

Nota: A unidade de massa atómica (unificada) é definida como $\frac{1}{12}$ da massa do átomo do nuclídeo ^{12}C .

Nota final do tradutor

A quase total ausência de literatura científica em português, no domínio da Física, dificultou a tradução de certos termos. Nestes casos pôs-se em nota infrapaginal o termo

correspondente no texto em inglês; pretendeu-se assim salientar que a tradução apresentada não é mais do que uma mera sugestão, a ser posteriormente confirmada ou rejeitada. O tradutor receberá com agrado qualquer crítica, e a *Gazeta de Física* publicará eventualmente as correcções pertinentes.

O tradutor expressa aqui o seu agradecimento a todos os que contribuíram, com as suas críticas e sugestões, para o melhoramento da tradução.

(Tradução de J. SOUSA LOPES)

Progressos recentes em Física Corpuscular

(Continuação do número anterior)

CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS CORPÚSCULOS

Os vários corpúsculos, elementares ou não, diferem uns dos outros por um certo número de características que constituem aquilo a que pode chamar-se o seu bilhete de identidade. Nalguns aspectos este é semelhante, noutros muito diferente, daquele que passaríamos a um «corpúsculo macroscópico»; considerámos interessante examinar a relação entre os dois. O nosso objectivo principal é, evidentemente, sublinhar as diferenças, algumas das quais de certo chocarão os leitores não familiares com os métodos especiais da Física Matemática. Se em nome do senso comum se apresentarem objecções, temos que responder: «não se põe a questão da teoria concordar com o senso comum, mas sim de concordar com os factos experimentais; na verdade, todas estas hipóteses concordam com os factos suficientemente bem para que a teoria vá muitas vezes avançada em relação à experiência».

Seja-nos permitido acrescentar que não é absolutamente certo que seja impossível

voltarmos algum dia a explicações mais simples, mais de acordo com o chamado senso comum. Por exemplo, recentemente Brylinsky⁽¹⁾ conseguiu formular uma possível estrutura interna do electrão, que se tinha geralmente concluído ser impossível. Contudo, um tal caminho parece mais tortuoso do que o seguido até aqui; muitos físicos, e de forma alguma os menos importantes, julgam que um tal regresso às chamadas ideias sãs do passado é inteiramente impossível.

Não se pretende neste artigo tomar parte no grande debate a favor ou contra o determinismo, com Einstein a conduzir a primeira escola, e Heisenberg a segunda, enquanto que Luís de Broglie representa a opinião intermédia. Pretende-se apenas apresentar, duma maneira tão simples e completa quanto possível, as ideias que hoje são geralmente aceites no que respeita ao corpúsculo.

⁽¹⁾ *Révue Générale de Electricité* 52249 (1943).

A estrutura interna aqui referida é a de um toro em rotação. Elimina as discrepâncias que existem nas teorias de Lorentz e Poincaré, mas nenhuma destas é importante para a mecânica ondulatória.

Corpúsculo «macroscópico»

O corpúsculo «macroscópico» é um pequeno corpo material que obedece às leis da mecânica clássica. Podemos, por exemplo, considerá-lo esférico, e somos sempre capazes de especificar o seu raio, volume, massa⁽¹⁾, e densidade. O corpúsculo é constituído por certa substância; a sua cor, a sua temperatura podem ser sempre especificadas.

O corpúsculo pode ter outras propriedades; por exemplo, uma carga eléctrica. Pode admitir-se que roda em torno de um dado eixo; os parâmetros angulares deste eixo, o período de rotação podem então especificar-se. O produto da velocidade angular pelo momento de inércia, chamado momento angular, pode ser facilmente calculado. A presença simultânea duma rotação e duma carga eléctrica torna-o equivalente a um pequeno magnete, em virtude do movimento de rotação da carga eléctrica originar correntes eléctricas equivalentes às de uma bobine.

Pode definir-se «momento magnético» como o produto da corrente (obtida dividindo a carga pelo seu período de rotação) pela área da superfície envolvida. O momento magnético é também igual ao produto⁽²⁾ do momento angular pela carga específica, pelo menos se esta é constante em todo o volume.

Corpúsculo microscópico

Na física corpuscular algumas destas noções são conservadas enquanto outras se desprezam. Introduzem-se também alguns parâmetros novos, que são mais importantes para a onda associada do que para a própria partícula (tanto quanto é possível considerar

onda e partícula separadamente). O comprimento de onda associado é um exemplo.

Em física corpuscular a noção de cor é imediatamente posta de parte. É bem conhecido que a noção de cor está associada com o comprimento de onda da luz reflectida, e perde o significado no que respeita a partículas infinitamente pequenas. Também não faz sentido falar-se do material que constitui uma partícula elementar, pois isso equivale a negar a sua natureza elementar. Da mesma forma não tem sentido falar-se da temperatura duma partícula isolada.

Além disto, não é possível atribuir dimensões definidas a corpúsculos elementares; são mais ou menos nebulosos, e parecem mudar algumas vezes, de acordo com as circunstâncias.

Mas este aspecto logo contrasta com um outro do seu comportamento, no qual parecem ser estritamente pontuais. Não é possível considerar aqui em detalhe este comportamento paradoxal, mas é concebível que a noção de dimensão perca o seu significado neste campo. O mesmo se passa com a densidade. Porém a massa em repouso e a carga eléctrica continuam entre os mais importantes parâmetros da física corpuscular.

No que respeita à rotação do corpúsculo em torno do seu eixo não é possível especificar nem o período de rotação nem a velocidade angular.

Como o tamanho é indeterminado também não é possível calcular nem a velocidade linear nem o momento de inércia. Contudo, o momento angular mantém o seu significado (apesar de ser o produto de dois parâmetros sem significado). Este momento angular intrínseco designa-se por «spin».

Por outro lado, é impossível especificar o eixo em torno do qual se dá a rotação correspondente ao spin. Três parâmetros angulares são necessários para especificar um tal eixo, e apenas um pode ser determinado num instante definido. Assim, uma só das componentes do spin, referida a um sistema de coordenadas, pode ser determinada num instante qualquer. O eixo de referência

(1) Referimo-nos à massa em repouso; quando em movimento devemos acrescentar-lhe o equivalente massa da energia cinética (equivalência relativista de massa e energia).

(2) Correctamente, a metade deste produto (N. do T.).

pode ser escolhido arbitrariamente mas, feito isto, é impossível escolher um segundo eixo.

O momento magnético é também um parâmetro importante em física corpuscular, mas está sujeito às mesmas restrições que o spin. Ademais, é sempre diferente do produto do momento angular pela carga específica. O seu comportamento é o que seria de esperar se os corpúsculos fossem não homogêneos.

O leitor pensará talvez que tudo isto é arbitrário e complicado. Contudo, devemos repetir que a escolha dos conceitos a serem postos de parte é ditada pela necessidade de interpretar os factos experimentais. Algumas vezes o resultado parece natural. Por exemplo, no caso da temperatura, conceito estatístico que perde o seu significado quando deixamos de trabalhar com um conjunto de partículas. Se compreendermos o conceito de extensão no espaço tão bem como, por exemplo, compreendemos o de temperatura, talvez achemos natural alguma perda de significado neste domínio.

Corpúsculo macroscópico em movimento

Consideremos novamente o corpúsculo macroscópico, desta vez em movimento. Em qualquer instante é possível determinar exactamente a posição e a velocidade do seu centro de massa; as três componentes do momento são conhecidas, assim como a sua energia cinética. É bem sabido que o conhecimento simultâneo da posição e do momento nos permite calcular posições e momentos futuros, quer em mecânica clássica quer em mecânica relativista. Parece ser sempre possível arranjar um aparelho capaz de com ele se realizar a medida simultânea necessária.

Por exemplo, uma lanterna dá dois «flashes» sucessivos; tiram-se duas fotografias estereoscópicas, e o problema fica resolvido (fig. 10).

Contudo, se considerarmos as coisas mais de perto, o processo é duvidoso, pois pode

acontecer que a pressão de radiação (pressão exercida pela luz nos corpos que ilumina) modifique a trajectória do corpúsculo.

Corpúsculo microscópico em movimento

Na estrutura da física corpuscular, a dificuldade torna-se muito séria. Se iluminarmos um electrão, por exemplo, este deve ser atingido por fotões; mas estes são (numa expressão bastante livre, que não deve tomar-se à letra) tão grandes como o electrão, e assim uma só colisão perturba seriamente o movimento (fig. 11).

Usando argumentos bastante gerais, Heisenberg mostrou a impossibilidade de se medir com precisão e simultaneamente a posição e o momento; o produto dos erros mínimos nestas quantidades é sempre da ordem de grandeza da constante h de Planck. Assim, é impossível calcular uma trajectória precisa para o corpúsculo e determinar as suas posições futuras.

Este é um dos problemas mais difíceis da física contemporânea. Heisenberg vai mais longe e afirma que uma tal medida é impossível porque não tem sentido. Sim! Os corpúsculos da física contemporânea são tais que não tem sentido inquirir simultaneamente da sua posição e do seu momento exactos. Não somos capazes de calcular uma trajectória porque uma tal trajectória não tem existência real. Apenas têm significado as manifestações esporádicas do corpúsculo. Quando ele se não manifesta (por exemplo interactuando com um ou vários corpúsculos) não tem sentido a questão de saber-se qual é a sua posição. Esta é a tese da escola indeterminista.

Uma tal tese não é universalmente aceite. Vários físicos, e em particular Einstein, sustentam que não é justificado dizer-se que qualquer coisa não tem sentido porque não somos capazes de medi-la; confiam em que, mais cedo ou mais tarde, o cálculo da trajectória se torne, de alguma maneira, possível, permitindo assim a ressurreição do determinismo.

Como já dissemos, não é nossa intenção alongarmo-nos nesta controvérsia, mas apenas limitarmo-nos a afirmar que, pelo menos provisoriamente, não é possível medir simultaneamente a posição e o momento dum partícula e consequentemente determinar-lhe uma trajectória definida. O nosso conhecimento será expresso como uma dada proba-

No campo microscópico, as próprias partículas não são conservadas; em certos conjuntos de condições, que mais tarde serão discutidos, podem desmaterializar-se em energia, ou materializar-se a partir de energia; podem também mudar completamente a sua natureza. Mas durante estes fenómenos, a energia (no sentido relativista da palavra,

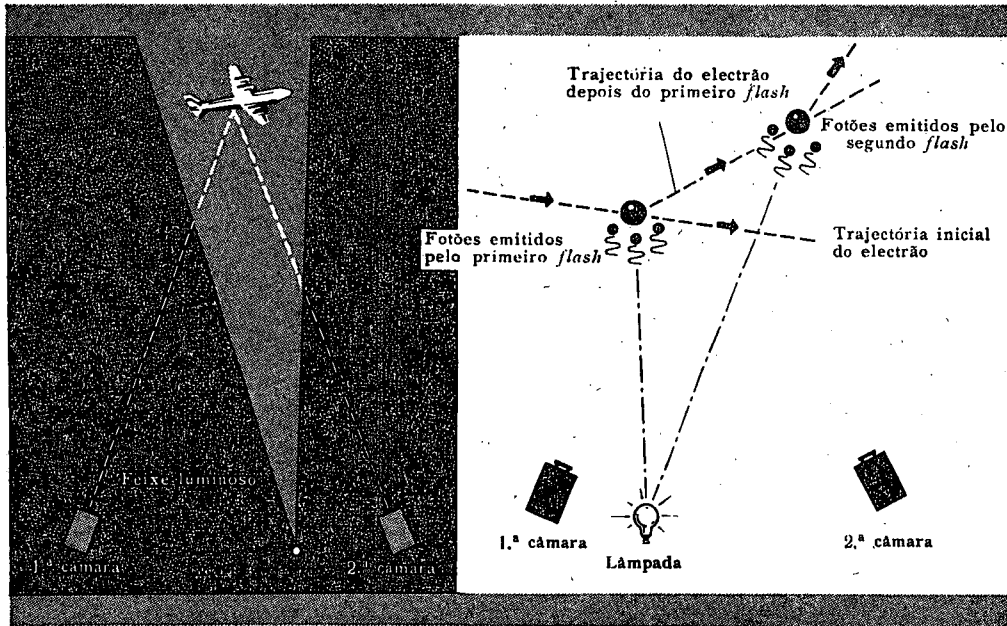


Fig. 10 e 11 — Ilustração das relações de incerteza de Heisenberg: teoricamente, é possível determinar simultaneamente a posição e a velocidade dum corpo macroscópico iluminando-o em dois instantes sucessivos em cada um dos quais se tira uma fotografia estereoscópica. Parece não haver limite para a precisão que se pode obter. Praticamente, isto não é verdade porque se desprezou a pressão de radiação. Em física corpuscular, para se determinar simultaneamente a posição e a velocidade dum electrão, deve perturbar-se necessariamente a sua trajectória, e assim a medida não é possível com precisão infinita.

bilidade de presença do corpúsculo em tal ou tal elemento de volume.

Consideremos agora as interacções entre partículas. No campo macroscópico, a matéria (e assim os próprios corpúsculos) é conservada; a energia pode ser transferida dum corpúsculo a outro, mas conserva-se a energia total; na ausência dum campo externo, o mesmo é verdadeiro para os momentos linear e angular. Finalmente, é conservada a carga eléctrica.

isto é, admitindo a equivalência massa-energia), o momento, o momento angular e a carga eléctrica são conservados, assim como outros parâmetros mais abstractos e que serão definidos adiante.

Por uma escolha conveniente do eixo de referência, a conservação do momento angular é equivalente à conservação do spin total.

Contudo as relações de incerteza de Heisenberg modificam, mais ou menos, os

teoremas de conservação. Por exemplo, Heisenberg mostrou que, para se medir a energia com precisão, é necessário fazer a observação durante um intervalo de tempo finito, tal que o produto do erro da medida multiplicado pelo valor do intervalo seja da ordem da constante de Planck.

Assim, a conservação da energia pode ser violada por uma quantidade ΔW se a duração dessa violação não exceder um intervalo de tempo Δt tal que

$$\Delta W \cdot \Delta t \leq h.$$

Condicionamentos semelhantes devem ser feitos no que respeita à conservação dos momentos linear e angular. Mais tarde mostraremos a importância destas restrições.

RESUMO

Resumindo, um corpúsculo é intrinsecamente caracterizado por:

- massa em repouso.
- carga eléctrica.
- momento angular ou spin.
- momento magnético⁽¹⁾.

O movimento do corpúsculo é conhecido se se consegue determinar:

- a posição.
- o momento (e a energia).
- a orientação do eixo do spin.

O conhecimento destes parâmetros é sempre parcial, visto que o produto do erro na posição multiplicado pelo erro no momento é sempre pelo menos igual a um certo valor mínimo (que não é, de forma alguma, desprezável neste campo), e que apenas um dos parâmetros do eixo do spin é conhecido em qualquer momento (e, consequentemente, apenas uma componente do spin).

(1) Alguns corpúsculos são instáveis e o seu período de vida média, definido como para os elementos radioactivos, junta-se frequentemente a esta lista.

Tomando em consideração algumas observações precedentes, para um grupo de partículas interactuantes, a massa (incluindo a energia equivalente), a carga, o momento e o spin são conservados.

As partículas em si podem ser criadas ou destruídas.

MECÂNICA ONDULATÓRIA

Como se disse acima, a interpretação dos factos experimentais em Física Corpuscular conduziu-nos a admitir um princípio de dualidade entre ondas e corpúsculos; de acordo com este princípio, qualquer onda guia corpúsculos, e qualquer corpúsculo é guiado por uma onda, verificando-se as relações numéricas já indicadas entre energia e frequência, e comprimento de onda e momento linear.

Correctamente, estas relações são válidas para o movimento livre (propagação de ondas planas associada com o movimento linear, a velocidade constante, de um ou vários corpúsculos). Porém, se o movimento ocorre num campo de forças (caso correspondente à propagação duma onda num meio de índice de refração continuamente variável) a situação é bastante mais complicada. Uma dificuldade adicional resulta da rotação da partícula em torno do seu eixo, isto é, da existência de *spin*, o que conduz à introdução de elementos não escalares na função de onda.

Movimento dos electrões no átomo

Para ilustrarmos a importância da Mecânica Quântica e darmos uma ideia do seu formalismo sem entrar em detalhes matemáticos, vamos primeiramente recordar o desenvolvimento histórico da concepção do movimento dos electrões no átomo.

Notemos antes de mais que a discussão está simplificada pelo facto de admitirmos

que o núcleo central é o centro do campo de forças, se bem que em rigor se devesse considerá-lo como um corpúsculo. Esta hipótese pode justificar-se teoricamente, mas não entraremos nos pormenores da justificação.

O campo de forças do núcleo é essencialmente composto por duas partes:

a) um campo electrostático (fig. 12) que se pode considerar, em muito boa aproximação (pelo menos para os núcleos não muito pesados), como o de uma carga pontual;

b) um campo magnético (fig. 13) que podemos considerar como dipolar, isto é, como equivalente ao produzido por uma corrente numa espira circular, plana, infinitesimal.

Nalguns problemas (efeito Zeeman, efeito Stark) devemos juntar a estes campos um campo externo uniforme, magnético no primeiro caso, eléctrico no segundo).

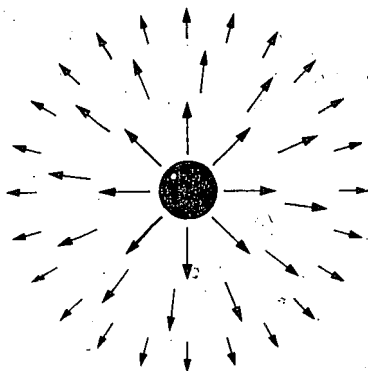


Fig. 12 — Campo electrostático unipolar criado por uma carga eléctrica positiva.

De todos estes campos, o campo electrostático nuclear é, de longe, o mais importante; permite um primeiro cálculo aproximado, já bastante preciso. Mas os dados experimentais, principalmente de origem espectroscópica, são duma precisão extraordinária, algumas vezes com seis, sete ou oito algarismos significativos.

Assim, a correspondente interpretação teórica deve ser também muito precisa. Os

outros termos têm por isso que ser tomados em consideração, geralmente como *perturbações*, que introduzem a chamada *estrutura fina* nos espectros ópticos.

Os métodos para tratar o movimento dos electrões orbitais no campo de forças criado pelo núcleo evoluíram consideravelmente durante a primeira metade do século vinte, tornando-se cada vez mais abstractos, à medida que os velhos modelos, demasiado concretos, se iam mostrando incapazes de

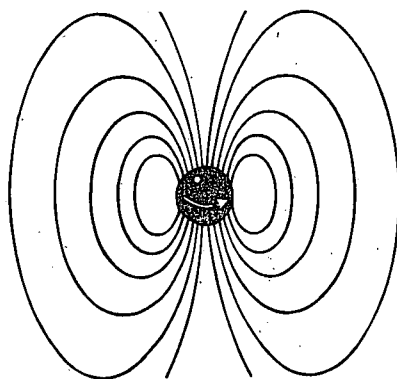


Fig. 13 — Campo magnético dipolar de uma carga eléctrica positiva em rotação.

interpretarem correctamente os factos experimentais e conduzindo por vezes a discrepâncias importantes. Contudo, antes de discutirmos estes vários modelos, é talvez útil recordar aqui, para os leitores menos familiares com a teoria da radiação electromagnética, uma forma de calcular a energia emitida por dado sistema quando se conhece o movimento das cargas eléctricas que o constituem.

Radiação eléctrica dipolar

Um «dipolo eléctrico» é constituído por duas cargas eléctricas, uma positiva, outra negativa, iguais em valor absoluto. O momento eléctrico dipolar é o produto desse valor absoluto pelo vector distância entre as cargas; é uma grandeza vectorial que se

considera dirigida da carga negativa para a positiva.

Pode mostrar-se que, quando o momento dipolar varia, o dipolo emite radiação electro-magnética. A potência instantânea da emissão obtém-se integrando o produto vectorial dos campos eléctrico e magnético (produto que se designa por vector de Poynting) sobre a superfície duma esfera muitas vezes maior do que as dimensões do dipolo; conclui-se que é proporcional ao quadrado da segunda derivada (em ordem ao tempo) do momento dipolar.

A maior parte das antenas usadas nas telecomunicações são equivalentes a dipolos eléctricos oscilantes, isto é, de direcção fixa e de grandeza variando sinusoidalmente. Em Física Corpuscular, o caso mais frequente é o do dipolo rotativo constituído por uma carga negativa (electrão) rodando em torno duma carga central positiva, que faz parte do núcleo atómico. Como a potência emitida por uma carga fixa é nula, pode interpretar-se a potência radiada como resultando inteiramente do movimento do electrão; e, pelo resultado indicado no último parágrafo, conclui-se facilmente que a potência é proporcional ao quadrado do produto da carga pela aceleração. Num dipolo puramente rotativo, apenas a aceleração centrípeta é diferente de zero.

Um argumento semelhante leva-nos a concluir que uma carga que rode em torno do seu eixo, ou uma espira circular em rotação quando percorrida por corrente eléctrica, também emitem radiação. Em qualquer dos casos, a frequência da radiação está relacionada com o período de rotação.

Modelos sucessivos da camada electrónica

O modelo de Rutherford* é o primeiro que considera o núcleo como essencialmente

pontual. Desta forma os modelos anteriores não têm interesse para nós.

Os electrões movem-se em órbitas tais que a força centrífuga é compensada pela força eléctrica de Coulomb. Cada electrão é assim uma fonte de radiação cuja frequência característica é a do seu movimento em torno do núcleo central; assim, cada linha espectral corresponde a uma dada órbita electrónica. Este modelo é incapaz de explicar a razão pela qual cada espécie química tem um espectro característico. Mais importante ainda é o não conseguir explicar o facto dum átomo poder permanecer estável, sem emitir radiação. Como o electrão não pode parar o seu movimento sem cair no núcleo central, devido à ausência de força centrífuga, a sua aceleração é sempre diferente de zero e, por isso, deveria emitir radiação continuamente.

Somos assim levados a concluir que um átomo construído de acordo com um modelo que obedece às leis da mecânica e do electromagnetismo clássicos é instável e não pode existir.

Notemos que o período de decaimento é menor do que um microsegundo, isto é, muitíssimo pequeno.

O átomo de Bohr é uma versão arbitrariamente quantificada do átomo de Rutherford. Os electrões ainda se movem em torno do núcleo central em órbitas circulares, por forma a que a força centrífuga seja compensada pela força de Coulomb, mas Bohr admite, *duma maneira inteiramente arbitrária*, que:

a) apenas algumas órbitas, para as quais a energia é um múltiplo inteiro do produto da constante de Planck pela frequência de revolução, podem existir (Cf. Secção I, quantificação da radiação electromagnética);

b) em contradição com as leis da radiação dipolar, um electrão que se mova numa tal órbita não emite radiação;

c) é emitida ou absorvida radiação quando o electrão salta duma órbita para outra; a frequência da radiação emitida (ou absorvida) obtém-se dividindo a diferença de

* Cf. *Gazeta de Física*, pág. 56 (Vol. IV, Fasc 2).

energia das duas órbitas pela constante de Planck.

Apesar da sua natureza arbitrária, o modelo de Bohr foi aceite imediatamente, devido ao facto das frequências calculadas a partir dele coincidirem, com grande precisão, com as experimentais (excepto no que respeita à análise da estrutura fina). A célebre constante de Rydberg pode agora ser calculada em termos de outras constantes fundamentais.

Os efeitos Zeeman e Stark, produzidos por campos magnéticos ou eléctricos externos, podem também ser correctamente interpretados.

O modelo de Bohr foi consideravelmente melhorado por Sommerfeld, que introduziu órbitas elípticas e, ao mesmo tempo, substituiu a quantificação da energia de Bohr por uma condição expressa em termos das coordenadas generalizadas de Lagrange e dos respectivos momentos lineares conjugados. Esta condição pode escrever-se:

$$\int p_i dq_i = n_i h$$

(com tantos índices quantos os graus de liberdade).

Sommerfeld tomou ainda em consideração o facto de, ao longo duma órbita elíptica, a velocidade e consequentemente (de acordo com a teoria da relatividade) a massa variarem. Uhlenbeck e Goudsmit introduziram o spin do electrão e tomaram em consideração o acoplamento magnético. O resultado deste trabalho foi uma explicação parcial da estrutura fina. Nalguns casos os resultados eram correctos; noutros era necessário fazerem-se alguns ajustamentos arbitrários, levantando assim difíceis problemas teóricos.

O carácter arbitrário das três condições de quantificação de Bohr foi removido pela Mecânica Ondulatória que substituiu aquela mistura de Mecânica Clássica e condições quânticas por uma teoria bastante satisfatória do ponto de vista matemático, embora

muito abstracta. Isto fez-se em três fases principais.

O modelo de Louis de Broglie não era muito diferente dos de Bohr e Sommerfeld. Faz-se notar que Broglie associa ao movimento do corpúsculo de momento mv a propagação de uma onda com um comprimento de onda $\lambda = \frac{h}{mv}$. É fácil mostrar que, se as condições de Sommerfeld são satisfeitas, a trajectória (fechada) dum electrão à volta de um núcleo é igual a um número inteiro de comprimentos de onda.

Nesta altura, considerava-se ainda que o electrão descrevia uma órbita bem definida, e simultaneamente, admitia-se a existência de um fenómeno ondulatório de amplitude real, localizado, em princípio, na mesma órbita. As únicas órbitas possíveis eram aquelas cujo comprimento igualava um número inteiro de comprimentos de onda.

Matematicamente este modelo é equivalente ao de Sommerfeld.

O modelo de Schrödinger-Born representa um passo decisivo para a abstracção; é, de facto, um modelo puramente matemático, e a sua interpretação física conduz a importantes dificuldades de linguagem. Estes autores deixam de considerar o movimento do corpúsculo e definem uma certa «função de onda», cuja amplitude é diferente de zero em todo o espaço, e não apenas sobre a órbita. Esta função de onda (Ψ) é solução de certa equação com derivadas parciais (fig. 19) obtida de acordo com dadas regras (tão arbitrárias como as condições de Bohr, mas matematicamente melhor relacionadas entre si). É bem conhecido que equações com derivadas parciais apenas possuem soluções finitas, contínuas e uniformes que tendem para zero num dado contorno (neste caso uma esfera de raio infinito) se um certo parâmetro toma um valor pertencente a certo conjunto discreto de valores. Neste caso o parâmetro é a energia, e voltamos às condições de Bohr.

Ao electrão não se atribui já uma trajetória específica; tudo o que pode calcular-se é a sua probabilidade de presença em cada ponto do espaço em qualquer instante; essa probabilidade é proporcional ao produto da função de onda pelo seu complexo conjugado. Efectivamente, a função de onda Ψ não só se estende a todo o espaço, contrariamente à onda de Broglie que estava bem localizada, como é uma quantidade complexa, reforçando assim o character abstracto da teoria.

Para a interpretação da estrutura fina o modelo de Schrödinger-Born era ainda menos satisfatório do que o de Sommerfeld, ou o de Uhlenbeck e Goudsmit. Tinha contudo a vantagem fundamental de ter simetria esférica (pelo menos nalguns casos) em vez de se limitar a um plano, como os modelos anteriores que, a esse respeito, estavam em grave desacordo com a experiência, em particular com a teoria cinética dos gases.

Além disto, esse modelo teve o mérito de conduzir à introdução da teoria de Dirac. A função de onda, complexa e escalar, foi substituída por uma função com quatro componentes, também complexa, chamada «spinor»; Dirac estabeleceu ainda qual a equação de onda que devia ser satisfeita pelo spinor. Mostrou que este formalismo dá conta das propriedades do spin do electrão, e foi susceptível de dar, pela primeira vez, uma teoria completa da estrutura fina, sem ajustamentos empíricos. À parte a função de onda deixar de ser escalar para ser um spinor, o formalismo matemático é o mesmo que o introduzido por Schrödinger-Born.

Deve notar-se que um spinor não é um vector num espaço a quatro dimensões; as suas componentes não se transformam da mesma maneira relativamente a uma transformação dos eixos de referência. Contudo

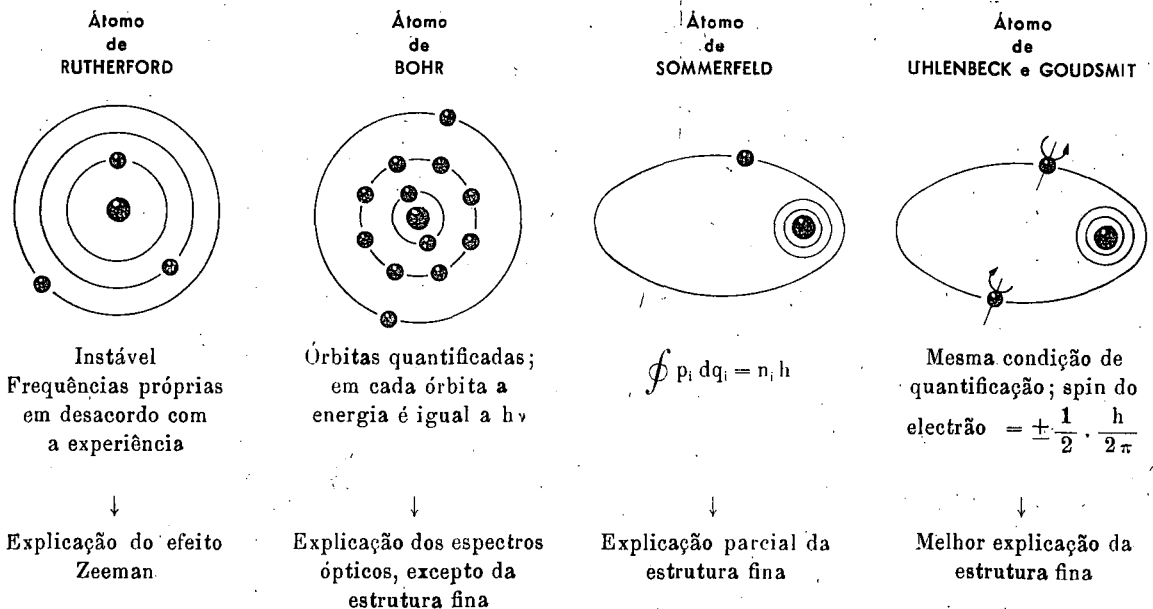


Fig. 14, 15, 16, 17, 18, 19 e 20 — Evolução do «modelo atómico» na história da Física moderna: o modelo de Rutherford (fig. 14) estava em completo acordo com as leis da mecânica e do electromagnetismo clássicos, mas conduzia rapidamente a dificuldades intransponíveis em campos tão elementares como, por exemplo, o da explicação da estabilidade da matéria. O modelo quantificado de Bohr (fig. 15) elimina a maioria destas dificuldades, mas à custa da introdução de condições de quantificação inteiramente arbitrárias. Os modelos com órbitas elípticas de Sommerfeld, e com electrões com spin de Uhlenbeck e Goudsmit, melhoraram consideravelmente a precisão do modelo de Bohr, embora sem eliminarem algumas discrepâncias. Além disto, se se

algumas das suas propriedades não são muito diferentes das de um vector.

A teoria de Dirac representa o último grau da abstracção; foi melhorada nalguns pormenores, mas o formalismo geral parece definitivamente estabelecido.

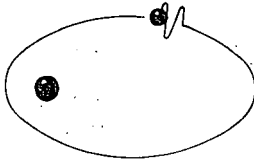
Uma das suas maiores vitórias foi a previsão teórica da existência de antipartículas. Esta previsão foi feita, como já sabemos, antes da primeira descoberta experimental. Matematicamente, a previsão decorre da extracção duma raiz quadrada; mostra-se que as propriedades duma raiz positiva correspondem às de uma partícula, enquanto que as propriedades duma raiz negativa correspondem às de uma antipartícula.

Acabámos assim de indicar os marcos principais do caminho que conduziu à Mecâ-

nica Ondulatória do electrão. No que respeita aos outros corpúsculos, alguns deles, tendo o mesmo spin que o electrão, obedecem ao formalismo de Dirac (ocasionalmente com pequenas modificações); outros, com spin nulo, obedecem (aproximadamente) ao formalismo de Schrödinger-Born; outros ainda, de spin duplo do do electrão, obedecem a um formalismo ligeiramente mais complicado, introduzido por Broglie, que utiliza como função de onda um spinor com dezasseis componentes. Está para além do âmbito deste artigo entrar em pormenores, mas o leitor encontrará informação suplementar na continuação deste artigo, bem como interessantes referências bibliográficas.

(Continua)

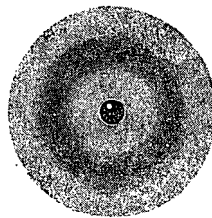
Átomo de BROGLIE



Órbita com um número inteiro de comprimentos de onda

Matematicamente equivalente ao modelo de Sommerfeld

Átomo de SCHRÖDINGER-BORN



$$\Delta \Psi - \frac{8\pi^2 m}{h^2} V(x, y, z, t) \Psi = -\frac{4\pi im}{h} \frac{\partial \Psi}{\partial t}; \Psi \text{ é um escalar; a energia } (= h\nu) \text{ é um «valor próprio»}$$

Equivalente ao modelo de Bohr, mas com simetria esférica

Átomo de DIRAC



$$\left[\frac{1}{c} \left(\frac{h}{2\pi i} \frac{\partial \Psi}{\partial t} - \epsilon V \right) - \alpha \left(\frac{h}{2\pi i} \vec{\nabla} + \epsilon \vec{A} \right) + \alpha_4 m_0 c \right] \Psi = 0$$

Ψ é um «spinor»; a energia $(= h\nu)$ é um valor próprio

Interpretação completa dos espectros ópticos, inclusive a estrutura fina

tenta especificar a forma e a orientação no espaço de órbitas elípticas, verifica-se que estas dependem do sistema de referência, facto dificilmente compatível com a própria existência das órbitas.

O primeiro modelo ondulatório, devido a Broglie (fig. 18), era aparentemente muito diferente dos precedentes, embora matematicamente equivalente ao de Sommerfeld.

O verdadeiro modelo de Schrödinger-Born não é a representação de uma «nuvem electrónica» (fig. 19), mas antes a equação matemática indicada sob a figura. Da mesma forma o modelo de Dirac é também uma equação matemática (fig. 20), com a diferença de que a função de onda é agora um «spinor».