do que redesenhar um íman de reator de fusão completamente novo, que custou milhares de milhões de dólares.

Uma vez que um reator pode custar entre dez e vinte mil milhões de dólares, o resultado serão poupanças astronómicas. Os novos *designs* podem ser criados e testados virtualmente porque o computador quântico consegue calcular as suas propriedades. Além do mais, um computador quântico pode facilmente jogar com uma série de novos *designs* virtuais para ver se melhoram o desempenho do reator.

A potência dos computadores quânticos também será ampliada se for aliada à inteligência artificial. Os sistemas de IA podem variar a força dos vários ímanes de um reator de fusão. Depois, os computadores quânticos analisarão o fluxo de dados deste processo, de modo a aumentar o fator Q. Por exemplo, o programa de IA DeepMind já foi usado para modificar o reator de fusão operado pelo Instituto Federal de Tecnologia Suíço em Lausanne, na Suíça.

«Penso que a IA virá a desempenhar um grande papel no controlo futuro dos *tokamaks* e da ciência de fusão em geral», diz

Federico Felici do Instituto Suíço. «Há um enorme potencial de aplicar a IA para obter um melhor controlo e perceber como operar tais aparelhos de modo mais eficaz», acrescenta.⁶

Assim, a IA e os computadores quânticos podem trabalhar em conjunto para aumentar a eficiência dos reatores de fusão, que por sua vez poderão vir a criar a energia do futuro e ajudar a reduzir o aquecimento global.

Outra aplicação dos computadores quânticos é decifrar como funcionam os supercondutores cerâmicos de alta temperatura. Tal como mencionámos, de momento ninguém sabe como possuem essa propriedade mágica. Estas cerâmicas de alta temperatura existem há mais de quarenta anos, e, contudo, não existe consenso. Foram propostos modelos teóricos, mas não passam disso mesmo: teóricos.

Um computador quântico, contudo, pode alterar as coisas. Uma vez que o computador quântico é, ele próprio, mecânico-quântico, poderá calcular a distribuição de eletrões nas camadas bidimensionais dentro do supercondutor cerâmico, e assim determinar qual das teorias está correta.

Além disso, já vimos que a criação de supercondutores ainda é feita por meio de experimentação e erro. É possível que se descubram novos supercondutores por acaso. No entanto isso significa que é preciso criar experiências completamente novas de cada vez que se testa um novo material. Não existe uma forma

sistemática de encontrar novos supercondutores. Um computador quântico, porém, conseguirá criar um laboratório virtual no qual testar novas propostas para um supercondutor. Será possível testar rapidamente dezenas de substâncias interessantes numa única tarde, em vez de demorar anos e gastar milhões para examinar cada uma delas.

Assim, os computadores quânticos podem encerrar a chave para uma energia futura não poluente, barata e fiável.

Todavia, se conseguirmos resolver as equações de fusão num computador quântico, talvez possamos resolver também a equação de fusão que se encontra no coração das estrelas, de modo a desvendar o segredo das fornalhas nucleares internas espalhadas pelo céu da noite, perceber como essas estrelas explodem em supernovas e como, por fim, se tornam no mais misterioso dos objetos do Universo, os buracos negros.

¹ Jonathan Amos, «Major Breakthrough on Nuclear Fusion Energy», *BBC News*, 9 de setembro de 2022; <http://www.bbc.com/news/science-environment-60312633>.

² Claude Forthomme, «Nuclear Fusion: How the Power of Stars May Be Within Our Reach», *Impakter*, 10 de fevereiro de 2022; <http://www.impakter.com/nuclear-fusion-power-stars-reach/>.

³ Jonathan Amos, «Major Breakthrough on Nuclear Fusion Energy», *BBC News*, 9 de setembro de 2022; <http://www.bbc.com/news/science-environment-60312633>.

⁴ «Multiple Breakthroughs Raise New Hopes for Fusion Energy», *Global BSG*, 27 de janeiro de 2022; <http://www.globalbsg.com/multiple-breakthroughs-raise-new-hopes-for-fusion-energy/>.

⁵ Catherine Clifford, «Fusion Gets Closer with Successful Test of a New Kind of Magnet at MIT Start-up Backed by Bill Gates», *CNBC*, 8 de setembro de 2021; <http://www.cnn.com/2021/09/08/fusion-gets-closer-with-successful-test-of-new-kind-of-magnet.html>.

⁶ «Nuclear Fusion Is One Step Closer with New AI Breakthrough», *Nation World News*, 13 de setembro de 2022; <http://www.nationworldnews.com/nuclear-fusion-is-one-step-closer-with-new-ai-breakthrough/>.

CAPÍTULO 16

Simular o Universo

Em 1609, Galileu Galilei espreitou pelo telescópio que ele próprio construíra e viu maravilhas que ninguém vira antes. Pela primeira vez na história, a verdadeira glória e majestade do Universo eram desvendadas.

Galileu ficou fascinado com o que via com os seus próprios olhos, deslumbrado por uma nova e assombrosa imagem do Universo que lhe era revelada todas as noites. Foi o primeiro a ver que a Lua tinha crateras profundas, que o Sol tinha minúsculos potinhos negros, que Saturno tinha uma espécie de «orelhas» (hoje sabemos que são anéis), que Júpiter tinha quatro luas próprias e que Vénus tinha fases como a Lua, o que lhe provou que era a Terra que girava à volta do Sol e não o contrário.

Galileu até organizou festas de observação dos céus, nas quais a elite de Veneza podia contemplar com os seus próprios olhos o verdadeiro esplendor do Universo. Porém, tal imagem gloriosa não condizia com a que era transmitida pelo poder religioso, e assim pagou um preço elevado por essa revelação cósmica. A Igreja ensinava que os céus eram formados por esferas perfeitas, eternas e celestiais, um testemunho da glória de Deus, enquanto a Terra era atormentada pelo pecado carnal e pela tentação. No entanto,

Galileu via com os seus próprios olhos que o Universo era rico, variado, dinâmico e em constante mutação.

Na verdade, alguns historiadores acreditam que o telescópio pode ser considerado talvez o instrumento mais sedicioso alguma vez introduzido na história da ciência, porque desafiou os poderes instituídos e alterou para sempre a relação da humanidade com o mundo à nossa volta.

Galileu, com o seu telescópio, estava a deitar por terra tudo o que se pensava conhecer sobre o Sol, a Lua e os planetas. Por fim, Galileu foi preso, julgado, e recordado de forma contundente de que o antigo monge, Giordano Bruno, ainda meros trinta e três anos antes fora queimado vivo nas ruas de Roma por ter afirmado que podia haver outros sistemas solares no espaço, talvez até com vida em alguns.

A revolução desencadeada pelo telescópio de Galileu alterou para sempre a forma como vemos as glórias do Universo. Os astrónomos já não são queimados vivos. Hoje, lançam satélites gigantes como os Telescópios Hubble e James Webb para desvendar os mistérios do Universo. (E até há uma estátua de Bruno na praça Campo de Fiori em Roma, precisamente no local onde foi queimado vivo. Todos os dias, Bruno é vingado quando encontramos novos planetas na órbita de estrelas distantes.)

Hoje em dia, os satélites na órbita da Terra têm uma visão sem paralelo dos céus. Esses instrumentos, como o Telescópio Espacial

Webb, que se encontra a 1,5 milhões de quilómetros da Terra, abriram novos horizontes para a astronomia do seu ponto de vantagem cósmico.

A ciência tem sido tão bem-sucedida que os cientistas se veem atualmente esmagados sob montanhas de dados, e serão necessários os computadores quânticos para organizar e analisar esta avalanche de informação. Os astrónomos já não tiritam, sozinhos, ao frio, a contemplar as noites solitárias pelos seus telescópios e a registar meticulosamente os movimentos de cada planeta. Hoje, programam telescópios robóticos gigantes que varrem automaticamente o céu noturno.

As crianças fazem muitas vezes uma simples pergunta: quantas estrelas há no céu? É uma pergunta de difícil resposta, mas a nossa galáxia, a Via Láctea, tem na ordem dos cem mil milhões de estrelas. Todavia, o Telescópio Hubble consegue, à partida, detetar cem mil milhões de galáxias. Assim, estima-se que existam por volta de cem mil milhões vezes cem mil milhões = 10^{22} estrelas no Universo conhecido.

Isto, por sua vez, significa que uma enciclopédia de todos os planetas, que catalogasse a sua localização, tamanho, temperatura, etc., esgotaria a memória de um supercomputador. Portanto serão necessários os computadores quânticos para que se tenha uma verdadeira medida do Universo.

Um computador quântico conseguirá analisar esta torre astronômica de dados e selecionar características cruciais dos objetos celestes. Consegue identificar dados essenciais e extrair conclusões vitais dessa massa caótica, com o mero pressionar de um botão.

Além disso, ao calcularem a fusão nas profundezas de uma estrela, os computadores quânticos talvez possam prever quando a próxima grande erupção solar paralisará a rede elétrica. Os computadores quânticos poderão também resolver as equações que descrevem os movimentos de asteroides renegados, as explosões de estrelas, a expansão do Universo e o que existe dentro de um buraco negro.

1. Asteroides Assassinos

Existe uma razão prática para analisarmos esses corpos celestes, que nos toca pessoalmente. Alguns deles podem, na verdade, ser perigosos, capazes de destruir a Terra que conhecemos. Há 66 milhões de anos, um objeto com cerca de dez quilômetros de diâmetro atingiu a Península do Yucatán, no México. A explosão libertou tanta energia que criou uma cratera com cerca de 320 quilômetros de diâmetro, gerando um tsunami com mais de um quilômetro e meio de altura e alagando o golfo do México. Libertou também uma tempestade de meteoros ardentes, que atearam incêndios infernais por toda a área. Quando as densas nuvens de poeira taparam a luz do Sol e mergulharam a Terra na penumbra, as temperaturas caíram a pique, até que os dinossauros deixaram de conseguir caçar ou encontrar comida. Talvez 75 por cento de

todas as formas de vida pereceram em resultado do impacto deste asteroide.

Os dinossauros, infelizmente, não tinham um programa espacial, e por isso não estão aqui para discutir o assunto. Mas nós temos, e um dia talvez venhamos a precisar dele, se surgir um objeto extraterrestre em rota de colisão com a Terra.

Até aqui, o governo e as forças militares identificaram e seguem cuidadosamente cerca de 27.000 asteroides. São objetos próximos da Terra (NEO), cuja trajetória cruza a da Terra e que, por isso, representam uma ameaça a longo prazo para o planeta. Muitos deles variam, em tamanho, entre um campo de futebol e vários quilómetros de dimensão. Porém, mais preocupantes são as dezenas de milhões de asteroides mais pequenos do que um campo de futebol e que não são sequer vigiados. Esses podem aparecer sem serem detetados e causar danos consideráveis se atingirem a Terra. Outro perigo vem dos cometas de longo período, cuja localização para além de Plutão é desconhecida e que podem um dia aproximar-se da Terra sem se fazerem anunciar e sem serem detetados. Assim, infelizmente, apenas uma fração de objetos com potencial de serem perigosos é, atualmente, seguida pelos investigadores.

Entrevistei uma vez o astrónomo Carl Sagan, famoso pelos seus programas televisivos de divulgação de ciência. Perguntei-lhe sobre o futuro da humanidade. Ele respondeu que a Terra se encontra no meio de «uma carreira de tiro cósmica», e que portanto era apenas uma questão de tempo até, um dia, sermos confrontados com um

asteroide gigante capaz de destruir a Terra. É por isso, disse-me ele, que temos de nos tornar uma «espécie de dois planetas». É esse o nosso destino. Devíamos explorar o espaço, disse ele, não só para descobrir novos mundos, mas para encontrar outro refúgio seguro nos céus.

Um asteroide que está a ser cuidadosamente vigiado como potencial ameaça, é o Apophis, que mede aproximadamente 300 metros de diâmetro e roçará a atmosfera da Terra em abril de 2029.

Passará a 10 por cento da distância entre a Terra e a Lua. Na verdade, passará tão perto da Terra que será visível a olho nu, passando abaixo de alguns dos nossos satélites.

Uma vez que roçará a nossa atmosfera, encontrará condições atmosféricas imprevisíveis, pelo que é impossível saber ao certo qual será a sua trajetória mais tarde, em 2036, quando fizer a passagem seguinte em torno da Terra. É provável que não atinja o planeta em 2036, mas isto não passa de um palpite.

A questão, aqui, é que os computadores quânticos podem vir a ser necessários para seguir e calcular melhores aproximações das trajetórias de asteroides potencialmente perigosos. Um dia, um asteroide passará perto da Terra, causando o pânico de massas, enquanto os cientistas tentam determinar se atingirá o planeta ou passará de forma inofensiva. É aqui que os computadores quânticos podem fazer a diferença.

No pior cenário possível, pode haver um cometa distante no espaço profundo a iniciar uma longa viagem até ao nosso sistema solar. Sem uma cauda, será invisível para os nossos telescópios. Quando der a volta por trás do nosso Sol, a luz solar aquecerá finalmente o gelo do cometa para formar uma cauda. Quando emergir subitamente de trás do Sol, os nossos telescópios detetarão finalmente a cauda do cometa e avisar-nos-ão antes do impacto catastrófico. Mas que tempo de aviso nos poderão dar os nossos telescópios? Talvez algumas semanas.

Infelizmente, não podemos esperar que Bruce Willis parta para nos salvar no vaivém espacial. Em primeiro lugar, o programa do vaivém espacial foi cancelado, e o substituto do vaivém não consegue alcançar o espaço profundo. Porém, ainda que conseguisse, seria impossível intercetar um asteroide e desviá-lo ou destruí-lo a tempo.

Em 2021, a NASA enviou a sonda DART (Teste de Redirecionamento de Asteroide Duplo) para o espaço, com o intuito de efetivamente intercetar um asteroide. Pela primeira vez na história, um objeto de fabrico humano conseguiu alterar fisicamente a trajetória de um asteroide. Este impacto poderá, esperamos, responder a muitas perguntas. Um asteroide é um conjunto de tochas soltas, que se desfaz facilmente? Ou uma massa dura e sólida que permanece intacta? Se tiver êxito, outras missões como a DART poderão visar asteroides distantes, como ensaio para o que poderá acontecer um dia.

No fim, caberá provavelmente aos computadores quânticos detetar asteroides perigosos, capazes de matar planetas, e identificar a sua trajetória exata, porque existem potencialmente milhões deles capazes de causar graves danos na Terra, muitos dos quais por detetar.

Precisamos também dos computadores quânticos para modelar o próprio impacto, de modo a obter uma estimativa de quão perigosos esses objetos podem ser se efetivamente atingirem a Terra. Podemos esperar que um asteroide atinja a Terra a velocidades na ordem dos 250.000 quilómetros por hora, e sabemos muito pouco sobre como calcular a devastação causada por um impacto a tais velocidades supersónicas. Os computadores quânticos podem ajudar a preencher as lacunas, para sabermos o que esperar se a Terra acabar na mira de um asteroide assassino que não consigamos desviar ou destruir.

2. Exoplanetas

Olhando para além do nosso sistema solar, há outra razão para usar computadores quânticos, que é catalogar todos os planetas na órbita de outras estrelas. O telescópio espacial Kepler e outros satélites e telescópios em terra já detetaram cerca de 5000 exoplanetas só aqui no nosso pedacinho da galáxia Via Láctea. Isto significa que, em média, cada estrela que vemos no céu à noite tem um planeta na sua órbita. Talvez cerca de 20 por cento de todos os exoplanetas são planetas tipo-Terra, pelo que a nossa própria galáxia pode ter milhares de milhões de planetas semelhantes à Terra para além daqueles que já identificámos.

Quando eu andava na escola primária, recordo vividamente que um dos meus primeiros livros de ciências era sobre o sistema solar. Depois de uma deslumbrante visita guiada por Marte, Saturno, Plutão e mais além, o livro dizia que decerto há outros sistemas solares na galáxia, e que o nosso será provavelmente um sistema típico. É de esperar que todos os sistemas solares tenham planetas rochosos perto de um sol e gigantes gasosos mais afastados, como Júpiter, todos a orbitar o seu sol numa trajetória circular.

Hoje sabemos como eram erradas essas suposições. Sabemos que há sistemas solares de todos os tamanhos e feitios. O nosso sistema solar, na verdade, é até invulgar. Encontrámos sistemas solares com planetas em órbitas altamente elípticas. Encontrámos gigantes gasosos maiores do que Júpiter em órbitas extremamente próximas do seu sol. Encontrámos sistemas solares com múltiplos sóis.

Assim, um dia, quando tivermos uma enciclopédia dos planetas da galáxia, ficaremos assombrados com a sua rica variedade. Se conseguir imaginar um planeta estranho, provavelmente ele existe, algures. Vamos precisar de um computador quântico para identificar e seguir todos os possíveis caminhos que descrevem a evolução planetária. Conforme lançarmos mais telescópios para o espaço, esta enciclopédia de planetas explodirá em tamanho, requerendo uma potência computacional imensa para analisar as suas atmosferas, composição química, temperatura, geologia, padrões de vento e outras características, que irão produzir montanhas de dados.

3. ET no Espaço?

Um objetivo no qual os computadores quânticos se concentrarão é a busca por outras formas de vida inteligentes. Levanta-se uma questão embaraçosa: como reconheceremos uma inteligência que pode ser completamente diferente da nossa? Como reconheceremos uma forma de vida alienígena ainda que esteja mesmo à nossa frente? Podemos precisar dos computadores quânticos para reconhecer padrões que talvez estejam totalmente ocultos dos computadores convencionais.

O astrônomo Frank Drake, na década de 50, criou uma equação que tentava fazer uma estimativa de quantas civilizações avançadas poderão existir na galáxia. Começamos pelos cem mil milhões de estrelas da galáxia e reduzimos esse número através de uma série de suposições razoáveis. Reduzimo-lo pela fração das estrelas que têm planetas, a fração que tem planetas com atmosferas, a fração que tem planetas com atmosferas e oceanos, a fração que tem planetas com vida microbiana, etc. Sejam muitas ou poucas as suposições razoáveis que fizemos sobre estes planetas, o número final é geralmente na casa dos milhares.

E, no entanto, o projeto SETI (Busca por Inteligência Extraterrestre) nunca encontrou evidências de qualquer sinal de rádio inteligente proveniente do espaço sideral. Absolutamente nenhum. Os seus poderosos radiotelescópios em Hat Creek, nas imediações de São Francisco, registam apenas silêncio absoluto ou estática. Assim, vemo-nos reduzidos ao paradoxo de Fermi: se a

probabilidade de vida alienígena no Universo é tão elevada, onde é que eles estão?

Os computadores quânticos podem ajudar a responder a essa pergunta. Uma vez que se destacam pela sua capacidade de analisar quantidades enormes de dados para encontrar pistas ocultas, e a inteligência artificial se destaca pela sua capacidade de encontrar coisas novas pela identificação de padrões, em conjunto talvez possam aprender a analisar quantidades imensas de dados para encontrar o que neles se oculta, mesmo que seja algo bizarro ou completamente inesperado.

Tive uma amostra disto mesmo quando apresentei um programa sobre inteligência alienígena para o Science Channel, no qual analisámos a inteligência de não-humanos, como o golfinho. Colocaram-me numa piscina com vários golfinhos brincalhões. O objetivo era pô-los a comunicar uns com os outros para ver se conseguíamos medir a sua inteligência. Na água havia sensores que registariam todos os seus sons.

Como pode um computador encontrar sinais de inteligência naquela algaraviada de barulho e sons sem sentido? Este tipo de gravações pode ser analisado por um programa de computador criado para procurar padrões específicos. Por exemplo, a letra do alfabeto usada mais frequentemente na língua inglesa é o «e». Ao examinarmos algo escrito por determinada pessoa, é possível classificar cada letra pela frequência com que é usada. Esta classificação das letras do alfabeto, com base na frequência de uso, é específica dessa pessoa. Duas pessoas diferentes utilizarão uma

ordenação ligeiramente diferente de letras. Na verdade, isto pode ser utilizado para encontrar falsificações. Por exemplo, se passarmos as obras de Shakespeare por este programa, é possível saber se alguma das suas peças foi escrita por outra pessoa.

Quando as gravações dos golfinhos foram analisadas pelo computador, ao início ouvia-se apenas uma cacofonia aleatória de sons. Porém, o programa fora especificamente criado para descobrir como certos sons eram ouvidos. E o computador acabou por concluir que havia uma lógica por trás de todos os guinchos e trinados.

Outros animais foram testados da mesma maneira e há uma quebra no nível de inteligência à medida que passamos para organismos mais primitivos. Na verdade, quando chegamos aos insetos, esses sinais de inteligência baixam para quase zero.

Os computadores quânticos podem analisar esta vasta coleção de dados em busca de sinais interessantes, e os sistemas de IA podem ser treinados para procurar padrões inesperados. Por outras palavras, a IA e os computadores quânticos, a trabalhar em conjunto, talvez consigam encontrar evidências de inteligência mesmo numa cacofonia de sinais caóticos provenientes do espaço.

4. Evolução Estelar

Outra aplicação imediata dos computadores quânticos é preencher as lacunas no nosso entendimento da evolução estelar e do ciclo de vida das estrelas, desde o nascimento até à morte final.

Quando estava a fazer o meu doutoramento em Física Teórica na Universidade da Califórnia, em Berkeley, o meu colega de quarto estava a fazer o doutoramento em Astronomia. Todos os dias ele me dizia até logo e declarava que ia cozinhar uma estrela. Eu julgava que era uma brincadeira. Ninguém pode cozinhar estrelas. Muitas são maiores do que o nosso Sol. Assim, um dia, perguntei-lhe finalmente o que queria dizer com aquilo. Ele pensou um pouco e depois disse-me que as equações que descrevem a evolução estelar não estão completas, mas são boas o suficiente para poderem simular o ciclo de vida de uma estrela, do nascimento à morte.

De manhã, ele introduzia no computador os parâmetros de uma nuvem de poeira de hidrogénio (tamanho, teor de gás, temperatura do gás). Depois o computador calculava como essa nuvem de gás evoluiria. À hora de almoço, a nuvem tinha colapsado sob a gravidade, aquecera e inflamara-se, tornando-se uma estrela. À tarde, arderia durante milhares de milhões de anos e agiria como um forno cósmico, fundindo ou «cozinhando» o hidrogénio e criando elementos cada vez mais pesados, como hélio, lítio e boro.

Aprendemos muito com esse tipo de simulações. No caso do nosso Sol, após cinco mil milhões de anos ele terá esgotado a maior parte do seu combustível de hidrogénio e começará a queimar hélio. Nessa altura, iniciará uma expansão radical, tornando-se numa gigante vermelha tão grande que encherá o céu e se estenderá ao longo de todo o horizonte. Engolirá os planetas todos até Marte. O céu será de fogo. Os oceanos ferverão, as montanhas derreterão e tudo regressará ao Sol. Viemos da poeira das estrelas, e à poeira das estrelas regressaremos.

Como escreveu um dia o poeta Robert Frost:

Há quem diga que o mundo acabará em fogo
Outros dizem que será em gelo.
Pelo que do desejo pude provar,
Junto-me aos que preferem o fogo.
Porém, se duas vezes o mundo perecer
Acho que sei o suficiente de ódio
Para dizer que o gelo, para destruição
É igualmente grandioso
E será quanto baste.*

A dada altura, o Sol esgotará também o hélio e encolherá, tornando-se uma estrela anã branca, que é apenas do tamanho da Terra, mas pesa quase tanto como o Sol original. À medida que arrefece, tornar-se-á uma estrela morta, uma anã negra. Assim, é esse o futuro do nosso Sol, morrer em gelo e não em fogo.

* Tradução livre do poema original, Fire and Ice.

Contudo, quando se trata de estrelas verdadeiramente enormes, na fase de gigante vermelha, essas continuarão a fundir elementos mais e mais elevados, até chegarem por fim ao elemento ferro, que tem tantos prótons que eles se repelem uns aos outros e, assim, interrompe-se finalmente a fusão. Sem fusão, a estrela colapsa sob a gravidade e as temperaturas podem disparar para os bilhões de graus. Nesse ponto, a estrela explode numa supernova, um dos maiores cataclismos da natureza.

Assim, uma estrela gigante pode morrer em fogo e não em gelo.

Infelizmente, ainda existem muitas lacunas no nosso entendimento do ciclo de vida das estrelas, desde mera nuvem de gás a supernova. Mas com os computadores quânticos a modelar o processo de fusão, talvez seja possível colmatar muitas delas.

Esta pode revelar-se uma evidência crucial quando nos preparamos para mais uma ameaça funesta: uma erupção solar monstruosa que poderá fazer com que a civilização regride centenas de anos. Para prever a ocorrência de uma erupção solar mortífera, é preciso compreender as dinâmicas nas profundezas das estrelas, o que ultrapassa em muito as capacidades de um computador convencional.

5. Evento Carrington

Por exemplo, sabemos muito pouco sobre o interior do nosso Sol, e por isso estamos vulneráveis a erupções catastróficas de energia

solar que projetam quantidades enormes de plasma superaquecido para o espaço. Em fevereiro de 2022, fomos recordados do pouco que sabemos do Sol quando uma gigantesca erupção de radiação solar atingiu a atmosfera da Terra e liquidou 40 dos 49 satélites de comunicações colocados em órbita pela SpaceX de Elon Musk. Foi o maior desastre solar da história moderna, e é muito provável que volte a acontecer, já que temos muito a aprender sobre estas descargas maciças provenientes da coroa do Sol.

A maior tempestade solar de que há registro, conhecida como Evento Carrington, teve lugar em 1859. Na altura, esta erupção solar monstruosa fez com que os fios de telégrafo em grande parte da Europa e da América do Norte se incendiassem. Criou perturbações atmosféricas por todo planeta, com auroras boreais a encobrirem o céu sobre Cuba, México, Havai, Japão e China. Nas Caraíbas, era possível ler o jornal em plena noite, com a luz da aurora. Em Baltimore, a aurora foi mais luminosa do que uma noite de lua cheia. Um mineiro de ouro, C. F. Herbert, escreveu o seguinte testemunho gráfico desse evento histórico:

Apresentou-se-me uma cena de beleza quase indizível... Luzes de todas as cores imagináveis surgiram nos céus a sul, uma cor desvanecendo-se apenas para dar lugar a outra, se possível, ainda mais bela do que a anterior... Uma imagem inesquecível, e que foi considerada na altura a maior aurora de que havia registo... O racionalista e o panteísta viram a natureza nas suas vestes mais deslumbrantes... O supersticioso e o fanático viram augúrios funestos, e acreditaram que se tratava de um aviso do Armagedão e da destruição final.¹

O Evento Carrington aconteceu quando a Era da Eletricidade estava ainda na sua infância. Desde então, foram feitas tentativas

de reconstruir os dados e calcular o que aconteceria se tivesse lugar outro Evento Carrington nos tempos modernos. Em 2013, investigadores da Lloyd's de Londres e da Investigação Atmosférica e Ambiental (AER) nos Estados Unidos, concluíram que outro Evento Carrington podia causar até 2,6 biliões de dólares de prejuízos.

A civilização moderna ficaria subitamente paralisada. Um evento dessa natureza deitaria abaixo os nossos satélites e a Internet, provocaria curto-circuitos em cabos de energia, paralisaria todas as comunicações financeiras e causaria apagões globais. Seríamos projetados talvez cento e cinquenta anos para o passado. As equipas de salvamento e reparação não poderiam vir em nosso auxílio porque também elas seriam apanhadas pelo apagão global. Com os alimentos perecíveis a apodrecer, isso podia acabar por causar motins alimentares devastadores e uma desintegração da ordem social e até dos governos, com as pessoas a lutarem desesperadamente por comida.

Voltará a acontecer? Sim. Quando poderá acontecer? Ninguém sabe. Talvez seja possível encontrar pistas em anteriores eventos semelhantes. Alguns estudos analisaram a concentração de carbono-14 e berílio-10 em núcleos de gelo, na esperança de encontrar evidências de erupções solares pré-históricas. Esses estudos encontraram possíveis erupções dessas em 774-75 d.C. e em 993-94 d.C. Na verdade, os dados do núcleo de gelo quanto ao evento de 774-75 d.C. indicam que terá sido talvez dez vezes mais energético do que o Evento Carrington. (E a erupção solar de 993-94 d.C. foi tão intensa que deixou a sua marca em madeira antiga, que os historiadores utilizaram para datar as primeiras povoações

vikings nas Américas.) Porém, nessa altura, antes da alvorada da Era da Eletricidade, a civilização mal terá dado por isso.

A maior erupção solar da história recente teve lugar em 2001. Uma enorme ejeção de massa coronal foi projetada para o espaço a mais de sete milhões de quilómetros por hora. Felizmente, a erupção não atingiu a Terra. Caso contrário, teria espalhado danos comparáveis ao Evento Carrington por todo o planeta.

Os cientistas alegam que talvez seja possível prepararmo-nos para o próximo Evento Carrington se alocarmos fundos para reforçar os nossos satélites, proteger instrumentos eletrónicos mais delicados e construir centrais elétricas redundantes. Seria um dispêndio ínfimo para prevenir uma perda catastrófica de todo o nosso sistema elétrico. Porém, regra geral, estes avisos são ignorados.

Os físicos sabem que as descargas de massa coronal ocorrem quando as linhas de força magnéticas na superfície do Sol se cruzam, cuspidas quantidades enormes de energia para o espaço. Porém, ninguém sabe o que acontece dentro do Sol para criar essas condições. Conhecemos as equações básicas de plasmas, termodinâmica, fusão, convecção, magnetismo e por aí fora, mas resolvê-las conforme acontecem no interior do Sol ultrapassa a capacidade dos computadores modernos.

Assim, talvez um dia os computadores quânticos possam resolver as complexas equações no interior do Sol e ajudar a prever

quando a próxima grande erupção solar colocará em risco a civilização. Sabemos que devem existir enormes correntes de convecção de plasma superaquecido em movimento nas profundezas do Sol, mas não fazemos ideia de quando poderá irromper a próxima tempestade solar, nem mesmo se atingirá a Terra. Assim, se um computador quântico puder «cozinhar» estrelas na sua memória, talvez consigamos preparar-nos para o próximo Evento Carrington.

No entanto, os computadores quânticos podem ir ainda mais além, resolvendo até mesmo o maior cataclismo do Universo. O Evento Carrington talvez paralisasse um continente, mas uma explosão de raios gama faria muito pior, incinerando um sistema solar inteiro.

6. Explosões de Raios Gama

Em 1967, desenrolou-se um mistério no espaço sideral. O satélite Vela, que foi especificamente lançado pelos Estados Unidos para detetar detonações não autorizadas de bombas nucleares, apanhou uma estranha radiação proveniente de uma enorme explosão de raios gama. Esta explosão gigantesca tinha origem desconhecida, e pôs em curso um jogo de adivinhas mortalmente sério. Estariam os russos a testar uma arma desconhecida de potência sem paralelo? Haveria alguma nação em vias de desenvolvimento a testar uma nova arma? Estar-se-ia perante uma falha devastadora dos serviços secretos dos Estados Unidos?

Os alarmes soaram no Pentágono. De imediato, os principais cientistas foram chamados para tentar identificar a anomalia e determinar de onde provinha. Pouco tempo depois, foram detetadas mais explosões de raios gama. Os planeadores no Pentágono suspiraram de alívio quando finalmente a origem foi identificada. Não vinham da União Soviética, mas sim de galáxias distantes. Para espanto dos cientistas, estas explosões duravam meros segundos, mas libertavam mais radiação do que uma galáxia inteira. Na verdade, libertavam mais energia do que o Sol produzirá em todos os seus dez mil milhões de anos de vida. Eram as maiores explosões de todo o Universo, a seguir ao próprio *Big Bang*.

Uma vez que estas explosões de raios gama geralmente duram apenas alguns segundos antes de se dissiparem, significava que seria difícil criar um sistema de aviso antecipado. Por fim, criou-se uma rede de satélites preparados para detetar esses eventos assim que ocorressem, e alertar de imediato os detetores na Terra para os apanhar em tempo real.

Há muitas falhas no nosso entendimento das explosões de raios gama, mas a principal teoria é que são ou colisões entre estrelas de neutrões e buracos negros, ou estrelas a caírem em buracos negros. Podem representar as fases finais da vida das estrelas. Assim, talvez sejam necessários computadores quânticos para explicar precisamente por que razão as estrelas libertam tanta energia quando atingem o ponto final do seu ciclo de vida.

Nem todos os potenciais perigos da explosão de estrelas estão muito longe da Terra. Na verdade, alguns dos átomos do seu corpo

podem ter sido «cozinhados» por uma antiga supernova há milhares de milhões de anos. Tal como já mencionámos, as estrelas como o nosso Sol, por si só, não têm calor suficiente para criar elementos para além do ferro, tais como zinco, cobre, ouro, mercúrio e cobalto. Esses elementos foram criados no calor de uma explosão de supernova que teve lugar milhares de milhões de anos antes de o nosso Sol ter nascido. Assim, a mera presença desses elementos no nosso corpo é prova de que houve uma supernova na nossa região da galáxia. Na verdade, alguns cientistas especularam que a extinção do Ordovícico, há 500 milhões de anos, que eliminou 85 por cento de toda a vida aquática na Terra, foi causada por uma explosão de raios gama relativamente próxima.

Mais perto de casa, a gigante vermelha Betelgeuse, que fica a 500-600 anos-luz da Terra, está instável e, mais cedo ou mais tarde, passará por uma explosão de supernova. É a segunda estrela mais brilhante da constelação de Orion. Quando finalmente explodir, estará suficientemente perto para, provavelmente, brilhar mais do que a Lua à noite, ao ponto de projetar sombra. Recentemente, a estrela sofreu alterações notáveis de claridade e forma, causando alguma especulação de que poderá estar prestes a explodir, embora tal seja ainda alvo de debate aceso.

A questão, no entanto, é que há muita coisa que não compreendemos sobre supernovas, e essas falhas podem vir a ser colmatadas com os computadores quânticos. Um dia, talvez os computadores quânticos possam explicar toda a história de vida das estrelas, incluindo o Sol, e também de estrelas instáveis potencialmente perigosas nas nossas imediações.

Contudo, o que tem vindo a gerar muito interesse é o produto final de uma supernova — os buracos negros.

7. Buracos Negros

Simular os buracos negros depressa esgota a potência computacional de um supercomputador digital comum. Para uma estrela grande, talvez 10 a 50 vezes mais maciça do que o nosso Sol, existe a possibilidade de vir a explodir numa supernova, transformar-se numa estrela de neutrões e talvez colapsar num buraco negro. Ninguém sabe realmente o que acontece quando uma estrela enorme colapsa gravitacionalmente, porque as leis de Einstein e a teoria quântica começam a falhar e é certamente necessária uma nova física.

Por exemplo, se seguirmos simplesmente a matemática de Einstein, o buraco negro irá colapsar por trás de uma misteriosa esfera escura chamada horizonte de acontecimentos. Este foi fotografado em 2021, unindo a luz de uma série de radiotelescópios em todo o globo para criar assim um radiotelescópio, na prática, do tamanho do próprio planeta. Revelou que o horizonte de acontecimentos no coração da galáxia chamada M87, a cerca de 53 milhões de anos-luz da Terra, era uma esfera escura rodeada por gases luminosos superaquecidos.

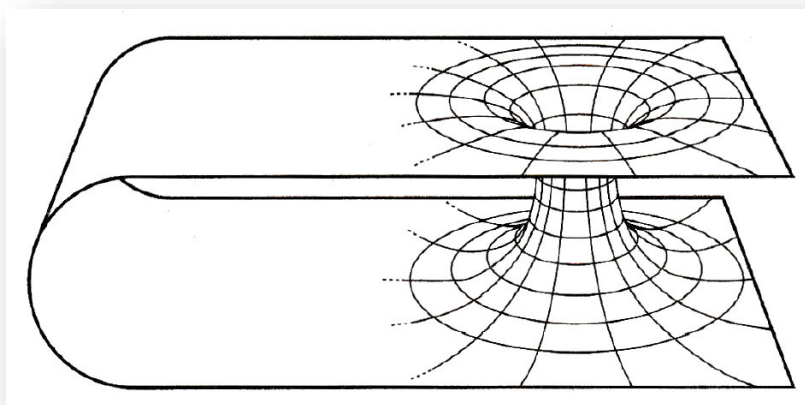


Figura 12: Computadores quânticos e buracos negros.

De acordo com a relatividade, um buraco negro giratório pode colapsar num anel de neutrões, unindo duas regiões diferentes do espaço-tempo pela criação de um *wormhole* ou uma passagem entre dois Universos. Talvez seja necessário um computador quântico para determinar a estabilidade dos mesmos sob correções quânticas.

O que se encontra dentro do horizonte de acontecimentos? Ninguém sabe. Em tempos julgou-se que um buraco negro poderia vir a colapsar numa singularidade, um ponto supercompacto de densidade inimaginável. Mas o panorama mudou, uma vez que vemos buracos negros a girar a velocidades tremendas. Em vez de um ponto singular, os físicos acreditam agora que os buracos negros podem colapsar num anel de neutrões giratório, onde os conceitos habituais de espaço e tempo são invertidos. A matemática diz que, se cairmos através desse anel, podemos na realidade não morrer mas sim entrar num universo paralelo. Assim, o anel giratório torna-se um *wormhole*, uma passagem para outro Universo para além do buraco negro.

O anel giratório funciona mais ou menos como o espelho da Alice. De um lado, temos a província tranquila de Oxford. Mas se passarmos para o outro lado do espelho, entramos no universo paralelo do País das Maravilhas.

Infelizmente, a matemática dos buracos negros não é fiável, porque é preciso incluir também os efeitos quânticos. Talvez os computadores quânticos possam dar-nos simulações da teoria de Einstein e da teoria quântica quando tempo e espaço estão distorcidos no centro de um buraco negro. Nessas condições, as equações estão altamente ligadas. Primeiro, temos a energia devida à gravidade e à dobração do espaço-tempo. Depois temos a energia devida às várias partículas subatómicas. Mas estas partículas, por sua vez, têm o seu próprio campo gravitacional, que se mistura com o campo original de formas complexas. Assim, há um emaranhado de equações, cada uma a afetar as outras, numa mistura altamente intrincada que está fora do alcance dos computadores convencionais, mas talvez não dos computadores quânticos.

Os computadores quânticos talvez possam ainda ajudar a responder a uma pergunta ancestral e algo embaraçosa: de que é feito o Universo, afinal?

8. Matéria Escura

Após dois mil anos de especulação e incontáveis experiências, ainda não conseguimos responder à simples pergunta feita pelos gregos: de que é feito o mundo?

A maioria dos manuais da escola primária diz que o Universo é feito essencialmente de átomos. Porém, sabemos hoje que essa afirmação está errada. O Universo, na realidade, é essencialmente

feito de matéria e energia escuras, invisíveis e misteriosas. A maior parte do Universo é escura, para além da capacidade de observação e estudo dos nossos telescópios, e fora da capacidade de deteção dos nossos sentidos.

A primeira pessoa que teorizou a matéria escura foi lorde Kelvin, em 1884. Ele reparou que a quantidade de massa necessária para justificar a rotação da galáxia era muito superior à massa concreta das estrelas. Concluiu que a maioria das estrelas era, na verdade, escura, que essas estrelas não eram luminosas. Mais recentemente, astrónomos como Fritz Zwicky e Vera Rubin confirmaram essa estranha observação, verificando que a galáxia e os aglomerados estelares estão a girar demasiado depressa e, de acordo com as nossas equações, deviam, portanto, desfazer-se. Na verdade, a nossa galáxia gira dez vezes mais depressa do que seria de esperar. Porém, devido à enorme fé que os astrónomos têm na teoria da gravidade de Newton, este resultado foi, em grande medida, ignorado.

Ao longo das décadas, descobriu-se que não só a Via Láctea mas todas as galáxias exibiam este mesmo fenómeno curioso. Os astrónomos começaram a perceber que as galáxias continham matéria escura invisível que as mantinha unidas. Este halo era muitas vezes mais maciço do que a própria galáxia. A maior parte do Universo, ao que parecia, era feita desta misteriosa matéria escura.

(Ainda mais misteriosa é a energia escura, que é uma estranha forma de energia que preenche o vácuo do espaço e até faz com

que o Universo se expanda. Embora a energia escura forme até 68 por cento do teor conhecido de matéria/energia do Universo, não sabemos quase nada sobre ela.)

Este quadro resume os mais recentes dados quanto ao que os cientistas pensam sobre a composição do mundo:

Energia Escura	68 por cento
Matéria Escura	27 por cento
H e He	5 por cento
Elementos mais Elevados	1 por cento

Sabemos agora que muitos dos elementos que compõem o nosso corpo representam apenas 0,1 por cento do Universo. Somos verdadeiramente anomalias. Porém, aquilo que forma a maior parte do Universo possui propriedades estranhas. Uma vez que a matéria escura não interage com a matéria comum, se a segurássemos na mão passaria através dos nossos dedos e cairia para o chão. E não se ficaria por aí; continuaria a cair através de terra e cimento, como se a Terra não estivesse ali. Atravessaria a crosta do planeta e chegaria à China. Aí, inverteria lentamente a sua direção devido à atração gravitacional da Terra e voltaria para trás pelo mesmo caminho, até chegar de novo à nossa mão. Depois oscilaria para trás e para a frente através do planeta.

Hoje, temos mapas desta matéria invisível. A maneira como determinamos a presença de matéria escura invisível é a mesma

pela qual sabemos que os nossos óculos têm lentes. O vidro distorce a luz, e por isso conseguimos observar os seus efeitos. A matéria escura distorce a luz praticamente da mesma maneira. Assim, se efetuarmos correções para a refração da luz através da matéria escura, conseguimos gerar mapas 3D da mesma. E, tal como previsto, descobriu-se que a matéria escura se concentra em torno das galáxias, mantendo-as coesas.

Porém, embaraçosamente, não sabemos do que é feita a matéria escura. Ao que parece, é feita de uma substância nunca antes vista, algo que fica de fora do Modelo Padrão de partículas subatômicas.

Assim, a chave para resolver o mistério da matéria escura talvez seja compreender o que está para além do Modelo Padrão de partículas.

9. Modelo Padrão de Partículas

Os computadores quânticos, tal como vimos, exploram as leis contraintuitivas da mecânica quântica para efetuarem os seus cálculos. Mas a mecânica quântica propriamente dita não tem estado parada. Tem vindo a evoluir, à medida que grandes aceleradores de partículas lançam prótons uns contra os outros para descobrir os constituintes básicos da matéria. De momento, o acelerador mais poderoso do mundo é o Grande Colisor de Hadrões (LHC), nos arredores de Genebra, Suíça, a maior máquina científica alguma vez construída. É um tubo com 27 quilómetros de

circunferência, com ímanes tão potentes que conseguem projetar prótons a 14 bilhões de elétrons-volt.

Visitei o LHC para uma série que apresentei na BBC e até toquei no tubo que se encontra no coração do acelerador, quando estava ainda a ser construído. Foi uma experiência avassaladora, saber que, dali a poucos anos, haveria prótons a serem projetados com energias inimagináveis no interior daquele tubo.

Depois de décadas de trabalho árduo no LHC, os físicos convergiram finalmente em algo a que se chama o Modelo Padrão ou a Teoria de Quase Tudo. A velha equação de Schrödinger, como vimos, explicava a interação dos elétrons com a força eletromagnética. O Modelo Padrão, todavia, unifica a força eletromagnética também com as forças nucleares forte e fraca.

Assim, o Modelo Padrão de partículas representa a versão mais avançada da teoria quântica. É o culminar do trabalho de dezenas de galardoados com o Prémio Nobel, e o produto final de milhares de milhões de dólares gastos em gigantescos colisores de átomos. Devia ser, para todos os efeitos, um marco cintilante do mais nobre feito alcançado pela mente humana.

Infelizmente, é uma trapalhada.

Em vez de ser o mais delicado produto da inspiração divina, é uma grosseira salgadeira de partículas. Consiste numa coleção desconcertante de partículas subatômicas que não parece ter

grande lógica. Tem 36 quarks e antiquarks, mais de 19 parâmetros livres que podem ser ajustados à vontade, três gerações de partículas idênticas e uma data de partículas exóticas chamadas gluões, bósons W e Z, bósons de Higgs e partículas de Yang-Mills, entre outras.

É uma teoria que só uma mãe conseguiria amar. É como juntar um oricterope, um ornitorrinco e uma baleia com fita-cola e chamar-lhe a criação mais perfeita da natureza, produto de milhões de anos de evolução.

Pior ainda, a teoria não faz qualquer menção à gravidade e não consegue explicar a matéria escura e a energia escura, que compõem a vasta maioria do Universo conhecido.

Só há um motivo para que os físicos estudem esta teoria confrangedora: funciona. Descreve inegavelmente o mundo de baixa energia das partículas subatômicas como mesões, neutrinos, bósons W e por aí fora. O Modelo Padrão é tão desastrado e feio que a maioria dos físicos pensa que é apenas uma aproximação de baixa energia a uma teoria mais bela que existirá em energias mais altas. (Parafraseando Einstein, quando vemos a cauda de um leão, desconfiamos de que mais cedo ou mais tarde aparecerá um leão.)

Porém, durante os últimos cinquenta anos, os físicos não viram qualquer desvio do Modelo Padrão.

Até agora.

10. Para Além do Modelo Padrão

A primeira indicação de uma fenda no Modelo Padrão veio do Laboratório Nacional de Aceleração Fermi, nos arredores de Chicago, em 2021. O enorme detetor de partículas aí existente encontrou um ligeiro desvio nas propriedades magnéticas dos mesões mu (que se costumam encontrar nos raios cósmicos). Foi preciso analisar uma quantidade imensa de dados para encontrar este desvio ínfimo, mas, caso se confirme, pode assinalar a presença de novas forças e interações para além do Modelo Padrão.

Pode significar que estamos a obter um vislumbre do mundo para além do Modelo Padrão, de onde poderá emergir uma nova física, talvez a teoria das cordas.

Os computadores quânticos destacam-se como motores de busca capazes de encontrar a esquiva agulha no palheiro. Muitos físicos acreditam que os nossos aceleradores de partículas acabarão por encontrar evidências conclusivas de partículas para além do Modelo Padrão, que revelarão a verdadeira simplicidade e beleza do Universo.

Os físicos já estão a usar computadores quânticos para compreender as dinâmicas misteriosas das interações de partículas. No LHC, dois raios de prótons de alta energia são projetados um contra o outro a uma energia de 14 biliões de eletrões-volt, criando energias que não se viam desde o princípio do Universo. Esta colisão titânica cria uma chuva gigantesca de detritos subatômicos. Nessa

colisão colossal, são criados uns assombrosos bilhão de *bytes* por segundo de dados, que são depois analisados por um computador quântico.

Além disso, os físicos estão já a formular planos para um substituto do Grande Colisor de Hadrões, chamado Colisor Circular do Futuro, que será construído no CERN, na Suíça. Com cem quilómetros de circunferência, deixará muito para trás os 27 quilómetros do LHC. Custará 23 mil milhões de dólares e alcançará a energia astronómica de cem biliões de eletrões-volt. Será, de longe, a maior máquina científica no planeta.

Se for realmente construído, este colisor recriará as condições presentes no nascimento do Universo. Deve levar-nos tão perto quanto é humanamente possível da derradeira teoria, a Teoria de Tudo, que Einstein procurou nos últimos trinta anos da sua vida. Nenhum computador convencional conseguiria lidar com a enchente de dados proveniente dessa máquina. Por outras palavras, talvez o segredo da própria criação possa vir a ser desvendado por um computador quântico.

11. Teoria das Cordas

Até agora, a principal (e única) candidata a uma teoria quântica para além do Modelo Padrão é a teoria das cordas.² Todas as teorias concorrentes se revelaram divergentes, anómalas, inconsistentes ou com aspetos cruciais da natureza em falta. Qualquer um destes defeitos seria fatal para uma teoria física.

(Recebo muitos *e-mails* de pessoas que alegam ter encontrado, por fim, a Teoria de Tudo. Digo-lhes que há três critérios a que essa teoria tem de obedecer:

1 -Tem de incluir toda a teoria da gravidade de Einstein.

2 -Tem de incluir o Modelo Padrão de partículas completo, com todos os seus quarks, glúons, neutrinos, etc.

3 -Tem de ser finita e livre de anomalias.

Até agora, a única teoria que consegue satisfazer estes três simples critérios é a teoria das cordas.)

A teoria das cordas diz que todas as partículas elementares não são mais do que notas musicais em minúsculas cordas que vibram. Tal como um elástico que pode oscilar em diferentes frequências, a teoria das cordas diz que cada vibração deste minúsculo elástico corresponde a uma partícula, de modo que os eletrões, quarks, neutrinos e todos os outros participantes do Modelo Padrão são apenas notas musicais diferentes. A física corresponde então às harmonias que é possível tocar nessas cordas. A química corresponde às melodias criadas pelas cordas em vibração. O Universo pode ser comparado a uma sinfonia de cordas. E, por último, a «mente de Deus» sobre a qual Einstein escreveu, corresponderia à música cósmica a ressoar pelo Universo.

Admiravelmente, quando calculamos a natureza dessas vibrações, encontramos a gravidade, a força cuja ausência é notória no Modelo Padrão. Assim, a teoria das cordas dá-nos uma razão credível para acreditar que pode ser a Teoria de Tudo. (Na verdade, se Einstein nunca tivesse nascido, a relatividade geral teria sido descoberta como produto derivado da teoria das cordas, apenas uma das notas mais baixas na corda em vibração.)

Porém, se esta teoria pode unificar tanto a teoria da gravidade como as forças subatômicas, por que estão os galardoados com o Nobel divididos em relação à teoria, com alguns a dizerem que é um beco sem saída, enquanto outros dizem que esta pode ser a teoria que escapou a Einstein? Um dos problemas é o seu poder de previsão. Não só contém o Modelo Padrão de partículas, como inclui muito mais. Na verdade, pode ter um número infinito de soluções, uma abundância de tesouros. Se assim é, qual das soluções descreve o nosso Universo?

Por um lado, sabemos que todas as grandes equações têm um número infinito de soluções. A teoria das cordas não é exceção. Até a teoria de Newton consegue explicar um número infinito de coisas, como bolas de basebol, foguetões, arranha-céus, aviões, etc. É preciso especificar adiantadamente aquilo que vamos investigar, ou seja, é preciso especificar as condições iniciais.

Mas a teoria das cordas é uma teoria de todo o Universo. Assim, é preciso especificar as condições iniciais do *Big Bang*. Só que ninguém sabe quais as condições que desencadearam a explosão cósmica inicial que criou o Universo.

A isto chama-se o problema da paisagem, o facto de parecer haver um número infinito de soluções para a teoria das cordas, criando uma vasta paisagem de possibilidades. Cada ponto nessa paisagem corresponde a um Universo inteiro. Um desses pontos pode explicar as características do nosso Universo.

Mas qual deles é o nosso? Será a teoria das cordas uma teoria de tudo, ou uma teoria de qualquer coisa?

De momento, não há consenso para a resolução deste problema. Uma solução pode ser a criação de uma nova geração de aceleradores de partículas, como o Colisor Circular do Futuro já mencionado, o Colisor Circular Eletrónico de Positrões que a China propôs, ou o Colisor Linear Internacional do Japão. Não há, contudo, qualquer garantia de que mesmo esses projetos ambiciosos solucionem esta questão importante.

12. Os Computadores Quânticos Podem Ter a Chave

O meu ponto de vista é que talvez os computadores quânticos possam oferecer a derradeira resposta a esta questão. Vimos anteriormente como, na fotossíntese, a natureza usa a teoria quântica para estudar uma vasta coleção de caminhos pelo princípio de ação mínima. Um dia, talvez seja possível introduzir a teoria das cordas num computador quântico para selecionar o caminho correto. Talvez muitos dos caminhos que se encontram na paisagem sejam instáveis e se decomponham rapidamente,

deixando apenas a solução correta. Talvez o nosso Universo surja como o único Universo estável.

Assim, os computadores quânticos podem ser o passo final para encontrar a Teoria de Tudo.

Há precedentes para tal. A teoria que melhor descreve a teoria da força nuclear forte chama-se cromodinâmica quântica (QCD). É uma teoria de partículas subatômicas que une os quarks para criar o neutrão e o próton. Originalmente, pensava-se que os físicos seriam inteligentes o suficiente para resolver completamente a QCD usando matemática pura. Isto provou ser uma ilusão.

Hoje, os físicos praticamente desistiram de tentar resolver a QCD à mão, e contam em vez disso com supercomputadores gigantescos para resolver essas equações. A isto chama-se QCD na rede, e divide o espaço e o tempo em milhares de milhões de cubos minúsculos, formando uma rede. Resolvem-se as equações de um dos cubos minúsculos, usa-se isso para resolver as equações do cubo adjacente, e repete-se o processo para todos os seguintes. Assim, o computador acabará por resolver para todos os cubos adjacentes, um após outro.

De forma semelhante, talvez sejamos obrigados a recorrer aos computadores quânticos para resolver todas as equações da teoria das cordas. Esperemos que a verdadeira teoria do Universo possa surgir desse processo. Assim, os computadores quânticos podem ter a chave para a própria criação.

¹ «The World Should Think Better About Catastrophic and Existential Risks», *The Economist*, 25 de junho de 2020; <http://www.economist.com/briefing/2020/06/25/the-world-should-think-better-about-catastrophic-and-existential-risks>.

² Para uma discussão sobre a teoria das cordas, ver Michio Kaku, *The God Equation: The Quest for a Theory of Everything* (Nova Iorque: Anchor, 2022), em português, *A Equação Divina: A busca inacabada por uma teoria de tudo e o futuro da física* (Lisboa: Bertrand, 2021)

CAPÍTULO 17

Um Dia No Ano 2050

1. Janeiro de 2050, 6 da manhã

O seu despertador está a tocar e você acorda com uma dor de cabeça terrível.

Molly, a sua assistente robótica pessoal, aparece subitamente no ecrã da parede. Anuncia em voz animada:

— São seis horas da manhã. Pediu-me para o acordar.

Ensonado, você responde:

— Oh, dói-me a cabeça. O que é que fiz ontem à noite para merecer isto?

Molly diz:

— Lembra-se, estive na festa para celebrar a abertura do novo reator de fusão. Deve ter bebido demasiado.

Aos poucos, começa a recordar-se de tudo. Lembra-se de que é engenheiro na Quantum Technologies, uma das maiores companhias de computadores quânticos do país. Os computadores quânticos estão por todo o lado, ou assim parece, e a festa na noite anterior foi para celebrar a abertura do mais recente reator de fusão, um marco tornado possível pelos computadores quânticos.

Lembra-se de um repórter na festa lhe perguntar:

— Porquê este entusiasmo todo, tanto alarido por causa de gás aquecido?

E você respondeu:

— Os computadores quânticos finalmente determinaram como estabilizar o gás quente no interior de um reator de fusão, de modo a podermos extrair quantidades quase ilimitadas de energia da fusão do hidrogénio em hélio. Pode ser a chave para resolver a crise energética.

Isso significa que há dezenas de reatores de fusão a serem inaugurados por todo o mundo, e muitas festas onde beber demais. Abriu-se uma nova Era de energia barata e renovável, graças aos computadores quânticos.

Mas agora está na hora de ver as últimas notícias.

— Molly — pede —, por favor mostra-me as notícias desta manhã sobre desenvolvimentos na ciência.

O ecrã na parede acende-se subitamente. Sempre que ouve as últimas notícias, você gosta de fazer um jogo consigo próprio. Depois de ouvir cada notícia de ciência, tenta identificar quais dessas notícias, se é que há alguma, que não foi possível graças aos computadores quânticos.

A apresentadora do vídeo declara:

— O governo aprovou uma nova frota de jatos supersónicos, reduzindo assim em muito o tempo necessário para atravessar os oceanos Pacífico e Atlântico.

Claro que foram os computadores quânticos que, através do recurso a túneis de vento virtuais, encontraram o *design* aerodinâmico ideal para eliminar o som dos estrondos sónicos, o que ajudou a tornar possível esta nova enchente de jatos comerciais supersónicos.

A seguir, a apresentadora anuncia:

— Os nossos astronautas em Marte conseguiram construir um grande painel solar e um conjunto de superbaterias para armazenar energia para a colónia no planeta vermelho.

Você sabe que isto só foi possível porque os computadores quânticos criaram a superbateria que alimenta o posto avançado em Marte, e que reduziu também a nossa dependência do carvão e de centrais a petróleo na Terra.

A seguir, a apresentadora anuncia:

— Médicos em todo o mundo anunciaram um novo medicamento para a doença de Alzheimer, capaz de impedir a acumulação da proteína amiloide que causa esta doença fatal. O resultado pode afetar milhões de vidas.

Sente-se orgulhoso porque a sua companhia esteve na vanguarda da utilização de computadores quânticos para isolar o tipo específico de proteína amiloide responsável pela doença de Alzheimer.

Ao ouvir as notícias de ciência, sorri para consigo, porque, uma vez mais, todas as notícias de ciência foram possibilitadas, direta ou indiretamente, pelos computadores quânticos.

Depois de ouvir as notícias, arrasta-se até à casa de banho, toma um duche e lava os dentes. Enquanto vê a água desaparecer pelo ralo, sabe que a sua água residual está a ser silenciosamente enviada para um laboratório biológico, onde é analisada em busca de células cancerígenas. Milhões de pessoas ignoram ditosamente que fazem um *checkup* médico completo várias vezes por dia, com

um computador quântico silenciosamente ligado à sua casa de banho.

Uma vez que os computadores quânticos conseguem agora identificar células cancerígenas anos antes da formação de um tumor, o cancro foi reduzido a algo ao nível da constipação comum. Como há historial de cancro na sua família, você pensa: «Felizmente o cancro já não é o assassino que foi em tempos.»

Por fim, enquanto se veste, o ecrã ilumina-se de novo. Desta vez, é a imagem do seu médico de IA que surge na parede.

— O que se passa desta vez, doutor? Boas notícias, espero?

Robo-doc, o seu médico robótico pessoal, diz:

— Bom, tenho boas notícias e más notícias. Primeiro, as más. Ao analisar as células nas suas águas residuais da semana passada, foi determinado que tem cancro.

— Oh, se essas são as más notícias, quais são as boas? — pergunta, ansioso.

— As boas notícias são que localizámos a origem e encontrámos apenas algumas centenas de células cancerígenas a crescer no seu pulmão. Não é motivo de preocupação. Analisámos a genética das células cancerígenas e vamos dar-lhe uma injeção para reforçar o sistema imunitário e derrotar este cancro. Acabámos de receber a

mais recente remessa de células imunitárias geneticamente modificadas, criadas por computadores quânticos da sua empresa para atacar este tipo de cancro em particular.

Que alívio. Faz-lhe então outra pergunta:

— Diga-me a verdade. Se os computadores quânticos não tivessem detetado as células cancerígenas nos meus fluidos corporais, o que teria acontecido há, digamos, dez anos?

Robo-doc responde:

— Há algumas décadas, antes de os computadores quânticos se terem generalizado, nesta altura já teria milhares de milhões de células cancerígenas a formar um tumor no seu corpo e morreria em menos de cinco anos.

Você engole em seco. É um orgulho trabalhar para a Quantum Technologies.

De súbito, Molly interrompe o Robo-doc.

— Acaba de chegar uma mensagem. Tem uma reunião urgente na sede. A sua presença é necessária, imediatamente, em pessoa.

Oh-oh, pensa com os seus botões. Normalmente, as tarefas mais mundanas são feitas *online*. Mas desta vez convocaram toda a gente, em pessoa. Deve ser uma reunião importante.

— Cancela os outros compromissos e chama o meu carro — pede a Molly.

O seu carro, um veículo autónomo sem condutor, chega minutos depois, para o levar ao escritório. O trânsito não está mau, porque há milhões de sensores embutidos na estrada e ligados a computadores quânticos que ajustam cada semáforo, segundo a segundo, para eliminar engarrafamentos.

Quando chega, sai do carro e diz:

— Vai estacionar. E prepara-te para me vir buscar mais logo, assim que eu te chamar.

O carro liga-se ao computador quântico que monitoriza todo o tráfego na cidade e identifica o lugar de estacionamento vago mais próximo.

Entra na sala de reuniões e, na sua lente de contato, vê as biografias das pessoas sentadas à volta da mesa. Os mandachuvas da companhia estão lá todos. Deve ser uma reunião importante.

O presidente da companhia dirige-se àquele distinto grupo de executivos.

— É com choque que anuncio que, esta semana, os nossos computadores quânticos detetaram um vírus nunca antes visto. A nossa rede internacional de sensores em sistemas de esgotos, a

primeira linha de defesa contra vírus mortíferos, detetou um novo vírus perto da fronteira da Tailândia. Este vírus apanhou-nos desprevenidos. É altamente letal e muitíssimo contagioso, provavelmente originário em alguma espécie de ave. Não tenho de vos recordar que a última pandemia nos custou mais de um milhão de vidas só nos Estados Unidos e quase arrasou a economia mundial. Selecionei um grupo dos nossos melhores funcionários para ir imediatamente até à Ásia analisar a ameaça. Temos o transporte supersónico pronto para descolar. Alguma pergunta?

Várias mãos erguem-se no ar. Muitas das perguntas são em línguas estrangeiras, mas a sua lente de contato traduz tudo para inglês.

E você que estava a planear um belo fim de semana sossegado. Todos esses planos caíram por terra. Desta vez, é um carro voador que o leva ao aeroporto, onde o aguarda um transporte supersónico. Toma o pequeno-almoço em Nova Iorque, almoça sobre o Alasca e janta em Tóquio, após o que se segue uma reunião. «Os jatos supersónicos são uma grande melhoria em relação aos jatos convencionais, com aquelas viagens agonizantes de treze horas entre Nova Iorque e Tóquio», pensa com os seus botões.

Depois lembra-se de que, na escola primária, leu nos manuais de História sobre o pesadelo causado pela Pandemia de 2020, quando o mundo foi apanhado totalmente despreparado para lidar com um vírus desconhecido. Na verdade, esse vírus matou algumas pessoas da sua família. Desta vez, porém, todas as peças estão nos seus lugares.

No dia seguinte, é posto a par dos desenvolvimentos. O seu gerente diz:

— Felizmente, os computadores quânticos conseguiram identificar a genética deste vírus, localizar os seus pontos fracos ao nível molecular e produzir planos para vacinas que serão eficazes contra a doença. Tudo isto foi feito em tempo recorde graças aos computadores quânticos, que conseguiram analisar também os registos aéreos e ferroviários para ver de que forma o vírus poderá ter-se já espalhado a nível internacional. Os sensores em todos os principais aeroportos e estações de comboio foram calibrados para identificar o cheiro específico deste novo vírus.

Depois de uma semana de visita aos laboratórios da companhia, regressa a Nova Iorque confiante de que a sua equipa tem o novo vírus controlado. Orgulha-se de os seus esforços poderem salvar alguns milhões de vidas e impedir o colapso da economia mundial.

Em casa, pergunta a Molly quais são os seus compromissos imediatos.

— Bom, desta vez temos um pedido de entrevista por parte de uma das maiores revistas do planeta. Vão publicar uma reportagem sobre computadores quânticos. Posso fazer a marcação?

Fica agradavelmente surpreendido quando a jornalista chega ao seu escritório. Sarah está bem preparada, é culta e muito profissional.

Sarah diz:

— Parece que os computadores quânticos estão em todo o lado, nos dias que correm. Os antigos computadores digitais, como dinossauros, estão a ir para a sucata. Para onde quer que me vire, vejo os computadores quânticos a substituírem a anterior geração de computadores de silício. Sempre que falo ao telemóvel, dizem-me que estou na realidade a falar com um computador quântico algures na nuvem. Mas diga-me, como é que todo este progresso ajudará a resolver os problemas sociais mais prementes? Quer dizer, sejamos francos. Por exemplo, ajudará a alimentar os pobres?

Você responde sem hesitar:

— Bom, na verdade a resposta é sim. Os computadores quânticos desvendaram o segredo de como extrair nitrogénio do ar que respiramos todos os dias e de como convertê-lo em ingredientes para fertilizantes. Isto está a criar uma Segunda Revolução Verde. Os mais pessimistas diziam que, com a explosão populacional, haveria fome, guerras, migrações em massa, motins alimentares e por aí fora. Nada disso aconteceu, graças aos computadores quânticos...

— Espere aí — interrompe Sarah. — E os problemas de aquecimento global? Basta pestanejar e a Internet na minha lente de contato só tem imagens de incêndios florestais enormes, secas, furacões, cheias... O tempo parece ter enlouquecido.

— Sim — admite você —, a indústria lançou para a atmosfera quantidades enormes de CO₂ ao longo do último século, e estamos finalmente a pagar o preço. Todas as previsões se realizaram. No entanto, estamos a contra-atacar. A Quantum Technologies tem estado na vanguarda dos esforços para criar uma superbateria capaz de armazenar vastas quantidades de energia elétrica, diminuindo em muito o custo da energia e ajudando a introduzir a tão aguardada Era Solar. Já conseguimos ter energia quando o Sol não brilha e os ventos não sopram. A energia de tecnologias renováveis, incluindo as centrais de fusão que estão a abrir por todo o mundo, é hoje mais barata do que a energia dos combustíveis fósseis, pela primeira vez na história. Estamos a virar uma nova página na questão do aquecimento global. Esperemos ainda ir a tempo.

— Muito bem, deixe-me fazer-lhe uma pergunta pessoal. Como é que os computadores quânticos afetaram a sua família e entes queridos? — pergunta Sarah.

Você responde, tristemente:

— A minha família foi muito afetada pela doença de Alzheimer. Assisti a esse sofrimento em primeira mão, com a minha mãe. De início, esquecia-se de coisas que tinham acontecido minutos antes. Depois, aos poucos, perdeu a noção da realidade e falava sobre coisas que nunca tinham acontecido. A seguir, esqueceu-se dos nomes de todos aqueles que amava. Por fim, esqueceu-se até de quem era. Mas orgulho-me de dizer que os computadores quânticos estão a resolver o problema. Ao nível molecular, os computadores

quânticos isolaram a proteína amiloide defeituosa específica que afeta o cérebro. A cura para a doença de Alzheimer não tardará.

A seguir, ela pergunta:

— Eis uma pergunta meramente hipotética. Fala-se muito sobre a possibilidade de os computadores quânticos estarem perto de descobrir uma forma de abrandar ou travar o processo de envelhecimento. Diga-me, esses boatos são verdadeiros? Estão mesmo prestes a encontrar a Fonte da Juventude?

— Bem — responde você —, ainda não temos todos os pormenores, mas sim, é verdade: os nossos laboratórios conseguiram usar terapia genética, CRISPR, e computadores quânticos para corrigir os erros causados pelo envelhecimento. Sabemos que o envelhecimento é um acumular de erros nos nossos genes e células. E agora estamos a descobrir o método de corrigir esses erros e, por consequência, abrandar e talvez até inverter o processo de envelhecimento.

— Isso leva-me à minha última pergunta. Se pudesse ter mais uma vida, o que gostaria de ser? Por exemplo, eu, como jornalista, adorava ter mais uma vida em que pudesse ser escritora. E o senhor?

— Bom — responde —, viver várias vidas já não é uma possibilidade assim tão disparatada. Mas se eu tivesse mais uma vida, gostaria de aplicar os computadores quânticos para resolver a

derradeira questão sobre o Universo. De onde é que veio? Por que é que ocorreu o *Big Bang*? O que aconteceu antes? Nós, humanos, somos demasiado primitivos para resolver estas questões fantásticas, mas aposto que, um dia, os computadores quânticos poderão encontrar a resposta.

— Descobrir o sentido do Universo? Uau, é uma grande ambição. Mas não tem medo do que os computadores quânticos poderão encontrar? — pergunta ela.

— Lembra-se do que aconteceu no fim de *À Boleia pela Galáxia*? Depois de muita antecipação e entusiasmo, um supercomputador gigante finalmente calculou o sentido do Universo e a resposta era o número 42. Bom, estamos a falar de uma obra de ficção. Hoje em dia, contudo, creio que poderemos usar os computadores quânticos para solucionar o problema. A sério — responde.

Depois da entrevista, despede-se com um aperto de mão e um agradecimento a Sarah pela conversa fantástica. E, depois, convida-a discretamente para jantar consigo. O artigo é um grande sucesso, informando milhões de pessoas sobre como os computadores quânticos mudaram a economia, a medicina e o nosso modo de vida. Outro bónus foi ter oportunidade de conhecer melhor Sarah.

É com grande satisfação que descobrem ter muito em comum. Ambos são pessoas muito motivadas e bem informadas. Mais tarde, convida-a para visitar o novo salão de videojogos da Quantum

Technologies, onde os mais poderosos computadores quânticos criam os jogos virtuais mais realistas possível. Divertem-se muito a jogar jogos engraçados, que criam cenas fantásticas e exóticas através das poderosas simulações dos computadores quânticos. Num deles, exploram o espaço sideral. Noutro, uma estância à beira-mar. A seguir, o cume da montanha mais alta. É espantoso como são realistas, ao mais pequeno pormenor. Mas a sua viagem preferida é ver a lua cheia erguer-se sobre as montanhas distantes. Ao ver a Lua iluminar a floresta, não consegue deixar de se sentir perto da natureza.

Diz a Sarah:

— Sabes, foi graças ao programa lunar, ao ver os astronautas começarem a explorar o Universo, que me interessei por ciência.

Sarah responde:

— Eu também, mas para mim o que me empolgava era saber que um dia poderia ver mulheres a caminhar na Lua.

Por fim, à medida que se aproximam mais e mais, você finalmente pede-a em casamento e, para sua felicidade, ela aceita.

Mas onde ir passar a lua de mel?

Com todas as notícias sobre a queda dos custos das viagens espaciais e voos comerciais para o espaço, ela pede autorização à revista para fazer outra reportagem.

— Sei o sítio ideal para a nossa lua de mel — diz Sarah. — Quero ir de lua de mel para a Lua.

1. Enigmas Quânticos

O cosmólogo Stephen Hawking disse uma vez que os físicos são os únicos cientistas que podem dizer a palavra «Deus» sem corar. No entanto, se quiser mesmo ver um físico corar, pode colocar-lhe perguntas filosóficas profundas para as quais não há respostas concretas.

Eis uma curta lista de perguntas que deixarão sem palavras a maioria dos físicos, uma vez que se encontram na fronteira entre filosofia e física. Todas elas afetam a existência dos computadores quânticos, e vamos debruçar-nos sobre cada uma delas.

1.1 Deus Teve Realmente Uma Escolha na Criação do Universo?

Einstein considerava que esta era a pergunta mais profunda e reveladora que podíamos fazer. Poderia Deus ter criado o Universo de outra forma qualquer?

1.2 O Universo É Uma Simulação?

Seremos apenas autómatos que vivem num videojogo? Será tudo aquilo que vemos e fazemos um derivado de uma simulação de computador?

1.3 Os Computadores Quânticos Computam em Universos Paralelos?

Poderemos resolver o problema de medição dos computadores quânticos se introduzirmos um multiverso de Universos?

1.4 Será O Universo Um Computador Quântico?

Poderá tudo aquilo que nos rodeia, desde partículas subatômicas a aglomerados galácticos, ser evidência de que o próprio Universo é um computador quântico?

2. Deus Teve Escolha?

Einstein passou grande parte da sua vida a perguntar a si próprio se as leis do Universo eram únicas ou apenas uma de várias possibilidades. Quando ouvimos falar pela primeira vez de computadores quânticos, o seu funcionamento interno parece bizarro e louco. Parece incrível que, a um nível fundamental, os eletrões possam exibir um comportamento tão irreconhecível, como estar em dois sítios ao mesmo tempo, tunelar através de barreiras sólidas, transmitir informação mais rápido do que a luz e analisar instantaneamente um número infinito de caminhos entre dois pontos. Perguntamos a nós próprios, o Universo tem mesmo de ser assim tão estranho? Se tivéssemos escolha, não conseguiríamos voltar a organizar as leis da física de modo que fossem mais lógicas e sensatas?

Quando Einstein se via preso num problema, costumava dizer: «Deus é subtil, mas não é malicioso.» Porém, perante os paradoxos da mecânica quântica, Einstein pensava, por vezes: «Talvez Deus seja malicioso afinal de contas.»

Ao longo da história, os físicos contemplaram a possibilidade de Universos imaginários, obedecendo a um conjunto diferente de leis fundamentais, para ver se as leis da natureza são únicas e para ver se é possível criar um Universo melhor a partir do zero.

Até os filósofos se debateram com esta questão cósmica. Afonso, *o Sábio*, disse, uma vez: «Se eu tivesse estado presente na Criação, teria dado algumas sugestões úteis para uma melhor organização do Universo.»

O juiz e crítico escocês, lorde Jeffrey, queixava-se de todas as imperfeições do nosso Universo. Dizia: «Malfadado sistema solar. Má iluminação, planetas demasiado distantes, atormentado por cometas; um esquema muito fraco; eu próprio teria feito [um Universo] melhor.»

Contudo, os cientistas, por mais que se esforçassem, nunca conseguiram melhorar as leis da mecânica quântica. Geralmente, chegam à conclusão de que as alternativas à mecânica quântica produzem Universos instáveis ou sofrem de alguma falha oculta e fatal.

Para responder a esta questão filosófica que fascinou Einstein, os físicos começam frequentemente por elencar as qualidades que queremos que um Universo tenha.

Primeiro, e acima de tudo, queremos que o nosso Universo seja estável. Não queremos que se desfaça nas nossas mãos, deixando-nos sem nada.

Surpreendentemente, este critério é extremamente difícil de alcançar. O ponto de partida mais simples seria assumir que vivemos num mundo newtoniano de senso comum. Este é o mundo com o qual estamos familiarizados. Partamos do princípio de que esse mundo é feito de pequenos átomos, que são como sistemas solares em miniatura, com eletrões a girar em torno de um núcleo, em obediência às leis de Newton. Este sistema solar estaria estável se os eletrões se movessem em círculos perfeitos.

Porém, se perturbássemos ligeiramente um dos eletrões, este podia começar a oscilar e assumir trajetórias imperfeitas. Significa que, mais cedo ou mais tarde, os eletrões colidiriam uns nos outros ou cairiam para o núcleo. Muito rapidamente o átomo colapsa e há eletrões a voar em todas as direções. Por outras palavras, um modelo newtoniano do átomo é inerentemente instável.

Imagine-se o que aconteceria com as moléculas. Num mundo governado apenas pela mecânica clássica, uma órbita à volta de dois núcleos é altamente instável e rapidamente colapsará mal seja perturbada. Assim, não poderiam existir moléculas num mundo

newtoniano, pelo que não existiriam compostos químicos complexos. Este Universo, sem átomos e moléculas estáveis, acaba por se tornar uma neblina informe de partículas subatômicas aleatórias.

Todavia, a teoria quântica resolve este problema, porque o eletrão é descrito por uma onda, e apenas ressonâncias discretas dessa onda podem oscilar em torno do núcleo. Ondas nas quais esses eletrões colidam e se dispersem não são permitidas pela equação de Schrödinger, portanto o átomo é estável. Num mundo quântico, as moléculas também são estáveis porque se formam quando as ondas de eletrões são partilhadas entre dois átomos diferentes e se cria uma ressonância estável que une dois átomos. Isto fornece a cola que consegue manter a molécula coesa.

Assim, de certa forma, há um «objetivo» ou uma «razão» para a mecânica quântica e as suas estranhas características. Por que é que o mundo quântico é tão bizarro? Aparentemente, para tornar a matéria estável e sólida. Caso contrário, o nosso Universo desintegrar-se-ia.

Isto, por sua vez, tem uma consequência importante para os computadores quânticos. Se tentarmos modificar a equação de Schrödinger, que é a base do computador quântico, esperamos que o computador quântico modificado produza resultados absurdos, tais como matéria instável. Assim, por outras palavras, a única forma de os computadores quânticos criarem Universos estáveis é começar pela equação de Schrödinger. Um computador quântico é único. Pode haver muitas maneiras de a matéria se unir para criar

um computador quântico (p. ex., com diferentes tipos de átomos), mas há apenas uma maneira pela qual o computador quântico consegue efetuar os seus cálculos e ainda assim descrever matéria estável.

Assim, se queremos um computador quântico que manipule elétrons, luz e átomos, resta-nos provavelmente uma única arquitetura possível para um computador quântico.

3. O Universo Como Simulação

Qualquer pessoa que tenha visto o filme Matrix sabe que Neo é o Eleito. Tem superpoderes. Consegue voar pelos céus. Consegue desviar-se de balas ou travá-las em pleno ar. Consegue aprender instantaneamente karaté com um toque num botão. E consegue atravessar espelhos.

Tudo isto é possível porque Neo, na realidade, vive numa simulação fictícia, gerada por computador. Tal como viver num videojogo, onde a «realidade» é, na verdade, um mundo imaginário.

Isto, no entanto, levanta a questão: com a potência computacional a crescer de forma exponencial, será possível que o nosso mundo seja na realidade uma simulação, e que a «realidade» que conhecemos seja um videojogo a ser jogado algures? Seremos apenas linhas de código, até que alguém carregue finalmente no botão de delete e ponha fim a esta charada? E se um computador

clássico não é poderoso o suficiente para simular a realidade, poderia um computador quântico fazê-lo?

Façamos primeiro uma pergunta mais simples: poderia um Universo clássico como o descrito acima ser uma simulação newtoniana?

Consideremos por um momento uma garrafa de vidro vazia. O ar no interior da garrafa pode conter mais de 10^{23} átomos. Para o modelarmos com exatidão num computador clássico, precisaríamos de manipular 10^{23} *bits* de informação, muito para além daquilo que um computador clássico é capaz de fazer. Para criar uma simulação perfeita dos átomos nessa garrafa, teríamos também de conhecer a posição e velocidade de todos esses átomos. Agora imagine tentar simular as condições meteorológicas na Terra. Seria preciso saber a humidade, pressão do ar, temperatura e velocidade do vento em todo o planeta. Muito rapidamente esgotaríamos a capacidade de memória de qualquer computador clássico conhecido.

Por outras palavras, o objeto mais pequeno que consegue simular o tempo, é o próprio tempo.

Outra maneira de ver o problema é considerar aquilo a que se chama o efeito borboleta. Se uma borboleta bater as asas, cria uma onda de ar que, se as condições forem as certas, pode crescer e transformar-se num vento poderoso. Este, por sua vez, pode tocar no ponto crucial de uma nuvem e causar uma chuvada. É um resultado da teoria do caos, que diz que, embora as moléculas do

ar possam obedecer às leis newtonianas, os efeitos combinados de bilhões de moléculas de ar são caóticos e imprevisíveis. Assim, é quase impossível prever a probabilidade exata de que se possa formar uma tempestade. Embora seja possível determinar a trajetória de uma única molécula, o movimento coletivo de bilhões de moléculas de ar está fora do alcance das capacidades de qualquer computador digital. Uma vez mais, uma simulação é impossível.

Mas, e se estivermos a falar de computadores quânticos?

A situação torna-se muito pior se tentarmos modelar o tempo com um computador quântico. Se tivermos um computador quântico com 300 *qubits*, então temos 2^{300} estados no computador quântico, um número maior do que os estados do Universo. Decerto um computador quântico tem memória suficiente para codificar toda a «realidade» tal como a conhecemos.

Não necessariamente. Pense numa molécula de proteína complexa, que pode ter milhares de átomos. Para um computador quântico simular uma só molécula de proteína sem qualquer aproximação, temos de ter muitos mais estados do que existem no Universo. E o nosso corpo pode ter milhares de milhões dessas moléculas de proteína. Assim, para verdadeiramente simular todas as moléculas de proteína que se encontram no nosso corpo, precisamos, em princípio, de milhares de milhões de computadores quânticos. Uma vez mais, o Universo mais pequeno que pode simular o Universo, é o próprio Universo. É pura e simplesmente impraticável montar milhares e milhares de milhões de

computadores quânticos para simular um fenómeno quântico complexo.

A única «realidade» que poderia efetivamente ser simulada é uma realidade que não é perfeita, com muitas falhas e imperfeições. Isto poderia reduzir o número de estados que têm de ser simulados. Se a simulação não for perfeita, então pode realmente existir. Por exemplo, a simulação pode ter áreas incompletas. O «céu que vemos sobre nós pode ter buracos e rasgões, como um antigo cenário de cinema, ou, para quem mergulhar em águas profundas, pode achar que o seu mundo é o oceano inteiro, até colidir com uma parede de vidro, apercebendo-se então de que o seu mundo é apenas uma pequena simulação do oceano. Assim, um Universo com simulações deste tipo seria certamente possível.

4. Universos Paralelos

Antigamente, Hollywood e a banda desenhada conseguiam criar Universos imaginários e excitantes ao levar as suas personagens para o espaço sideral. Porém, uma vez que já enviamos foguetões para o espaço há mais de cinquenta anos, isso tornou-se desatualizado. Assim, os escritores de ficção científica precisam de um campo novo e empolgante para os seus enredos fantásticos, e hoje em dia esse campo é o multiverso. Muitos sucessos de bilheteira recentes passam-se em universos paralelos, onde o super-herói ou o vilão existem em múltiplas realidades.

No passado, sempre que via um filme de ficção científica, eu costumava contar quantas leis da física estavam a ser violadas. Deixei de o fazer quando me lembrei das palavras de Arthur C. Clarke: «Qualquer tecnologia suficientemente avançada é indistinguível de magia» Assim, se um filme parecia ter violado alguma lei da física conhecida, talvez essa lei da física viesse um dia a provar estar incorreta ou incompleta.

Agora, contudo, com os filmes a entrarem no multiverso de universos paralelos, tenho de pensar bem para ver se há leis físicas a serem violadas. Neste caso, os filmes estão na verdade a seguir os passos dos físicos teóricos, que começam a levar muito a sério a ideia do multiverso.

A razão para tal é que a teoria dos muitos mundos de Hugh Everett está a ter um ressurgimento. Tal como já mencionámos, a teoria dos muitos mundos de Everett é, talvez, a forma mais simples e mais elegante de resolver o problema da medição. Se simplesmente afastarmos o último postulado da mecânica quântica, que a função de onda que descreve o comportamento quântico colapsa sob observação, a teoria dos muitos mundos é a maneira mais rápida de resolver o paradoxo que isso coloca.

Porém, há um preço a pagar por permitirmos que a onda de eletrões prolifere. Se a onda de Schrödinger se puder mover livremente por si só, sem colapsar, então dividir-se-á um número infinito de vezes, criando uma cascata infinita de possíveis Universos. Assim, em vez de colapsar num só Universo, deixamos

que um número infinito de universos paralelos se divida constantemente.

Não existe um consenso universal entre os físicos quanto a estes universos paralelos. Por exemplo, David Deutsch acredita que esta é a razão essencial pela qual os computadores quânticos são tão poderosos, porque calculam simultaneamente em universos paralelos diferentes. Isto leva-nos de novo ao velho paradoxo de Schrödinger, em que um gato numa caixa pode estar simultaneamente morto e vivo.

Stephen Hawking, sempre que lhe faziam alguma pergunta sobre este problema frustrante, dizia: «Sempre que oiço o gato de Schrödinger, pego na minha arma.»

No entanto, há uma teoria alternativa também a ser considerada, chamada teoria da decoerência, que afirma que as interações com o ambiente exterior fazem com que a onda colapse, ou seja, a onda colapsa por si mesma quando toca no ambiente, porque o ambiente já está decoerente.

Por exemplo, isto significa que o paradoxo de Schrödinger pode ser resolvido de forma simples. O problema original era que, antes de abrir a caixa, era impossível dizer se o gato estava vivo ou morto. A resposta tradicional é que o gato não está vivo nem morto até abrirmos a caixa. Esta nova teoria diz que os átomos do gato já estão em contacto com os átomos aleatórios que pairam na caixa, portanto o gato já entrou em decoerência mesmo antes de a caixa

ser aberta. Assim, o gato já está morto ou vivo (mas não ambas as coisas).

Por outras palavras, de acordo com a interpretação tradicional de Copenhaga, o gato entra em decoerência apenas quando se abre a caixa e se efetua uma medição. Pela abordagem da decoerência, contudo, o gato já está decoerente porque as moléculas do ar tocaram na onda do gato, fazendo com que esta colapsasse. A causa do colapso da onda na abordagem da decoerência, substitui o observador que abre a caixa pelo ar no interior da caixa.

Geralmente, os debates na física resolvem-se por meio de uma experiência. A física, em última análise, não se baseia em especulação e conjectura. O fator decisivo são evidências concretas. Mas imagino que daqui a décadas os cientistas ainda debaterão esta questão, porque não há nenhuma experiência decisiva que possa excluir uma destas interpretações, pelo menos por enquanto.

Porém, pessoalmente tenho a convicção de que há uma falha na abordagem da decoerência. Esta abordagem tem de fazer uma distinção entre o ambiente, ou seja, o ar (que é decoerente) e o objeto alvo de estudo (o gato). Na abordagem de Copenhaga, a decoerência é introduzida pelo observador que faz a experiência. Na abordagem da decoerência, é introduzida por interações com o ambiente.

Contudo, assim que introduzimos a teoria quântica da gravidade, a unidade mais pequena que quantificamos é o próprio Universo.

Não há qualquer distinção entre o observador, o ambiente e o gato. Todos fazem parte de uma gigantesca função de onda, a função de onda do Universo, que não pode ser separada em várias partes. Nesta abordagem da gravidade quântica, não existe uma verdadeira distinção entre ondas que são coerentes e ondas no ar que são decoerentes. A diferença é somente de grau. (Por exemplo, no *Big Bang*, o Universo inteiro era coerente antes da explosão. Assim, ainda hoje, 13,8 mil milhões de anos mais tarde, existe um pouco de coerência que conseguimos ainda encontrar entre o gato e o ar.)

Esta abordagem, portanto, afasta a decoerência e reverte à interpretação de Everett. Infelizmente, não existe qualquer experiência capaz de diferenciar estas várias abordagens. Ambas as abordagens dão o mesmo resultado mecânico-quântico. Diferem apenas na interpretação do resultado, que é filosófica.

Significa isto que quer usemos a abordagem de Copenhaga, a abordagem da decoerência, ou a teoria dos muitos mundos, obtemos os mesmos resultados experimentais, pelo que as três abordagens são experimentalmente equivalentes.

Uma possível diferença entre estas abordagens é que, na interpretação dos muitos mundos, pode ser possível a deslocação entre diferentes universos paralelos. Contudo, se fizermos os cálculos, a probabilidade de o conseguir fazer é tão pequena que não podemos verificá-la experimentalmente. Regra geral, temos de esperar mais tempo do que o tempo de vida de um Universo para entrar noutro universo paralelo.

5. Será o Universo um Computador Quântico?

Analisemos agora se o Universo é, ele próprio, um computador quântico.

Recordemos que Babbage colocou uma pergunta bem definida: qual o limite de potência de um computador analógico? Até onde poderemos computar com engrenagens e alavancas mecânicas?

Turing alargou a questão, perguntando a si mesmo: qual o limite de potência de um computador digital? Até onde poderemos computar com componentes eletrônicos?

Assim, é natural que a pergunta seguinte seja: qual o limite de potência de um computador quântico? Até onde poderemos computar se conseguirmos manipular átomos individuais? E, uma vez que o Universo é feito de átomos: será o Universo ele próprio um computador quântico?

O físico que propôs esta ideia é Seth Lloyd do MIT. É um de entre um punhado de físicos que se encontrava presente no início, quando os computadores quânticos começaram a ser criados.

Perguntei a Lloyd como é que se envolveu com computadores quânticos. Ele disse-me que, quando era rapaz, tinha um fascínio por números. Interessava-o particularmente o facto de, com apenas alguns números, ser possível descrever uma vasta quantidade de objetos do mundo real pelas regras da matemática.

Quando foi fazer o doutoramento, contudo, deparou-se-lhe um problema. Por um lado, havia alunos de física brilhantes, a trabalhar em teoria das cordas e física de partículas elementares. Por outro lado, havia alunos a trabalhar em ciências computacionais. Ele estava apanhado no meio, porque queria trabalhar em informação quântica, que se encontrava entre a física de partículas e a ciência computacional.

Na física de partículas elementares, a derradeira unidade de matéria é a partícula, como o eletrão. Na teoria da informação, a derradeira unidade de informação é o *bit*. Assim, ele debruçou-se sobre a relação entre partículas e *bits*, o que nos leva aos *bits* quânticos.

A sua ideia controversa é que o Universo é um computador quântico. À primeira vista, pode parecer absurdo. Quando pensamos no Universo, pensamos em estrelas, galáxias, planetas, animais, pessoas, ADN. E quando pensamos num computador quântico, pensamos numa máquina. Como podem ser a mesma coisa?

Na verdade, existe uma profunda relação entre os dois. É possível criar uma máquina de Turing capaz de conter todas as leis newtonianas do Universo.

Pensemos, por exemplo, num comboio de brincar numa linha de miniatura. A linha está dividida numa longa sequência de quadrados, nos quais podemos colocar o número 0 ou 1. O número

0 significa que não há comboio nessa linha, e o 1 significa que o comboio de brincar está nessa linha. Agora avancemos o comboio, quadrado a quadrado. De cada vez que deslocarmos o comboio um quadrado, substituímos o 0 por 1. Assim, o comboio pode deslocar-se facilmente pela linha. O número 1 localiza a posição do comboio de brincar.

Agora, substituamos a linha ferroviária por uma fita digital com 0s e 1s. Em vez do comboio de brincar, temos um processador. De cada vez que o processador se desloca um quadrado, trocamos o 0 por um 1.

Assim, podemos pegar num comboio de brincar e convertê-lo numa máquina de Turing. Por outras palavras, uma máquina de Turing pode simular as leis do movimento de Newton, que são a base da física clássica.

Podemos também modificar um comboio de brincar para descrever acelerações e movimentos mais complexos. De cada vez que movermos o comboio, podemos aumentar a separação entre os 1s, o que significa que o comboio está a acelerar. Podemos também generalizar o comboio a deslocar-se por uma linha em 3D, ou grelha. Desta forma, é possível codificar todas as leis da mecânica newtoniana.

Conseguimos então estabelecer uma ligação precisa entre uma máquina de Turing e as leis de Newton. É possível codificar um Universo clássico com uma máquina de Turing.

A seguir, podemos generalizar isto aos computadores quânticos. Em vez de um comboio de brincar, que contém 0s e 1s, substituímo-lo por um comboio de brincar que leva uma bússola. A agulha pode apontar para norte, onde lhe chamamos 1, ou para sul, onde lhe chamamos 0, ou para um ângulo entre os dois, onde representa a sobreposição de norte e sul. Assim, à medida que o comboio de brincar se movimenta pela linha, a agulha move-se em direções diferentes, de acordo com a equação de Schrödinger.

(Se quisermos incluir o entrelaçamento, basta adicionar várias bússolas ao comboio de brincar. Todas as agulhas dessas bússolas podem mover-se de maneiras diferentes conforme o comboio se desloca pela linha, de acordo com as regras do processador.)

Quando o comboio se movimenta, a agulha da bússola começa a girar. O movimento da agulha segue a informação contida na equação de onda de Schrödinger. Desta forma, conseguimos derivar a equação de onda com este comboio de brincar.

O que importa aqui é que uma máquina de Turing quântica pode codificar as leis da mecânica quântica que, por sua vez, governam o Universo. Neste sentido, um computador quântico pode codificar o Universo. Assim, a relação entre um computador quântico e o Universo é que o primeiro pode codificar o segundo. Portanto, rigorosamente falando, o Universo não é um computador quântico, mas todos os fenómenos no Universo podem ser codificados por um computador quântico.

Porém, uma vez que todas as interações ao nível microscópico são governadas pela mecânica quântica, isso significa que os computadores quânticos podem simular qualquer fenómeno do mundo físico, desde as partículas subatômicas e o ADN, até aos buracos negros e ao *Big Bang*.

O reino de ação dos computadores quânticos é o próprio Universo. Assim, se conseguirmos verdadeiramente compreender uma máquina de Turing quântica, talvez consigamos também compreender verdadeiramente o Universo.

Só o tempo o dirá.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer, em primeiro lugar, ao meu agente literário, Stuart Krichevsky, que está ao meu lado há tantos anos, a ajudar-me a conduzir os meus livros do rascunho ao mercado. Confio no seu discernimento infalível em todas as questões literárias. Os seus bons conselhos têm ajudado os meus livros a alcançar o sucesso.

Quero agradecer também ao meu editor, Edward Kastenmeier. Sempre me deu pareceres sensatos em todas as questões editoriais. A sua ajuda ao longo de todo o caminho permitiu uma maior clareza no objetivo do livro e que este se tornasse mais acessível.

Queria ainda agradecer aos muitos galardoados com o Prémio Nobel que consultei ou entrevistei e que me deram conselhos valiosos:

Richard Feynman

Steven Weinberg

Yoichiro Nambu

Walter Gilbert

Henry Kendall

Leon Lederman

Murray Gell-Mann

David Gross

Frank Wilczek

Joseph Rotblat

Henry Pollack

Peter Doherty

Eric Chivian

Gerald Edelman

Anton Zeilinger

Svante Pääbo

Roger Penrose

Gostava também de agradecer a estes cientistas de renome, líderes de investigação científica ou diretores em importantes laboratórios científicos, e que tão generosamente partilharam comigo a sua sabedoria:

Marvin Minsky

Francis Collins

Rodney Brooks

Anthony Atala

Leonard Hayflick

Carl Zimmer

Stephen Hawking

Edward Witten

Michael Lemonick

Michael Shermer

Seth Shostak

Ken Croswell

Brian Greene

Neil deGrasse Tyson

Lisa Randall

Leonard Susskind

Por último, o meu agradecimento aos mais de 400 cientistas que entrevistei ao longo dos anos, e cujas perspetivas foram de um valor incalculável na escrita deste livro.