

1 - Curta história da física quântica

Problemas sem respostas

Para dar início à história da física quântica, e de forma bastante curta, devemos começar lembrando que no final do séc. XIX, os físicos estavam às voltas com alguns fenômenos difíceis de explicar à luz da física dita clássica. Vamos chamar a atenção para aqueles que ganhavam mais destaque. Destacamos quatro fenômenos para os quais a física clássica, a física conhecida até o ano de 1900, não conseguia dar a resposta correta. Estes fenômenos eram alvo de intenso debate na passagem do século XIX para o século XX.

Quais são estes fenômenos?

a) O efeito fotoelétrico

O primeiro deles é o efeito fotoelétrico. Efeito este descoberto por Hertz, aproximadamente no ano de 1887. O efeito consiste num fenômeno relativamente simples. Verifica-se experimentalmente que é possível arrancar elétrons da superfície de um metal fazendo incidir luz, ou ondas eletromagnéticas, sobre ele.

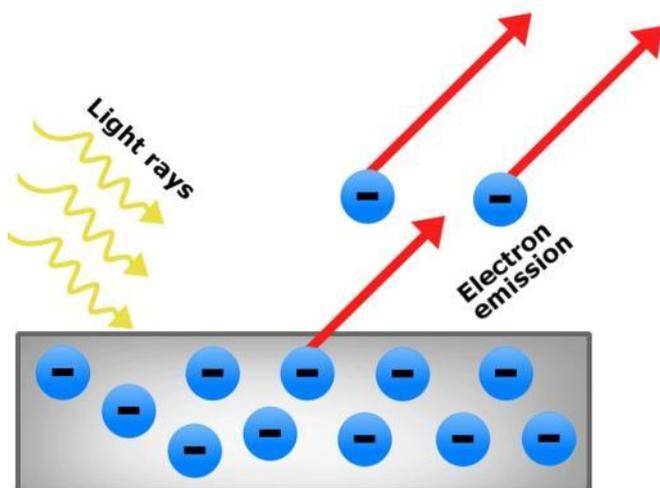


Figura 1. O efeito fotoelétrico.

A física clássica não explicava várias características do efeito fotoelétrico. Voltaremos a este tema, posteriormente.

b) Espectro discreto de átomos e moléculas.

Outro fenômeno para o qual a física conhecida até então não dava conta de explicar, é o espectro discreto do átomo de hidrogênio.

Este fenômeno foi observado por vários cientistas ao longo de muitos anos. Cerca do ano de 1750. Bem antes, portanto, do início do século XX. Balmer, um físico suíço foi capaz de escrever, em 1885, uma expressão para uma série de linhas. A famosa série de Balmer. Outros, em seguida, escreveram expressões fenomenológicas para as demais séries.

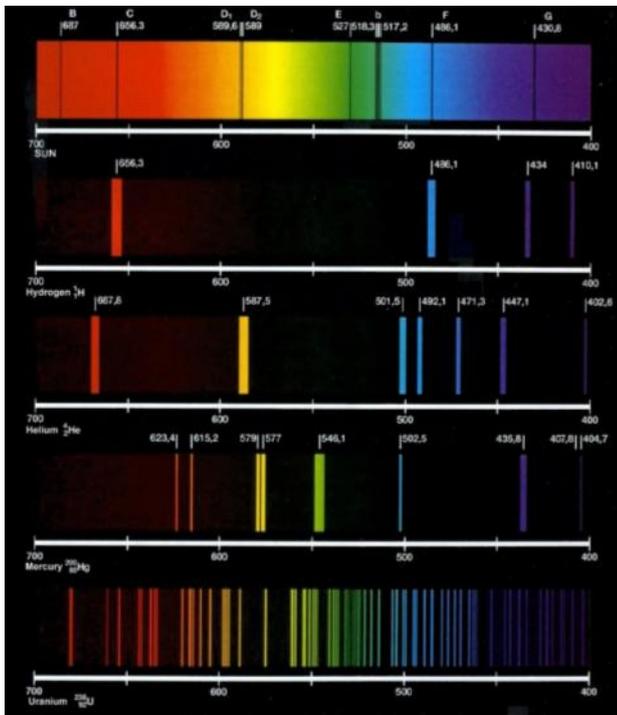


Figura 2. Átomos exibem um espectro discreto.

No entanto, logo depois se verificou que o mesmo acontecia em relação a outros átomos. Isso simplesmente não é possível explicar a luz da física clássica por que de acordo com a física clássica, o elétron sendo acelerado numa órbita circular, ele emitiria radiação continuamente, mas não num espectro discreto da radiação.

c) A radiação de corpo negro

O fenômeno da radiação dita de corpo negro é bastante comum. Essa radiação pode ser evidenciada a partir do aquecimento de um metal, por exemplo. É bastante perceptível uma variação nas cores do mesmo á medida em que o aquecemos a temperaturas cada vez maiores. Primeiramente veremos um vermelho escuro. Quando o aquecemos um pouco mais o avermelhado tende a ficar mais claro. À medida em que o aquecemos um pouco mais, ele vai se tornando mais esbranquiçado, tendendo á cor da luz branca. No entanto, mesmo quando não atinge a temperatura na qual ele fica vermelho, ele está emitindo radiação eletromagnética.

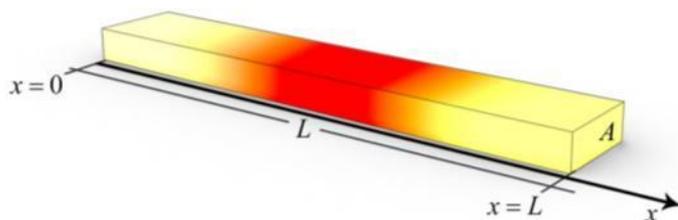


Figura 3. Como explicar a cor dos objetos aquecidos?

A radiação emitida por objetos aquecidos têm características próprias. Por exemplo, a intensidade total irradiada depende de uma forma específica com a temperatura. De acordo com a Teoria de Stefan-Boltzmann, essa intensidade depende do quadrado da temperatura do corpo aquecido:

$$I(T) = \sigma T^4 \quad 1.1$$

Onde σ é a constante de Stefan-Boltzmann

Alem disso, emite muito mais radiação numa determinada faixa do espectro eletromagnético do que em outras faixas. Estas faixas dependem fortemente da temperatura. Essa é a razão para a variação das cores descrita acima.

Este é o terceiro fenômeno não explicado pela física clássica. Qual seja o problema da radiação do corpo negro. Aqui, o problema que se coloca é o de explicar como a intensidade da radiação emitida pelo corpo negro depende da frequência. O que se sabia até então é que o comportamento é aquele descrito pela figura abaixo.

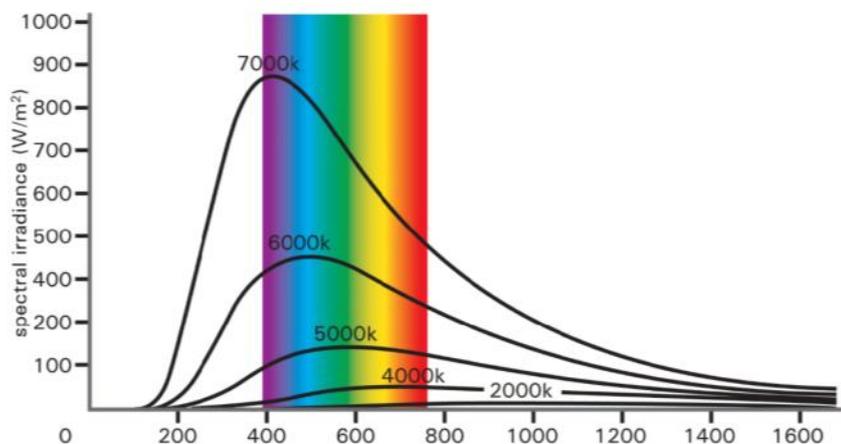


Figura 4. Decomposição espectral em função da temperatura.

Entendíamos apenas aspectos do problema, como a intensidade total da radiação emitida, ou o desvio do comprimento de onda associado ao máximo da intensidade com a temperatura. Ou seja, não entendíamos muito bem como se comporta um corpo aquecido.

d) A estabilidade do átomo e da matéria

Finalmente consideremos o problema da estabilidade do átomo, e da matéria.

Em 1911, Rutherford mostrou que o átomo tem uma estrutura diferente daquela imaginada por Thompson. Isso porque, ao bombardear átomos com partículas α (núcleos de hélio, como sabemos hoje), Rutherford percebeu que, ao invés de um átomo sólido e rígido, ele é na verdade oco. O átomo tem uma estrutura tal que os elétrons se movem em torno de um núcleo bastante compacto. Adiantou ainda que a força elétrica entre eles é a força responsável pela existência do mesmo.

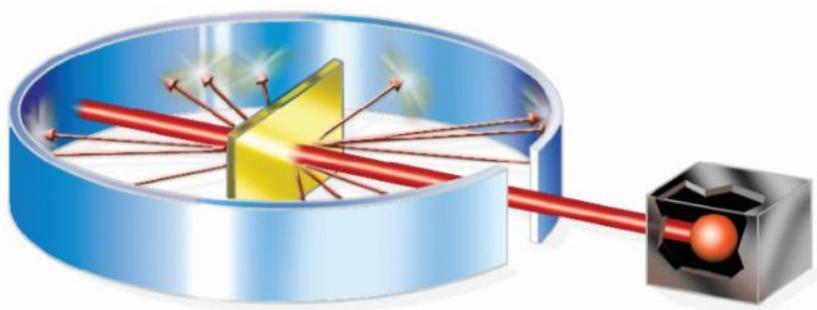


Figura 5. A experiência de Rutherford.

Assim, com as experiências de Rutherford aprendemos que um átomo é muito pequeno, mas muito grande se comparado ao seu núcleo, no qual se encontra toda a sua carga positiva. O núcleo, sabemos hoje, é dez mil vezes menor que o átomo como um todo. Note-se que o diâmetro de um átomo é de aproximadamente um centésimo de um milionésimo de centímetro.

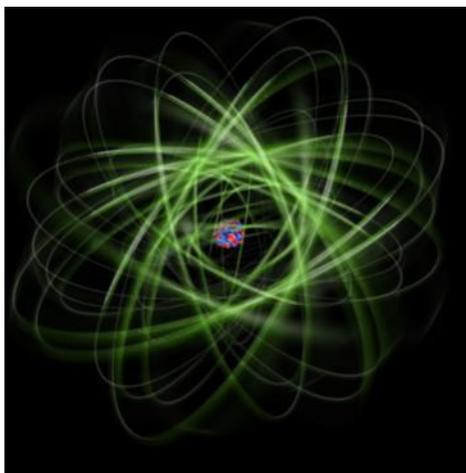


Figura 6. ERNEST RUTHERFORD e seu modelo de átomo.

[8] E. Rutherford, The Scattering of α and β Particles by Matter and the Structure of the Atom, Phil. Mag. 21, 669 (1911).

A massa dos núcleos é milhares de vezes superior à massa dos elétrons. Eles concentram, portanto, a maior parte da massa do átomo e isso se deve ao fato de que, por exemplo, o próton ter uma massa quase duas mil vezes maior do que a massa do elétron.

A teoria clássica prevê que uma partícula carregada em movimento acelerado emite radiação. Assim, os elétrons pertencentes aos átomos, ao descreverem um movimento circular sob a ação da força elétrica, devem emitir radiação. Assim, claramente o espectro de radiação emitida pelos elétrons teria, de acordo com a física clássica, um espectro contínuo.

Ademais, uma partícula numa órbita fechada emitindo radiação faria com que ela aos poucos vá perdendo energia e, com isso, em algum momento o elétron cairia sobre o núcleo. Ou seja, na mecânica clássica o átomo não é estável.

A teoria clássica prevê que uma partícula carregada em movimento acelerado emite radiação. Assim, os elétrons pertencentes aos átomos, ao descreverem um movimento circular sob a ação da força elétrica, devem emitir radiação.

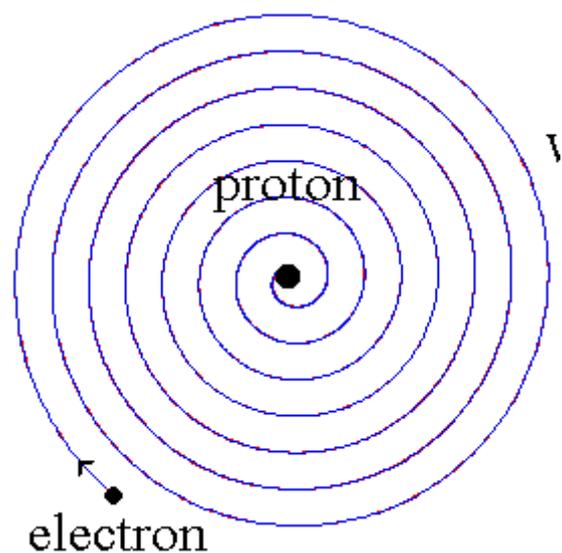


Figura 7. Na física clássica o elétron iria perdendo energia continuamente, até cair sobre o núcleo. Ele duraria pouco. Muito menos do que um segundo.

O NASCIMENTO DA FÍSICA QUÂNTICA

A física quântica pode-se dizer, ela se iniciou no ano de 1900 quando Planck conseguiu obter uma expressão correta para intensidade da radiação como função da frequência, e claro, daí podemos integrar sobre todas as frequências obtendo a lei de Stefan-Boltzmann.

Para explicar este fenômeno, Planck evocou uma ideia bastante simples, ou seja, que a energia de certos osciladores surgiria em quântums, ou seja, num múltiplo da quantidade elementar de energia. Planck propôs então que a energia seria sempre igual a um múltiplo inteiro de um quantum elementar. Isso requeria que se introduzisse uma nova constante na física que depois se chamou constante de Planck. Escreveu ele:

$$E_n = nh\nu \quad 1.2$$

Onde h é uma constante hoje denominada constante de Planck.

$$h = 6.6207004 \times 10^{-34} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s} \quad 1.3$$

E esta é uma constante fundamental da natureza.

Oportunamente, vamos explicar como essa hipótese de Planck deu origem à teoria quântica. O que é importante ressaltar é que essa hipótese, na realidade, é uma hipótese que depois foi entendida por Einstein como sendo a quantização da radiação. Ou seja, a ideia de que a radiação é composta por fótons.



Figura 8. MAX PLANCK.

Einstein e a Natureza dual da Radiação

Em 1905, Albert Einstein avançou a ideia da existência de fótons. Fótons são partículas elementares de massa zero. Einstein propôs que a energia de um fóton associado ou que faria parte de ondas eletromagnéticas de frequência ν seria dado por

$$E = h\nu \quad 1.4$$

Dando assim um reforço e propiciando um melhor entendimento para hipótese de Planck. Com isto o que Einstein estava fazendo era agora atribuir uma natureza corpuscular para a luz. Mais geralmente, uma natureza corpuscular para as ondas eletromagnéticas.

Com isso passamos a entender que a radiação teria uma natureza dualística por que até então se sabia que a radiação, as ondas eletromagnéticas exibiam uma natureza ondulatória. Agora estamos verificando que em alguns fenômenos que a luz se comporta também como tendo uma natureza corpuscular.

Em 1905, portanto, tomamos conhecimento de que de fato a radiação é composta por partículas. Exibe, portanto uma natureza corpuscular. Hoje sabemos que o fóton, na teoria quântica de campos ou no contexto da eletrodinâmica quântica, é na realidade o quantum do campo eletromagnético.

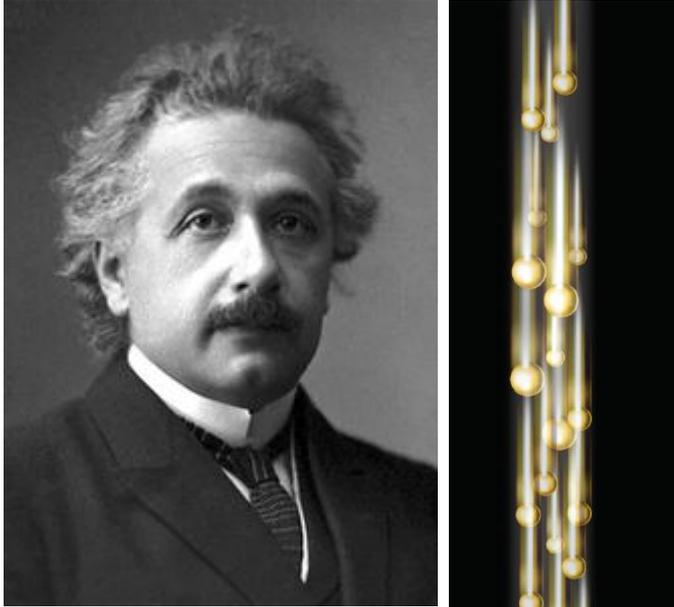


Figura 9. ALBERT EINSTEIN E SUA IDÉIA DE LUZ CONSTITUIDA DE PARTÍCULAS.

O Átomo de Bohr

Outro desenvolvimento importante, mas agora para explicar a natureza discreta do espectro do átomo de hidrogênio foi uma proposta de Niels Bohr. Sabemos que essa proposta também envolvia a ideia de quantização da mesma forma que foi feita a quantização da energia, ou seja, a proposta de Bohr, para explicar a natureza discreta do átomo de hidrogênio ele propunha regras de quantização. A mais simples é aquela na qual se escreve que a componente z do momento angular é igual ao número inteiro de

$$L_z = n \frac{h}{2\pi} = n\hbar \quad 1.5$$

Ou seja a ideia é que o momento angular existe como quantuns de uma quantidade elementar que é a constante de Planck dividida por 2π , ou seja, \hbar . Com isso, ele pode explicar o espectro discreto do átomo de hidrogênio.

Os principais resultados foram:

- 1-A energia do átomo de hidrogênio resulta ser quantizada.
- 2- Ao passar de uma órbita circular para outra, o elétron emite uma radiação.
- 3- Existe um valor mínimo para a energia. Portanto, quando atinge esse nível de energia o átomo não tem como fazer transições. Ele se torna estável.

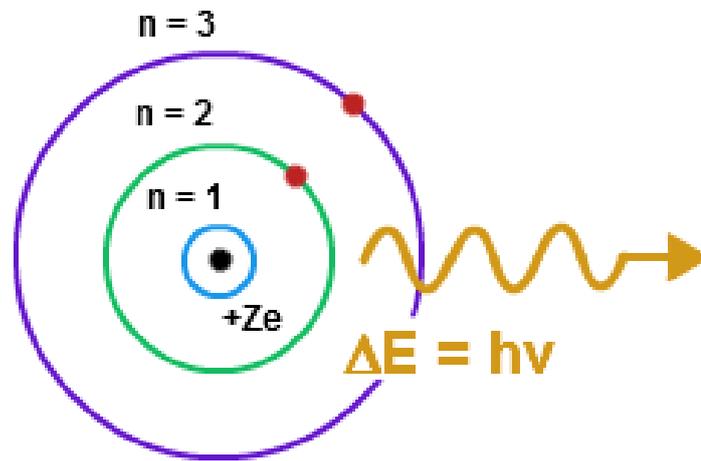


Figura 10. NIELS BOHR E SEU MODÉLO ATOMICO.

[1] N. Bohr, On the Constitution of Atoms and Molecules, Phil. Mag. 26, 1 (1913),

DE BROGLIE E A NATUREZA DUAL DA MATÉRIA

Outro desenvolvimento importante na história da teoria quântica foi à ideia de Broglie de propor que assim como acontecia com a radiação, que tinha uma natureza dualística, por que não a matéria poderia ter uma natureza dualística? Ou seja, o que ele estava propondo é que a matéria deveria também exibir propriedades ondulatórias e isso foi absolutamente revolucionário. Propunha também que se associasse um momento tal que ele viesse a estar relacionado com comprimento de onda.

$$\lambda = \frac{h}{mv} \quad f = \frac{E}{h} \quad 1.6$$

Essa proposta revolucionária de De Broglie foi feita em 1923. Em 1927 tivemos experiências importantíssimas que comprovaram aquilo que de Broglie havia proposto. Ou seja, elétrons incidindo sobre uma estrutura cristalina são capazes de gerar fenômenos de difração tal qual ocorre no caso do efeito Bragg, quando incidimos sobre um cristal ondas eletromagnéticas. Todos esses pesquisadores foram mercedores do premio Nobel. Depois de comprovadas estas ideias restava à questão se a matéria exibe uma natureza ondulatória, vem a questão central: qual é a equação de ondas da matéria?

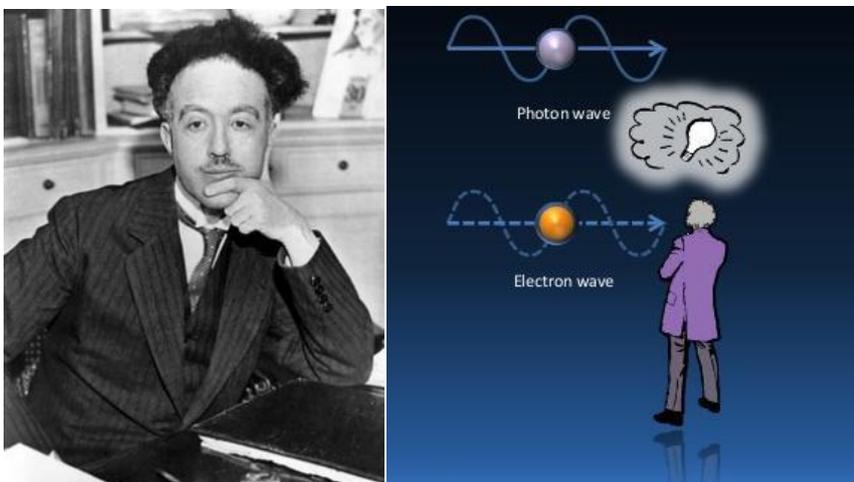


Figura 11. LOUIS DE BROGLIE E SUA PROPOSTA DE DUALIDADE DA MATÉRIA.

COMPROVAÇÃO EXPERIMENTAL DA NATUREZA ONDULATÓRIA

Numa experiência relatada em 1927, Davisson e Germer confirmaram a hipótese de De Broglie. Nessa primeira experiência faziam incidir sobre a estrutura cristalina do níquel, um feixe de elétrons lentos, não relativísticos de energia dada por:

$$E = \frac{p^2}{2m} \quad 1.7$$

Essa energia é expressa na unidade eletrovolts, uma vez que:

$$E = -e\Delta V \quad 1.8$$

A voltagem aplicada nessa primeira experiência variava de 40 a 68 Volts.

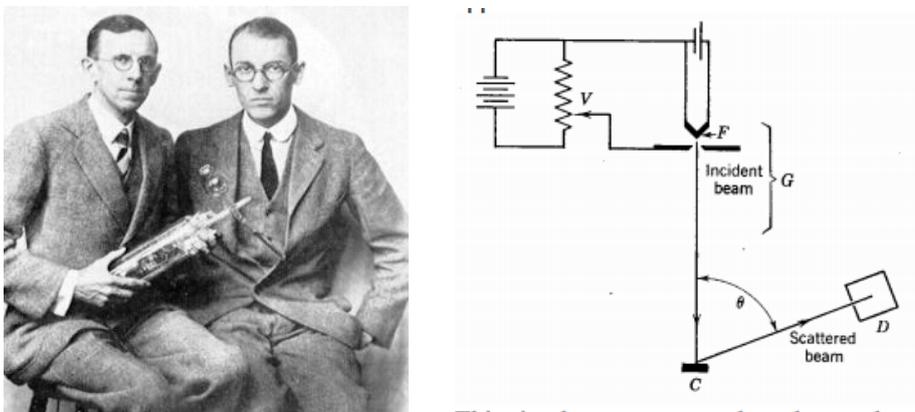


Figura 12. Davisson e Germer e seu arranjo experimental.

Os elétrons coletados, depois de incidirem sobre a estrutura cristalina do Níquel levavam a informações sobre a intensidade em função da direção associada ao ângulo θ , o de espalhamento (vide fig). Em particular, eles perceberam que para as voltagens de 54 V, para ângulos de 50° havia um pico na intensidade. O mesmo ocorria para a voltagem de 60 V.

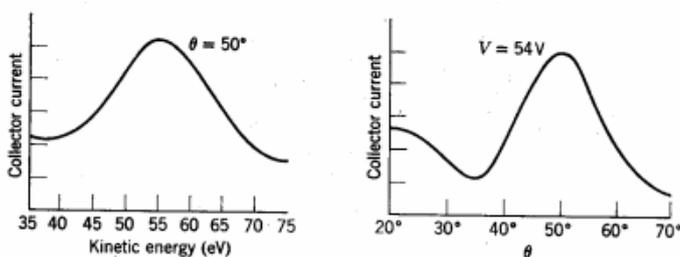


Figura 13. Resultado experimental indicando a natureza ondulatória de elétrons.

Eles atribuíram esses resultados experimentais, de uma forma correta. Eles concluíram que esses resultados deviam ser interpretados como resultado da difração de elétrons por uma rede cristalina seguindo o mesmo padrão da difração de raios-x por uma rede cristalina. Portanto, dando razão a hipótese De Broglie. Agora, estamos diante de um fenômeno no qual se manifesta a natureza ondulatória da matéria. Isso levou Davisson a receber posteriormente o prêmio Nobel por essa descoberta

AS RELAÇÕES DE INCERTEZA DE HEISENBERG

Uma das consequências mais importantes da dualidade onda/partícula é conhecida como as relações de incerteza de Heisenberg. Tais relações podem ser entendidas por meio de um exemplo bastante simples: o movimento de uma partícula.

Para o movimento em uma dimensão, o momento é definido como um produto da velocidade pela massa:

$$p_x = mV_x \quad 1.9$$

No caso do movimento unidimensional (a partícula nesse caso se move em uma dimensão, a qual denominaremos de x) esse par é constituído pela velocidade e a posição da partícula. Sejam Δx e ΔV_x definidos como as imprecisões com que podemos medir duas grandezas físicas. Ou seja,

Δx será definida como a imprecisão com que se pode determinar a coordenada x .

Δp_x é a imprecisão com que se pode determinar a componente x do momento, da partícula p_x .

$$\Delta p_x \Delta x \geq \hbar \quad 1.10$$

O fato é que, como veremos posteriormente, essa relação pode ser deduzida do comportamento ondulatório da matéria.

De acordo com princípio da incerteza de Heisenberg, se determinarmos a posição de um elétron com absoluta precisão ($\Delta x = 0$), então não teremos a menor idéia a respeito do valor da sua velocidade ($\Delta V = \infty$). Em linguagem matemática isso se escreve,

$$\Delta x = 0 \Rightarrow \Delta p_x = \infty \quad 1.11$$

Por outro lado se determinarmos o momento de uma partícula com absoluta precisão ($\Delta p_x = 0$), não teremos a menor idéia a respeito de onde estará o elétron ($\Delta x = \infty$). Resumindo:

$$\Delta p_x = 0 \Rightarrow \Delta x = \infty \quad 1.12$$

O princípio de Heisenberg se aplica para pares de variáveis. Para esses pares podemos falar de situações extremas. Uma variável medida com absoluta precisão e outra completamente indeterminada. E isso, independentemente do processo de medida.

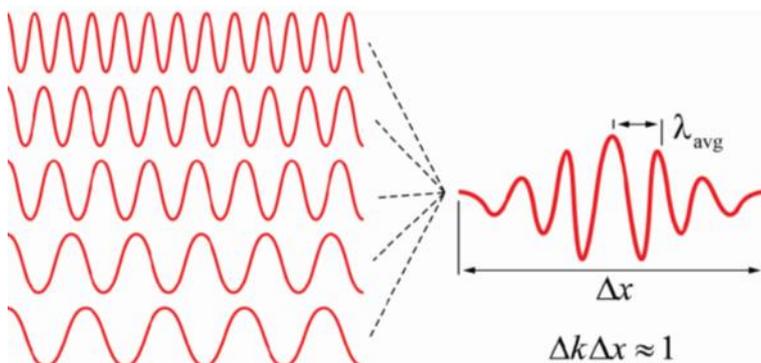


Figura 14. Comportamento ondulatório. Uma onda muito localizada implica num espectro dotado de muitos comprimentos de onda. Por outro lado quanto menos localizada ela for, menor será o intervalo de comprimentos de onda.

O FORMALISMO DA TEORIA QUÂNTICA

Deve-se creditar a Werner Heisenberg uma ideia que levou a um formalismo bastante geral para a teoria quântica. Ele se constituiu numa base para a formulações da teoria quântica tanto não relativística (a primeira quantização) quanto a teoria quântica de campos (a segunda quantização).

O formalismo de Heisenberg era uma nova teoria cinemática. O título do trabalho era *“Reinterpretação quântica de relações cinemáticas e mecânicas”*. Neste trabalho a velocidade e a coordenada de uma partícula seriam representadas de forma diferente da usual. Conseguia obter algo parecido com a quantização de Planck para osciladores harmônicos. Propunha, portanto, um rompimento radical com a teoria clássica. Trata-se, nessa proposta, de abandonar a ideia de trajetória, pois as grandezas cinemáticas não seriam aquelas adotadas na física clássica.

Um passo fundamental no aperfeiçoamento do formalismo proposto por Heisenberg foi dado por Max Born e Pascual Jordan. O artigo que marcou época tinha o título de *“Sobre a mecânica quântica”*. Ambas as formulações foram publicadas no ano de 1925.

O principal aperfeiçoamento de Born e Jordan foi associar às grandezas físicas, no caso as grandezas coordenada e momento, a operadores. Matrizes, mais especificamente. Propunham que tais matrizes seriam tal a satisfazerem a relação de comutação:

$$XP - PX = i \frac{h}{2\pi} \quad 1.13$$

Onde X e P seriam matrizes adequadas para representar as grandezas cinemáticas na formulação Hamiltoniana.

Em 1930 Paul Dirac lança sua obra *“Os princípios da Mecânica quântica”*. Procura demonstrar como se pode “construir um formalismo completamente novo para a teoria quântica”. Apresentava a teoria quântica dotada agora de uma estrutura lógica.



Figura 15. Werner Heisenberg.

A EQUAÇÃO DE SCHROEDINGER

Agora estamos diante de outra proposta revolucionária feita por Schrödinger. Em 1926, Schrödinger propôs a equação de ondas a qual recebe o seu nome. Essa equação de ondas envolve uma função conhecida como função de ondas e que, mais tarde, Bohr deu a interpretação de amplitude de probabilidade.

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi + V(x, y, z) \psi \quad 1.14$$

É uma equação de ondas não relativística, e que logo se mostrou fundamental para entender o átomo.



Figura 16. ERWIN SCHROEDINGER

O SPIN DAS PARTÍCULAS

Pieter Zeeman descobriu um efeito surpreendente. Sob a ação de um campo magnético externo e uniforme, níveis de energia se desdobravam em outros tantos níveis. Seriam níveis degenerados na ausência do campo magnético.

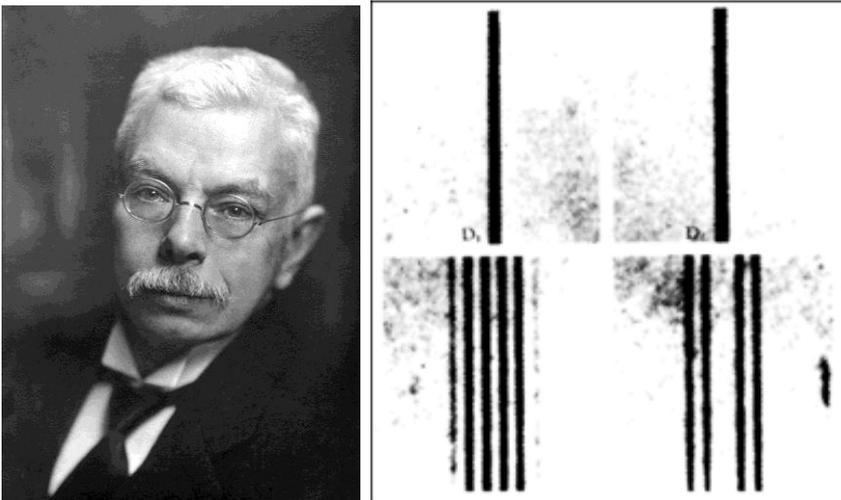


Figura 17. PIETER ZEEMAN E O DESDOBRAMENTO DE NÍVEIS DE ENERGIA.

Essa experiência pioneira levou à suspeição de que o elétron poderia exibir algo que se assemelhasse a uma estrutura interna. Algo como um movimento de rotação em torno do seu eixo. Esse movimento de rotação seria associado ao spin do elétron. Hoje sabemos que essa visão clássica não se sustenta. Essa ideia do movimento de rotação do elétron em torno do seu eixo de simetria foi proposta em 1925 por Uhlenbeck, Goudsmit, e Kronig.

No entanto, a ideia do spin ganhava corpo por conta da experiência de Stern-Gerlach, realizada em 1921, na qual se comprova que quando da passagem de um feixe de elétrons através de uma região na qual havia um gradiente do campo magnético ele se dividia em exatamente dois feixes. Os elétrons depois de atravessar essa região iam se depositar em regiões distintas. Ou seja, o campo magnética é capaz de separar as duas direções do spin das partículas.

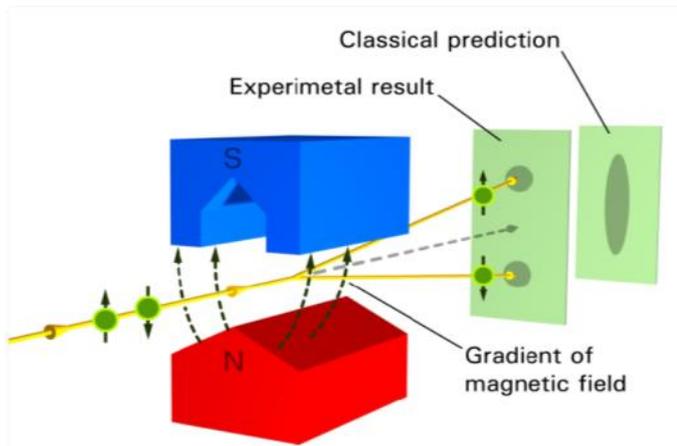


Figura 18. Experimento de Stern-Gerlach.

Um desenvolvimento importante, em relação ao conceito de spin, envolve o princípio de Pauli. O princípio da exclusão estabelece uma diferenciação entre partículas de diferentes spins. De acordo com esse princípio, partículas dotadas de spin $\frac{1}{2}$, as partículas fermiônicas, são tais que elas não podem estar em estados nos quais elas teriam o mesmo número quântico.

Com o tempo descobrimos que, à exceção do bóson de Higgs, todas as partículas, como os fótons são dotadas de spin. E essa grandeza física é um atributo das mesmas, assim como a carga elétrica e a massa.

Hoje classificamos as partículas em fermiônicas, quando o spin é semi-inteiro, em homenagem a Enrico Fermi, e partículas bosônicas em homenagem a F. Bose, físico indiano. As partículas bosônicas tem spin inteiro. São em número de 12.

Logo se comprovou que estas partículas exibem características muito diferentes. Por exemplo, as partículas bosônicas podem exibir a condensação de Bose-Einstein que é um fenômeno puramente quântico. E que é utilizado para explicar, por exemplo, a superfluidez do hélio4.

A EQUAÇÃO DE DIRAC

O fato é que a proposta de Schrödinger ganhou corpo por que estávamos diante de uma equação de ondas. Uma equação não relativística, no entanto.

Dirac, em 1932 escreveu uma equação de ondas relativísticas. Essa equação de ondas relativísticas foi capaz de prever, ou melhor, Dirac interpretou soluções da sua equação de forma a prever uma nova partícula que seria o pósitron. Veja que, agora a ideia da teoria quântica leva a previsões absolutamente revolucionárias, como as antipartículas. Logo em seguida, Anderson descobriu o pósitron.

No entanto a teoria de Dirac não é totalmente compatível com a teoria da relatividade.

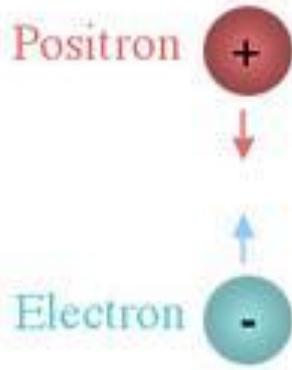


Figura 19. PAUL DIRAC.

A TEORIA QUÂNTICA DE CAMPOS

Essa teoria quântica é mais fundamental dentre todas. Ela é a única a incorporar a teoria quântica levando em conta a teoria da relatividade. Ela foi construída por muitos cientistas. Dentre eles destacamos Dirac, Pauli, Schwinger, Dyson, Tomonaga e Feynman dentre outros. Porquanto, por exemplo, a eletrodinâmica quântica que descreve a interação de partículas dotadas de carga elétrica e spin, foi desenvolvida por Tomonaga, Schwinger e Feynman. Receberam o prêmio Nobel por esse feito notável.

Gostaríamos, para encerrar, de dizer que a teoria que descreve todas as partículas elementares, que é a teoria quântica de campos, foi finalizada aproximadamente no ano de 1987, por conta de trabalhos revolucionários de Steven Weinberg, Abdus Salam e Georgi Glashow. Essa é a teoria quântica que descreve todos os constituintes fundamentais da matéria e suas três interações. Essa teoria, ou esse modelo, é conhecido como modelo padrão.



Figura 20. Richard Feynman deu duas contribuições para a física quântica: a eletrodinâmica e aquela que envolve pesos para as contribuições de vários caminhos (uma nova formulação da mecânica quântica).

Duas Teorias Quânticas

Existem duas teorias quânticas. Nas duas teorias o conceito de campo desempenha um papel central. Assim, nessas teorias associamos a cada partícula um campo. Por exemplo, ao fóton, considerado o quantum do campo de radiação, associamos um campo de quatro componentes denominado quadri-potencial:

$$\text{fóton} \Leftrightarrow \text{Campo } A_{\mu}(x, y, z, t) \quad 1.15$$

Os campos elétricos e magnéticos são derivados a partir das componentes dos campos acima.

A uma partícula como o elétron, considerada um quantum da matéria, associamos outro campo:

$$\text{elétron} \Leftrightarrow \text{Campo} \quad \Psi(x, y, z, t) \quad 1.16$$

No contexto da segunda quantização, os campos têm uma estrutura algébrica complexa, pois são tidos como operadores.

Física Clássica e Quântica

A física quântica se originou quando da descoberta de dois fenômenos para os quais as teorias vigentes até o ano de 1900 não davam conta de explicar. As explicações para esses dois fenômenos exigiram uma reformulação completa na nossa forma de pensar e descrever uma ampla classe de fenômenos físicos. A teoria que emergiu dessa necessidade de descrever esses dois fenômenos, bem como muitos outros insuspeitos até o início do século XX, recebe o nome de teoria quântica.

Esses dois fenômenos são conhecidos como radiação do corpo negro e o espectro discreto do átomo de hidrogênio e serão apresentados a seguir.

Definimos a parte da Física que era aplicada com sucesso para explicar os fenômenos naturais até o ano de 1900, como sendo a *Física Clássica*. No entanto, o conceito é um pouco mais amplo do que esse, já que a física clássica descreve fenômenos não explorados, como o Caos, até 1900. A física clássica não caiu em desuso. A queda de uma maçã é descrita com grande precisão pelas leis de Newton, conhecidas há mais de 3 séculos. As partes da Física Clássica mais conhecidas são as equações de Newton (voltadas para o estudo do movimento) e as equações de Maxwell, que descrevem todo o eletromagnetismo clássico.

No entanto, como apontado antes, existem fenômenos para os quais essa nova teoria, a teoria quântica é absolutamente essencial. A parte da física que se dedica ao estudo dos fenômenos para os quais na sua descrição se requer a utilização da teoria quântica é denominada de *Física Quântica*.

Pode-se dizer que, via de regra, a Física Clássica descreve os fenômenos naturais do dia a dia. A Física Quântica, no entanto é imprescindível nos fenômenos ocorrendo nas escalas moleculares, atômica, e subatômica.