

«O mais belo livro de Rovelli. Inesquecível.»
—THE LONDON TIMES

CARLO
ROVELLI

AUTOR
DE SETE BREVES LIÇÕES DE FÍSICA
E A ORDEM DO TEMPO

O ABISMO
VERTIGINOSO

UM MERGULHO
NAS IDEIAS DA FÍSICA
QUÂNTICA

*Para Ted Newman, que me fez entender
que eu não entendia a mecânica quântica*

ÍNDICE

Mergulhar o olhar no abismo.	11
--------------------------------------	----

PRIMEIRA PARTE

I

A absurda ideia do jovem Werner Heisenberg: «os observáveis»	19
A confusa ψ de Erwin Schrödinger: «a probabilidade»	31
A granularidade do mundo: «os quanta».	39

SEGUNDA PARTE

II

Sobreposições	51
Levar ψ a sério: mundos múltiplos, variáveis ocultas e colapsos físicos	61
Aceitar a indeterminação	69

III

Houve uma época em que o mundo parecia simples.	75
Relações	77
O mundo rarefeito e leve dos quanta	83

IV

Emaranhamento.	91
A dança a três que tece as relações do mundo	99
Informação	103

TERCEIRA PARTE

V

Aleksandr Bogdanov e Vladimir Lenine	117
Naturalismo sem substância	129
Sem fundamento? Nāgārjuna	135

VI

Simples matéria?	149
O que significa «significado»?	155
O mundo visto de dentro.	165

VII

Mas é realmente possível?	177
-------------------------------------	-----

<i>Agradecimentos</i>	185
<i>Créditos das imagens</i>	187
<i>Notas</i>	189
<i>Índice remissivo</i>	201

Mergulhar o olhar no abismo

Časlav e eu estamos sentados na areia a poucos passos do mar. Conversámos durante horas. Viemos à ilha de Lamma, frente à ilha de Hong Kong, na tarde de intervalo da conferência. Časlav é um dos mais reputados especialistas em mecânica quântica. Na conferência, apresentou uma análise de uma complexa experiência ideal. Discutimo-la e voltámos a discuti-la no trilho que orla a floresta até à praia e depois aqui, à beira-mar. Concordamos em relação a praticamente tudo. Na praia, há um longo momento de silêncio. Olhamos o mar. «É realmente incrível», sussurra Časlav. «Como acreditar nisto? É como se a realidade... não existisse...»

Estamos neste ponto no que diz respeito aos quanta. Pensando bem, depois de um século de resultados impressionantes, depois de nos fornecer a tecnologia contemporânea e a base para toda a física do século XX, a teoria mais bem-sucedida da ciência ainda nos enche de espanto, confusão e incredulidade.

Houve um momento em que a gramática do mundo parecia clara: a origem de todas as diversificadas formas da realidade parecia resumir-se a partículas de matéria guiadas por poucas forças. A humanidade podia pensar que conseguira levantar o véu de Maia e ver a realidade mais profunda. Mas durou pouco: muitos factos não batiam certo.

Até que, no verão de 1925, um jovem alemão de 23 anos foi passar alguns dias de inquieta solidão numa ventosa ilha do mar

do Norte: Helgoland, a ilha sagrada. Nesse lugar, teve uma ideia que lhe permitiu explicar todos os factos recalcitrantes e construir a estrutura matemática da mecânica quântica, a «teoria dos quanta». Talvez a maior revolução científica de todos os tempos. O jovem era Werner Heisenberg. A história deste livro começa com ele.

A teoria dos quanta esclareceu as bases da química, o funcionamento dos átomos, dos sólidos, dos plasmas, a cor do céu, os neurónios do nosso cérebro, a dinâmica das estrelas, a origem das galáxias... uma infinidade de aspetos do mundo. Constitui o fundamento das tecnologias mais recentes: dos computadores às centrais nucleares. Faz parte do quotidiano de engenheiros, astrofísicos, cosmólogos, químicos e biólogos. Rudimentos da teoria encontram-se presentes no programa do secundário. Ela nunca falhou. É o coração pulsante da ciência atual. Apesar disso, permanece um mistério. Ligeiramente perturbador.

Destruiu a imagem da realidade constituída de partículas que se movem ao longo de trajetórias definidas, sem, contudo, esclarecer como devemos pensar o mundo. A sua matemática não descreve a realidade, não nos diz «o que existe». Objetos distantes parecem magicamente interligados. A matéria é substituída por fantasmagóricas ondas de probabilidades.

Todos os que se perguntam o que a teoria dos quanta nos diz sobre o mundo real ficam perplexos. Einstein, embora tenha antecipado as suas ideias e inspirado Heisenberg, nunca a aceitou; Richard Feynman, o grande físico teórico da segunda metade do século XX, escreveu que ninguém entende os quanta.

Todavia, a ciência é isto: uma exploração de novas maneiras de pensar o mundo. Trata-se da capacidade que temos de questionar constantemente os nossos conceitos. É a força visionária de um pensamento rebelde e crítico capaz de modificar as suas próprias bases conceptuais e redesenhar o mundo a partir do zero.

Se a estranheza da teoria nos confunde, também nos abre novas perspectivas para compreender a realidade. Uma realidade mais sutil do que a do materialismo simplista das partículas no espaço. Uma realidade feita mais de relações do que de objetos.

A teoria sugere novos caminhos para repensar grandes questões, da estrutura da realidade à natureza da experiência, da metafísica até, talvez, à natureza da consciência. Hoje, todas essas coisas são alvo de um acirrado debate entre cientistas e filósofos, e falo de tudo isso nas páginas que se seguem.

Na ilha de Helgoland, despojada, remota, fustigada pelo vento do Norte, Werner Heisenberg levantou um véu entre nós e a verdade; para lá daquele véu surgiu um abismo. O relato deste livro parte da ilha onde Heisenberg concebeu a semente da sua ideia e estende-se progressivamente às questões cada vez mais amplas que a descoberta da estrutura quântica abriu da realidade.

Escrevi estas páginas em primeiro lugar para quem não conhece a física quântica e deseja compreender, na medida do possível, o que ela é e quais as suas implicações. Procurei ser o mais conciso possível, deixando de lado todos os pormenores que não fossem essenciais para apreender o cerne da questão. Procurei ser o mais claro possível, ao falar de uma teoria que se encontra no centro da obscuridade da ciência. Mais do que explicar como entender a física quântica, talvez me limite a explicar por que motivo é tão difícil entendê-la.

No entanto, o livro foi pensado também para os colegas, cientistas e filósofos, que, quanto mais se adentram na teoria, mais perplexos ficam com ela; para continuar o diálogo em curso sobre o significado dessa física impressionante e chegar a uma perspectiva geral. Por isso, incluí inúmeras notas, destinadas a quem já conhece bem a mecânica quântica. Elas traduzem de forma mais precisa o que tento explicar no texto de maneira mais legível.

O principal objetivo da minha pesquisa em física teórica tem sido compreender a natureza quântica do espaço e do tempo. Tornar a teoria dos quanta coerente com as descobertas de Einstein sobre espaço e tempo. Tenho refletido continuamente sobre os quanta. Este texto reflete o ponto a que cheguei. Não ignora opiniões divergentes, mas faz questão de tomar partido: concentra-se na perspectiva que considero eficaz e que, a meu ver, abre os caminhos mais interessantes, a interpretação «relacional» da teoria.

Um aviso antes de começar. O abismo do que não sabemos é sempre magnético e vertiginoso. No entanto, levar a mecânica quântica a sério, refletir sobre as suas implicações, é uma experiência quase psicadélica: exige que, de um modo ou de outro, renunciemos a algo que nos parecia sólido e inquestionável nos moldes em que compreendíamos o mundo. Exige que aceitemos que a realidade é profundamente diferente do que imaginávamos. Que mergulhemos o olhar nesse abismo, sem medo de nos afundar no insondável.

Lisboa, Marselha, Verona, Londres, Ontário, 2019-20

PRIMEIRA PARTE



I

Olhando para um interior de estranha beleza.

Como um jovem físico alemão descobriu uma ideia bastante estranha, mas que descrevia o mundo muito bem, e a grande confusão que isso provocou.

A absurda ideia do jovem Werner Heisenberg: «os observáveis»

«Eram mais ou menos três da manhã quando o resultado final dos meus cálculos surgiu diante de mim. Fiquei muito abalado. Estava tão agitado que não conseguia sequer pensar em dormir. Saí de casa e pus-me a caminhar lentamente na escuridão. Subi a uma pedra que se projetava sobre o mar, na ponta da ilha, e esperei que o Sol nascesse...»¹

Muitas vezes me perguntei quais eram os pensamentos e as emoções do jovem Heisenberg, naquela pedra acima do mar, na despojada e ventosa ilha de Helgoland, no mar do Norte, enquanto observava a vastidão das ondas, esperando que o Sol nascesse, depois de ter pousado pela primeira vez os olhos num dos mais vertiginosos segredos da natureza alguma vez vislumbrados pela humanidade. Heisenberg tinha 23 anos.

Estava ali à procura de melhorar da alergia que o atormentava. Em Helgoland — o nome significa «ilha sagrada» — quase não há árvores e, portanto, tem pouquíssimo pólen. «Helgoland com a sua única árvore», como diz Joyce em *Ulisses*. Heisenberg encontrava-se lá sobretudo para mergulhar no problema que o obcecava. A batata quente que Niels Bohr lhe atirara para as mãos. Dormia muito pouco, passava os dias sozinho, tentando calcular algo que justificasse as incompreensíveis regras de Bohr. Fazia algumas pausas para escalar as pedras da ilha. Nesses poucos momentos, memorizava os versos do *Divã ocidento-oriental*,

de Goethe: a coletânea em que o maior poeta alemão canta o seu amor pelo Islão.

Niels Bohr já era um cientista de renome. Escrevera fórmulas simples, mas estranhas, que previam as propriedades dos elementos químicos antes de as medir. Previam, por exemplo, a frequência da luz emitida pelos elementos aquecidos: a cor que eles assumem. Um sucesso notável. No entanto, as fórmulas encontravam-se incompletas: não permitiam calcular a intensidade da luz emitida.

Acima de tudo, essas fórmulas tinham algo realmente absurdo: assumiam, sem motivo, que os elétrons nos átomos orbitavam em volta do núcleo apenas em *certas* órbitas precisas, a *certas* distâncias precisas do núcleo, com *certas* energias precisas; e depois «saltavam» magicamente de uma órbita para outra. Os primeiros «saltos quânticos». Por que motivo só aquelas órbitas? O que são esses incongruentes «saltos» de uma órbita para outra? Que força desconhecida pode levar um elétron a ter um comportamento tão bizarro?

O átomo é o pequeno bloco elementar de tudo. Como funciona? Como é que se movem os elétrons dentro dele? Bohr e os colegas faziam essa mesma pergunta havia mais de dez anos. Inutilmente.

Em Copenhaga, Bohr rodeou-se dos jovens físicos mais brilhantes que conseguiu encontrar, trabalhando com eles nos mistérios do átomo, tal qual na oficina de um pintor renascentista. Um deles era Wolfgang Pauli, um jovem excepcional, inteligentíssimo, arrogante, atrevido, amigo e colega de escola de Heisenberg. Apesar da sua arrogância, Pauli recomendou o amigo Heisenberg ao grande Bohr, dizendo-lhe que, se quisessem avançar, o melhor era chamarem-no. Bohr aceitou a sugestão e, no outono de 1924, convidou Heisenberg, assistente do físico Max Born em Göttingen, para ir a Copenhaga. Heisenberg ficou alguns meses na capital dinamarquesa, discutindo com Bohr

diante de quadros de lousa cheios de fórmulas. O jovem e o mestre empreenderam juntos longas caminhadas pela montanha a conversar sobre os mistérios do átomo, a física e a filosofia.²

Heisenberg mergulhou no problema e fez dele a sua obsessão. Como os outros, também tentou de tudo. Nada funcionava. Nenhuma força razoável parecia capaz de guiar os elétrons nas estranhas órbitas e nos estranhos saltos de Bohr. E, no entanto, aquelas órbitas e aqueles saltos permitiam prever bem os fenômenos atômicos. Uma confusão.

O desânimo obriga a soluções extremas. Na ilha do mar do Norte, sozinho, Heisenberg decidiu explorar ideias radicais.

No fundo, as ideias com as quais Einstein assombrara o mundo vinte anos antes também eram radicais. O radicalismo de Einstein mostrou-se eficaz. Pauli e Heisenberg eram apaixonados pela sua física. Einstein era o mito. Será que não chegara o momento, perguntavam-se, de arriscarem um passo igualmente radical para saírem do impasse dos elétrons nos átomos? E se conseguissem dar esse passo? Aos vinte anos, os sonhos são ousados.

Einstein havia mostrado que as convicções mais arreigadas podem afigurar-se equívocas. O que parece óbvio pode não ser correto. Abandonar suposições aparentemente óbvias pode levar a uma melhor compreensão. Ensinou-nos que devemos basear-nos apenas no que vemos, não no que pensamos que deve existir.

Pauli repetia reiteradamente essas ideias a Heisenberg. Os dois jovens tinham provado desse mel venenoso. Tinham acompanhado as discussões sobre a relação entre realidade e experiência que perpassavam a filosofia austríaca e alemã do começo do século xx. Ernst Mach, cuja influência foi determinante para Einstein, defendia a necessidade de basear o conhecimento apenas nas observações, libertando-se de qualquer conceito «metafísico» implícito. Eis os ingredientes díspares que se misturavam nos pensamentos do jovem Heisenberg, como

componentes químicos de um explosivo, quando se refugiou na ilha de Helgoland, no verão de 1925.

E foi ali que ele teve a ideia. Uma ideia que só se pode ter no radicalismo sem freios dos vinte anos; a ideia destinada a abalar toda a física, toda a ciência, toda a nossa concepção do mundo; a ideia que a humanidade, a meu ver, ainda não digeriu.

O salto de Heisenberg era tão ousado como simples. Ninguém conseguia encontrar a força capaz de guiar os elétrons no seu comportamento bizarro? Ora, então, descartemos uma nova força. Em vez disso, vamos usar a que já conhecemos: a força elétrica, que atrai o elétron para o núcleo. Não encontramos novas leis do movimento para justificar as órbitas e os saltos de Bohr? Então, mantenhamos as leis do movimento que já conhecemos, sem as alterar.

Em contrapartida, vamos mudar a maneira segundo a qual pensamos o elétron. Renunciemos à ideia de que este é um objeto que se move ao longo de uma trajetória. Deixemos de descrever o seu movimento. Descrevamos apenas o que *observamos de fora*: intensidade e frequência da luz emitida pelo elétron. Baseemos tudo apenas em quantidades *observáveis*. Eis a ideia.

Heisenberg tentou recalculer o comportamento do elétron usando unicamente as quantidades que observamos: a frequência e a amplitude da luz emitida. Procurou recalculer a energia do elétron a partir daí.

Observamos os efeitos dos *saltos* de elétrons de uma órbita de Bohr para outra. Heisenberg substituiu as variáveis físicas por *tabelas* com a órbita de partida nas linhas e a órbita de chegada nas colunas. Cada casa da tabela, que ocupa uma linha e uma coluna, descreve o salto de determinada órbita para outra. Passou o seu tempo na ilha a tentar usar essas tabelas para calcular algo que justificasse as regras de Bohr. Dormia muito

pouco. Não conseguia fazer os cálculos para o elétron no átomo; eram demasiado difíceis. Tentou fazê-los para um sistema mais simples: um pêndulo. Procurou as regras de Bohr nesse caso simplificado.

A 7 de junho, algo começou a fazer sentido:

Quando o primeiro termo pareceu dar certo [reencontrar as regras de Bohr], comecei a ficar muito agitado, a cometer erros de aritmética uns atrás dos outros. Eram mais ou menos três da manhã quando o resultado final das contas surgiu diante de mim. Estava certo em todos os termos.

De repente, já não tive dúvidas sobre a coerência da nova mecânica «quântica» que o meu cálculo indicava.

Sentia-me muito abalado. Tinha a sensação de que, através da superfície dos fenómenos, estava a olhar para um interior de estranha beleza; sentia-me aturdido só de pensar que agora tinha de investigar essa nova riqueza de estrutura matemática que a natureza tão generosamente dispunha diante de mim.

Estas palavras arrepiam-nos. Através da superfície dos fenómenos, «um interior de estranha beleza». Evocam as palavras escritas por Galileu quando viu aparecer uma regularidade matemática nas suas medidas sobre a queda de objetos ao longo do plano inclinado, a primeira lei matemática descoberta pela humanidade que descreve o movimento de objetos na Terra: «Não existe emoção maior do que vislumbrar a lei matemática por trás da desordem das aparências.»

A 9 de junho, Heisenberg voltou da ilha de Helgoland para a sua universidade: Göttingen. Enviou uma cópia dos resultados

ao amigo Pauli, comentando: «Tudo é ainda muito vago e não está claro para mim, mas parece que os elétrons não se moverão em órbitas.»

A 9 de julho, entregou uma cópia do trabalho a Max Born, o professor de quem era assistente (não o confundam com Niels Bohr, de Copenhaga), acompanhada de um bilhete, onde se lia o seguinte: «Escrevi um trabalho maluco e não tenho coragem de o enviar a uma revista para publicação.» Pediu-lhe que o lesse e lhe dissesse o que fazer.

A 25 de julho, o próprio Max Born enviou o trabalho de Heisenberg para a *Zeitschrift für Physik*.³

Percebendo a importância do passo dado pelo seu jovem assistente, tentou esclarecer as coisas. Pediu ao seu aluno Pascual Jordan que tentasse organizar os bizarros resultados de Heisenberg.⁴ Este, por sua vez, procurou o apoio de Pauli, que hesitou: parecia-lhe um jogo matemático demasiado abstrato e obscuro. De início, portanto, só três pessoas trabalharam na teoria: Heisenberg, Born e Jordan.

Trabalharam febrilmente e em poucos meses conseguiram finalizar toda a estrutura formal de uma nova mecânica. É muito simples: as forças são as mesmas da física clássica; as equações são as mesmas da física clássica (mais uma* da qual falarei adiante); mas as variáveis são substituídas por tabelas de números ou «matrizes».

Porquê tabelas de números? O que observamos de um elétron num átomo é a luz emitida quando, de acordo com a hipótese de Bohr, este salta de uma órbita para outra. Um salto envolve

* $XP - PX = i\hbar$.

duas órbitas: a de partida e a de chegada. Assim, como mencionei, cada observação pode ser disposta na casa de uma tabela, na qual a órbita de partida determina a linha e a de chegada, a coluna.

A ideia de Heisenberg era escrever *todas* as quantidades que descrevem o movimento do elétron já não como números, mas enquanto tabelas de números. Em vez de se ter uma única posição x para o elétron, tem-se toda uma tabela X de possíveis posições: uma para cada possível salto. A ideia da nova teoria era continuar a usar as equações da física de sempre, substituindo simplesmente as quantidades usuais (posição, velocidade, energia e frequência da órbita...) por estas tabelas. A intensidade e a frequência da luz emitida num salto, por exemplo, seriam determinadas pela casa correspondente da tabela. A tabela correspondente à energia tinha números apenas na diagonal, e estes seriam as energias das órbitas de Bohr.

Ficou claro? Nem um pouco. Escuro como breu.

		ÓRBITA DE CHEGADA				
		Órbita 1	Órbita 2	Órbita 3	Órbita 4	...
ÓRBITA DE PARTIDA	Órbita 1	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	...
	Órbita 2	X_{21}	X_{22}	X_{23}	X_{24}	...
	Órbita 3	X_{31}	X_{32}	X_{33}	X_{34}	...
	Órbita 4	X_{41}	X_{42}	X_{43}	X_{44}	...

Uma matriz de Heisenberg: a tabela de números que «representa» a posição do elétron. O número X_{23} , por exemplo, refere-se ao salto da segunda para a terceira órbita.

No entanto, esta absurda receita de substituir variáveis por tabelas permite calcular os resultados corretos: prevê exatamente o que observamos nas experiências.

Para grande espanto dos três mosqueteiros de Göttingen, antes do fim do ano, Born recebeu por correio um breve artigo de um desconhecido jovem inglês. Nele, estava construída essencialmente a mesma teoria, numa linguagem matemática ainda mais abstrata do que as matrizes de Göttingen.⁵ O jovem era Paul Dirac. Em junho, Heisenberg realizara uma conferência em Inglaterra, tendo no fim falado das suas ideias; Dirac encontrava-se na plateia, mas estava cansado e não entendeu nada. Mais tarde, o seu professor entregou-lhe o trabalho de Heisenberg, que recebera pelo correio e que também não havia entendido. Dirac leu-o, achou que não fazia sentido e descartou-o. Contudo, algumas semanas mais tarde, num passeio ao ar livre, refletiu sobre as ideias ali expostas e percebeu que as tabelas de Heisenberg se assemelhavam às coisas que ele próprio tinha estudado num curso de que não se lembrava bem, pelo que precisou de esperar até que a biblioteca abrisse na segunda-feira para refrescar ideias num livro...⁶ A partir daí, em pouco tempo, Dirac também construiu, de forma independente, a teoria elaborada pelos três magos de Göttingen.

Só faltava aplicá-la ao eletrão no átomo e ver se funcionava realmente. Será que de facto permitia calcular todas as órbitas de Bohr?

O cálculo revelou-se difícil, e os três não conseguiram completá-lo. Pediram a ajuda de Pauli⁷, sempre o mais brilhante (e presunçoso) de todos, que respondeu: «Efetivamente, este é um cálculo demasiado difícil... para vocês.» Com tecnicismos acrobáticos, completou-o em algumas semanas.⁸

O resultado era perfeito: os valores da energia calculados com a teoria das matrizes de Heisenberg, Born e Jordan eram exatamente os imaginados por Bohr. O novo esquema levava às estranhas regras de Bohr para os átomos, mas não só. A teoria permitia calcular também a intensidade da luz emitida, algo que as regras de Bohr não conseguiam fazer. Também esta foi comprovada com as experiências!

«Rovelli é um génio, um comunicador incrível.
É aqui que a ciência ganha vida.»
NEIL GAIMAN

UMA PERSPETIVA SURPREENDENTE DA TEORIA QUÂNTICA,
DO AUTOR DE *SETE BREVES LIÇÕES DE FÍSICA*
E *A ORDEM DO TEMPO*

Em Helgoland, uma ilha no Mar do Norte, no mês de junho de 1925, o jovem físico alemão Werner Heisenberg pôs em marcha a mais radical revolução científica do nosso tempo: a física dos *quanta*. Um rasgo de génio com quase um século, que descreve na perfeição o mundo que observamos, da cor do céu aos neurónios do nosso cérebro, do funcionamento dos computadores à origem das galáxias, e que está, também, na origem de inúmeras descobertas e avanços tecnológicos.

Aliando ciência, filosofia e história, Carlo Rovelli reconstrói com admirável clareza o controverso debate em torno do sentido desta teoria, argumentando que as suas aparentes contradições podem ser explicadas com uma mudança radical de perspetiva: tudo o que existe é fundamentalmente composto, não por matéria, mas por interações. Uma interpretação arrojada, por um dos físicos mais brilhantes da atualidade, que sugere que a realidade é muito diferente daquilo que imaginamos.

UMA VIAGEM FASCINANTE PELAS IDEIAS VERTIGINOSAS DA TEORIA QUÂNTICA, QUE ESTRUTURA, COM ENORME ELEGÂNCIA E BELEZA, A COMPREENSÃO DO NOSSO LUGAR NO UNIVERSO.

CARLO ROVELLI é físico teórico e membro do Instituto Universitário de França e da Academia Internacional de Filosofia e das Ciências. Considerado um dos 100 pensadores mais influentes em 2019, trabalhou em Itália, Estados Unidos e França. De entre os vários livros que tem publicados, foi com *Sete breves lições de Física* e *A ordem do tempo* que conquistou a merecida admiração de académicos e leigos, apaixonando milhões de leitores em todo o mundo.



Penguin
Random House
Grupo Editorial

 penguinlivros.pt
  penguinlivros
 editoraobjectiva

ISBN 9789897845093



9 789897 845093 >