

O SURGIMENTO DA FÍSICA QUÂNTICA

(NOTAS DE AULA)

SILVIO SENO CHIBENI

Departamento de Filosofia - IFCH - UNICAMP

A história das grandes transformações sofridas pela física e que culminaram na formulação da mecânica quântica na segunda metade da década de 1920 começou no primeiro ano do século, quando Max Planck logrou explicar, através de uma hipótese que a ele próprio repugnava, o *espectro de radiação do corpo negro*.

Um pequeno orifício aberto em um corpo oco representa aproximadamente um “corpo negro” (não confundir com “buraco negro”, que é algo muito diferente!). Tal orifício aparecerá negro para corpos em temperaturas usuais, daí advindo o seu nome. No entanto, à medida que a temperatura se eleva, o orifício se torna vermelho, depois amarelo e, finalmente, branco (neste ponto, ou mesmo antes, o material se funde; fenômeno do mesmo tipo pode ser observado aquecendo-se um pedaço de metal.) A cada temperatura corresponde uma coloração da luz emitida, que resulta da mistura de radiações luminosas de diferentes frequências; cada frequência contribui na mistura em uma determinada proporção, fornecendo uma determinada parcela de energia à energia total irradiada pelo orifício. Essas proporções podem ser medidas experimentalmente. A figura abaixo mostra o gráfico de uma grandeza proporcional à energia irradiada em função do comprimento de onda.

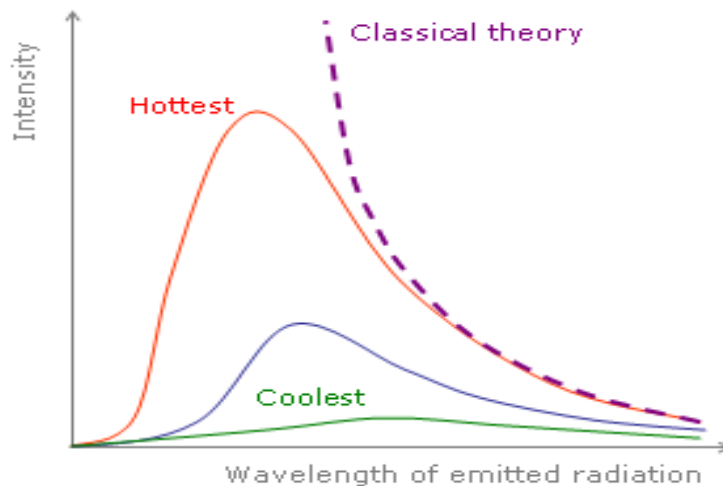
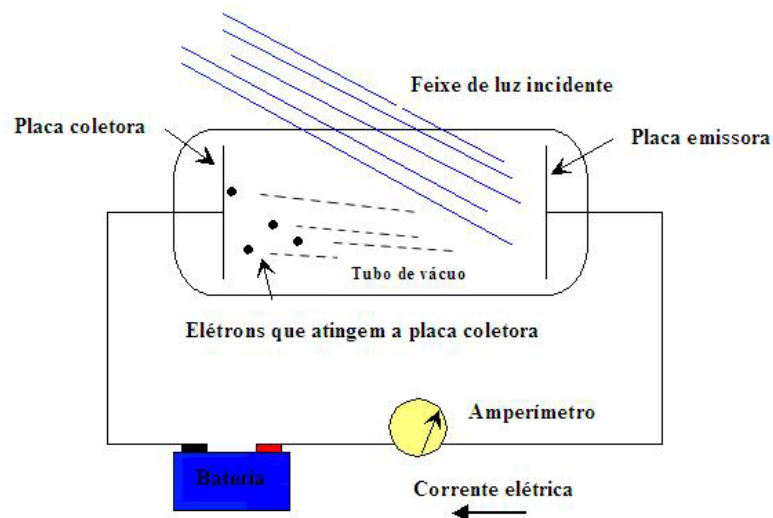


Figura 1: Espectro de radiação do corpo negro, para $T=1600^{\circ}K$.

Cálculos dessa grandeza a partir das teorias clássicas — eletromagnetismo, mecânica clássica e estatística — fornecem resultados em completo desacordo com os dados empíricos, como se vê no gráfico (curva de Rayleigh-Jeans), exceto na região de altos comprimentos de onda (ou baixas frequências). Essa discrepância constituiu um problema grave para a física do final do século passado. Depois de várias tentativas fracassadas de obter os resultados experimentais corretos através de manipulações nas teorias clássicas, Planck percebeu que com a simples introdução da hipótese de que os osciladores eletrônicos, responsáveis pela emissão da radiação eletromagnética (luz), só podem vibrar com determinados valores de energia podia obter previsões teóricas em perfeito acordo com a experiência. Ora, tal hipótese, além de *ad hoc*, não parecia ser fisicamente admissível, dada a sua incompatibilidade com um ponto básico das teorias da época. A *quantização* da energia de oscilação dos elétrons conflita com o caráter contínuo da energia, conforme sempre se aceitou, e com boas razões, inclusive de ordem experimental.

Malgrado a repugnância que lhes causava, e a desestruturação das bases da física que acarretava, essa hipótese acabou sendo provisoriamente tolerada pelos físicos, pois era a única de que se dispunha para dar conta dos fatos. Prosseguiu-se, porém, imaginando que a quantização ocorreria apenas nos osciladores eletrônicos atômicos, mas não na energia irradiada, que, segundo o eletromagnetismo, se propaga na forma de ondas eletromagnéticas.

Em 1905, porém, Einstein propôs, no segundo dos três artigos que publicou naquele mesmo ano (do primeiro já falamos; o terceiro artigo deu a público a teoria da relatividade especial), que a quantização deveria ser estendida à energia eletromagnética livre. Essa idéia de Einstein, talvez ainda mais inaceitável que a de Planck, surgiu no contexto de suas investigações de um fenômeno descoberto por Hertz em 1887, o chamado *efeito fotoelétrico*. Tal efeito consiste no favorecimento da emissão de raios catódicos (elétrons) propiciado pela incidência de luz sobre o cátodo. Um esquema simplificado do aparelho para a observação do efeito é o seguinte:



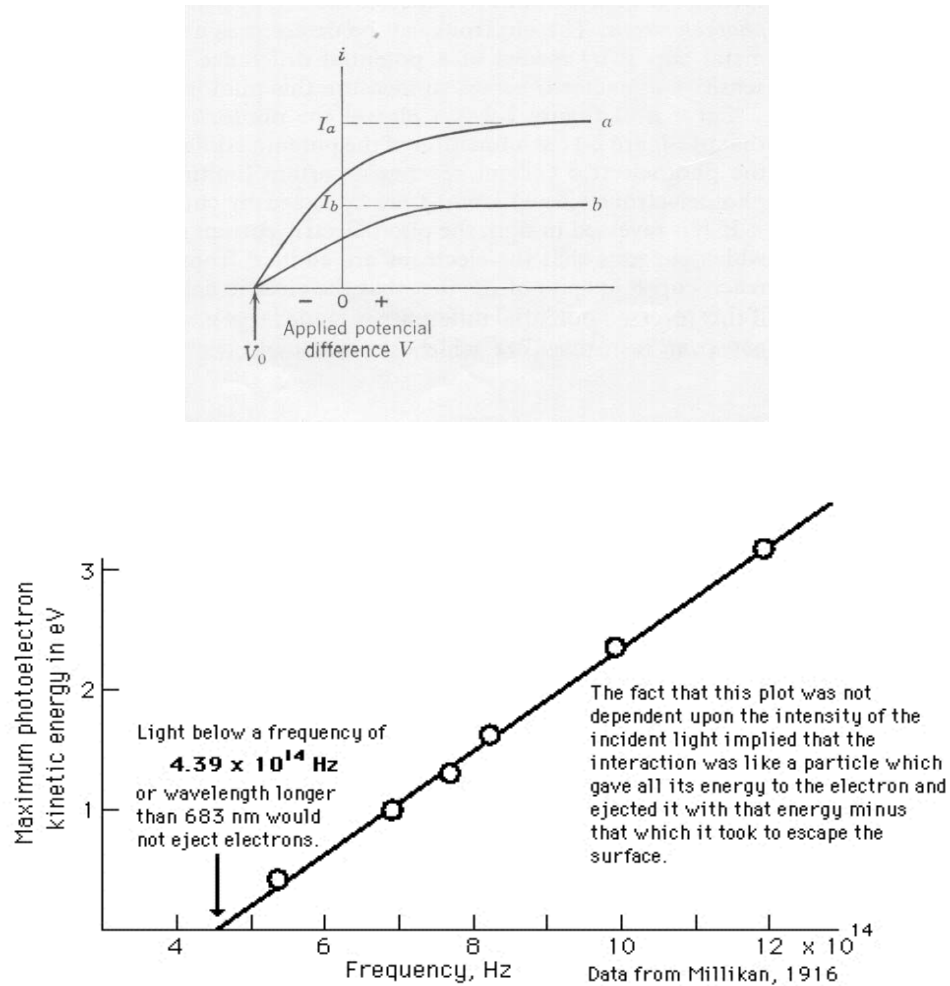


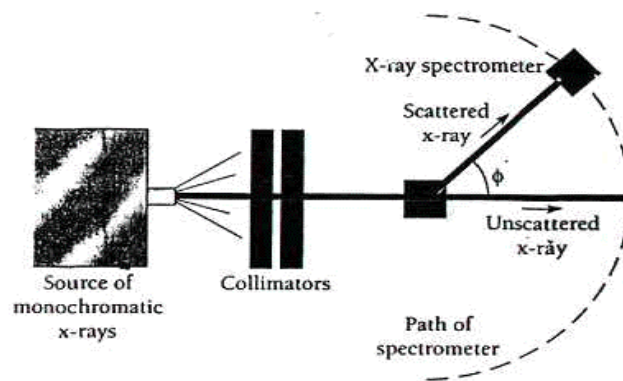
Figura 2: O efeito fotoelétrico.

Até o trabalho de Einstein, esse fenômeno não despertou muito a atenção dos físicos. Supunha-se que a energia transferida pelas ondas eletromagnéticas de luz aos elétrons do cátodo provocava o seu desprendimento, para que se movessem na direção do ânodo, formando-se assim uma corrente elétrica através do circuito. Ao propor que a energia eletromagnética da luz era quantizada, ou seja, que se propagava em “pedaços”, ou “quanta” (posteriormente batizados com o nome de *fótons*), Einstein previu que se fossem realizados experimentos para a medição de certos parâmetros do efeito fotoelétrico, os resultados mostrariam que sua hipótese, e somente ela, forneceria as previsões corretas. Essas inusitadas previsões eram: 1) que a energia cinética dos elétrons independeria da intensidade da luz; 2) que existiria uma frequência de corte da luz incidente, abaixo da qual o efeito cessa, não importando quão intensa seja a luz; e 3) que os elétrons seriam ejetados imediatamente, não importando quão baixa seja a intensidade da luz.

Ora, essas três previsões contrariam de modo frontal as previsões clássicas, que partem do pressuposto de que a luz é uma onda eletromagnética, e que portanto a energia que transporta se distribui continuamente pelo espaço.

Para perplexidade geral, medições cuidadosas realizadas em 1914 pelo grande experimentalista americano Robert Millikan confirmaram as previsões de Einstein. Foi por este trabalho e pela determinação da razão carga/massa do elétron que Millikan ganhou o Prêmio Nobel, em 1923; e foi por haver explicado (antecipadamente!) as observações de Millikan que Einstein ganhou o seu, em 1921.

Uma importante confirmação independente da hipótese do quantum de luz surgiu em 1923, com a detecção, pelo físico americano Arthur Compton, de um fenômeno que ficou conhecido como *efeito Compton*. Em seu experimento Compton bombardeou um alvo de grafite com raios-X de uma dada frequência. Medindo a frequência da radiação espalhada pelo alvo, verificou que surgia, ao lado da esperada radiação com a frequência da radiação incidente, outra com frequência menor. Em termos da teoria ondulatória da radiação eletromagnética — e tinha-se como certo que os raios-X eram uma radiação desse tipo, já que se haviam observado difração e interferência de raios-X —, a existência da radiação “anômala” detectada era completamente inexplicável. Se se assume, porém, que os raios-X também são quantizados, ou seja, consistem de “partículas”, o efeito pode ser explicado em termos simples. Ao colidir com os elétrons do grafite, tais partículas transferem-lhes parte de sua energia, sendo pois refletidas com menos energia do que tinham antes. Essa perda de energia pode ser calculada pelas leis da mecânica relativista de Einstein. Usando então a relação entre energia e frequência proposta por Planck e Einstein, ou seja, $E = hf$ (onde h é a chamada constante de Planck), pode-se calcular o quanto essa perda de energia significa em termos de diminuição de frequência. O valor obtido concorda perfeitamente com os dados experimentais. Por esse trabalho, que forneceu esmagadora evidência à natureza corpuscular da radiação eletromagnética, Compton recebeu o Prêmio Nobel em 1927. A Figura 3 esquematiza o efeito Compton e sua explicação em termos do quantum de radiação.



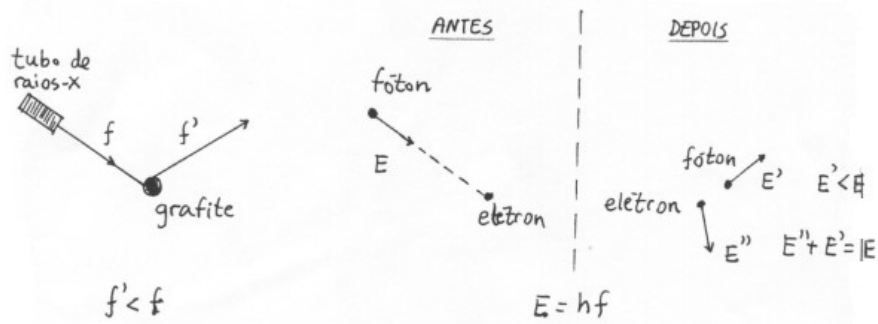
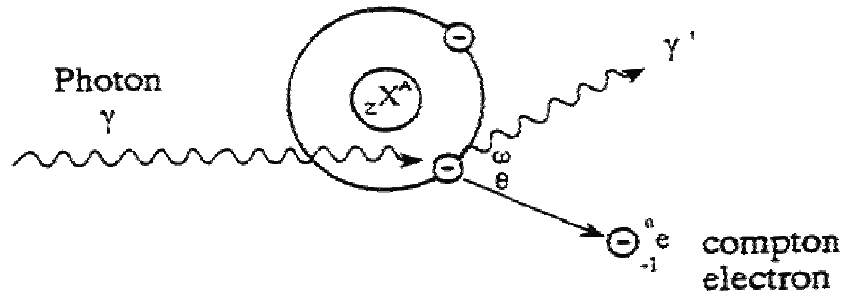
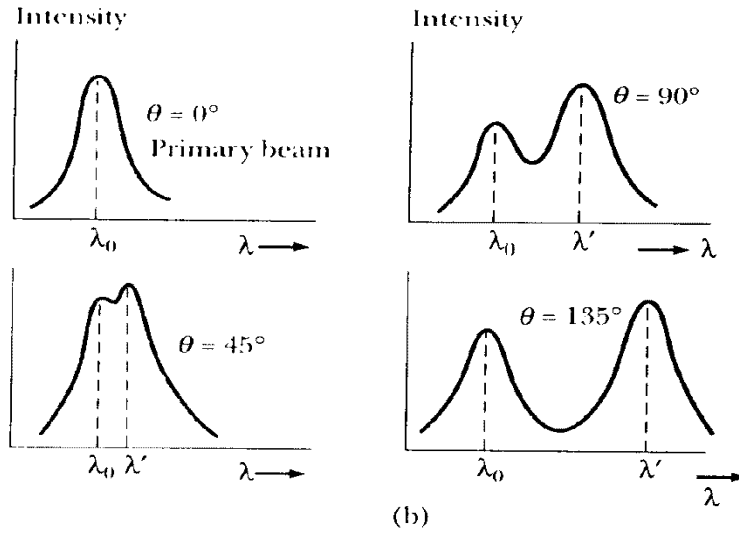


Figura 3: O efeito Compton e sua explicação em termos de fótons.

As investigações de Planck, Einstein, Millikan e Compton ressuscitaram as discussões sobre a natureza da luz, que se julgava extintas pelo final do século passado.

Agora, porém, estava-se diante de uma dificuldade com que a física nunca topara antes. É que não se podia simplesmente abandonar a concepção ondulatória da luz para retomar a concepção corpuscular. Se se fizesse isso, se solucionariam os novos problemas (explicar o espectro do corpo negro e os efeitos fotoelétrico e Compton), mas à custa da exumação de vários outros que pareciam definitivamente resolvidos pela teoria ondulatória eletromagnética de Maxwell (difração e interferência da luz, correlações entre os parâmetros ópticos e eletromagnéticos). Os físicos viam-se por assim dizer entre a cruz e a espada: conserta-se de um lado para estragar do outro, e vice-versa. *Ambas* as concepções de luz, ondulatória e corpuscular, são requeridas para a explicação da totalidade dos fenômenos. O nó da questão é que tais concepções são claramente inconciliáveis. Veremos agora que embaraço análogo envolve as concepções de átomo, elétron, próton, etc.

Narramos acima, em termos brevíssimos, a história da teoria atômica, e vimos como a hipótese de que a matéria dita “ponderável” é composta de corpúsculos de algum tipo se tornou aceita pela comunidade científica no início de nosso século. Sua incorporação à teoria química de Dalton e à mecânica estatística, seu uso por Einstein na explicação do movimento browniano, e a confirmação empírica das equações que obteve, as investigações experimentais de J. J. Thomson, Rutherford e colaboradores, e finalmente o sucesso do modelo atômico de Bohr na previsão de fenômenos importantes, praticamente eliminavam as dúvidas de que a matéria ponderável seria descontínua, constituída de pequenos “pedaços”.

No entanto, como também já mencionamos, a teoria quântica velha de Bohr, que representava o refinamento máximo alcançado pela teoria atômica, era insatisfatória do ponto de vista de sua consistência e de seus fundamentos, além de sofrer sérias limitações em sua capacidade de previsão quantitativa. Do ponto de vista mecânico, o que havia de mais estranho era a quantização das energias, e portanto das órbitas, dos elétrons. Por que motivo os elétrons não podiam orbitar senão a determinadas distâncias do núcleo?

Intrigado com essa questão, o jovem nobre francês Louis de Broglie imaginou o seguinte: Na física, os únicos fenômenos que exibem uma quantização desse tipo são determinados fenômenos ondulatórios. (O ar nos tubos de um órgão e as cordas de um piano, por exemplo, só vibram em determinadas frequências.) Também, se os trabalhos de Planck, Einstein e Compton haviam mostrado que a radiação eletromagnética, tida como um tipo de onda, às vezes se comporta como se fosse composta de partículas, por uma questão estética (simetria) talvez devamos esperar que os átomos, elétrons e outros entes tidos como partículas, às vezes se comportem como ondas...

Motivado por tais idéias, de Broglie resolveu arriscadamente desenvolvê-las em sua tese de doutorado. Sua proposta era a de que a cada partícula (elétron, átomo, etc.) estaria associada uma “*onda de matéria*” que ditaria parcialmente o seu comportamento. Essa onda teria uma frequência determinada pela energia da partícula através da mesma equação que Einstein usara para determinar a energia do fóton a partir de sua frequência, ou seja, $E = hf$.

Naturalmente, a proposta causou espécie, e o orientador do aspirante a cientista, Paul Langevin, resolveu, por prudência, fazer o trabalho de seu pupilo passar pelo crivo de Einstein, antes da defesa de tese. Para a salvação de de Broglie, o cientista apoiou entusiasticamente sua idéia, que, enfatizamos, não estava apoiada em nenhuma evidência

empírica direta. Assim, de Broglie recebeu o seu título, em 1924 e, cinco anos depois, o Prêmio Nobel.

A confirmação experimental da idéia de de Broglie tem uma história interessante. Respondendo a um membro da banca examinadora, na Sorbonne, de Broglie disse que sua idéia poderia ser verificada projetando-se um feixe de elétrons sobre um cristal: efeitos de difração e interferência seriam observados, como se se tratasse de uma onda. Ninguém acreditou; mas em todo o caso o trabalho contava com o apoio de Einstein... Através do próprio Einstein, a estranha idéia chegou, via Max Born, a James Franck, chefe do departamento de física experimental de Göttingen. Franck percebeu que a experiência sugerida por de Broglie de fato *já havia sido realizada* um ou dois anos antes por Clinton Davisson e Charles Kunsman, nos Estados Unidos. Mas os resultados foram interpretados de outro modo, visto que ninguém ousava sequer imaginar que pudesse ocorrer difração de elétrons. Após a incorporação da idéia de de Broglie na teoria quântica completa, desenvolvida em 1925 e 1926 por Heisenberg e Schrödinger, ela passou a ser levada a sério, e Davisson repetiu suas experiências, com um novo assistente, Lester Germer, desta vez com o objetivo específico de investigar a existência das tais “ondas de elétrons”. Paralelamente, experimentos semelhantes foram levados a cabo em Cambridge, Inglaterra, por George Thomson, filho do famoso J. J. Thomson, e por seu assistente Alexander Reid. Os resultados dessas experiências confirmaram de modo inequívoco o comportamento ondulatório dos elétrons, e Davisson e G. Thomson dividiram o Prêmio Nobel de 1937. É cômico observar que J. J. Thomson recebeu o Prêmio em 1906 por haver mostrado que o elétron é uma partícula, e que seu filho mereceu a mesma condecoração trinta e um anos mais tarde por haver mostrado que o elétron é uma onda!

Conforme já dissemos, esses desenvolvimentos no estudo da estrutura da matéria geraram um impasse análogo ao que travou as investigações sobre a natureza da luz. Aqui também a totalidade dos fenômenos só pode ser explicada pelo uso de *ambas* as concepções, a de partícula e a de onda, claramente incompatíveis. Os experimentos de Davisson e Thomson são fisicamente equivalentes à experiência de difração e interferência de ondas que atravessam dois orifícios próximos abertos em um anteparo (ver Fig. 4 das notas “Características conceituais básicas da física clássica”). Isso ocorre tanto com a luz como com elétrons, nêutrons, etc., indicando que tais entidades comportam-se, pelo menos nesta situação experimental, como ondas. Não é possível explicar efeitos desse tipo sem recorrer a ondas.

O que é misterioso é que em outras situações essas mesmas entidades comportam-se como partículas. Se, por exemplo, colocarmos detetores de “coisas” quânticas em cada um dos orifícios do aparelho de interferência, verificaremos que a “coisa” sempre é registrada por um *ou* por outro, mas nunca por *ambos*, como seria o caso se ela fosse uma onda. Porém nesse experimento modificado evidentemente não é mais possível observar o fenômeno de interferência, já que as “coisas” são absorvidas pelos detetores.

Outra maneira de ver a dificuldade consiste em colocar detetores diminutos ao longo de toda a linha AB, da Figura 4 das notas “Características conceituais básicas da física clássica”. Mais uma vez, quer se trate de luz, quer de elétrons, etc., será sempre apenas *um* detetor que irá “clicar”, registrando a chegada da “coisa”, o que significa que ela é algo localizado no espaço, ou seja, um corpúsculo. Por outro lado, se acumularmos os

dados dos diferentes detetores durante um tempo suficiente, e com tais dados elaborarmos um gráfico do número de clics de cada detetor, o resultado será o gráfico de intensidades visto à direita da Figura 4. E esse gráfico só pode ser explicado assumindo-se que as coisas quânticas são ondas, e que portanto passaram pelos dois orifícios ao mesmo tempo!

Para testar-se a explicação concebível, de que essas observações seriam devidas a algum tipo desconhecido de interação *entre duas* coisas quânticas, ao longo de seu trajeto, foram realizados experimentos com fontes de coisas quânticas que as emitem a largos intervalos, de modo que apenas uma delas por vez esteja entre a fonte e os detetores. Os resultados foram os mesmos do que no caso dos experimentos ordinários, com fontes de alta intensidade, nos quais em cada instante muitas partículas encontram-se em trânsito. Portanto, é uma *mesma* coisa quântica que, *sozinha*, desempenha os papéis de onda e de partícula.

Quando o homem logrou mais amplos progressos na investigação dos constituintes básicos do mundo, reconheceu que os conceitos de que tradicionalmente se serviu para representar a realidade mostraram-se inadequados. As coisas que formam o mundo não podem ser descritas nem como corpúsculos nem como ondas, embora sempre se comportem ora como estas, ora como aqueles, dependendo da situação. Não há uma ontologia *visualizável* que permita unificar essa descrição.

Pode-se agora perguntar como, diante de uma situação tão paradoxal, pôde a física assistir à criação da mecânica quântica, a mais abrangente, profunda e precisa teoria científica de todos os tempos. Essa teoria é responsável por praticamente todo o progresso tecnológico de nossa era, dos transistores aos *chips*, dos raios *laser* aos reatores nucleares, dos supercondutores à engenharia genética. Nossa admiração aumenta quando observamos que a mecânica quântica foi desenvolvida de modo independente e quase simultâneo por duas pessoas, o alemão Werner Heisenberg e o austríaco Erwin Schrödinger (e em um certo sentido também pelo inglês Paul Dirac). Embora diferindo muito em sua estrutura e em seus conceitos básicos, verificou-se depois que as teorias formuladas por esses físicos são na verdade equivalentes.

Para uma continuação natural deste texto, ver nosso artigo “Implicações filosóficas da microfísica”, *Cadernos de História e Filosofia da Ciência* - Série 3, 2 (2):141-64, 1992.

Dentre as muitas boas obras acerca da história e dos problemas conceituais da física quântica, merecem destaque os clássicos:

JAMMER, M. *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*. New York, McGraw-Hill, 1966.

— . *The Philosophy of Quantum Mechanics*. New York, Wiley, 1974.

PAIS, A. *Subtle is the Lord*. Oxford, Oxford University Press, 1982.