

corrida armamentista e de outros riscos que, a seu ver, estavam para surgir. Ao mesmo tempo, tinha esperança de que a energia nuclear pudesse vir a beneficiar a humanidade. Não teve sucesso em suas tentativas. Suas idéias a respeito do assunto foram mais tarde transcritas em uma carta aberta às Nações Unidas, em 1950.

Nos últimos anos de sua vida, os interesses de Bohr ampliaram-se para além da física. Viveu com a esposa em sua esplêndida residência em Copenhague e a hospitalidade, gentileza e amabilidade que todos ali recebiam eram reminiscências da corte de um príncipe renascentista.

Bohr morreu repentinamente, em 18 de novembro de 1962, aos setenta e oito anos de idade.

Finalmente uma verdadeira mecânica quântica

No capítulo anterior tratamos dos triunfos e das atribulações dos modelos atômicos. Talvez ninguém melhor do que Niels Bohr tivesse consciência da fragilidade dos métodos que tanto contribuíram para deslindar alguns dos mistérios atômicos. Acrescento um "talvez" em tal declaração porque Einstein também tinha idéias originais e profundas a esse respeito, idéias essas que o perseguiram durante vinte anos sem que ele encontrasse uma saída para elas. No início da década de vinte, os métodos antigos já haviam alcançado seus limites e era necessário que surgissem uma nova geração e novas forças para solucionar o problema de uma mecânica quântica consistente, na área da física. Era o maior desafio do século e exigia, para sua solução, novas maneiras de pensar. E aqui, observamos um fato estranho. Num espaço de bem poucos anos o mistério foi atacado por três flancos e, de início, aparentemente havia três – e não apenas uma – formas distintas, embora consistentes, de mecânica quântica. Só um pouco mais tarde é que se reconheceu tratar-se de diferentes formulações matemáticas da mesma teoria que, de fato, eram equivalentes.

Uma vez resolvido o problema matemático formal, abriu-se caminho para um novo problema epistemológico, porque a interpretação das fórmulas matemáticas precisava de uma revisão profunda e global do conceito básico de causalidade e determinismo em física. Precisava ainda de uma nova análise filosófica não menos revolucionária e categórica do que aquela produzida por Einstein em sua análise do espaço e do tempo, em 1905.

Louis de Broglie: Ondas de Matéria

O primeiro cientista a dar um passo revolucionário foi um aristocrata francês, Príncipe Louis de Broglie (1892 – 1986), que era quase desconhecido entre os físicos da época (Figura 8.1). A família de de Broglie, originária de Chieri, no Piemonte, Itália, tem sido importante na história da França desde o século XVIII, e a ela pertencem vários marechais, embaixadores, ministros e, para não dizer menos, o Duque Maurice de Broglie, o irmão mais velho do Príncipe Louis. Maurice foi um destacado físico e autor dos primeiros estudos clássicos sobre os raios X, levados a cabo em seu palácio em Paris, na rua Byron, parte do qual transformara em laboratório. Nesse ponto, faz-me

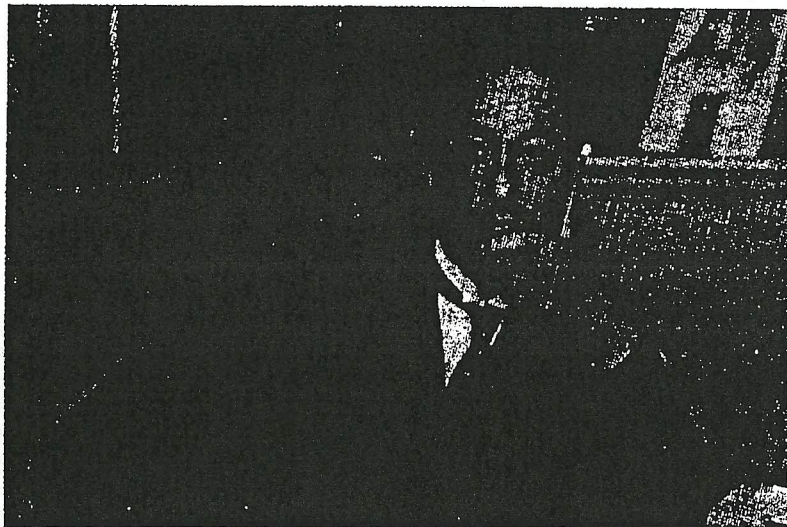


Figura 8.1. Louis de Broglie. Com sua hipótese sobre a natureza ondulatória do elétron e sua famosa fórmula $\lambda = h/p$, de Broglie abriu caminho para a mecânica ondulatória.

lembrar Lord Rayleigh, seu amigo, que também adaptara sua propriedade rural, Terling Place, para transformá-la em um laboratório.

Os pais dos irmãos de de Broglie morreram quando Louis ainda era muito jovem e Maurice, dezoito anos mais velho do que ele, encarregou-se de sua educação. O primeiro interesse de Louis foi a história e ele dedicou-se seriamente a essa disciplina. Mas, aos poucos, foi-se desligando dos estudos em arquivos. Em 1911, ouviu o irmão, que tinha sido secretário do primeiro Conselho Solvay, comentar sobre os problemas da natureza da luz, radiação e *quanta*, e isso despertou-lhe o interesse científico. Durante a Primeira Guerra Mundial, foi designado para o setor de rádio do Exército francês. Ao final da guerra, começou a estudar física e dedicou-se à teoria.

De Broglie começou a meditar sobre o dilema representado pela natureza dual da luz. Segundo todas as experiências, sobre interferência e difração, a luz consistia de ondas eletromagnéticas, mas, segundo a hipótese de Einstein, era corpuscular em todas as trocas de energia com a matéria. Ambos os pontos de vista eram apoiados por indícios experimentais sólidos e todos os resultados anteriores indicavam apenas ondas e não *quanta*. Alguns dos dados mais recentes tiveram origem no laboratório de seu irmão e nas experiências que Louis tinha ajudado a realizar. Como se podiam conciliar esses dois aspectos, que pareciam tão contraditórios? Conforme vimos na página 92, Einstein já tinha dado a entender que esse era um dos problemas mais importantes que se deparavam à física.

Louis de Broglie teria apreciado participar da terceira série de conferências do Conselho Solvay de 1921, mas não conseguiu arranjar convite. Estimulado por essa rejeição, prometeu a si mesmo que até a próxima conferência seria convidado como membro participante em razão de suas descobertas. E foi de fato o que aconteceu no quinto encontro, em 1927.

De Broglie deu início a suas deliberações revolucionárias examinando o seguinte paradoxo:

“Por um lado, a teoria quântica da luz não pode ser considerada satisfatória visto definir a energia de um corpúsculo de luz pela equação $W = h\nu$ contendo a frequência ν . Mas uma teoria puramente corpuscular não contém nada que nos permita definir uma frequência; portanto, é somente por essa razão que somos compelidos, no caso da luz, a introduzir simultaneamente a idéia de corpúsculo e a idéia da periodicidade. Por outro lado, a determinação do movimento estável dos elétrons no átomo introduz números inteiros; e até esse ponto, os únicos fenômenos que envolvem números inteiros em física são os da interferência e dos tons normais de vibração. Esse fato sugeriu-me a idéia de que os elétrons também não podiam ser considerados simplesmente como corpúsculos, mas que também a periodicidade lhes deve ser atribuída”. (*Les Prix Nobel en 1929.*)

Então, fez uso da relatividade para desenvolver seus argumentos e chegou à relação fundamental

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

que relaciona o *momentum* $p = mv$ de uma partícula com o comprimento de onda λ de uma onda a ela associada.

De Broglie observou ainda que a óptica tem duas faces: há uma óptica geométrica que tem grandes analogias formais com a mecânica clássica das massas puntiformes e há uma óptica ondulatória que ressalta a natureza ondulatória da luz. É possível, porém, demonstrar que a óptica geométrica pode derivar da óptica ondulatória como aproximação. A óptica geométrica em geral é usada por construtores de instrumentos quando buscam “raios” de luz e é válida quando os comprimentos envolvidos são grandes em comparação com o comprimento de onda da luz. Quando analisamos o comportamento de uma lente, falamos dos raios de luz e não das linhas perpendiculares à frente das ondas.

Há mais de um século sabe-se que há analogias matemáticas íntimas entre os raios de luz e as trajetórias das partículas. Por volta do ano de 1835, o matemático irlandês William R. Hamilton formulou a equação de movimento de um ponto material em um campo de força de uma forma bastante similar às equações de um raio de luz em um meio de índice de refração variável. O fato é que, embora dêem significados diferentes aos símbolos usados, as equações são as mesmas. Uma variação do índice de refração faz curvar os raios de luz da mesma maneira que a variação do potencial faz curvar as trajetórias de pontos materiais.

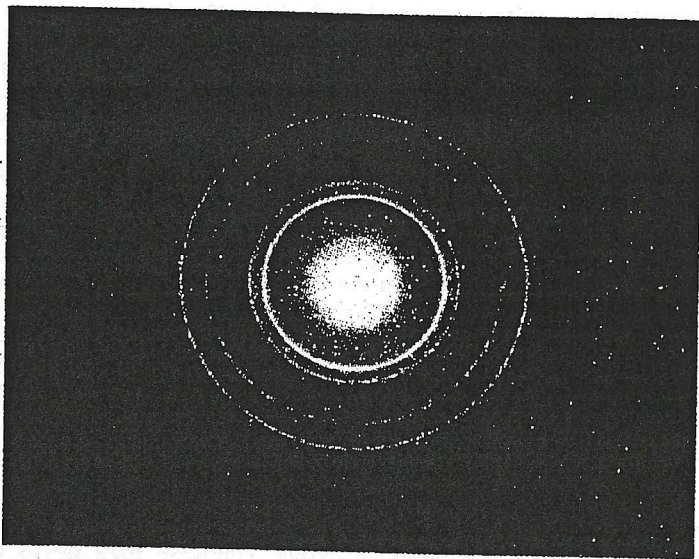


Figura 8.2. Difração do elétron para 100 keV elétrons. Seu comprimento de onda dado pela fórmula de de Broglie é de cerca de $3,7 \times 10^{-10}$ cm. (Foto de A. Chambers.)

De que modo se poderá construir uma mecânica que tenha a mesma relação com a mecânica ordinária que a óptica ondulatória possui em relação com a óptica geométrica? Era esse o problema que se deparava a de Broglie. A partir desse ponto de vista, ele achou mais uma vez a relação $\lambda = h/mv$ mencionada anteriormente. Outro resultado importante por ele obtido baseia-se na idéia de que, se se quiser estabelecer um sistema de ondas estacionárias em uma órbita, essa órbita deverá conter um número inteiro de comprimentos de onda. É aí que os números inteiros aparecem, e assim surgem normas de quantização que, em alguns casos, dão os mesmos resultados que as normas de quantização de Bohr-Sommerfeld. A relação entre comprimento de onda e *momentum* é, em geral, verdadeira; o método de quantização é válido apenas em casos específicos e precisa de outros aperfeiçoamentos.

Os fenômenos de interferência produzidos por ondas de elétron (Figura 8.2) já tinham sido observados, mas não reconhecidos como tal, por C. J. Davisson e C. H. Kunsman nos Laboratórios Bell de Nova Iorque em 1921-1923. Após ter lido os trabalhos de de Broglie, Walter Elsasser, então um físico principiante, explicou-essas experiências, em 1925, como difração de elétrons. Quando mencionou seu resultado a Einstein, este respondeu:

“Jovem, você está sentado em cima de uma mina de ouro” (W. Elsasser, *Memoirs of a Physicist*, p. 66, Nova Iorque: *Science History Publications*, 1978).

Mas a prova experimental objetiva só foi obtida em 1927, por Davisson e L. H. Germer, nos Laboratórios Bell, e por G. P. Thomson, o filho de J. J. Thomson, citado por Rutherford (vide p. 51). Desse modo, tanto pai quanto filho tornaram-se famosos por descobertas relacionadas ao elétron: o pai, pela natureza corpuscular do elétron, o filho, pelo aspecto ondulatório do elétron. Os debates em família eram calorosos e interessantes, conforme se depreende pela leitura da vida de J. J. descrita por seu filho.

A segunda parte da descoberta de de Broglie — seu método de quantização — era primitiva, mas ajudou a estimular Erwin Schrödinger na descoberta da verdadeira equação de ondas do elétron.

O Príncipe aperfeiçoou suas idéias em várias notas publicadas nos *Comptes-rendus* da Académie des Sciences de Paris entre 1923 e 1924. Depois, coligiu-as em um documento mais completo; com o objetivo de transformá-las em tese de doutorado. A Sorbonne ficou embaraçada, pois ninguém ali sabia como avaliar a tese. Parte do julgamento foi o seguinte: “Elogiamo-lo por ter empenhado, com notável competência, um esforço que tinha de ser envidado para que se superassem as dificuldades que estavam abalando os físicos”. P. Langevin, o amigo de Marie Curie e de Einstein, mostrou-se impressionado e enviou uma cópia dos trabalhos de de Broglie a Einstein, tendo recebido uma resposta bastante positiva: segundo Einstein, o documento continha descobertas muito importantes.

Agora precisamos deixar de Broglie de lado por algum tempo; mais tarde veremos o que aconteceu a seus enfoques. Enquanto isso, voltemos à história de um outro físico cerca de dez anos mais jovem que de Broglie, Werner Heisenberg.

Werner Heisenberg e Wolfgang Pauli: Matrizes Mágicas

Werner Heisenberg (1901-1976) nasceu em Würzburg, em 5 de dezembro de 1901, filho de um professor de grego da Universidade de Munique (Figura 8.3). Estudou em Munique e, na Universidade, foi aluno de Arnold Sommerfeld, sob cuja orientação escreveu uma dissertação de doutorado em hidrodinâmica. Mas tinha-se voltado para pesquisas de física atômica mesmo antes de receber o grau de doutor, e tentara descobrir regularidades empíricas em espectros, estudo esse que o levou a dominar o material numérico disponível. Em Munique, Heisenberg praticava esportes que o mantinham em contato com a natureza, sobretudo esqui e alpinismo. Sob muitos aspectos, era um patriota romântico com uma pitada de escoteiro e do *Wandervogel* alemão. Heisenberg escreveu um livro autobiográfico em que descreve momentos importantes de sua vida ocorridos, segundo ele, em seus anos de maturidade. Esse livro apresenta muitos reflexos de seu amor pela natureza e lembranças de experiências suas como alpinista.

Heisenberg não apenas deu início à mecânica quântica mas, durante muitos anos, também ofereceu idéias novas e brilhantes para muitos ramos da física. Antes dos trinta anos, já tinha fundado uma escola de física em Leipzig, onde fora indicado para a cátedra de física teórica; vários dos melhores teóricos, apenas alguns anos mais jovens do que ele, formaram-se nessa escola.



Figura 8.3. Werner Heisenberg (1901-1976), por volta de 1924. Sua descoberta da mecânica matricial e do relacionamento entre uma coordenada q e seu *momentum* conjugado p , $pq - qp = h/2\pi i$ revelou a primeira forma completa da mecânica quântica. (Universidade de Hamburgo.)

Quando os nazistas chegaram ao poder, Heisenberg, que não estava enfrentando nenhum risco pessoal, decidiu permanecer na Alemanha, país ao qual se sentia devedor de grande lealdade. A esperança de salvar o que fosse possível da ciência alemã foi um dos motivos de sua permanência, mas avaliou a situação de uma forma excessivamente otimista, e envolveu-se em grandes conflitos. Durante a guerra, foi um dos líderes do projeto alemão sobre a bomba atômica, mas não alcançou grande sucesso. Após a guerra, envidou todos os esforços para ajudar a reerguer a ciência alemã. Mudou-se para Munique, onde ocupou o cargo de diretor de um enorme instituto de pesquisas em física mas, como já acontecera com outros grandes físicos, a disciplina tinha tomado rumos que lhe eram inacessíveis. Morreu em 1976.

Quando ainda era estudante em Munique, Heisenberg conheceu Wolfgang Pauli, a quem já citamos, e dele tornou-se amigo íntimo. Pauli tinha a mesma idade de Heisenberg. Ficou famoso aos vinte e um anos por ter escrito um artigo sobre relatividade para a *Encyklopädie der mathematischen Wissenschaften* (vol. V 19) (*Enciclopédia da Matemática*). Em princípio, sua função seria ajudar Sommerfeld nessa tarefa, mas o mestre logo percebeu as qualificações de Pauli e deixou que se encarregasse sozinho do trabalho. Einstein ficou impressionado com o artigo e surpreendeu-se ao saber a idade do autor. O artigo foi traduzido para o inglês, reeditado em 1958 e é ainda um dos melhores textos que há sobre relatividade.

Pauli era gordo, não gostava de praticar esportes e, sob muitos aspectos, era o oposto de Heisenberg. Além disso, tinha uma rigorosa atitude crítica e sólida formação cultural. Dessa maneira, servia de oráculo e juiz para a verificação de idéias e resultados daqueles que tinham descoberto — ou julgavam

ter descoberto — coisas novas na área da física. O oráculo, entretanto, não era infalível, conforme já vimos com relação à descoberta do spin do elétron por Uhlenbeck e Goudsmit. Quando, em 1932, alguns físicos jovens reunidos em torno de Bohr decidiram produzir uma peça satírica adaptando o *Fausto* de Goethe às condições da física teórica de então, a Pauli coube o papel de Mefistófeles, *der Geist der stets verneint* (o espírito que sempre nega).

Após um período em Göttingen e um estágio em Copenhague, em 1923, Pauli fixou-se em Hamburgo e ali manteve com Otto Stern uma amizade que durou toda a vida. Mais tarde, sucedeu a Schrödinger em Zurique e, à exceção dos anos de guerra passados no Institute for Advanced Study de Princeton, permaneceu em Zurique até a morte prematura, em 1958. Entre suas descobertas estão o princípio da exclusão, a hipótese do spin nuclear, a hipótese do neutrino e o desvendamento da conexão entre o spin e a estatística de uma partícula. Como autor científico, publicou, além do tratado sobre relatividade já referido, uma das melhores exposições sobre mecânica quântica.

Pauli tinha atitudes muito próprias. Por exemplo, após ouvir uma palestra em uma conferência internacional na qual descrevi um trabalho realizado sobre o espalhamento próton-próton, saiu do salão junto comigo e com outro físico. Virou-se para mim e disse: “Nunca ouvi palestra pior que a sua”. Pensou mais um pouco e depois voltou-se para nosso colega, acrescentando: “Com exceção da sua aula inaugural em Zurique”. Conhecendo Pauli muito bem, não me preocupei com a observação que fez. O movimento para a frente e para trás que ele fazia durante minha palestra era evidência de que estava ouvindo e isso significava mais do que qualquer comentário, conforme já sabiam todos os que o conheciam bem. Quando alguém apresentava a Pauli uma nova idéia ou uma nova teoria, ele respondia quase que automaticamente: “Droga!” (*Quatsch*, em alemão). Mas, se esse alguém insistisse na idéia e conseguisse convencê-lo de sua validade, então ele passava a auxiliar e oferecia novas idéias. Tinha muitos amigos que aprenderam a lidar com ele e o elevado conceito que esses amigos faziam a seu respeito compensava seu comportamento à primeira vista grosseiro.

Pauli e Heisenberg correspondiam-se intermitentemente, quando não podiam estar em contato direto um com o outro, e suas cartas constituem um comentário dramático sobre o desenvolvimento da mecânica quântica: Pauli vai da crítica entusiasmada à mais feroz em relação ao amigo. Tinha também interesse permanente pela psicologia e se correspondia com Carl Gustav Jung, tendo até mesmo escrito artigos sobre temas psicológicos. Esse outro aspecto de sua personalidade, embora aparentemente importante para ele, foi mantido em relativo segredo.

Em 1922, quando ainda era aluno de Sommerfeld, Heisenberg acompanhou seu orientador a Göttingen, para ouvir algumas palestras que seriam feitas por Bohr. Após uma das conferências, Heisenberg entabulou longo debate com Bohr, debate que se prolongou até mais tarde, durante uma caminhada que fizeram pelos arredores de Göttingen. Bohr ficou impressionado com o jovem intelectual e convidou-o a visitar Copenhague. Heisenberg obteve o grau de doutor em Munique e logo depois partiu para Göttingen, a fim de prosseguir seus estudos com Bohr. Ali permaneceu até o

outono de 1924, fazendo nesse meio tempo uma visita a Copenhague, durante a Páscoa daquele mesmo ano.

Em 1924, após um estudo da teoria de dispersão de luz empreendido junto com Bohr e Kramers, Heisenberg passou a suspeitar de vários conceitos intuitivos usados na teoria quântica, como o esquema literal das órbitas eletrônicas em átomos. Pauli, em sua correspondência com Heisenberg, expressou dúvidas similares. Heisenberg, então, empenhou-se em formular uma teoria que evitasse representações concretas — e que não podiam ser observadas — das órbitas, fazendo uso apenas de quantidades que pudessem ser observadas, como as probabilidades de transição para saltos quânticos. Dessa forma, esperava chegar mais próximo da realidade e superar conceitos espúrios baseados em modelos. Essa formulação levou à necessidade de usar quantidades identificadas por dois índices; essas quantidades também se vinculavam à expansão de Fourier das coordenadas que representavam o movimento periódico no modelo orbital. O esquema gerou um tipo de álgebra que, para surpresa de Heisenberg, não era comutativa; isto é, o produto de duas quantidades dependia da ordem da multiplicação. Heisenberg elaborou um estudo no qual desenvolveu essas idéias em maio de 1925, durante uma estada na ilha de Helgoland, no Mar do Norte, onde se refugiara para escapar aos pólems que lhe provocavam dolorosa alergia.

Nessa época, Heisenberg não conhecia a teoria matemática das matrizes mas, quando falou a respeito de suas quantidades não-comutantes com Max Born (1882-1970), este logo reconheceu que elas estavam relacionadas com a álgebra matricial, já bastante conhecida de Born (Figura 8.4), desde seu tempo de estudante. Heisenberg, Born e Pascual Jordan, outro aluno de Born bem-dotado para a matemática, se uniram e logo conseguiram elaborar um esquema consistente da mecânica quântica que proporcionava resultados corretos. Seu método baseava-se no aperfeiçoamento e interpretação mais profunda do princípio de correspondências ligado ao uso de matrizes para a representação de variáveis cinemáticas. O método vinculava-se também à mecânica analítica clássica de Hamilton. As coordenadas q e seus momenta conjugados p , no entanto, não eram números ordinários que variassem com o tempo, mas matrizes — isto é, séries de números complexos dispostos em um quadrado. A posição de cada número no quadrado é denotada por dois índices, o primeiro correspondendo à fileira horizontal e o segundo à coluna em que se coloca o número. Na aplicação física específica, os índices correspondem ao estado inicial e final de um sistema. Objetos matemáticos, como matrizes, podem ser acrescentados e subtraídos segundo regras simples inteiramente semelhantes àquelas que prevalecem para números ordinários. A regra de multiplicação, no entanto, é diferente. A multiplicação da matriz p pela matriz q não dá o mesmo resultado que a multiplicação de q por p . Ao contrário, as matrizes obedecem a uma estranha regra de comutação:

$$pq - qp = \frac{h}{2\pi i}$$



Figura 8.4. Max Born (1882-1970) no lago de Como em 1927, durante uma excursão organizada para os participantes da Conferência de Volta. Born acabava de fornecer a interpretação probabilística da mecânica ondulatória. (Cortesia de F. Rasetti.)

Mais detalhadamente, para os elementos da matriz p_{mr} , q_{mr} , essa equação tem a seguinte forma

$$\sum_r (p_{mr}q_{rn} - q_{mr}p_{rn}) = \frac{h}{2\pi i} \delta(m,n)$$

onde $\delta(m,n)$ é um símbolo de Kronecker, igual a 1 se $n = m$, mais, caso contrário, igual a zero. Em termos de física clássica, para um ponto movendo-se em uma dimensão, q é a coordenada x , p é o momentum $mx = mv$. Na física clássica, quando p e q são números, obviamente $pq - qp = 0$. Mas em mecânica quântica p e q são expressões mais complicadas — matrizes — e obedecem à fórmula de comutação mostrada acima.

Essa nova mecânica, chamada *Matrizenmechanik* ou *Quantenmechanik* estava muito longe de ser clara e apresentava grandes dificuldades de cálculo. Além de ter estudado a teoria geral, Heisenberg e seus colegas tinham-na aplicado, como exemplos específicos, ao oscilador harmônico e a alguns outros problemas simples. Com tremendo esforço, Pauli tivera êxito ao aplicá-la ao átomo de hidrogênio, conseguindo pelo novo método os resultados que Bohr tinha conseguido em 1912 fazendo uso de hipóteses inconsistentes.

A *Quantenmechanik* continha idéias novas e fundamentais que exerceram grande motivação. Parecia abrir novos caminhos, sobretudo pelo fato de oferecer a possibilidade de abandonar-se o conceito de órbita, e de fazer uso apenas de observáveis; mas seus conceitos físicos eram um tanto nebulosos e ela não solucionava novos problemas concretos, pelo menos no início. Em resumo, sua motivação era limitada a um grupo relativamente pequeno de iniciados.



Figura 8.5. Paul A. M. Dirac (1902-1984), em 1934. Dirac deu a formulação geral da mecânica quântica e sua equação relativística para o elétron teve conseqüências profundas e duradouras. (Foto Ramsey & Muspratt.)

Paul Adrien Maurice Dirac: Abstração e Beleza Matemática

Enquanto esses fatos estavam acontecendo entre Göttingen e Copenhague, uma surpresa estava sendo preparada em Cambridge. Estava-se aperfeiçoando uma mecânica quântica nova e, à primeira vista, diferente. Seu descobridor também era um jovem, pouco conhecido dos físicos: Paul A. M. Dirac (Figura 8.5). Nascido em Bristol, Inglaterra, de pai suíço e mãe inglesa, Dirac foi contemporâneo de Heisenberg, Pauli e Fermi. Tinha iniciado estudos de engenharia elétrica em Bristol, mas depois passou-se para a matemática pura enquanto ainda estava naquela cidade, e mais tarde seguiu o curso de matemática no St. John's College, Cambridge, onde foi designado estudante pesquisador "sênior" com bolsa da Exposição de 1851. Em Cambridge, Dirac aprendeu a teoria atômica de Bohr e escreveu alguns artigos sobre o assunto. Em 1925, depois de Heisenberg ter visitado Cambridge, Dirac recebeu as provas do primeiro artigo de Heisenberg sobre *Matrizenmechanik*, que foi a primeira apresentação de Dirac à mecânica quântica. Após ter estudado as provas durante cerca de dez dias, ele chegou à conclusão de que a não-comutação era a nova idéia essencial. Eis as palavras do próprio Dirac:

"Durante algum tempo, concentrei-me muito nesse relacionamento bastante geral para tentar ver de que forma seria possível fazer uma conexão com as leis da mecânica que já eram bastante conhecidas. Nessa época, eu costumava dar longos passeios sozinho aos domingos, enquanto pensava em tais problemas; e foi durante um desses passeios que me ocorreu a idéia de

que o comutador A vezes B menos B vezes A era muito semelhante ao parêntese de Poisson que se tem em mecânica clássica quando se formulam as equações segundo a forma hamiltoniana. Foi uma idéia que imediatamente deixei de lado quando me ocorreu. Depois, no entanto, a ela retornei pelo fato de que não sabia muito bem o que era um parêntese de Poisson. Era alguma coisa sobre a qual eu havia lido em livros avançados de dinâmica, mas não tinha realmente muito emprego prático, e, após ler sobre o assunto, ele me saíra da cabeça e não me lembro bem de qual era efetivamente a situação. Foi necessário examinar se o parêntese de Poisson na realidade podia corresponder ao comutador e eu precisava ter uma definição precisa do que era o parêntese de Poisson.

Então corri para casa e procurei em todos os meus livros e papéis e não consegui descobrir nenhuma referência ao parêntese de Poisson. Os livros que eu tinha eram muito elementares. Era um domingo, não podia recorrer a uma biblioteca. A única coisa que me restava fazer era esperar impacientemente durante toda a noite; na manhã seguinte, quando as bibliotecas abriram, corri para verificar o que era um parêntese de Poisson e descobri que era exatamente aquilo que eu tinha imaginado e que se podia estabelecer a conexão entre um parêntese de Poisson e um comutador. Isso dava uma relação muito estreita entre a mecânica clássica comum a que as pessoas estavam acostumadas e a nova mecânica que envolvia as quantidades não-comutativas introduzidas por Heisenberg.

Depois dessa idéia inicial, o trabalho foi relativamente direto. Durante bom tempo, não tive de enfrentar dificuldades efetivamente sérias. Podiam-se calcular as equações da nova mecânica: bastava fazer a generalização adequada nas equações clássicas expressas segundo a forma hamiltoniana. Continuei a desenvolver esse trabalho, enquanto Heisenberg e os que com ele trabalhavam desenvolveram o ponto de vista matricial em Göttingen, independentemente; trocamos algumas cartas, mas estávamos trabalhando essencialmente à parte". (*Proceedings of the International School of Physics, "Enrico Fermi"*, vol. 57, p. 134.)

Há certos números que são essenciais para a forma de mecânica quântica de Dirac. Ele chamou-os de números q para distingui-los dos números c ordinários; os números q têm uma álgebra não-comutativa e são estreitamente vinculados às matrizes de Heisenberg e aos operadores de Schrödinger, que mencionaremos mais tarde. A letra q representa *quantum*; c representa clássico.

Assim, já em 1925 Dirac conseguia dar uma formulação completa da mecânica quântica que, sob muitos aspectos, era mais geral do que aquela dada por seus contemporâneos. É digna de nota em virtude de sua formulação axiomática e das generalizações que permite.

Em 1932, Dirac foi nomeado professor Lucasiano de matemática na Universidade de Cambridge, ocupando a mesma cadeira que Newton havia ocupado no século XVIII, e ali permaneceu até aposentar-se. De caráter um tanto retraído, ele exerceu influência profunda através de seus estudos de pesquisas e de seu livro *The Principles of Quantum Mechanics*. Seus escritos se caracterizam por um estilo conciso e profundo que quase sempre exige do leitor um esforço de concentração. Uma história curiosa, que talvez seja

verdadeira, serve para descrever esse homem. No final de uma conferência, Dirac perguntou, como sempre fazia, se havia alguma pergunta. Alguém da platéia aventurou-se a dizer: "Não compreendi como o senhor passou de A para B", indicando duas equações. Dirac respondeu friamente: "Isso é uma afirmação, não uma pergunta".

Erwin Schrödinger

Sem que os físicos de Göttingen, Copenhague e Cambridge soubessem, em Zurique um outro físico chamado Erwin Schrödinger (1887-1961) também estava descobrindo a mecânica quântica, embora sob forma diferente. Schrödinger (Figura 8.6), nascido em Viena, já era um físico bastante conhecido e tinha a seu crédito realizações de alto nível. Era de temperamento artístico e escrevia com facilidade e clareza. Seu pai, de nacionalidade austríaca, era um homem culto, bem-versedado em muitos assuntos científicos, inclusive química e botânica; sua mãe era inglesa. Erwin tinha estudado em Viena, onde a memória e o espírito de Boltzmann permaneciam vivos. O professor de Schrödinger tinha sido Fritz Hasenöehrl, também ex-aluno de Boltzmann e um físico bastante promissor. Hasenöehrl infelizmente morreu na Primeira Guerra Mundial. Schrödinger lutara no Exército austríaco durante a guerra. Depois, trabalhara em diversas universidades e finalmente estabeleceu-se na Universidade de Zurique, onde levou a cabo sua obra imortal. Impressionado pelas idéias de Broglie e por alguns comentários favoráveis feitos por Debye e Einstein com relação a essas idéias, aperfeiçoou-as em uma verdadeira teoria ondulatória. De início, tentou tratar tudo segundo um enfoque relativista, mas achou que os resultados não combinavam com as evidências experimentais; sentiu-se desestimulado e abandonou temporariamente os esforços que estava empreendendo.

Após alguns meses, Schrödinger voltou ao tema usando de um enfoque não-relativista e descobriu resultados que combinavam com dados experimentais. O motivo pelo qual sua teoria relativista não combinava era que ele não levava em conta o spin do elétron. A idéia do spin era praticamente nova naquela época e os teóricos não estavam habituados a ela.

Seu trabalho foi publicado em janeiro de 1926 [*Annalen der Physik* 79, 361 (1926)] e trazia a famosa equação de Schrödinger:

$$\nabla^2 \psi(x,y,z) + \frac{8\pi^2m}{h^2} [E - U(x,y,z)] \psi(x,y,z) = 0$$

Essa equação tem uma forma que era bem-conhecida dos primeiros físicos matemáticos que haviam estudado as ondas. Na realidade, trata-se da equação típica de todos os movimentos ondulatórios: ondas acústicas, ondas eletromagnéticas e assim por diante, todas são tratadas por equações matematicamente muito similares à de Schrödinger. Além disso, pouco antes da publicação dos trabalhos de Schrödinger, Richard Courant e David Hilbert, dois famosos matemáticos de Göttingen, publicaram um livro intitulado *Methoden der Mathematischen Physik*, que continha todas as bases



Figura 8.6. Erwin Schrödinger (1877-1961), que formulou a versão ondulatória da mecânica quântica e descobriu a equação que traz seu nome. Trata-se de instrumento versátil e rico, que explicou muitos fenômenos. (Cortesia de W. L. Scott.)

matemáticas necessárias ao entendimento dos trabalhos de Schrödinger. De fato, o próprio Schrödinger descobriu no livro de Courant e Hilbert a solução matemática para problemas que derivavam de casos específicos de suas equações.

Na equação de Schrödinger ∇^2 é o operador laplaciano $\partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2 + \partial^2/\partial z^2$, E é a energia do sistema e $U(x,y,z)$ é o potencial que caracteriza o sistema. Por exemplo, para um átomo de hidrogênio $U(x,y,z) = Ze^2/r = Ze^2/\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$. A função $\psi(x,y,z)$ foi chamada por Schrödinger de *campo escalar*. Sua interpretação será tratada mais tarde. A equação de Schrödinger tem "soluções aceitáveis"; isto é, soluções tais que $\int |\psi(x,y,z)|^2 dx dy dz$ é finito apenas para certos valores específicos de E . Esses valores são chamados de autovalores ou valores próprios e seu conjunto

forma um espectro. No caso do hidrogênio, há um espectro idêntico aos níveis de energia de Bohr e um contínuo para a energia positiva. A quantização, portanto, ocorre de maneira automática. Os níveis de energia se assemelham às frequências de uma corrente vibratória propriamente dita, isto é, aos tons emitidos por qualquer instrumento de cordas.

Os trabalhos de Schrödinger foram publicados como uma série de memórias nos *Annalen der Physik*, a mesma publicação que tinha divulgado as memoráveis descobertas de Planck e de Einstein. O título é "Quantização como Problema de Autovalores" e a obra imediatamente atraiu a atenção e admiração de todo o mundo. As cartas entre Schrödinger, Einstein, Planck e outros luminares testemunham esse fato. Planck convidou Schrödinger a Berlim para presidir seu seminário, e foi comovente ver Planck, já em idade avançada, rejubilar-se por finalmente ver uma forma definitiva e consistente da mecânica quântica.

Por que o sucesso de Schrödinger foi tão imediato e universal, comparado à aceitação mais modesta que teve a obra anterior de Heisenberg? Talvez um dos motivos tenha sido o fato de a matemática de Schrödinger ser do tipo familiar aos físicos e de todo o seu método não ser matematicamente diferente da teoria ondulatória clássica. Mesmo o jovem Fermi teve sérias dificuldades para assimilar as idéias de Heisenberg; no entanto, assimilou imediatamente os escritos de Schrödinger e, depois que estes foram publicados, ele, Fermi, explicou-os a seus amigos e alunos. Fermi sentia-se embaraçado não com a matemática de Heisenberg, a qual dominava facilmente, mas com as idéias de Heisenberg na área da física. Outro motivo para o sucesso de Schrödinger é que seus métodos podiam aplicar-se a problemas práticos concretos com muito mais facilidade do que os métodos de Heisenberg, e assim podiam ser comparados a experiências.

Mas havia uma grande questão a resolver. O que é o ψ , o misterioso campo escalar que se propaga como uma onda? Durante algum tempo, Schrödinger e outros julgaram que o quadrado do módulo do número complexo ψ era a densidade da carga elétrica, como se o elétron se dissolvesse em uma nuvem. Essa interpretação, no entanto, era muito suspeita, pois havia boa razão para se acreditar que os elétrons se localizam em áreas de espaço muito pequenas, quase como pontos. A Figura 7.5 mostra as órbitas de Bohr e a Figura 8.7, as nuvens de eletricidade de Schrödinger para o átomo do hidrogênio, mas nem as órbitas nem as nuvens existem de fato; o único conceito sólido é a abstração matemática incorporada pelas fórmulas. As fórmulas podem ser transpostas para se aplicarem a uma situação experimental, ao contrário dos conceitos.

Em Copenhague, a teoria de Schrödinger foi admirada, mas sua interpretação de ψ foi repelida. Bohr convidou Schrödinger a um debate sobre problemas vinculados à sua teoria e enfrentou-o com críticas e objeções à interpretação. Os longos debates foram tão exaustivos que, no fim, Schrödinger adoeceu de cansaço e ficou de cama na residência de Bohr, onde estava hospedado, o que não impediu o anfitrião de continuar a discutir com Schrödinger. Lembremos que Bohr tinha um espírito amável, polido e sinceramente preocupado com o bem-estar de seu hóspede mas, quanto a um problema vital de física, não conseguia controlar-se.

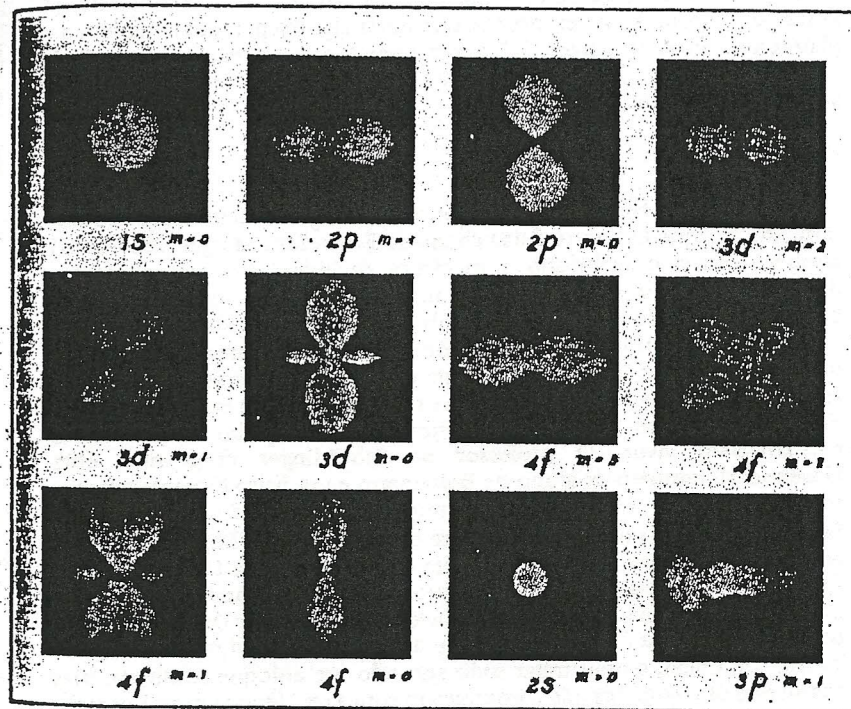
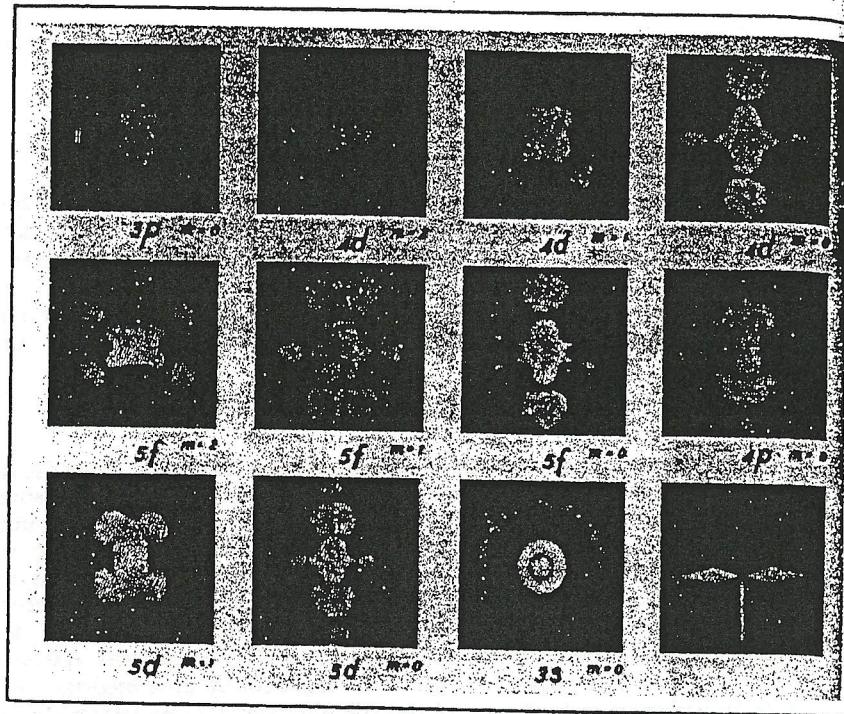


Figura 8.7. Nuvens de elétrons de Schrödinger, correspondentes a estados estacionários de um átomo de hidrogênio. Indicam a "densidade do elétron", isto é, a probabilidade $|\psi|^2$ de achar-se o elétron em um determinado ponto quando o átomo está nos estados dados pelos números quânticos especificados. O primeiro número é n , o número quântico total; as letras s, p, d, f , por motivos históricos, indicam o valor do *momentum* angular em unidades de $h/2\pi$; s corresponde a $l = 0$, p a $l = 1$, d a $l = 2$, f a $l = 3$, m é o número quântico magnético que dá a orientação do átomo. [De H. White, *Physical Review*, 37, 1416 (1937).]

A vida de Schrödinger, a partir de então, é um espelho da época em que viveu, sucedeu a Planck em Berlim, mas, em 1933, desgostoso com a ascensão do nazismo, abandonou a Alemanha, seguindo para Oxford. Imprudentemente, voltou a Graz, em seu país, a Áustria, em 1936, e dali foi expulso em 1938, quando Hitler anexou a Áustria à Alemanha. Chegou a Roma com uma mochila que continha apenas aquilo que pudera carregar e procurou Fermi para pedir-lhe que o levasse ao Vaticano, onde encontrou abrigo e um asilo tranquilo durante certo tempo. Dali seguiu para o Institute of Advanced Study de Dublin, onde permaneceu até 1955. Em Dublin, escreveu um folheto — "O Que é a Vida?" —, que exerceu considerável influência entre os biofísicos. Depois retornou a Viena, onde morreu em 1961.



Voltemos a ψ . Sua potencialidade e sua surpreendente natureza estão bem-descritas em uma quadrinha composta por Walter Hückel, um jovem colaborador de Debye:

“Erwin com seu *psi* consegue realizar alguns cálculos, mas uma coisa ninguém viu: qual o significado de *psi*?”

O significado de ψ começou a tornar-se claro em 1926, quando Max Born interpretou-o não como densidade de eletricidade, mas como densidade de probabilidade, isto é, $|\psi(x,y,z)|^2 d\tau$ é a probabilidade de achar-se o elétron em um elemento de volume $d\tau$ em coordenadas x , y , z . Naturalmente essa idéia colocou problemas alarmantes porque era novidade considerar-se que uma teoria mecânica deveria dar uma probabilidade, embora em 1917 Einstein, com seus A e B, tivesse prenunciado o papel da probabilidade em fenômenos atômicos.

Um grande obstáculo foi superado com êxito, quando Schrödinger, o jovem norte-americano Carl Eckart e outros físicos, atuando independentemente, reconheceram que as teorias de Heisenberg e de Schrödinger eram matematicamente equivalentes. Se se soubesse como solucionar a equação

de Schrödinger para um determinado problema, poder-se-iam calcular as matrizes de Heisenberg, e vice-versa. Era quase como resolver os mesmos problemas por meios geométricos ou analíticos. Dessa forma, a mecânica ondulatória e a *Matrizenmechanik* eram equivalentes; ou melhor, não eram propriamente equivalentes, eram uma coisa só.

A teoria de Dirac também é equivalente à de Heisenberg e à de Schrödinger. Para todas três a relação essencial que produz a quantização é

$$pq - qp = \frac{h}{2\pi i}$$

Para Heisenberg, p e q são matrizes; para Schrödinger q é um número e p é o operador diferencial

$$p = \frac{h}{2\pi i} \frac{\partial}{\partial q}$$

Para Dirac, p e q são números específicos que obedecem a uma álgebra não comutativa. Os resultados de qualquer cálculo sobre um problema concreto feito por qualquer desses métodos são idênticos.

O Significado das Equações

O problema da interpretação da matemática é mais sério. É fato que tanto a luz quanto a matéria mostram algumas características de partículas e algumas características de ondas. Estamos nos referindo aqui a partículas macroscópicas clássicas e a ondas macroscópicas clássicas. Podemos então perguntar: “A luz será um fenômeno ondulatório ou será um composto de partículas?” Pergunta semelhante poderá ser feita, digamos, com relação a um elétron.

Para responder a indagações desse tipo, precisamos recorrer a um modo de pensar e a métodos introduzidos por Einstein em 1905, quando ele mostrou como analisar o conceito aparentemente simples de simultaneidade e chegou a resultados lógicos espantosos.

Fazendo uso de métodos semelhantes, conforme Heisenberg mostrou de início em um famoso estudo escrito em 1927, descobrimos que conceitos clássicos como o da órbita de uma partícula ou conceitos ondulatórios clássicos falham quando tentamos aplicá-los a objetos microscópicos. Ao fazer certas experiências, podemos “mostrar” que estamos lidando com uma onda, mas depois é impossível realizar com o mesmo objeto as experiências necessárias para mostrar que estamos lidando com um corpúsculo e vice-versa. As condições quânticas estão na raiz desse dilema.

Se tentarmos simultaneamente determinar a coordenada e o *momentum* de uma partícula, deparar-nos-emos com contradições originárias da natureza dualística — corpuscular e ondulatória — da partícula. Para ilustrar essa dificuldade, Heisenberg debateu sobre muitas experiências que mostram ser impossível conseguir tal medição em virtude da natureza dualística

(ondulatória e corpuscular) de uma partícula como um electrón. A precisão do resultado é limitada por uma famosa relação chamada de princípio da incerteza estabelecida por Heisenberg. Chamando Δq de erro inevitável que afeta a medição das coordenadas e Δp de erro análogo para a medição do *momentum*, temos

$$\Delta p \Delta q \approx \frac{h}{2\pi}$$

O termo *erro*, naturalmente, não significa o erro causado pela imperfeição de instrumentos práticos, mas sim o erro inerente a fenômenos inevitáveis, como o recuo, quando da emissão de um *quantum* ou a difração de uma onda através de uma fenda.

A equação de incerteza é estreitamente vinculada à condição quântica $pq - qp = h/2\pi i$. As relações de incerteza são obtidas apenas para grandezas que não se comutam. O histórico artigo de Heisenberg, no qual essas idéias são descritas, foi aclamado por Bohr; Pauli também aplaudiu a teoria, que tinha sido levada a seu conhecimento através de carta.

Em nossa vida quotidiana, onde lidamos com objetos de dimensões humanas, não temos oportunidade de experimentar as limitações impostas pelo princípio da incerteza e delas não temos consciência. Se observarmos um objeto macroscópico, a perturbação em seu comportamento provocada pela observação será inteiramente desprezível e, desse modo, escapam às limitações impostas pelo princípio da incerteza. O recuo quando da emissão de um *quantum* que é captado pelo meu olho (e de que necessito para perceber o objeto) é desprezível se o emissor for até mesmo um pequeno pedaço de cristal, e assim não preciso preocupar-me com a mudança de *momentum* que minha observação força sobre ele. Mas, quando a partícula emissora é um electrón atômico, o recuo passa a ser suficientemente grande para afetar seu movimento subsequente e assim a observação perturba o objeto observado. Neste caso, um exame crítico dos procedimentos que podem ser teoricamente usados para medir coordenada e *momentum* levam à relação de incerteza.

Podemos entender melhor essa situação através de um exemplo. Vamos supor que temos muitos sistemas idênticos ou que repetimos a mesma experiência muitas vezes no mesmo sistema. Estamos fazendo uso de instrumentos perfeitos, no sentido de que não consideramos limitações técnicas. Mas não podemos ignorar limitações impostas pelas leis da natureza. Medimos a coordenada de um electrón muitas vezes e cada vez achamos o valor q ; o valor médio de q é \bar{q} . Definimos Δq como $\sqrt{\langle (q - \bar{q})^2 \rangle}$, ou a raiz do desvio médio quadrático de q , e da mesma forma no que diz respeito a p . Agora, vamos supor que a medida consista em observar que o electrón passa através de uma fenda de largura a na direção x ; então, $\Delta x = a$. Suponhamos que o electrón seja enviado através da fenda com uma velocidade v_y , na direção y perfeitamente perpendicular ao plano da fenda. Mas, após passar pela fenda, o electrón pode tomar uma direção diferente da inicial, porque os electróns estão sujeitos à difração. Portanto, ele adquire velocidade na direção x , dada pela largura da difração, que é aproximadamente de $(\lambda/a)v_y$. Pa-

ra λ devemos inserir o comprimento de onda de de Broglie h/mv_y , e a partir dessas relações imediatamente obtemos

$$\Delta x \Delta p_x = am \frac{\lambda}{a} v_y = h$$

Se estreitarmos a fenda, reduzindo a , Δp_x aumenta na mesma proporção em que a se reduz. O cerne da questão é que pontos materiais se comportam tanto como partículas quanto como ondas e, portanto, é impossível fazer uma descrição perfeita a partir de um só enfoque.

Existe também uma outra relação de incerteza que afirma que no intervalo de tempo Δt pode-se medir uma energia com uma acuidade ΔE tal que

$$\Delta t \Delta E = h$$

Além dessas limitações, desconhecidas da física clássica, e por causa delas, a formulação dos problemas de mecânica quântica é completamente diferente da formulação macroscópica usual. Por exemplo, temos um sistema mecânico como o átomo de hidrogênio (deixaremos de lado os spins, por questão de clareza). É inútil indagar a respeito de órbitas ou de outros conceitos que não são passíveis de medição em virtude da natureza dual do electrón. Mas podemos indagar a respeito da energia ou do *momentum* angular ou de outras quantidades que são mensuráveis. A teoria nos dá uma lista de possíveis valores dos resultados de uma medição. No caso específico da energia de um átomo de hidrogênio, esses valores são os valores negativos $-2\pi^2 e^4 / bn^2$ e todos os valores positivos. (O zero da energia ocorre quando o electrón está em repouso, a grande distância do núcleo.) Para o *momentum* angular, a lista dá $l h / 2\pi$, onde l é um número inteiro, zero ou positivo. Além disso, a teoria dá a probabilidade, em certas circunstâncias, de se achar qualquer determinado valor especificado na lista. Na física clássica, por outro lado, a lista contém uma série contínua de valores e podemos especificar exatamente qual deles será obtido em determinadas circunstâncias.

Para um resumo mais técnico e mais condensado da formulação de problemas físicos pela mecânica quântica, vide Apêndice 10.

Uma Nova Visão da Realidade: Complementaridade

Bohr aprofundou mais as idéias básicas da mecânica quântica, chegando à noção de complementaridade. Duas grandezas são complementares quando a medição de uma delas impede a medição simultânea e acurada da outra. Do mesmo modo, dois conceitos são complementares quando um impõe limitações ao outro. Da mesma maneira como o princípio de correspondência era difícil de ser formulado com precisão, mas relativamente representava o modo de pensar de Bohr, a complementaridade é mais uma forma de pensar do que um conceito preciso.

Em 1930, Heisenberg resumiu as relações entre todas essas tendências de idéias no quadro mostrado abaixo. (Heisenberg, *Physical Principles of the Quantum Theory*).

Teoria clássica	Teoria quântica		
descrição espaço-tempo	I Alternativa Descrição espaço-tempo	Conexão estatística	II Alternativa Esquema matemático abstrato—nenhuma descrição espaço-tempo
Causalidade	Relação de incerteza		Causalidade

A nova formulação de problemas físicos típica da mecânica quântica e o tipo de respostas dadas pela mecânica quântica podem, à primeira vista, parecer insatisfatórios, sobretudo porque não correspondem às imagens usuais que temos em mente, baseadas na experiência macroscópica cotidiana. Mas a teoria se enquadra estritamente na realidade definida como aquilo que pode ser observado experimentalmente. Essa maneira de pensar introduz o conceito de probabilidade de uma maneira essencial, mesmo que ela possa ser ocasionalmente igual a um, em outras palavras, seja certeza. Ela exige uma rejeição de nossos hábitos de pensamento semelhante à exigida pela análise feita por Einstein em 1905 das noções espaço-tempo, com base na relatividade restrita.

Nem todos apreciam revoluções desse tipo. Mesmo Einstein, que tinha aberto o caminho, opôs resistência tanto à física probabilística quanto à formulação da mecânica quântica segundo Bohr e outros físicos da escola de Copenhague. Ele as desprezava e julgava que poderiam ser superadas por algo mais determinista, embora naturalmente reconhecesse sua coerência lógica e sua consonância com as provas experimentais. Com o passar do tempo, contudo, as novas gerações se adaptaram à mecânica quântica. Quem manteve uma atitude cética foram — o que é digno de nota — alguns dos fundadores da nova doutrina: de Broglie, Schrödinger e, até certo ponto, Dirac.

A mecânica quântica teve uma inauguração quase que oficial na Conferência Internacional de Física realizada em Como (Itália) em 1927, quando do centésimo aniversário da morte de Volta (Volta era originário de Como). Muitos dos mais importantes físicos da época estavam presentes, inclusive vários pertencentes à geração mais jovem (Figura 8.8). Bohr falou sobre a mecânica quântica, aprofundando-se especificamente em questões epistemológicas. Einstein estava acintosamente ausente — ausência insubstituível —, por não querer pisar nos domínios de Mussolini. Algumas semanas mais tarde, no entanto, estava em Bruxelas, para o Conselho Solvay, junto com todas as autoridades em mecânica quântica: Heisenberg, Dirac, Bohr,

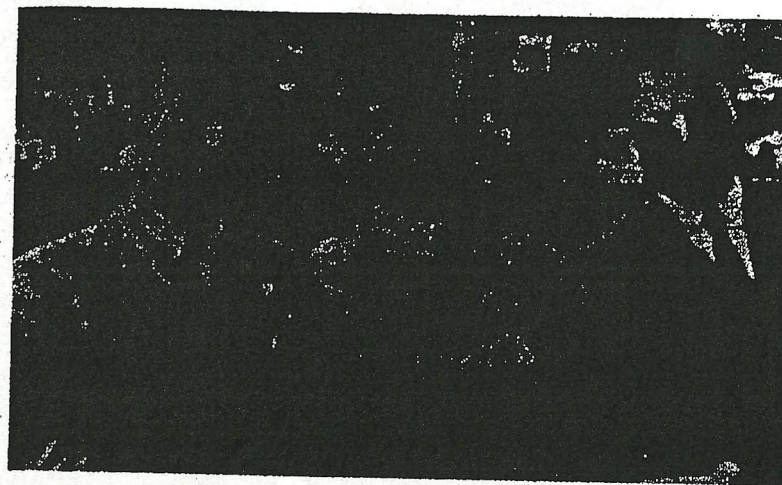


Figura 8.8. Da esquerda para a direita: Fermi, Heisenberg e Pauli no lago de Como em 1927. Heisenberg fazia pouco tempo tinha descoberto a mecânica de matrizes e o princípio da incerteza. Pauli acabava de descobrir o princípio da exclusão e Fermi, a estatística baseada nesse princípio. (Cortesia de F. Rasetti.)

Pauli, Born e muitos outros (Figura 8.9). Einstein tentou todos os meios possíveis para forjar contra-exemplos ao princípio da incerteza, procurando assim solapar as bases da nova teoria. Toda manhã, durante o café, apresentava a Bohr um exemplo engenhoso que julgava constituir uma contradição. Bohr estudava esse exemplo até conseguir descobrir alguma falha na crítica de Einstein. Mas logo Einstein aparecia com outro exemplo. Um dos exemplos mais sutis e difíceis só pôde ser solucionado com a ajuda da relatividade geral, criação do próprio Einstein. No fim, Einstein teve de admitir que não tinha conseguido achar um contra-exemplo válido, mas manteve sua crença de que “Deus não joga dados”, conforme escreveu em uma carta particular a Born.

Heisenberg, Pauli, Dirac e outros fundadores da mecânica quântica passaram um tempo considerável no Instituto de Bohr em Copenhague durante o período decisivo para o desenvolvimento da teoria. As longas discussões que tiveram com Bohr e entre eles mesmos ajudaram a esclarecer as idéias e cristalizar a doutrina. A comunhão intelectual, a reminiscência de dificuldades superadas com a ajuda mútua e a vida em comum geraram um *esprit de corps* e produziram um “espírito científico de Copenhague”. Esse espírito mostrou uma certa propensão a transformar-se em ortodoxia, como quase sempre ocorre em tais circunstâncias. Mas essa ortodoxia não era absolutamente rígida e tendia, à maneira típica de Bohr, a ter diversas variantes. Não era por nada que Bohr procurava evitar confrontos. Eu quase



Figura 8.9. Os participantes do Conselho Solvay de 1927. O Conselho foi dedicado à mecânica quântica e esse novo campo da física, por assim dizer, foi inaugurado oficialmente nesse encontro. Houve debates entre Einstein e Bohr. Na fileira da frente, da esquerda para a direita: J. Langmuir, M. Planck, M. Curie, H. A. Lorentz, A. Einstein, P. Langevin, C. E. Guye, C. T. R. Wilson, O. W. Richardson. Na segunda fileira, da esquerda para a direita: P. Debye, M. Knudsen, W. L. Bragg, H. A. Kramers, P. A. M. Dirac, A. H. Compton, L. V. de Broglie, M. Born, N. Bohr. Em pé, da esquerda para a direita: A. Piccard, E. Henriot, P. Ehrenfest, F. Herzen, T. De Donder, E. Schrödinger, E. Verschaffelt, W. Pauli, W. Heisenberg, R. H. Fowler, L. Brillouin. (Instituto Solvay.)

diria que ele apreciava o nevoeiro dinamarquês e menciona uma de suas citações preferidas:

*Nur die Fuelle fuehrt zur Klarheit
Und im Abgrund liegt die Wahrheit.*
[“Somente a plenitude leva à clareza
E a verdade repousa no abismo”.]



Acrescentarei uma pequena história a respeito de Bohr (mesmo que já tenha sido contada muitas vezes), porque ilustra sua personalidade e seu tipo de humor. Bohr tinha uma casa de veraneio onde passava as férias; em uma das portas da casa havia uma ferradura pendurada. Um dos visitantes, um tanto surpreso, perguntou-lhe se ele acreditava que ferraduras davam sorte. Bohr respondeu o seguinte: “Não, mas disseram-me que dão sorte para as pessoas que não acreditam nisso”.

Até 1927, nenhuma forma da mecânica quântica era relativista. Os físicos, a começar por de Broglie, tinham em vão tentado achar uma teoria relativística. Todas as tentativas ou redundavam em resultados absurdos ou afastavam-se das evidências experimentais.

Em 1928, Dirac finalmente descobriu uma maneira matemática de escrever uma equação relativisticamente invariante para um elétron. Descobriu que as conseqüências matemáticas apresentavam um novo grau de liberdade interno da partícula. Esse grau de liberdade aparenta ter todas as propriedades do spin do elétron, a começar de seu valor $\hbar/4\pi$. Também

tem um momento magnético de valor $eh/4\pi mc$. Esse resultado quase que miraculoso fortalece em muito a teoria de Dirac. Nas teorias não-relativísticas anteriores, o spin e o momento magnético tinham de ser introduzidos como informações *ad hoc*; neste ponto, tudo surgia automaticamente. Mas havia mais. A equação de Dirac descreve não apenas o movimento dos elétrons, mas também o de partículas com a mesma massa que o elétron, mas de carga positiva. Tais partículas não tinham sido consideradas na época em que Dirac formulou sua teoria. Dirac tentou identificar essas partículas indesejáveis com os prótons, mas enfrentou sérias dificuldades. Pauli, em seu *Treatise on Quantum Mechanics*, manifestou a opinião de que “uma tentativa de salvar a teoria em sua atual forma parece inútil diante de suas consequências...” Conforme veremos mais adiante, os elétrons positivos de fato existem e, quando foram descobertos em raios cósmicos, em 1932, a falha da teoria de Dirac transformou-se em um de seus triunfos. A teoria de Dirac exige novas entidades matemáticas chamadas *spinors*, que têm algumas analogias com vetores de quatro componentes.

Com esses trabalhos de Dirac, foram estabelecidas as principais linhas da mecânica quântica. O resultado é uma descrição da natureza mais abstrata do que aquela manifestada através da física clássica e ao mesmo tempo muito mais próxima da experiência.

Podemos ver um paralelo curioso entre o mundo das artes e o mundo das ciências. Quando Planck ainda era vivo, os impressionistas tinham desenvolvido um novo estilo de pintura. Mais ou menos na época da formação da mecânica quântica, artistas como Picasso também tendiam mais à abstração, desenhando, por exemplo, uma figura com dois rostos. Entretanto, não se podia propriamente dizer que um rosto era ondulatório e o outro corpuscular.

Os Mistérios são Explicados, mas Permanecem as Dúvidas

Todas as “inovações” em física (não aprecio essa palavra, de que tanto se tem abusado, mas devo usá-la quando é adequado) trazem não apenas teorias gerais, mas também a explicação de uma boa quantidade de fenômenos específicos que eram empiricamente conhecidos, mas só podiam ser tratados fenomenologicamente, quase sempre pela introdução de hipóteses *ad hoc* e coeficientes empíricos. Essa eclosão de aplicações também aconteceu com a mecânica quântica. Com “aplicações” não quero dizer aplicações tecnológicas: estas vieram mais tarde. Quero dizer a explicação de fenômenos que havia muito tempo eram conhecidos, mas continuavam sem explicação.

A teoria do átomo de hélio foi um dos primeiros êxitos de Heisenberg. Nela pela primeira vez encontramos vários aspectos inusitados. Por exemplo, no átomo de hélio há duas famílias de níveis de energia e não é possível passar de uma à outra pela emissão de radiação. Em um sistema, os spins dos dois elétrons são paralelos um ao outro; no outro, são antiparalelos. A diferença de energia entre os dois tipos de níveis era totalmente inexplicável segundo o antigo modelo de Bohr. Mas Heisenberg simplesmente calculou as energias e funções de onda conforme as regras da mecânica quântica, sem

se preocupar em entender o fenômeno de um ponto de vista orbital, e achou a resposta correta. A diferença de energia, que é vinculada à identidade dos elétrons, baseia-se em fenômenos que não têm interpretação clássica.

A essa explicação seguiu-se a teoria da ligação química homopolar em moléculas, tais como a molécula de hidrogênio. Sabia-se desde a época de Avogadro que a molécula de hidrogênio era diatômica, mas por que dois átomos de hidrogênio se atraíam e se ligavam um ao outro e, no entanto, um terceiro não se ligava a eles? Por que o hidrogênio ou o oxigênio formam moléculas, mas os gases nobres não? Estas são algumas das indagações mais simples da química teórica, mas até 1927 não havia resposta para elas. Walter Heitler e Fritz London, seguindo a orientação de Heisenberg, apresentaram a primeira teoria da ligação química de átomos idênticos. Essa teoria transformou-se em todo um ramo da ciência e com o tempo produziu resultados espetaculares. Linus Pauling foi um dos pioneiros na área da química.

Muitos outros problemas antigos capitularam diante da investida da nova mecânica quântica. A teoria da colisão foi analisada por Born e esse seu estudo é que deu a chave para a interpretação estatística fundamental do ψ . Dirac formulou uma interpretação profunda da mecânica quântica para o princípio de exclusão de Pauli, ao mesmo tempo em que redescobriu a estatística de Fermi. A teoria do paramagnetismo foi elucidada por Pauli. Felix Bloch deu um passo importantíssimo na teoria dos metais calculando como a função de onda do elétron se comporta em um campo potencial periódico. Heisenberg explicou o ferromagnetismo, justificando uma antiga teoria fenomenológica que arbitrariamente atribuía a uma substância ferromagnética, como o ferro, um campo magnético interno forte. Finalmente, e com a mesma importância, George Gamow, bem como Edward U. Condon junto com R. W. Gurney, descobriram — independentemente — a transparência de barreiras de potencial e aplicaram-na à explicação dos paradoxos aparentes do decaimento alfa nuclear. Esse resultado causou profunda impressão em Rutherford, que de alguma forma tinha-se mostrado cético quanto a qualquer teoria que envolvesse tanta matemática e tão pouca intuição.

Houve um período de alguns anos em que para fazer descobertas verdadeiras era suficiente entender a mecânica quântica e conhecer suas técnicas, tal como um bom estudante universitário nos dias de hoje. Naturalmente naquela época não era tão fácil dominar realmente os elementos da mecânica quântica. Após esse período de tumultuoso desenvolvimento, surgiu uma grande necessidade de sistematização. Os primeiros estudos escritos sobre descobertas quase sempre são de leitura difícil, mas por volta de 1929 começaram a ser publicados livros ou monografias nos quais os vários pontos de vista eram explicados de forma sistemática. Dirac, Heisenberg, Born, Jordan e Pauli escreveram, cada um, um livro ou uma monografia sobre o assunto. Essas obras formam a base dos tratados modernos usados pelos estudantes de hoje. Sommerfeld, também, acrescentou um volume suplementar ao *Atombau und Spektrallinien*.

A mecânica quântica não-relativística atualmente constitui uma disciplina fechada, pelo menos em tese. É uma generalização grandiosa da mecânica clássica, sobre a qual é modelada até um ponto considerável, e

demonstra o valor do princípio da correspondência uma vez que, para objetos macroscópicos, fornece as mesmas respostas que a teoria clássica.

A mecânica quântica relativística está muito menos adiantada. A teoria de Dirac se limita a partículas de spin $1/2$; para outros spins há dificuldades. Mas, mesmo para partículas de spin $1/2$ em um determinado campo eletromagnético preestabelecido, há problemas. É possível desenvolver uma teoria da perturbação que, contudo, apresenta divergências. Podemos remediar a situação introduzindo um corte de alta energia, mas isso destrói a invariância relativística. Não obstante, alcançamos precisão extremamente grande e, por exemplo, o momento magnético do elétron ou do múon pode ser calculado para 0,3 partes por bilhão. O resultado está de acordo com experiências num limite de erro de 0,2 partes por bilhão. Estes são os números medidos e calculados mais conhecidos em física.

No entanto, em 1972, Dirac encerrou uma conferência sobre o desenvolvimento da mecânica quântica com as seguintes palavras:

“Agora, que podemos fazer com essa situação? Parece-me evidente que ainda não temos as leis fundamentais da mecânica quântica. As leis que estamos usando atualmente precisarão sofrer alguma modificação importante antes de termos uma teoria relativística. É muito provável que essa modificação da atual mecânica quântica para a mecânica quântica relativística do futuro seja tão drástica quanto a modificação da teoria orbital de Bohr para a atual mecânica quântica. Quando fazemos uma alteração tão drástica, naturalmente nossas idéias da interpretação física da teoria com seus cálculos estatísticos podem muito bem ser modificadas”. (Dirac, *The Development of Quantum Mechanics*. Acc. Naz. Lincei, Roma, 1974.)

Capítulo IX

O maravilhoso ano de 1932: nêutron, pósitron, deutério e outras descobertas

O estudo da mecânica quântica a partir da publicação do trabalho de Planck em 1900 até o de Bohr em 1913 tinha atraído um número relativamente reduzido de físicos. Por outro lado, de 1913 até a conclusão da teoria em 1928, tal estudo absorveu todo o vigor da nova geração de físicos com a possível exceção daqueles que rodeavam Rutherford. Nesse período, a teoria predominava sobre a experiência, embora sem apoio experimental nada pudesse consolidar-se. Para acreditar nos espantosos resultados teóricos, tão diferentes da experiência cotidiana do senso comum baseada em objetos macroscópicos, provas experimentais eram absolutamente necessárias; a experiência aparentemente paradoxal de Stern–Gerlach é um exemplo típico.

Após a teoria relativística do elétron de Dirac, de 1928, surgiu a sensação de que se havia atingido um ponto crucial na física. Que essa sensação realmente existia na época e não foi imaginada posteriormente é fato demonstrado, por exemplo, por uma interessante exposição feita pelo Professor Orso Mario Corbino (1876-1937), então diretor do Instituto de Física da Universidade de Roma. A Sociedade Italiana para o Progresso da Ciência realizava uma vez por ano uma convenção na qual se esforçava por informar a “leigos inteligentes” o que estava ocorrendo nas diversas áreas científicas. Fermi, E. Persico e outros repetidamente falavam a respeito da nova física, tentando explicar seus resultados ao público italiano. Em 1929, Corbino decidiu estudar cuidadosamente questões mais gerais sobre o futuro da física e, após ter feito consultas a Fermi, em 21 de setembro de 1929, pronunciou uma palestra intitulada “As Novas Metas da Física Experimental”, que veio a mostrar-se profética sob vários aspectos. Cito a seguir alguns trechos dessa palestra:

“Um campo de estudos cuja teoria está atrasada no tempo é o dedicado ao mecanismo do arranjo molecular ou atômico de líquidos e sólidos. Já se chegou à conclusão de que as forças de coesão molecular são de origem elétrica. O exame através dos raios X nos ensinou praticamente a ver o arranjo de átomos ou grupos de átomos em ordem nos cristais. Mas a predição numérica das constantes físicas dos conjuntos de elétrons atômicos mal está começado. Desse modo, há muita coisa para os físicos teóricos fazerem nesse campo. Também sob o aspecto experimental o campo ainda não chegou a esgotar-se. Vou citar um velho problema não resolvido até agora. Se, na estrutura desses conjuntos, se pudessem introduzir algumas das