

CARLO ROVELLI

SOBRE A IGUALDADE  
DE TODAS AS COISAS

LIÇÕES AMERICANAS



# Índice

<i>Prefácio</i>	9
Primeira lição. A estrutura relacional da realidade	11
Terra	13
Velocidade	16
<i>Quanta</i>	21
Perspetivas	27
Segunda lição. Do interior do círculo	31
Conhecimento	31
Certeza	34
Informação	41
Circularidade	43
Terceira lição. O espaço-tempo é um processo quântico	49
Tempo	49
Espaço	54
Gravidade	58
Redes	62

Quarta lição. Viver no curso do tempo	75
Fluxo	75
Memória e causas	79
Liberdade	81
Quinta lição. O que existe?	91
Multiplicidade	91
Unidade	96
Moral	103
Sexta lição. Sem certeza nem fundamentos	113
Relações	113
Peixes	119
Fundamentos	127
Apêndice. Como funciona a ciência?	133
Continuidade com o senso comum	133
Continuidade histórica	137
A evidência é ilusória	138
Ferramentas modais, não modelos	139
Os conceitos evoluem	142
Pensamos por metáforas	146
Física fora de rota	147
Notas	153
<i>Índice analítico</i>	185

## PREFÁCIO

Estas páginas nascem de um convite do Departamento de Filosofia da Universidade de Princeton, em novembro e dezembro de 2024. A minha relação com os filósofos de Princeton teve início há cerca de quinze anos, altura em que Bas van Fraassen foi um dos primeiros a mostrar interesse pela abordagem relacional à mecânica quântica que eu começara a explorar nos anos noventa<sup>1</sup>. Estou grato a Hans Halvorson por ter renovado essa relação. Agradeço a Gideon Rosen, a Mark Johnston e a todos os membros do departamento, do diretor aos estudantes, pelo acolhimento caloroso e pelas discussões animadíssimas, que deixaram marcas profundas neste texto. Foi extremamente enriquecedor, sobretudo quando não estávamos de acordo.

As lições, e estas páginas, tinham como tema as implicações filosóficas da revolução científica em curso.

Dirijo-me aqui a diferentes leitores. Aos meus leitores que, sem conhecimentos técnicos, desejam compreender o impacto da ciência moderna nas grandes questões filosóficas de sempre. Mas, mais ainda, aos filósofos e cientistas interessados nas implicações conceptuais da gravidade e dos *quanta*, tomados em conjunto.

«Sobre a igualdade de todas as coisas» (齊物論) é o título do extraordinário segundo capítulo do *Chuang Tse*, um dos grandes livros da Antiguidade. Alude ao antifundacionalismo a que, creio, nos conduz a ciência moderna: elétrons e mente, pedras e leis, juízos e galáxias não são de natureza essencialmente diferente. São noções que se iluminam reciprocamente.

Este é o mundo que vejo emergir da revolução científica do século xx e que procuro ilustrar nas páginas que se seguem. É um mundo que não é feito de objetos, não ocupa um espaço, não se desenrola no tempo e não é governado por causas e efeitos. É tecido de relações, composto pelo entrelaçar de perspectivas e só pode ser descrito a partir do interior. Convida-nos a modificar os conceitos com que estamos habituados a organizar a realidade, a abandonar certezas e a renunciar a fundamentos últimos.

Embrenhar-me nele, primeiro como estudante, depois como investigador, refletir sobre ele e discuti-lo longamente foi para mim, e ainda é, fonte de espanto e vertigem. É um mundo alienígena. Mas parece-me mais leve e acolhedor para nós, seres mortais, feitos sobretudo de pensamentos e emoções.

PRIMEIRA LIÇÃO

A ESTRUTURA RELACIONAL  
DA REALIDADE

Apresentamo-nos como estudiosos de matemática e física. No nosso trabalho quotidiano, somos conduzidos a questões semelhantes às da metafísica; aproximamo-nos delas sem confiar no poder inato de penetração das nossas mentes, mas treinados para adaptar de modo constante os nossos modos de pensar aos factos da natureza externa.

JAMES CLERK MAXWELL, *Address to the Mathematical and Physical Sections of the British Association*, 1870

A curiosidade une-nos. Somos irmãos nas perguntas. Somos irmãs nas perguntas. Continuamos a descobrir novas perspectivas, que nos abrem novos olhares sobre a realidade. O aspeto que mais me fascina na ciência é este constante reajustar dos nossos conceitos, que se devem adaptar ao que vamos aprendendo. As noções com que pensamos o mundo foram moldadas pela experiência das gerações que nos precederam; novas experiências e novos conhecimentos continuam a transformá-las.

Deste modo, repensamos a natureza da realidade física, mas também a natureza do conhecimento e de nós mesmos: sujeitos do saber, testemunhas da existência, artífices e intérpretes do significado dos termos que utilizamos, seres concretos, porções do mundo físico, tecidos de pensamentos, desejos, projetos, emoções e sonhos.

Os saltos conceptuais a que nos conduz a ciência do século xx são ainda mais radicais do que os da grande revolução científica que inaugurou a era moderna: aquela que se inicia com Copérnico, passa por Galileu e culmina em Newton, substituindo hierarquias angelicais e influências astrais por corpos e forças. Na altura, o sucesso da *scientia nova* — como era chamada — teve

um impacto radical sobre a civilização europeia, e depois mundial, abrindo caminho ao Iluminismo de Voltaire, Hume e Kant, à revolução industrial e à modernidade. Hoje, a revolução científica em curso é igualmente disruptiva. Mas creio que a sua verdadeira dimensão filosófica ainda não foi plenamente digerida.

Parte da filosofia mantém-se à distância da ciência contemporânea. Julgo que erra ao fazê-lo. A melhor filosofia esteve sempre atenta à ciência do seu tempo. Aristóteles, Hume, Kant, Husserl olhavam para a ciência com extrema atenção... Ignorar a ciência atual equivale a permanecer ancorado na ideia de que a Terra é o centro do cosmos, mesmo após a revolução copernicana. É não olhar para lá da vedação do nosso pequeno jardim. Mas mesmo a parte da filosofia atenta à ciência parece-me ter dificuldade em integrar *plenamente* o saber gerado pela tumultuosa revolução científica em curso.

Estas páginas constituem uma reflexão sobre as implicações conceptuais e filosóficas desta revolução e o meu contributo para tentar resolvê-las. Tentarei resumir aquilo que hoje julgo compreender deste saber, após uma vida dedicada à física fundamental e à exploração do limiar do conhecido. Fiz um esforço para tornar as ideias tão transparentes quanto possível para todos os meus leitores, mas este não é um livro simples. É um longo voo. Apresenta um arco de pensamentos amplo, encadeados entre si, para construir, passo a passo, uma visão coerente daquilo que me parece conseguirmos (ou não) dizer sobre as coisas, sobre o nosso conhecimento, sobre o espaço, o tempo e nós próprios, à luz do que a física contemporânea nos ensinou.

As lições ziguezagueiam entre nós e a natureza. Nesta primeira lição, depois de uma breve digressão inicial sobre alguns aspetos da física que se estudam na escola, mergulho no enigmático coração dos *quanta*<sup>1</sup>. A segunda reconduz-nos a nós, ao abordar a questão do conhecimento; como fechar o círculo que o liga ao mundo<sup>2</sup>.

A terceira é dedicada ao espaço e ao tempo<sup>3</sup>, bem como à estrutura conceptual necessária para combinar os dois grandes saltos conceptuais do século xx: os *quanta* e as descobertas de Einstein sobre espaço, tempo e gravidade<sup>4</sup>. A quarta traz-nos de volta a nós, para analisar a base física do fluir do tempo e os fenómenos que lhe estão associados, sendo o primeiro deles a nossa evidente liberdade de determinar o futuro<sup>5</sup>.

A quinta é dedicada à forma como podemos pensar hoje a natureza<sup>6</sup>. Na sexta, procuro entrelaçar os fios deste saber riquíssimo, mas refratário a certezas e a fundamentos últimos. Num Apêndice aprofundado, discuto o funcionamento da ciência — a mesma que nos abriu o mundo estranho que estou prestes a descrever<sup>7</sup>.

## *Terra*

Antes de chegar aos *quanta*, tema desta primeira lição, começo por uma observação. Nós, humanos, habitamos a superfície do planeta Terra, um lugar singular: possui aspetos nada comuns no universo. Não são únicos — existem outros planetas semelhantes à Terra —, mas o cosmos imenso difere profundamente da nossa casa. As particularidades da superfície do nosso planeta conduzem-nos a preconceitos que dificultam a compreensão da vastidão do mundo. Eis algumas.

*A superfície da Terra é muito pequena.* Tão pequena que, para dar a volta, a luz demora um décimo de segundo: menos do que conseguimos captar com os sentidos. É por isso que comunicamos de forma quase instantânea: falamos ao telefone entre Nova Iorque e Xangai como se estivéssemos lado a lado. Não poderíamos fazê-lo com um amigo que vivesse na órbita de outra estrela. Para ir e voltar da estrela mais próxima, um sinal levaria anos. Uma conversa dessas far-nos-ia morrer de

tédio. A pequenez da Terra dá-nos a impressão de que existe um tempo partilhado. Que parece perfeitamente natural perguntar o que está a acontecer agora mesmo noutra lugar qualquer: basta fazer um telefonema para descobrir. Mas no vasto mundo não é assim. A ideia de um tempo comum funciona aqui, entre nós, bons vizinhos neste nosso planeta, mas não se aplica ao resto do universo.

*Na Terra há objetos.* Uma pedra, uma caneta, uma casa — são objetos, coisas. Entidades sólidas, bem definidas, estáveis no tempo. O que nos leva a acreditar que a natureza é feita de coisas. Mas basta pensar em Júpiter, Saturno ou no Sol para percebermos que nem sempre é assim. São mundos mais vastos do que a Terra, onde ocorrem todos os tipos de fenómenos, mas de natureza fluida. Aqui, os fenómenos não são interpretáveis enquanto objetos. Em Saturno não há coisas.

*A superfície da Terra está rodeada por ar.* O ar é uma substância estranha, tratamo-lo como se não existisse: dizemos «este copo está vazio» quando está cheio de ar. A evanescência do ar leva-nos a imaginar o espaço como vazio. Mas no cosmos nada é verdadeiramente vazio.

*Um quarto da superfície terrestre possui grande rigidez.* Terramotos e bradissismos são raros, os continentes movem-se com lentidão extrema. Esta circunstância oferece-nos a oportunidade peculiar de nos situarmos: dar nomes às regiões da Terra e usá-los para dizer onde as coisas estão — «estou em Princeton» ou «estou na ponte Pietra, em Verona». Se só houvesse mar, onde a água nunca permanece imóvel, seria muito mais difícil situarmo-nos, como tão bem sabem os marinheiros. A existência de lugares fixados pela rigidez dos continentes leva-nos a pensar o espaço de uma forma que não se aplica a outros horizontes. Permite-nos dizer «fico no mesmo sítio» para indicar que «não me movo em relação à superfície sólida da Terra». Em Júpiter, no entanto, não é claro o que significa «fico no mesmo sítio».

Na Terra, a gravidade é mais ou menos a mesma em qualquer lugar. Por isso, o tempo que medeia entre o momento em que nos separamos e o momento em que nos reencontramos é igual para todos. No vasto universo não é assim. O tempo passa a velocidades diferentes para viajantes diferentes: quando se reencontram, geralmente não envelheceram o mesmo número de anos.

\* \* \*

Uma criança que cresce numa aldeia imagina que o mundo inteiro se parece com essa aldeia. Espera encontrar os mesmos hábitos, os mesmos costumes, a mesma língua. Ao descobrir a diversidade do mundo, enche-se de espanto. Esse espanto constitui a beleza do aprender. É isto a ciência.

Mas nem sempre é fácil libertarmo-nos das ideias que formámos na nossa terra natal. Mesmo depois de aprendermos que em Londres os gatos se chamam *cats* e em Nova Deli se chamam *billee*, custa-nos aceitar que o verdadeiro nome do felino não seja, afinal, «gato».

É-nos instintivo assumir particularidades locais como verdades universais. Não nos damos facilmente conta de que coisas que nos parecem óbvias são apenas aspetos da «jeira que nos torna tão ferozes»<sup>8</sup>, como Dante chama à Terra quando a vê, no final do Paraíso, lá em baixo, pequenina, do alto do céu das estrelas fixas.

As particularidades da superfície da Terra, a aldeia onde crescemos, geram em nós preconceitos dos quais não nos libertamos facilmente. Se não quisermos ser como a criança que só conhece a sua aldeia, devemos aprender a distanciar-nos dela.

No vasto mundo, não existem objetos, espaço vazio ou modos absolutos de localizar acontecimentos. Dizer que algo permanece no lugar nada significa. Tal como nada significa falar de um «agora» em lugares distantes, já que não existe um tempo

comum... A realidade, como veremos aos poucos, é mais complexa, mais heterogênea do que aquela a que estamos habituados.

### *Velocidade*

Permitam-me que me demore um pouco mais sobre outro facto elementar antes de avançar para a ciência do século xx. Trata-se de um facto que introduz uma ideia cuja importância se tornará evidente ao longo deste livro.

Considere, caro leitor, cara leitora, um objeto ao seu lado. Por exemplo, a cadeira em que se encontra sentado (ou o sofá em que está deitada). Observe-o e pergunte-se se está imóvel ou em movimento. Se não estiver imóvel, pergunte-se a que velocidade se move.

A primeira resposta instintiva será que, se ninguém a mover, a cadeira está parada. A menos que, obviamente, esteja a ler estas linhas num comboio ou num avião, caso em que o assento em que se encontra se move rapidamente com o comboio ou o avião, podendo a velocidade atingir centenas de metros por segundo.

Mas talvez já lhe tenha ocorrido que a Terra se move: gira sobre si própria e percorre a sua órbita em torno do Sol. Movemo-nos todos com ela, a uma velocidade considerável. Quer isso também dizer que a cadeira se move com a Terra.

Mas não é tudo. Também a galáxia está em rotação, e o sistema solar com ela. A cadeira move-se, com a galáxia, a grande velocidade. E a galáxia? Não viajará ela também a uma certa velocidade em relação a outra coisa?... Mas em relação a quê?

Poderemos nós deter-nos nesta sequência de referências *relativamente às quais* nos perguntamos a que velocidade se move a cadeira? Existirá algum ponto de referência último, *verdadeiramente* imóvel, que nos permita dizer qual é a velocidade real da cadeira?

A resposta é conhecida por qualquer bom estudante de Física. A resposta é não. Foi intuída por Galileu Galilei há quatro séculos e progressivamente esclarecida com o desenvolvimento histórico da mecânica. Não existe uma referência absoluta que nos permita afirmar o que está parado e o que se move, senão relativamente a outra coisa. A única pergunta que faz sentido é se um objeto está parado ou não *em relação a algo*. A questão de saber se um objeto, *em si mesmo*, está parado ou em movimento é desprovida de sentido<sup>9</sup>.

De modo geral, fixamos implicitamente uma referência, sem a enunciar. A Terra oferece uma referência conveniente: sólida, grande, acessível. Quando dizemos «parado», frequentemente queremos dizer «parado em relação à Terra». Mas nem sempre. Se, a bordo de um avião, o senhor da fila da frente diz ao filho «está parado», certamente não espera que a pobre criança se lance pela janela para ficar parada *em relação à Terra*. Quer simplesmente dizer que não deve correr *em relação ao avião*. Quando estudamos os movimentos dos planetas, tomar a Terra como referência não é aconselhável: melhor será o Sol<sup>10</sup>. Na nossa atual compreensão do mundo, não existe uma referência absoluta<sup>11</sup>.

Porém, dado que estamos habituados a usar a Terra como referência, parece-nos natural pensar que, *ainda assim*, deva existir uma referência última e verdadeira, mesmo que a Terra se mova em relação ao Sol e as galáxias umas em relação às outras.

É-nos instintivo pensar que, *no fundo*, o facto de um objeto estar parado ou não deve ter sentido por si mesmo, independentemente do que fazem ou de onde estão os outros objetos. Enganamo-nos. É como pensar que, mesmo que os gatos tenham nomes diferentes nas várias línguas, *no fundo* deveriam ter um nome *verdadeiro*.

\* \* \*

Perdoe-me, caro leitor, se pareci pedante ao insistir numa ideia que talvez já lhe fosse familiar. Trata-se de algo que se estuda na escola, na física elementar.

Mas não creio que se reflita o bastante sobre quão radical é a descoberta de que a velocidade é uma propriedade relativa. Não é fácil digerir esta ideia, que, se pensarmos bem, é verdadeiramente surpreendente.

Durante o mês em que lecionei as aulas que deram origem a este livro, fiz amizade com um jovem brilhante que trabalhava no Departamento de Filosofia. Ao falar com ele, percebi que conhecia esta física, mas não acreditava nela! Um dia, durante uma discussão, disse-me: «Vá lá, Carlo, tem de haver um sentido *absoluto* em que algo ou se move ou está parado.» Aceitava a ideia de que não é possível *medir* se um objeto está em movimento ou não, mas insistia em pensar que o movimento, ou a sua ausência, deveria, *ainda assim*, ser um facto real, mesmo que não se possa observar. Um jovem do Departamento de Filosofia de uma das mais prestigiadas universidades do mundo não tinha assimilado o que Galileu Galilei compreendera quatro séculos antes<sup>12</sup>.

O que o levava a acreditar que há algo de real no movimento absoluto, mesmo que não fosse observável? A resposta que me deu é um dos motivos pelos quais escrevo este livro.

Respondeu-me: «Porque está na própria natureza do *conceito* de movimento que uma coisa se mova ou esteja parada.»

O mundo, na sua perspectiva, deve conformar-se aos nossos conceitos.

Onde está o erro? Não há dúvida de que, na própria natureza do seu *conceito* de movimento, tudo ou se move ou está parado. Um filósofo capaz de uma análise conceptual rigorosa vê com clareza o que implica um determinado conceito de movimento.

O erro está noutra lugar: em não compreender que esse conceito de movimento é inadequado para explicar o mundo real.

Por outras palavras, o meu amigo considerava a sua intuição, baseada no seu conceito de movimento, mais fiável do que o saber acumulado pela humanidade ao longo dos últimos quatro séculos.

O seu erro foi não perceber que a intuição em que assenta o seu conceito de movimento resulta de uma experiência limitada e, como tal, adequada apenas para descrever um âmbito restrito da realidade (o âmbito que nos é familiar, a nós, vagarosas formiguinhas na superfície sólida do pequeno planeta Terra).

O que o meu amigo não via é que os conceitos são fruto da experiência e que, quando a experiência é limitada, como a nossa é sempre, podem revelar-se inadequados para descrever o mundo real.

Não via que, para melhor compreender o mundo, temos de permitir que os nossos conceitos evoluam, ainda que isso nos pareça, a princípio, contraintuitivo.

Receio que parte da filosofia contemporânea esteja enredada neste erro. O erro consiste em julgar que os conceitos de que dispomos são necessariamente adequados para compreender a realidade, mesmo para lá do âmbito em que se formaram.

O erro é permanecer preso a um esquema conceptual e não perceber que pode já não funcionar à luz do que se descobre quando olhamos um pouco além.

\* \* \*

Há uma segunda razão pela qual discuti a relatividade da velocidade.

Introduz uma ideia que desempenha um papel em todas as páginas que se seguem: existem propriedades que atribuímos às coisas, que não dizem respeito às próprias coisas, mas às *relações* com outras coisas.

A velocidade de um objeto é sempre uma propriedade de dois objetos: é a velocidade de um *em relação ao outro*. Como veremos no próximo capítulo, a ideia de que as propriedades que julgamos caracterizar um objeto são, na verdade, relações entre coisas diferentes — tal como sucede com a velocidade — terá um papel central.

Para descrever as velocidades de um conjunto de galáxias, podemos escolher uma delas como referência. Ao fazê-lo, descrevemos as galáxias tal como aparecem do ponto de vista de uma delas. Faria sentido descrever velocidades cósmicas absolutas de cada galáxia, como se observadas *de fora do mundo*? Não, não teria qualquer significado, porque não existe um «fora do mundo», não existe um lugar privilegiado de onde possamos observar o mundo do exterior.

Descrevemos sempre o mundo *a partir de dentro*.

Esta é uma indicação valiosa. Frequentemente, procurar pontos de referência últimos, absolutos, a partir dos quais observar, pode não fazer sentido.

E, no fundo, pode até nem ter utilidade. Pense por um momento: de que nos serviria saber se esta cadeira se move ou não num sentido absoluto? De nada. O que nos interessa concretamente é saber se alguém a moveu ou não. Em relação ao chão.

Isto, como veremos gradualmente, será um motivo recorrente ao qual nos conduzem diversos ramos da física: das intuições de Galileu à mecânica quântica, à qual chegarei, finalmente, no seguimento desta lição; passando pela natureza do conhecimento, que discutirei na próxima lição; e culminando na gravidade quântica, de que falarei na seguinte.

Já o entediei bastante, caro leitor, com a física do passado. É chegado o momento de passarmos à física atual.

## *Quanta*

A descoberta dos fenómenos quânticos é a novidade mais estranha da nova ciência. Fenómenos observados em laboratório<sup>13</sup> levaram a uma revisão da forma como pensamos a matéria. A física quântica revelou-se de enorme eficácia ao explicar os factos do mundo, pequenos e grandes.

O preço deste sucesso é uma revisão conceptual radical. Mais radical do que a descoberta de que a velocidade é relativa. Mas, em certa extensão, semelhante a esta.

A novidade dos fenómenos quânticos foi compreendida pelo notável cientista que mais profundamente refletiu sobre o que eles nos dizem acerca do mundo, o dinamarquês Niels Bohr. Segundo Bohr, o cerne dos fenómenos quânticos está na

impossibilidade de separar, de forma clara, o comportamento dos sistemas atómicos da interação com o instrumento de medição que serve para definir as condições em que o fenómeno se manifesta<sup>14</sup>.

O que é importante nestas palavras não é que o sistema seja «atómico» ou que interaja com um «instrumento de medição». Passados cem anos, compreendemos que a ideia que Bohr intuiu se aplica a qualquer parte do mundo, «atômica» ou não, e à interação com qualquer outra parte do mundo, «instrumento de medição» ou não.

Por conseguinte, devemos reformular as palavras de Bohr do seguinte modo:

*As propriedades de um sistema físico não podem ser consideradas separadamente das interações nas quais estas propriedades se manifestam ou dos sistemas aos quais se manifestam.*

Este é o núcleo conceptual da mecânica quântica. Por vezes designa-se por «contextualidade», ou seja, dependência (do valor das variáveis físicas) do «contexto», isto é, daquilo que está à nossa volta. Vejamos o que significa.

Antes da descoberta dos *quanta*, acreditávamos poder pensar o mundo como formado por objetos com propriedades próprias, independentes de tudo o resto e caracterizadas por um valor definido a cada instante.

O materialismo do século XVIII pensava o mundo à maneira de Demócrito: um enxame de partículas, cada qual com variáveis próprias, como a posição, que a descrevem. Esta imagem do mundo é poderosa, mas não dá conta dos fenómenos quânticos<sup>15</sup>. Já posta em causa pela descoberta dos campos elétricos e magnéticos no final do século XIX, esta ideia do mundo — partículas que viajam no espaço — entrou em crise no início do século XX. A realidade é mais complexa do que isso.

Durante séculos, a física e a metafísica assumiram que as variáveis que descrevem qualquer entidade física captavam propriedades próprias dessa entidade. E que tais propriedades existiriam independentemente de quaisquer interações. Que cada objeto, interagisse ou não com outro, teria sempre propriedades próprias, bem definidas.

Os fenómenos quânticos não são compatíveis com esta ideia.

\* \* \*

Tentemos pôr ordem neste assunto. A física usa a expressão genérica «sistema físico» para designar qualquer porção da natureza: átomo, par de fótons, ser humano, galáxia...<sup>16</sup> Para descrever o seu comportamento, recorreremos a «variáveis», como a posição de uma pessoa, a energia de um átomo, a frequência de um fóton ou a extensão de uma galáxia<sup>17</sup>. Chamam-se «variáveis» porque variam: a mesma pessoa pode ter agora uma posição, depois outra.

As variáveis de um sistema físico manifestam-se quando o sistema atua sobre algo: a interação deixa um vestígio que depende dessas variáveis. Uma pessoa que caminha na praia deixa um rasto na areia que depende da sua posição. Um fotão deixa um rasto na nossa retina que depende da sua frequência e que o nosso olho interpreta como cor. E assim sucessivamente.

O salto que a mecânica quântica nos pede para dar é deixar de pensar que as variáveis têm valores definidos *fora dessas interações*.

Ou seja, compreender que as propriedades de um objeto são apenas os modos pelos quais ele influencia qualquer outra coisa.

Para um objeto, ter uma propriedade *nada* mais significa do que influenciar outro objeto de um certo modo. As propriedades de um objeto são *relações* entre objetos: referem-se a interações físicas.

Em suma: a mecânica quântica é a descoberta de que os valores das variáveis de qualquer sistema são apenas *relativos* a outro sistema e só se concretizam nas *interações* com ele.

\* \* \*

Esta leitura dos fenómenos quânticos e da contextualidade chama-se «interpretação relacional»<sup>18</sup> porque as *relações* entre sistemas diferentes desempenham um papel central. (Foi esta a ideia que despertou a atenção de Bas van Fraassen nos primórdios da minha relação com os filósofos de Princeton mencionada no Prefácio.)<sup>19</sup>

A física quântica pede-nos que abandonemos a venerável estrutura de pensamento que durante tanto tempo sustentou toda a nossa visão do mundo: a ideia de que ele é formado por coisas com propriedades próprias, independentes de tudo o resto.

Para compreender os fenómenos quânticos, devemos pensar, pelo contrário, que as variáveis que os descrevem só

adquirem valor no momento de uma interação. O valor que assumem é uma propriedade do *par* de sistemas em interação. O mundo está inextricavelmente interligado.

\* \* \*

Vou tentar tornar esta história mais concreta através de um exemplo clássico, que demonstra que um objeto só tem propriedades definidas quando interage: a passagem de um eletrão através de uma fenda dupla. Trata-se de uma discussão um pouco técnica; se preferir, pode avançar diretamente para o fim do capítulo. Não perde nada de essencial.

Um eletrão pode deixar um rasto, primeiro de um lado e depois do outro, numa parede com duas fendas. Se o eletrão tivesse sempre uma posição bem definida, para passar de um lado para o outro teria forçosamente de atravessar *uma* das duas fendas. Estranhamente, não é assim.

A questão é esta: *se fecho uma ou outra das duas fendas, o eletrão chega a pontos do ecrã que não são atingidos se ambas as fendas estiverem abertas.*

Pense nisto por um momento: se apenas a fenda da direita estiver aberta, o eletrão chega a um ponto *P* do ecrã; se apenas a fenda da esquerda estiver aberta, também chega ao mesmo ponto *P* do ecrã; mas, se ambas estiverem abertas, *nunca* atinge o ponto *P*!

Quanto mais se pensa nisto, mais estranho parece.

É como se, ao atravessar uma fenda, o eletrão soubesse que a outra está aberta e só o facto de a outra estar aberta o impedisse de chegar àquele ponto específico. São estas as estranhezas quânticas que se observam nos laboratórios.

Os físicos usam uma linguagem colorida para ilustrar estes fenómenos estranhos. Dizem que o eletrão «passa por ambas as fendas» ou que «se transforma numa onda difusa no espaço»,

atravessando como onda as duas fendas e colapsando depois «num único ponto do ecrã». Ou que, ao atravessar a parede, o eletrão se encontra numa «sobreposição quântica de duas posições», uma correspondente a cada fenda.

Trata-se apenas de palavras coloridas para indicar que o eletrão só tem uma posição definida quando interage com o ecrã.

O nome técnico deste fenómeno é *interferência*. A «parte» do eletrão que passa por uma fenda e a «parte» que passa pela outra fenda «interferem», impedindo-se mutuamente de chegar ao ponto *P*.

No entanto, o eletrão não tem partes: se instalarmos dois detetores nas duas fendas, só um deles vê passar o eletrão, inteiro. E — magia —, ao vê-lo passar, destrói a interferência: ou seja, o eletrão pode novamente chegar ao ponto *P*! Como se, ao vê-lo passar por uma fenda, se destruísse a «parte» do eletrão que passa pela outra. :-O

\* \* \*

Há mais duas novidades que surgem nos fenómenos quânticos além desta estranha contextualidade. São muito mais simples.

A primeira é o aparecimento de uma *probabilidade* irreduzível na nossa capacidade de prever acontecimentos. Por mais rigorosas que sejam as medições que fazemos de um sistema, não nos permitem prever o seu futuro com uma precisão arbitrariamente grande. Na melhor das hipóteses, podemos prever a *probabilidade* (aqui no sentido de frequência) de obter um ou outro resultado<sup>20</sup>.

A segunda novidade é a *granularidade* das variáveis físicas. Em geral, estas só podem assumir certos valores (*quantizados*) e não outros. Por exemplo, a energia de uma partícula numa caixa, ou de um eletrão à volta de um átomo, só pode assumir determinados valores e não outros. O mundo em pequena escala

revela uma granularidade peculiar. A constante de Planck fixa a escala desta granularidade elementar.

Ainda que a probabilidade e a granularidade sejam duas descobertas importantes, não são tão radicais quanto a contextualidade.

\* \* \*

Em concreto, a teoria quântica é uma estrutura matemática<sup>21</sup> que permite calcular duas coisas: que valores (*granulares*) das variáveis são possíveis<sup>22</sup> e a *probabilidade* dessas variáveis assumirem um ou outro desses valores *relativamente a um dado sistema físico*, conhecendo alguns desses valores *relativos ao mesmo sistema*. Essas probabilidades condicionais são chamadas «probabilidades de transição»<sup>23</sup>.

Dado que as variáveis assumem valores em relação a outros sistemas e deixam vestígios de si, e, com isso, *informação* sobre si noutros sistemas, podemos afirmar que a mecânica quântica descreve a *informação* que os sistemas físicos têm uns dos outros. (Na próxima lição veremos a relevância muito geral desta noção de informação).

Podemos sempre perguntar que informação temos sobre um sistema ou que informação um sistema possui acerca de outro.

Não há um «como é este sistema?» senão *relativamente* a outro sistema.

\* \* \*

Antes de deixar os aspetos técnicos dos *quanta*, acrescento algumas palavras sobre os «estados quânticos» de que tantas vezes se fala. Quando um sistema não interage, os físicos falam do seu estado  $\psi$ . O estado quântico  $\psi$  é uma entidade matemática que

sintetiza os vestígios que um sistema deixa noutro. É também relativo ao segundo sistema sobre o qual o primeiro deixou esses vestígios. Foi Hugh Everett III quem primeiro o compreendeu, nos anos cinquenta, ao redigir um trabalho que exerceu grande influência sobre as ideias que aqui apresento<sup>24</sup>.

É enganador pensar  $\psi$  como se fosse uma entidade: trata-se, antes, de um modo de ter em conta os vestígios deixados por um sistema noutro<sup>25</sup>. É também um instrumento para calcular probabilidades de vestígios futuros<sup>26</sup>. Interpretar  $\psi$  como uma entidade e pensar a realidade objetiva como se fosse descrita pela evolução de  $\psi$  ao longo do tempo são erros comuns, fruto da confusão conceptual gerada pelos primeiros trabalhos de Schrödinger sobre a mecânica ondulatória<sup>27</sup>.

\* \* \*

Estamos quase no fim da primeira lição, mas ainda não chegámos à parte mais surpreendente desta história. Para apreciar plenamente a profundidade das implicações da contextualidade dos fenómenos quânticos é preciso considerar o caso em que não é um eletrão que se encontra em «sobreposição de duas posições», mas um observador de carne e osso, como nós, que descreve o mundo à sua volta.

Esta situação foi imaginada por Eugene Wigner numa célebre experiência ideal, que lança luz sobre estas implicações. Agarrem-se bem porque vamos voar.

### *Perspetivas*

Wigner imagina pedir a um amigo que entre numa sala bem isolada e meça alguma coisa. O amigo mede uma variável de algo e obtém um determinado valor.

Depois, Wigner, com uma medição muito precisa de toda a sala (incluindo o amigo), revela um fenômeno de interferência que mostra que o próprio amigo, *em relação a Wigner*, estava numa sobreposição de dois estados: um em que mediu uma coisa e outro em que mediu algo diferente<sup>28</sup>. Esta é a experiência ideal de Wigner.

Realizar uma experiência semelhante é extraordinariamente complicado, porque qualquer amigo de Wigner seria demasiado massivo para que nele se pudessem observar os delicados fenômenos quânticos, que, em geral, são ínfimos quando se trata de objetos grandes. Mas a mecânica quântica diz-nos o que aconteceria se conseguíssemos observá-los — e acreditamos nela, não temos qualquer motivo para duvidar, visto que, há um século, tudo o que prevê, mesmo as coisas mais estranhas, se tem confirmado. Até prova em contrário, é o melhor conhecimento de que dispomos sobre como o mundo funciona.

Ora bem, a mecânica quântica diz-nos que o amigo vê um determinado valor da posição do elétron, mas, *ainda assim*, Wigner pode observar a interferência entre a sobreposição de diferentes valores vistos pelo seu amigo.

Imaginemos que o amigo vê por qual das fendas passa um elétron que chega a uma parede de duas fendas. Wigner observará interferência. Mas não a teria observado se *ele próprio* tivesse visto a posição do elétron!

À primeira vista, parece paradoxal: se a posição é observada por Wigner, já não há interferência; mas, se é observada pelo amigo, a interferência permanece.

A solução deste aparente paradoxo é que é errado pensar a posição do elétron em abstrato. A posição do elétron *relativa ao amigo* está determinada, enquanto a *relativa a Wigner* não. A determinação relativa ao amigo não influencia o que Wigner verá.

Para o amigo, o elétron passa por uma fenda. Para Wigner, passa por ambas.

Para Wigner, há sobreposição entre dois valores, e o próprio amigo encontra-se numa sobreposição quântica de dois estados: um estado em que viu um valor e outro em que viu um diferente<sup>29</sup>.

Assim, relativamente a outro observador, cada um de nós poderia estar numa sobreposição quântica! Mas, se, caro leitor, procurar perguntar-se sobre como seria estar no lugar do amigo de Wigner, nessa sobreposição quântica, e tentar imaginar misteriosas sobreposições de perceções, estará no caminho errado: em relação a si, apenas um dos eventos se realiza.

À semelhança do que sucede com a velocidade, mas de forma muito mais abrangente, já que diz respeito a *todas* as variáveis físicas, a mecânica quântica conduz-nos a um mundo tecido de relações, não de eventos absolutos.

Perguntar «isto aconteceu?» só tem sentido se especificarmos em relação a quem.

Analogamente ao caso da velocidade, tudo isto mostra que não faz sentido pensar que podemos observar o mundo de fora: só podemos falar de variáveis de um sistema relativas a outros sistemas, estados de um sistema relativos a outros estados.

Tal como não faz sentido perguntar, em absoluto, se um objeto está parado ou em movimento, também não faz sentido falar do estado de um sistema ou do valor que as suas variáveis assumem.

O que aprendemos sobre o mundo no século xx é que, ao falarmos das propriedades<sup>30</sup> de um objeto, estamos sempre, mais ou menos implicitamente, a referir-nos a outro objeto em relação ao qual essas propriedades se manifestam.

Se observo um átomo numa posição, este átomo está nessa posição *em relação a mim*. Mas pode não estar nessa mesma posição relativamente a outro sistema<sup>31</sup>. Não há um «como?» senão em sentido relativo.

Esta é uma redução radical do ser à interação.

## SEGUNDA LIÇÃO

### DO INTERIOR DO CÍRCULO

#### *Conhecimento*

Sabemos coisas sobre o mundo.

Temos *informações* sobre o mundo. O que queremos dizer quando afirmamos que uma pessoa, um objeto ou um sistema físico «tem informação» sobre outra coisa?

A expressão «ter informação» sobre algo usa-se num sentido muito geral. Há algo em comum quando dizemos que Alice tem informação sobre onde está Roberto, que o quadro de horários tem informação sobre a chegada de um comboio, uma camada geológica no solo tem informação sobre o clima de uma época distante, a memória de um computador contém informações ou que um rasto na areia tem informação sobre a passagem de uma gazela:

*Dizemos que uma coisa A tem informação sobre uma coisa B sempre que, interrogando ou observando A, conseguimos aprender algo sobre B<sup>1</sup>. Isto é verdade em cada um dos exemplos acima.*

Esta caracterização assume um sentido muito geral do que entendemos por «ter informação sobre algo». Do ponto de

vista técnico, corresponde à noção de «informação relativa» (*mutual information*) introduzida por Shannon, o primeiro investigador da teoria da informação, nos anos quarenta do século passado<sup>2</sup>.

Em física, se ao observar *A* conseguimos aprender algo sobre *B*, diz-se que uma observável de *A* está «correlacionada» com uma de *B*. Os estados possíveis de *A* e *B* não são independentes entre si. Há um vínculo entre os dois sistemas.

Se, por exemplo, uma moeda com uma figura num lado e uma coroa no outro estiver pousada sobre a mesa, a face virada para cima poderá ser cara ou coroa. A face virada para baixo também poderá ser cara ou coroa. No entanto, as duas possibilidades para a face de cima não são independentes das duas possibilidades para a face de baixo: olhando para a face de cima, sabemos o que está na face de baixo. Nesse sentido, a face de cima *contém informação* sobre a face de baixo (e vice-versa)<sup>3</sup>.

Existem correlações semelhantes entre a camada geológica no solo e o clima de há milhões de anos, entre o quadro de horários da estação e o comboio que está a chegar ou entre a localização de Roberto e algo no cérebro de Alice que a conhece. Perguntar a Alice, olhar para o quadro, estudar uma camada geológica ou procurar pegadas na areia permitem-nos saber algo sobre Roberto, sobre os comboios, sobre o clima passado ou sobre a passagem da gazela... Nesse sentido, Alice, o quadro, a camada geológica ou a areia têm informação.

O caso de Alice e Roberto é mais complexo do que os outros. O facto de Alice ter informação sobre Roberto envolve os processos mentais de Alice, o modo como funciona a sua memória, a linguagem, toda a estrutura de pensamentos, convenções e ideias, etc. Mas, por mais variadas que sejam essas possibilidades e por mais complexos que sejam os processos

envolvidos no saber de Alice, permanece o facto de que, para saber algo sobre Roberto, aquilo que existe concretamente na cabeça de Alice tem de estar correlacionado, de uma forma ou de outra, com Roberto: com o seu estado, a sua natureza ou a sua história.

Se, por exemplo, Alice sabe onde Roberto se encontra agora, então há algo de concreto no cérebro de Alice — um processo físico, uma configuração física — onde está depositada essa informação. Há um *certo* processo ou configuração se Roberto está em Roma; um processo ou configuração *diferente* se, por sua vez, estiver em Bolonha.

Por outras palavras, para que nós — a nossa memória, os nossos processos mentais, os nossos manuais, os nossos artigos e livros, *este livro...* — conheçamos o mundo, devem existir *correlações* físicas entre nós e o mundo. Graças a estas correlações, alguém, em princípio, pode aprender algo sobre o mundo perguntando-nos.

O ponto essencial a que quero chegar é que *todo o conhecimento se encontra necessariamente, concretamente, encarnado numa configuração física.*

Se Alice sabe que Roberto está em Roma, então, necessariamente, na Alice, enquanto sistema físico, deve haver algo *físico* diferente daquilo que existiria se Alice soubesse que Roberto está em Bolonha.

Nesse sentido, o conhecimento é uma (forma particular de) correlação entre partes concretas do mundo físico.

Esta simples observação, a meu ver frequentemente negligenciada, tem implicações surpreendentes e de grande alcance. Antes de as esclarecermos, perguntemo-nos quão *fiáveis* são as informações que podemos ter.

Ao ilustrar a grande revolução científica em curso, Carlo Rovelli apresenta-nos a sua mais importante — e alarmante — implicação: a impossibilidade de encontrar um fundamento último para a realidade.

No final de 2024, o físico italiano Carlo Rovelli aceitou o convite do Departamento de Filosofia da Universidade de Princeton para dirigir um conjunto de discussões sobre a abordagem relacional à mecânica quântica. O espírito dessas conversas deu o mote para *Sobre a igualdade de todas as coisas*, que propõe uma visão do mundo baseada nas relações e perspetivas que se estabelecem entre os diferentes elementos.

A ciência do século xx mudou para sempre a nossa compreensão da realidade, embora estejamos longe de poder afirmar que essa realidade faça sentido (talvez isso nunca aconteça). No entanto, graças à mecânica quântica, vemo-nos livres para trilhar caminhos outrora vedados ao pensamento humano.

«Elétrões e mente, pedras e leis, júzios e galáxias não são de natureza essencialmente diferente. São noções que se iluminam reciprocamente.» A realidade é moldada por esse jogo contínuo de reflexos e daí emerge a principal perceção de Rovelli: a igualdade de todas as coisas. Somos feitos da mesma matéria que o resto da realidade — e, portanto, num sentido mais profundo, estamos em casa neste mundo.



CARLO ROVELLI é físico teórico e membro do Instituto Universitário de França e da Academia Internacional de Filosofia das Ciências. Com vários livros publicados, como *Sete breves lições de Física* ou *A ordem do tempo*, Rovelli é, atualmente, responsável pelo Departamento de Física Teórica da Universidade de Aix-Marseille e professor afiliado do Departamento de História e Filosofia da Ciência da Universidade de Pittsburgh.



Penguin  
Random House  
Grupo Editorial

penguinlivros.pt  
penguinlivros

ISBN: 978-989-583-563-8



9 789895 835638