

São propostas três teses principais. A primeira é a ideia de que um *quantum* ou unidade mínima não é um exclusivo da teoria quântica, uma vez que surge já nas teorias clássicas da electricidade e electrólise. Em segundo lugar, as peculiaridades dos objectos descritos pela teoria quântica são os seguintes: as suas leis são probabilísticas; algumas das suas propriedades, como a posição e a energia, são espalhadas e não concentradas; duas partículas que antes estiveram juntas continuam a estar juntas mesmo depois de separadas; e o vácuo tem propriedades físicas, sendo por isso um tipo de matéria. Em terceiro lugar, a interpretação ortodoxa ou de Copenhaga é falsa e pode ser convenientemente substituída por uma interpretação realista (embora não classicista). A desigualdade de Heisenberg, o gato de Schrödinger e o paradoxo do *quantum* de Zenão são discutidos à luz das duas interpretações rivais. Mostra-se também que as experiências que falsearam a desigualdade de Bell não refutam o realismo mas um classicismo inerente às teorias de variáveis escondidas.

MARIO BUNGE

Departamento de Filosofia, Universidade de McGill, 855 St West,
Montreal, Quebec, Canadá H3A 2T7

martabunge@hotmail.com

Tradução de Florbela Meireles, revista por Carlos Fiolhais

VINTE E CINCO SÉC FÍSICA QUÂNTICA

De Pitágoras até hoje e do subjectivismo ao realismo

(1ª Parte)

Um *quantum* é uma unidade básica ou indivisível, tal como o cêntimo no sistema monetário europeu, a carga eléctrica do electrão e um *bit* de informação. É usual crer que os *quanta* são exclusivos da Física quântica e que só surgiram há cerca de um século. Quero refutar essas duas teses.

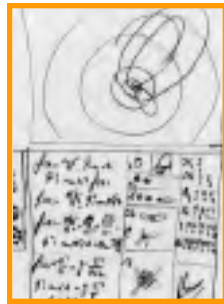
Com efeito, o primeiro a descobrir os *quanta* não foi Planck em 1900, mas Pitágoras no século VI a.C. Fê-lo quando estudava cordas vibrantes como as da harpa. De facto, descobriu que as frequências dessa corda são múltiplos inteiros de uma frequência base ou harmónico.

Também afirmo que uma peculiaridade dos *quantões* – o nome que dou aos objectos da teoria quântica – não é tanto o facto de algumas das suas propriedades variarem por saltos. É antes que, salvo algumas excepções, as suas propriedades, como a posição e a energia, são espalhadas e não concentradas. Mais precisamente, os seus valores obedecem a distribuições de probabilidade.

Outra peculiaridade da física quântica é que ela atribui propriedades físicas ao vácuo electromagnético. Este é um campo flutuante com intensidade média nula que exerce uma força sobre os electrões atómicos, causando o seu declínio "espontâneo" para níveis de energia mais baixos, assim como outros efeitos mensuráveis.

Uma terceira peculiaridade dos quantões é que, se eles tiverem estado juntos, não perdem essa associação: não se

ULOS DE



Notas de Niels Bohr

tornam completamente separáveis, ou individualmente localizáveis, mesmo que a distância entre eles seja grande. Os quântões são certamente estranhos para o senso comum. Contudo, partilham algumas propriedades com os objectos da Física clássica, ou clássões. Um deles, seguramente o mais importante, é que existem independentemente da mente do observador. Assim, a Física quântica, contrariamente à opinião generalizada, não exige uma mudança radical da teoria realista do conhecimento.

QUANTIZAÇÃO CLÁSSICA

QUANTIZAÇÃO DA FREQUÊNCIA: DE PITÁGORAS A D'ALEMBERT E FOURIER

É bem sabido que o sistema de crenças da fraternidade pitagórica era uma mistura de ouro e ganga. Uma das suas pepitas de ouro é a lei que diz que as frequências possíveis de uma corda vibrante são múltiplos inteiros de um tom harmónico básico (frequência). Isto é, as frequências possíveis de uma corda vibrante são ν , 2ν , 3ν , ..., $m\nu$.

As membranas e os sólidos em vibração têm propriedades semelhantes. Em todos estes casos a origem da descontinuidade é a mesma: na corda (ou membrana ou cilindro) atada nas pontas (ou bordos) há espaço para apenas um número inteiro de meias-ondas estacionárias. Nestes e noutros casos, a quantização é meramente um efeito das condições de fronteira fixas. Se estas forem relaxadas, as

ondas, desencadeadas por um estímulo, são progressivas em vez de estacionárias.

Em suma, Pitágoras descobriu a quantização das frequências de oscilação de corpos elásticos. Tal deve ser enfatizado para contrariar o mito de que apenas objectos microfísicos exóticos têm propriedades quânticas. Harpas, tambores, cristais, raios, pontes e muitos outros objectos têm também essa propriedade.

O primeiro a construir um modelo matemático de um corpo em vibração foi Jean Le Rond d'Alembert (1747), o grande matemático e físico que, com Denis Diderot, publicou a famosa *Encyclopédie*, que desafiou a ordem estabelecida. Dois séculos depois, a equação com o seu nome é ainda uma das fórmulas centrais da Física teórica. Graças a d'Alembert sabemos igualmente que, quando um músico faz vibrar uma corda de violino, a oscilação equivale à soma das vibrações de numerosas frequências e amplitudes: o violinista obtém uma sobreposição de ondas estacionárias.

Algo de semelhante acontece, claro, com as ondas de luz. As ondas estritamente monocromáticas são excepcionais: em geral, as ondas de luz são a soma de ondas de diferentes amplitudes e frequências. O caso da luz branca é extremo: compõe-se de ondas de luz de todas as frequências capazes de estimular a retina humana. Tudo isto são exemplos do princípio de sobreposição. Este é, de facto, um teorema em qualquer teoria linear de ondas, embora seja muitas vezes considerado um exclusivo da teoria quântica.

Se forem acrescentadas ondas de todas as frequências e amplitudes a onda resultante é uma série de harmónicos, inventada em 1822 por Joseph Fourier – sem qualquer parentesco com Charles, o socialista utópico. De facto, praticamente qualquer função ou curva, oscilação ou onda, estacionária ou progressiva, pode ser analisada como uma série (ou integral) de Fourier. Cada um dos termos desta série, como $\sin(n2\pi\nu t)$, representa uma onda (ou oscilação) elementar, que é um múltiplo inteiro da frequência básica ν . Assim, paradoxalmente, a continuidade resulta de uma acumulação de descontinuidades – estamos perante um caso de emergência.

O trabalho de Fourier foi o culminar de um processo de descobertas e invenções iniciadas por Pitágoras e reiniciadas por d'Alembert mais de vinte e dois séculos mais tarde. São exemplos do que se poderá chamar a lei de Merton (1968): *toda a descoberta ou invenção tem um*

precursor. Por sua vez, esta lei exemplifica a de Lucrecio: *Nada surge do nada*.

QUANTIZAÇÃO DA CARGA ELÉCTRICA: DE FARADAY A MILLIKAN

No seu estudo experimental da electrólise, Michael Faraday descobriu, em 1833, que o efeito químico de uma corrente electrolítica – isto é, a quantidade de matéria depositada num eléctrodo – é proporcional à quantidade de electricidade. Por sua vez, à luz da teoria atómica de Dalton, essa quantidade é vista como um múltiplo inteiro de uma certa carga básica ou elementar. Ou seja, a carga eléctrica é quantizada. Em 1911, Millikan descobriu que a unidade da carga eléctrica é a carga do electrão, que tinha sido descoberta em 1889. Colocando a afirmação na negativa: não há nenhum corpo com carga eléctrica fraccionária.

Estamos tão habituados a este resultado que não paramos para pensar que ele é tão surpreendente como o seria a descoberta de uma unidade natural de massa, sendo a massa de qualquer partícula ou corpo um múltiplo inteiro da massa de uma partícula elementar. Não é menos surpreendente que a teoria dos *quanta* não contenha um operador representando a quantização da carga. Esta parece ser uma falha a preencher: se fôssemos bons seguidores de Pitágoras fabricaríamos uma teoria quântica do campo electrostático, em que a carga do electrão surgiria como o *quantum* da electricidade.

QUANTIZAÇÃO MODERNA

QUANTIZAÇÃO DA ENERGIA: PLANCK, EINSTEIN E BOHR

Em 1900, Max Planck, embora algo relutante, postulou que um corpo negro, tal como um forno de microondas, não absorve ou emite energia radiante em quantidades arbitrárias mas sim em porções. Mais precisamente, a quantidade de energia electromagnética de frequência ν é um múltiplo inteiro da quantidade básica de energia $h\nu$, onde $h = 6,626 \times 10^{-27}$ erg . s é a famosa constante de Planck.

Uma peculiaridade desta constante é a sua extrema pequenez comparada com as acções que caracterizam os processos quotidianos (note que 1 erg . s é a acção dispendida ao puxar um berlinde de 1 g ao longo de uma distância de 1 cm à velocidade de 1 cm/s.). Uma outra peculiaridade de h é que é universal, ou seja, o seu valor

não depende do tipo de matéria (outras constantes semelhantes são G , c , e e k).

Cinco anos depois, Albert Einstein postulou que algo semelhante se aplica à radiação no espaço livre: que a energia total de um raio de luz de frequência ν é $n h \nu$, onde n é um número inteiro positivo. Por outras palavras, a radiação é composta por fotões, ou *quanta* do campo electromagnético (isto apenas se aplica à radiação: não se aplica aos campos electrostáticos ou magnetostáticos). Mais: a descoberta do efeito de Compton em 1923 confirmou a hipótese de Einstein de que o fotão tem um momento $h\nu/c$, tal como uma partícula. Contudo, um raio de luz visível de 1 erg é constituído por cerca de um trilhão de fotões. Não é de admirar, portanto, que se possa descrever aproximadamente pelas equações clássicas de Maxwell. Só raios de luz bastante fracos requerem a electrodinâmica quântica.



Albert Einstein aos 11 anos

Em 1911 Ernest Rutherford explicou o resultado das suas experiências de dispersão supondo que um átomo é feito de um núcleo duro de carga positiva cercado por electrões. Niels Bohr (1913) matematizou o modelo de Rutherford combinando-o com as ideias sobre radiação de Planck e Einstein. Para o conseguir acrescentou o postulado heterodoxo de que os estados de um átomo estável são enumeráveis. Cada um destes estados, caracterizado por um número inteiro positivo, corresponde à trajetória de um electrão em órbita em redor do núcleo.

Em linguagem técnica, Bohr afirmou que, num átomo, a acção (energia x tempo) é quantizada ou, mais precisamente, é um múltiplo inteiro da constante h de Planck. Isto sugere que uma transição entre dois estados estáveis sucessivos é descontínua. Tal acontecimento é um salto quântico em que o átomo ganha ou perde a energia $h\nu$, consoante absorve ou emite um fóton da mesma energia. A expressão "salto quântico" tem estado sempre presente desde então. No entanto, relembremos a intenção de Schrödinger de tentar analisar cada um desses saltos como um processo contínuo embora rápido. Isto pode aplicar-se, em particular, ao chamado colapso da função de estado causado por uma medição.

O modelo planetário do átomo de Rutherford-Bohr revelou-se de início tão bem sucedido e tornou-se tão popular que é ainda hoje o emblema da Física moderna. Isto apesar de se ter tornado obsoleto há três quartos de século. Na realidade, a teoria de Bohr é apenas parcialmente quântica, já que retém as ideias clássicas de órbita, forma, tamanho e valor exacto da energia. Estas características tornam-se difusas na mecânica quântica, embora reapareçam gradualmente no caso dos átomos pesados. Por outras palavras, as propriedades geométricas da matéria não são fundamentais, mas emergem quando o sistema se torna mais complicado.



Niels Bohr

VARIÁVEIS QUÂNTICAS E CLÁSSICAS

Louis de Broglie, Werner Heisenberg, Max Born, Pasqual Jordan, Erwin Schrödinger, Paul Dirac e outros construíram o *quantum* moderno entre 1924 e 1930.

(Conheci três dos fundadores – o que indica que a teoria é recente ou então que eu sou velho.) Esta teoria manteve os conceitos clássicos de espaço, tempo, massa e carga eléctrica. Por outro lado, abandonou os conceitos clássicos de posição, momento linear e angular e de energia. Em vez destes introduziu operadores que actuam na famosa função de estado ψ , formalmente semelhante a uma onda clássica, pelo que também se chama função de onda.

Esta semelhança formal sugeria no início que a matéria é semelhante às ondas: falava-se de ondas de matéria. Em 1927 Davisson e Germer confirmaram experimentalmente esta conjectura sob determinadas condições. Contudo, em condições diferentes, o aspecto corpuscular sobressai. Pode, portanto, falar-se da dualidade partícula – onda. Esta dualidade é óbvia na equação de Broglie $p = h/\lambda$. Não é menos evidente no microscópio de electrões (1933), onde os electrões são disparados como balas mas acabam por ser difractados como ondas.

Os objectos da mecânica quântica não são, portanto, nem partículas nem ondas. São algo *sui generis* que merece uma denominação própria. Propus o nome de *quantões*. A dualidade onda-partícula surge claramente na desigualdade de Heisenberg, chamada erradamente relação de indeterminação ou de incerteza. De acordo com ela, a posição e o momento linear têm distribuições cujas variâncias (ou desvios-padrão) são inversamente proporcionais. Mais precisamente, $x \cdot p \geq h/4\pi$. Isto é, quanto mais exacta for a *posição* (x pequeno), menos exacto será o *momento* (p grande). Se um quantão estiver bem localizado não há um valor exacto da velocidade, e, se tiver um valor exacto de velocidade, não está bem localizado (de notar que estou tacitamente a ver estas dispersões como propriedades objectivas dos quantões e não como erros de medição que poderiam conceberivelmente ser reduzidos com a ajuda de melhor equipamento).



Werner Heisenberg

O momento angular do quânto $x \times p$ é ainda mais estranho: se um dos seus componentes tiver um valor preciso, então os outros dois estarão completamente espalhados. Daí que o momento angular não seja um vector (ou melhor, um tensor). O mesmo se passa com a rotação e a velocidade na mecânica quântica relativista. As setas quânticas são tão difusas, quer na sua amplitude quer na sua direcção, que não se assemelham minimamente a setas.

MATÉRIA ESTRANHA

CLASSÕES E QUANTÕES

A discussão precedente sugere a seguinte classificação dos tipos de matéria:

- *Classões* (e.g., raio de luz intensa, molécula de DNA, célula, pedra, planeta);
- *Quantões* (e.g., fóton, electrão, átomo, corpo negro, superconductor).

Na realidade, não se trata de uma divisão radical já que existem coisas intermédias, tais como raios de luz fraca e moléculas de tamanho médio, por exemplo, o carbono 60. São frequentemente chamadas objectos mesoscópicos; podemos também chamar-lhes semiclasses ou semi-quantões. Não é de admirar que essas coisas sejam descritas por teorias semiclássicas (de facto, mesmo a teoria quântica padrão dos átomos é semiclássica, uma vez que deixa o campo electromagnético por quantizar).

Uma particularidade das teorias semiclássicas é que, ao contrário das teorias quânticas, admitem imagens de vários tipos. Por exemplo, a trajectória do electrão exterior de um átomo num estado muito excitado (ou de Rydberg) pode ser retratada de duas formas diferentes: como uma órbita microplanetária, ou como uma órbita circular estacionária com um número de cristas igual ao número quântico principal.

Além dos semiclasses (ou semi-quantões) há coisas materiais concretas, como organismos, robôs e sistemas sociais que estão fora do alcance da teoria quântica – contra os reducionistas radicais, que acreditam que esta é uma teoria universal. Aquelas coisas escapam à teoria quântica não porque tenham grandes dimensões, mas porque têm propriedades supra-físicas, tais como a de estar vivo e obedecer a normas que não derivam de leis físicas.

Devíamos estar gratos por ter uma teoria tão geral e precisa como a teoria quântica, mas seria ridículo tentar aplicá-la para além do seu domínio.

SOBREPOSIÇÃO E MEDIÇÃO

O "princípio" da sobreposição é um teorema segundo o qual, se duas ou mais funções são soluções de uma dada equação diferencial (linear), a sua combinação linear também é solução da mesma equação. Fisicamente: a sobreposição de estados simples (estacionários, em particular) é ainda um estado. Este teorema levanta algumas perplexidades. Consideremos uma delas, nomeadamente a de saber se esse princípio é consistente com a conservação de energia.

Suponhamos que um determinado quânto isolado não se encontra num estado estacionário com um valor de energia exacto, mas sim num estado constituído por vários valores de energia exactos, cada um com um peso determinado (ou probabilidade). Simplificando, assumamos que apenas dois estados estacionários, ψ_1 e ψ_2 , contribuem para o estado total. Ou seja, suponhamos que o quânto tem duas energias possíveis, E_1 com probabilidade p_1 , e E_2 com probabilidade p_2 . (Obviamente, a soma destas probabilidades é um). Por outras palavras, a distribuição de energia tem dois picos, um em E_1 com peso p_1 e o outro em E_2 com peso p_2 . (Isto é, o espaço de estados tem dois eixos e a função do estado é um vector ψ com duas componentes, ψ_1 e ψ_2 : $\psi = a_1 \psi_1 + a_2 \psi_2$, onde $|a_1|^2 = p_1$ e $|a_2|^2 = p_2$.)

De acordo com John von Neumann (1932), se uma medição de energia for feita no quânto, a sobreposição inicial será projectada para o eixo 1 do espaço de estados com probabilidade p_1 , ou para o eixo 2 com probabilidade p_2 . No primeiro caso, o investigador encontrará o valor exacto E_1 e, no segundo caso, o valor exacto E_2 . (Se for efectuado um grande número N de medições em quantões no mesmo estado, aproximadamente pN deles manterão o valor de energia E_1 e $p_2 N$ o valor E_2 .) Em suma, antes da medição ser efectuada, a energia do quânto tinha dois valores, cada um com a sua própria probabilidade (ou tendência, ou peso), e o acto de medição "seleccionou" um deles eliminando o outro.

Foi conservada a energia do quânto? Certamente que a teoria inclui o teorema segundo o qual a energia de um quânto isolado é uma constante do movimento. Mas o nosso caso não satisfaz a condição tácita do teorema, nomeadamente que a energia tem um valor exacto e único. E, obviamente, a energia não pode ser conservada se não tiver um valor bem definido. Além disso, a medição em questão interfere fortemente com o quânto ao ponto de reduzir a sua função de estado, o que viola a condição de que o quânto continua isolado. É, de facto, uma experiência destrutiva.

Este exemplo mostra que, para efectuar uma medição da energia, e, em particular, para testar o correspondente teorema de conservação, o quantão tem de estar preparado de forma adequada. Mais precisamente, tem de ser colocado num estado caracterizado por um valor de energia exacto, como E_1 ou E_2 . Só assim uma medição pode assegurar-se a energia se manteve constante. Mas esta medição terá de ser feita de forma não intrusiva, como é feito em espectroscopia. Isto é, as únicas medições consideradas por von Neumann são do tipo destrutivo: envolvem a redução súbita e não causal da função da onda e, por isso, não se adequam a testes dos teoremas de conservação (ou de constantes do movimento).

A alternativa seria sacrificar os teoremas de conservação no altar de von Neumann. Mas tal sacrifício não satisfaria nem mesmo o chamado fantasma de Copenhaga. De facto, as leis da conservação estão vinculadas a enunciados de leis básicas. Se estas falhassem, aquelas falhariam também, e o universo seria caótico no sentido comum do termo. (Na verdade, de "Se B , então C ", segue-se "se não- C " então "não- B ".)

ORTODOXIA E HETERODOXIA

A INTERPRETAÇÃO DE COPENHAGA OU ORTODOXA

Durante algum tempo os pais da mecânica quântica calcularam funções de estado sem saber o que isso significava. Ou seja, dominavam a sintaxe da teoria mas ignoravam a semântica. Foi apenas em 1927 que Max Born propôs a interpretação com o seu nome que é actualmente aceite. (Esta foi a primeira vez que um prémio Nobel foi atribuído por uma contribuição para a semântica.)

Na interpretação em questão pode ler-se: a quantidade $|\psi(x,t)|^2$ é a probabilidade de *encontrar* o quantão dentro do volume unitário colocado no ponto x quando a sua posição é medida no tempo t . Este postulado mostra, entre outras coisas, que o conceito de probabilidade é básico em mecânica quântica: ou seja, não é deduzido de suposições não-probabilísticas. Também sugere que a probabilidade em questão depende tanto do observador como do objecto observado.

O que acontece quando não é feita nenhuma medição de posição? O que significa então $|\psi(x,t)|^2$? De acordo com a interpretação *standard* (de Copenhaga), neste caso o quantão não tem posição, nem mesmo considerando

um elemento de volume. A ideia é que não se encontra nada a não ser que se procure e o que não se encontra não existe. Em geral, diz-se que faltam propriedades a um quantão que não esteja a ser medido: que as adquire apenas quando elas são medidas, o que, por sua vez, depende de uma decisão do investigador. (Estranhamente, isto só se aplica aos chamados observáveis, *i.e.*, variáveis dinâmicas, como x e p . não se aplica à massa nem à carga.)

A desigualdade de Heisenberg, que vimos atrás, costumava ser interpretada do seguinte modo: os desvios-padrão x e p são os efeitos das medições de x e p , respectivamente. Por exemplo, para localizar um átomo, iluminamo-lo, o que causa a deslocação do átomo por receber um empurrão. Isto é o que vemos na maioria dos manuais.

De notar que esta interpretação pressupõe que o quantão tem uma posição e um momento precisos antes da medição, só que nós não os conhecemos. Também pressupõe que a causalidade impera ao nível do quantão. Contudo, nenhuma dessas suposições está de acordo com a filosofia reinante da comunidade de físicos quando nasceu a teoria quântica. Esta filosofia, o operacionismo, foi formulada por Percy W. Bridgman no seu *best-seller* de 1927, *The Logic of Modern Physics*. Desde esse ano até 1938, a mesma filosofia foi expandida pelos membros da "Ernst Mach Verein", mais tarde conhecida por "Círculo de Viena", o berço do positivismo lógico.

Para contornar essa objecção, Niels Bohr e Werner Heisenberg em 1935, com o apoio do Círculo de Viena, propuseram a chamada interpretação de Copenhaga. De acordo com esta, a medição de uma variável não altera o seu valor preexistente: antes o cria. Ou, expresso de forma negativa, o quantão não tem quaisquer propriedades dinâmicas enquanto não for medido. (Mas, repita-se, pode possuir massa e carga.)

Assim, uma coisa não existe excepto enquanto componente de uma unidade selada e não analisada: objecto (quantão) – aparelho – sujeito (investigador). Como disse Leon Rosenfeld – o colaborador mais próximo de Bohr –, o investigador "conjura" o objecto quântico numa certa posição ou com uma determinada velocidade. Não fossem os físicos e não haveria átomos, nem mesmo nos seus próprios olhos. Tal aplicar-se-ia a todos os objectos físicos. Por exemplo, a Lua não existiria se não houvesse ninguém a olhar para ela.

Em geral, o investigador criaria um mundo quando o medisse. Ser é medir ou ser medido. Esta seria a nova

versão da máxima que George Berkeley propusera em 1710: "*Ser é perceber ou ser percebido*". Não é pois de admirar que meio século depois os sociólogos pós-mertonianos da ciência, como Bruno Latour, Steven Woolgar, Karen Knorr-Cetina, Harry Collins, e outros colaboradores da revista *Social Studies of Science*, tenham achado que os factos científicos são construídos pelos cientistas ou pelas comunidades científicas.

Esta visão é, claramente, antropomórfica e mesmo mágica. Colide frontalmente com o realismo inerente ao senso comum e à prática da ciência. Em particular, é inconsistente com a suposição tácita da investigação científica de que a Natureza satisfaz leis objectivas que precedem os cientistas, que apenas as tentam descobrir minimizando o seu próprio impacto nas coisas estudadas.

Quais são as origens da componente antropomórfica da interpretação de Copenhaga? Sugiro duas raízes. Uma é o facto de os eventos quânticos microfísicos serem imperceptíveis sem a ajuda de amplificadores. Certamente eles acontecem em todo o sítio, a toda a hora, como foi demonstrado, *e.g.*, pelo sucesso da Astrofísica. Mas só podem ser detectados ou produzidos num laboratório devidamente equipado. No entanto, o facto de o investigador poder "conjurar" os efeitos quânticos não implica que estes apenas tenham lugar sob condições experimentais. Uma primeira fonte do subjectivismo inerente à interpretação de Copenhaga é uma mera falácia lógica.

Uma outra origem da interpretação ortodoxa da teoria menos ortodoxa é, como foi mencionado, a filosofia positivista que reinava quando a teoria se desenvolveu. De acordo com essa filosofia, que partiu da Ernst Mach, apenas existe aquilo que pode ser medido, quando, na realidade, a mensurabilidade é apenas uma condição suficiente, logo um indicador ou critério de existência. Assim, a segunda fonte também se torna uma falácia lógica. Voltaremos a este tema no final. Vejamos agora a nossa análise das diferenças entre a Física quântica e a clássica.

A CONTROVÉRSIA BOHR – EINSTEIN: QUEM TINHA RAZÃO SOBRE O QUÊ

Em 1935 Einstein e Bohr travaram um debate memorável na *Physical Review* sobre a interpretação da mecânica quântica. Resumiram-no em 1949, no volume de P. A. Schillp dedicado a Einstein. Ambos tocaram, em particular, as seguintes questões: se as teorias físicas devem representar a realidade tal como ela é, independentemente do investigador (Einstein, sim; Bohr, não); se a teoria quântica é essencialmente completa (Einstein, não; Bohr,

sim); e se a teoria deve ser complementada com a adição de variáveis "escondidas" (isto é, sem dispersão) (Einstein, sim; Bohr, não).

A opinião prevalecente é que Bohr ganhou a batalha: a função de estado contém toda a informação necessária e, no entanto, não representa a realidade mas antes as aparências para o investigador. Apenas um grupo de heréticos, encabeçado por David Bohm e Louis de Broglie em 1951, que mais tarde contou também com John Bell e outros, considerou que Bohr estava errado e divulgou a teoria completa sugerida por Einstein. Em particular, Bohm enriqueceu a mecânica quântica não-relativista com uma coordenada clássica de posição e o correspondente momento e ainda com um potencial *sui generis*.



Bohr e Einstein

Note-se que a variável x que ocorre na mecânica quântica *standard* não é uma função dependente do tempo, representando antes uma propriedade do quânto. É a mesma coordenada geométrica "pública" que ocorre em teorias de campo: identifica um ponto genérico no espaço (assim, contrariamente ao que sucede na mecânica de matrizes de Heisenberg, a variável x que ocorre na teoria *standard*, centrada na equação de Schrödinger, não é um operador e, por isso, não tem funções próprias. É verdade que se pode calcular a sua taxa de variação, mas apenas através do hamiltoniano e da função de estado). A teoria de Bohm contém as duas coordenadas de posição, a geométrica e a dinâmica clássica ou coordenada de posição dependente do tempo. E, como foi mencionado, contém ainda um potencial cujo gradiente é uma estranha força interna ausente quer da mecânica quântica *standard* quer da Física clássica. Como veremos, a tentativa de Bohm

foi derrotada no laboratório. Continuemos, no entanto, com o famoso debate.

A meu ver, cada um dos gigantes perdeu três pontos e ganhou um:

- a) Bohr estava certo ao afirmar que a mecânica quântica subsiste, pelo menos aproximadamente, sem adicionar variáveis (clássicas) escondidas; mas estava errado ao defender que a mecânica quântica falha na descrição de uma realidade independente do investigador.
- b) Einstein estava certo ao reivindicar que todas as teorias físicas deviam representar a realidade o mais fielmente possível; mas estava errado ao sugerir que era necessário tornar "mais clássica" a mecânica quântica e, em particular, enriquecê-la com trajetórias precisas.
- a) Nem Bohr nem Einstein estavam correctos em relação ao carácter completo e acabado da teoria, já que nenhuma teoria factual (empírica), embora exacta, pode cobrir todos os seus referentes em pormenor. É provável que existam sempre mitos e lacunas e, por isso, espaço também para progressos e avanços.
- b) Nem Bohr nem Einstein caracterizaram de forma clara os conceitos filosóficos essenciais de realidade e causalidade, que são recorrentes no cerne dos seus debates. Além disso, na sua discussão em 1949, Bohr induziu Einstein a persuadi-lo, com a ajuda de uma experiência, de que há uma desigualdade de Heisenberg para a energia e tempo, nomeadamente $E \cdot t \geq h/4\pi$. Mas os axiomas da mecânica quântica não implicam tal fórmula por uma simples razão: nesta teoria o tempo é uma variável clássica (ou "escondida"), isto é, $t = 0$ para qualquer função de estado de um quantão arbitrário. Além disso, nenhuma fórmula teórica moderadamente complicada pode ser inferida de uma análise de experiências, nem mesmo reais – especialmente se não contiver parâmetros empíricos. Em particular, a desigualdade de Heisenberg e suas semelhantes derivam dos postulados da mecânica quântica, que são tão gerais que não fazem nenhuma referência a medições.

Em suma, nenhum dos dois gigantes venceu. No entanto, foram bem sucedidos ao estimular o debate sobre os fundamentos da mecânica quântica – e ao focar as questões filosóficas.

DETERMINISMO E INDETERMINISMO ATOMISMO E PLENISMO

CAUSALIDADE E PROBABILIDADE

Na Física clássica, o acaso só emerge em grandes aglomerados de eventos ou coisas que se comportam individualmente de uma forma causal mas bastante independente umas das outras. Exemplos triviais: moléculas num gás de baixa densidade, suicídios num país, ou acidentes de viação numa cidade. Em contraste, na Física quântica o acaso emerge não só no cruzamento de histórias causais independentes, mas também ao nível individual – de tal forma que funções de estado básicas se referem a dados individuais e não a agregados estatísticos. Por exemplo, qualquer átomo num estado excitado tem uma certa probabilidade de ser disperso por um determinado alvo dentro de um dado ângulo sólido. Não há aqui nenhum tipo de predestinação.

Por outras palavras, a função de estado é básica, não derivada. Isto mantém-se mesmo em teorias que, como a de Bohm, contêm variáveis dinâmicas sem dispersão. Este facto é usualmente visto como um triunfo do indeterminismo. Contudo, esta interpretação está errada, já que o indeterminismo nega, por si, a existência de leis afirmando, por outro lado, que tudo pode acontecer. Em contraste, a mecânica quântica centra-se em leis e exclui um determinado número de coisas e fenómenos conceptualmente possíveis, tais como a formação de partículas a partir do nada e a reabsorção de um fóton pelo átomo que o emitiu.

De notar ainda que algumas leis quânticas teóricas não são probabilísticas. Exemplos são os princípios de conservação de energia e do momento angular; as chamadas leis que "proíbem" certas transições entre níveis atômicos; e o princípio da exclusão, que nega a possibilidade de dois electrões (ou outros fermiões) ocuparem exactamente o mesmo estado num sistema.

Mais, os conceitos de acaso e causalidade ocorrem em simultâneo em frases como "a probabilidade que a causa C produz o efeito E é p ", o que mina as teorias da dispersão e da radiação. Além disso, as flutuações médias do vácuo electromagnético (sem fótons) causam a emissão "espontânea" de luz pelos electrões atômicos em estados excitados (efeito Lamb).

Em resumo, causalidade e acaso interligam-se na mecânica quântica. Esta interligação é clara na equação de estado, onde ocorre o termo $H\psi$. De facto, o operador de energia H é o factor causal, já que contém o potencial (ou fonte das forças, ou causas eficazes), enquanto ψ representa o factor acaso, em virtude do princípio de Born.

Por estas razões, é mais correcto falar no alargamento do determinismo do que na sua ausência – como argumentei no meu livro *Causalidade* (1959). Neste sentido lato, o determinismo pode ser definido como o primado das leis juntamente com o princípio de Lucrécio *ex nihilo nihil fit*.

PLENISMO E ATOMISMO: QUAL DELES TRIUNFOU?

Outro mito popular é a crença no triunfo do atomismo sobre o plenismo de Aristóteles e Descartes. Nada disso aconteceu. Primeiro, porque todos os campos são meios contínuos: são substâncias extensas e não agregados ou partículas. Em particular, os *quanta* do campo electro-magnético – os fótons – não são corpos pontuais mas sim porções estendidas de matéria sem limites precisos. Apenas a sua energia foi quantizada, mas a energia é uma quantidade e não uma coisa. Segundo, os núcleos atómicos, os átomos, as moléculas e os corpos sólidos apenas existem em virtude dos campos que mantêm os seus constituintes agrupados. Terceiro, a teoria quântica básica não é a mecânica quântica mas a chamada segunda quantização, uma teoria de campo. Nesta teoria, os electrões e outras partículas elementares são concebidos como os *quanta* do campo respectivo (*e.g.*, electrónicos e electro-magnéticos). Mais ainda, como já foi mencionado, a electrodinâmica quântica postula a existência de um campo electromagnético residual, de intensidade média nula mas capaz de causar um certo número de efeitos registados, entre eles o declínio espontâneo dos átomos por radiação.

Outro efeito semelhante é a força de Casimir, que provém de uma diferença entre o ponto zero das densidades de energia desse campo. Esta força pode exercer uma pressão de uma atmosfera em dois pratos paralelos condutores separados por uma distância de 10 nm (como mostraram Chan, Aksyuk, Kleiman, Bishop e Capasso em 2001). Claramente, a nanotecnologia terá eventualmente de lutar com a electrodinâmica. E a ontologia terá de se reconciliar com o facto de que não há um nada total em parte nenhuma do universo.

Em suma, certamente que há corpos, mas eles parecem-se com ondas. Além disso, são *quanta* de campos. A visão resultante assemelha-se de alguma forma à de Descartes, também ela uma síntese do plenismo aristotélico e do atomismo de Demócrito. Mas é claro que a síntese quântica, ao contrário da cartesiana, é calculável e passível de confirmação experimental. De facto, é a teoria científica mais exacta que alguma vez foi elaborada.

(Conclui no próximo número)

FÍSICA 2002

Ano do Centenário do Nascimento de Paul Dirac

Évora, 6 a 10 de Setembro, 2002



XIII Conferência Nacional de Física

[A física tal qual se faz no dealbar do séc. XXI]

XII Encontro Ibérico para o Ensino da Física

[Ensinar a aprender, ensinar a fazer]

I "Workshop" Científico

[Astrofísica Nuclear e Evolução do Universo]