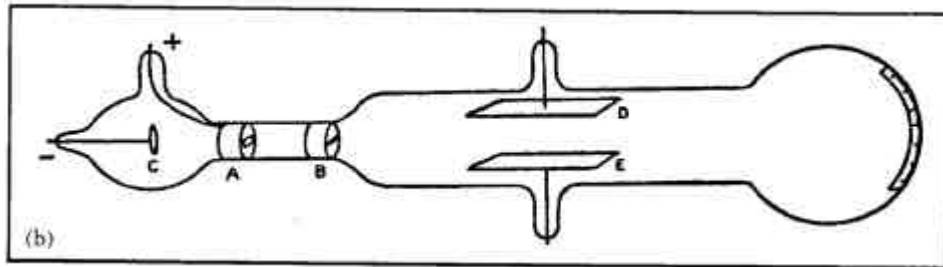


Electrão, a primeira partícula

Thomson em 1897 interpreta os raios catódicos em termos de um fluxo de electrões

Em 1899, Thomson e Wilson mediram a carga do electrão

Tubo de raios catódicos utilizado por Thomson



Um feixe de raios catódicos emitido pelo cátodo C e focado em A e B passa entre D e E, onde há um campo eléctrico. Um campo magnético perpendicular ao campo eléctrico é criado por bobinas colocadas no exterior do tubo.

Medições

Carga eléctrica Q acumulada no ânodo $Q = N.e$

Quantidade de calor produzida na zona de impacto dos raios catódicos $W = N.mv^2/2$

Deflecção do feixe catódico $R = mv/Be$

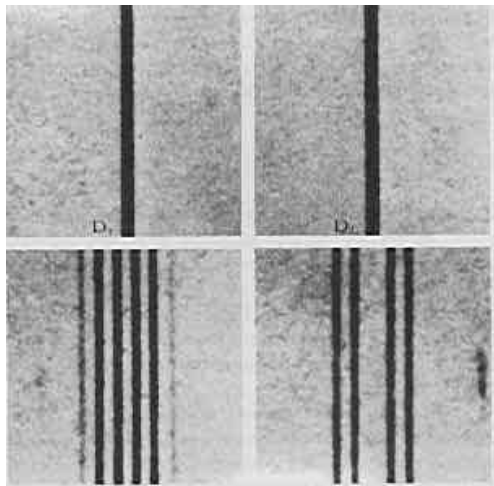
Resultado

$$e/m = 2W/QB^2R^2 = 2,3 \cdot 10^{17} \text{ esu/erg}$$

Efeito de Zeeman

Em 1887, Pieter Zeeman (1865-1943), assistente de Lorentz, observou o **efeito de um campo magnético na emissão de luz por um vapor de sódio**.

Verificou que as riscas características da emissão pelo sódio se dividem em várias riscas, designadas por **multipletos**.



Efeito de Zeeman nas riscas de emissão do vapor de sódio

Ao alto, as riscas D_1 e D_2 sem campo magnético.

Em baixo, as mesmas riscas são desdobradas em várias riscas quando a fonte é submetida a um campo magnético.

Zeeman determinou o valor de e/m do electrão a partir da variação da frequência da luz emitida, provando que **o electrão é um dos componentes dos átomo**.

Descoberta dos Raios X

Em 1895, Röntgen observou uma radiação penetrante produzida na operação de tubos de raios catódicos.

Röntgen conseguiu fixar as imagens em chapas fotográficas, sensíveis à nova radiação designada por raios X.



Progressivamente formou-se a ideia de que os raios X são radiações electromagnéticas de muito pequeno comprimento de onda

Em 1899 Wind e Hage obtiveram a primeira indicação da **difracção dos raios X**;
Em 1904 Charles Barkle observou em Cambridge a **polarização** dos novos raios;
A **velocidade de propagação** foi pela primeira vez medida em 1905 por Erich Marx.

Por volta de 1900 era claro que os raios X, bem como a luz ultravioleta, estimulam a libertação de electrões quando incidem em metais: o efeito fotoeléctrico.

Descoberta da radioactividade

Henri Becquerel em 1895 decidiu investigar a **relação entre a fluorescência e os raios X**.

Queria saber se as substâncias fluorescentes emitem igualmente raios X.



Descobriu que o sal de urânio emite raios capazes de atravessar papel preto, quer tenha sido ou não exposto ao Sol.

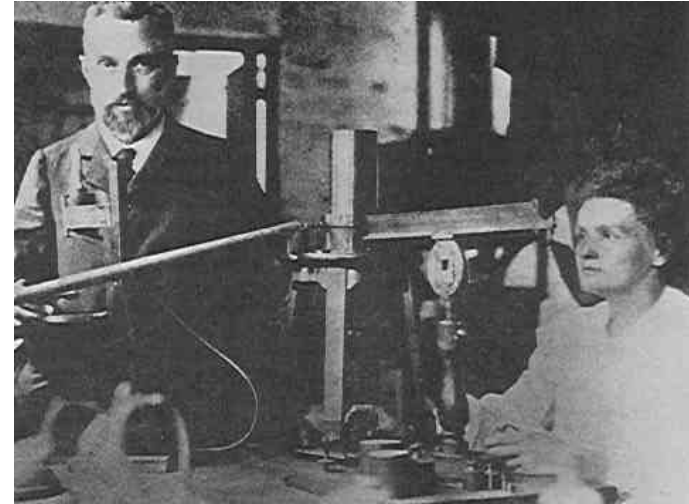
O sal de urânio emite espontaneamente uma radiação penetrante: contrariamente aos raios X, cuja emissão era provocada pelo impacto dos electrões no tubo de raios catódicos, os raios de H.Becquerel surgiam do sem que nada estimulasse a sua produção.

Pouco tempo depois, Becquerel verificou que a sua radiação ioniza os gases e desenvolveu o **método de medida da actividade** de uma amostra radiactiva

Marie Curie e os elementos radioactivos

Após analisar vários compostos de urânio, Marie Curie concluiu que a emissão da radiação é uma propriedade do elemento urânio.

Chamou Radiactividade à propriedade que alguns elementos possuem de emitir espontaneamente radiação.



Marie Curie verificou que a chalcólite (mineral de urânio) é particularmente radiactivo e suspeitou que um elemento desconhecido extremamente radiactivo deveria existir enquanto impureza no minério.

Utilizando métodos de análise química combinados com medidas de radiactividade, Marie e Pierre Curie isolaram um pequeno resíduo altamente radiactivo, portador de um novo elemento que, compreensivelmente, designaram de polónio.

Pouco tempo depois isolaram outro elemento fortemente radiactivo que apelidaram de rádio.

Radiações α , β e γ

Ernest Rutherford (1871-1937) estabeleceu, em 1898, a existência de dois tipos diferentes de radiações emitidas pelo urânio, designadas por raios alfa (α) e beta (β).

Distinguem-se pela carga eléctrica, pois são deflectidas em sentidos opostos num campo magnético e por um poder de penetração na matéria diferente.

Concluiu-se em poucos anos que os raios beta são raios catódicos, ou seja, electrões.

P.V.Villard, em França, descobriu uma terceira forma de radiação que designou por raios gama (γ).

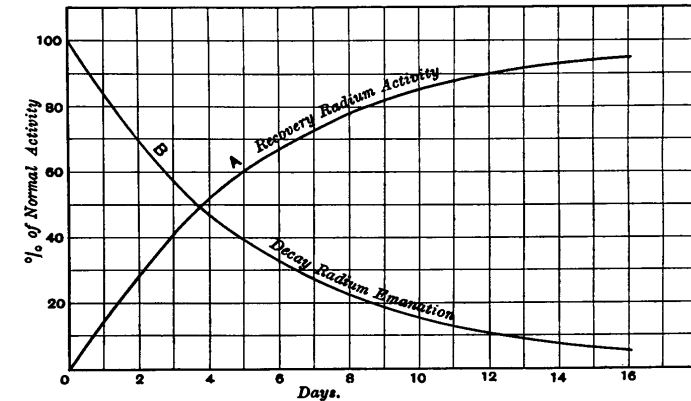
Mais tarde mostrou-se que os raios α são átomos de He ionizados.

Os três tipos de radiação, α , β e γ , distinguem-se através das suas trajectórias num campo magnético. [Extraído de: Marie Curie, Thesis (Paris: Gauthier-Villars, 1904)].

A descoberta da transmutação dos elementos .

Observações feitas por Rutherford:

- 1) Partindo de uma solução de um sal de urânio isolou um precipitado com a totalidade do elemento radioactivo
- 2) Com o tempo, esse precipitado perdia progressivamente a sua radioactividade
- 3) A solução a que se tinha retirado o elemento radioactivo recuperava a radioactividade inicial



Lei fundamental dos processos de desintegração: cada átomo radioactivo tem uma probabilidade constante de decair numa dada unidade de tempo.

A interpretação implica a transmutação entre elementos:

- 1) Os átomos de urânio ^{238}U decaem no isótopo de tório ^{234}Th , emitindo uma partícula α não detectável
- 2) O ^{234}Th emite radiação beta, a qual indica a presença de um elemento radioactivo no sal.
- 3) Uma vez isolado o ^{234}Th , a sua radioactividade diminui até se esgotarem os átomos disponíveis.
- 4) O urânio ainda existente na solução continua a decair em ^{234}Th , o qual ao desintegrar-se com emissão de raios β volta a revelar a radioactividade da solução.

A experiência de Rutherford

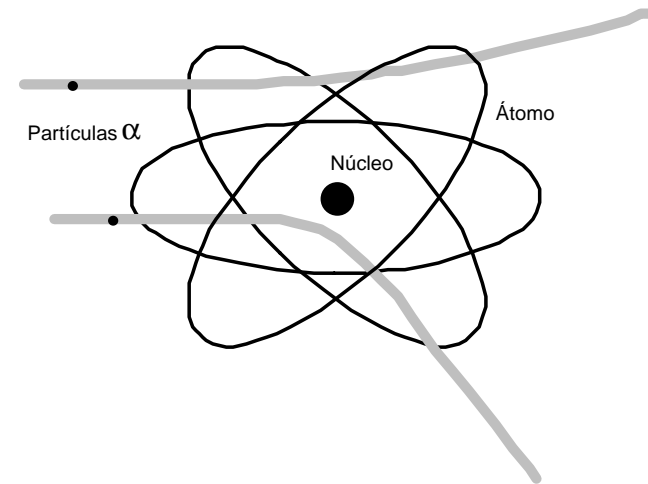
Ideia de E. Rutherford (1911):

utilizar a radiação emitida por algumas substâncias radioactivas para sondar o interior do átomo

Partículas α com energia cinética de 5 MeV resultantes da desintegração do rádio, são enviadas sobre folhas de ouro de muito pequena espessura.

As observações mostraram que na maioria dos casos as partículas α atravessavam a folha de ouro praticamente sem serem desviadas.

Nalguns casos, observavam-se deflexões a grande ângulo, acontecendo mesmo que por vezes a partícula α é reflectida



Esta experiência levou Rutherford a propor que no átomo os prótons se concentram no centro, formando o 'núcleo', e que as cargas negativas (os electrões) se encontram dispersas no volume do átomo, eventualmente orbitando em torno do núcleo.

Planck e o Quantum de luz

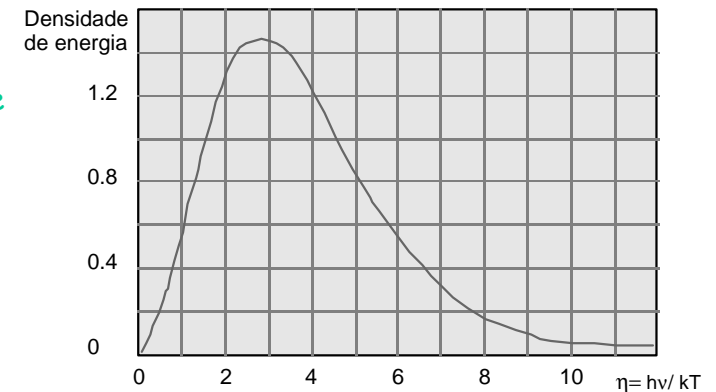
No final do século XIX, a física não conseguia explicar. **o espectro da radiação do corpo negro**
O espectro teórico (Rayleigh e Jeans) crescia com o quadrado de frequência:

$$u(n) = 8p/c^3 \cdot n^2 \cdot kT$$

Considerando o corpo negro como um conjunto de osciladores emitindo e absorvendo radiação;

Sabendo que num conjunto de osciladores em equilíbrio à temperatura T a energia média de cada um é igual a kT;

e que o número de ondas electromagnéticas com frequência n, por unidade de volume, confinadas numa cavidade, é dado por $N(n) = 8p/c^3 \cdot n^2$, obtem-se a expressão de Rayleigh e Jeans.



Espectro experimental da radiação do corpo negro

Por inspecção matemática Planck chegou à fórmula seguinte:

$$u(n) = 8phn^3/c^3 \cdot (\exp(hn/kT) - 1)^{-1}$$

Planck admitiu que a lei de equipartição de energia, segundo a qual a energia média dos osciladores é kT, não devia ser válida em todas as condições. A energia média do oscilador devia ser

$$e = hn \cdot (\exp(hn/kT) - 1)^{-1}$$

Para reproduzir as propriedades de radiação do corpo negro, Planck teve que admitir que a energia do oscilador não é uma variável contínua. **A energia do oscilador cresce por saltos de valor hn**

Einstein e o Quantum de luz

Em 1905, A. Einstein admitiu que o campo electromagnético é constituído de quanta, os fotões, cada um com uma energia igual a $h\nu$. Esta hipótese parecia indispensável para explicar o efeito fotoeléctrico.

Resultado experimental:

O físico alemão Lenard descobriu que quando se aumenta (diminui) a intensidade da luz incidente no metal, sem alterar o espectro da luz, o número de electrões ejectados por unidade de tempo cresce (decrece), mas a sua energia permanece a mesma.

Teoria clássica

Uma onda electromagnética mais intensa tem mais energia, e portanto os electrões produzidos devem ser mais energéticos. No sentido contrário, uma onda electromagnética muito pouco intensa deve, a partir de certo limite, ser incapaz de arrancar electrões ao metal.

Interpretação de Einstein

O impacto de um fotão é suficiente para extrair um electrão se a energia do fotão $h\nu$ for superior à energia de ligação W do electrão no metal.

O electrão é libertado com uma energia cinética $E = h\nu - W$.

Na luz de fraca intensidade há poucos fotões por unidade de tempo, mas quando um fotão colide com um electrão transmite-lhe toda a sua energia.

Uma mudança de intensidade da luz significa uma alteração do número de fotões, e portanto do número de electrões ejectados.

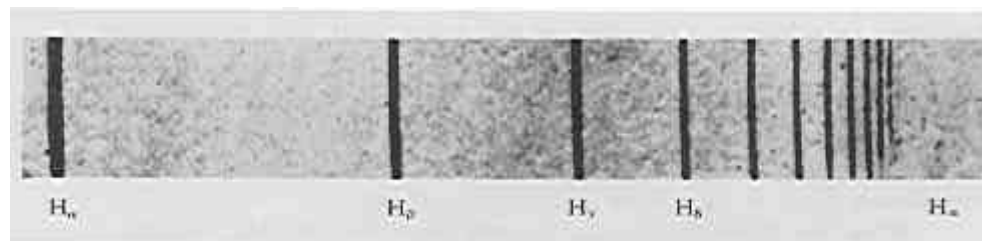
Um feixe de fotões de frequência abaixo de um valor limiar, W/h , não consegue libertar qualquer electrão.

Motivações da teoria quântica

Sommerfeld escreveu em 1919 no prefácio à sua obra 'Atombau und Spectrallinien': "Desde a descoberta da análise espectral, ninguém pôde duvidar que a linguagem do átomo seria compreendida se se conseguissem interpretar os espectros atômicos".

Esta afirmação caracteriza bem a importância fundamental da **espectroscopia** no desenvolvimento da física quântica.

Em larga medida a teoria quântica foi construída para explicar os **espectros de emissão atômica**.



Espectro do átomo de hidrogênio.

As observações de fenômenos relacionados com o átomo mostravam sistematicamente a existência de quantidades físicas discretas, quantidades que aparentemente só podem assumir determinados valores 'quânticos'.

E.g., As experiências de Frank e Hertz e a experiência de Stern e Gerlach

O átomo de Bohr

A dinâmica de um sistema atómico baseado num núcleo é incompatível com a física clássica:
a **identidade e a estabilidade** dos átomos não é explicável neste contexto.

Em 1913 N. Bohr aplica a ideia da quantificação da energia aos sistemas atómicos e introduz alguns postulados revolucionários para explicar o comportamento dos átomos.

O seu conteúdo é basicamente o seguinte:

- a) os electrões atómicos só podem existir em determinadas órbitas, designadas por estados quânticos ;
- b) a cada estado quântico corresponde uma certa energia do electrão, e estas energias só podem assumir determinados valores discretos;
- c) em situação normal os electrões ocupam os estados quânticos de energia mais baixa, dizendo-se que o átomo se encontra no estado fundamental ;
- d) o estado fundamental só pode ser alterado fornecendo ao átomo uma quantidade de energia suficiente para que um electrão transite para um estado quântico de energia superior; nestas condições o átomo fica no que se designa por um estado excitado ;
- e) o átomo desexcita-se, ou seja um electrão transita de um estado de energia E_2 para o estado fundamental de energia E_1 , emitindo um fóton de frequência $\nu = (E_2 - E_1)/h$, onde h é a constante de Planck;
- f) a quantificação das órbitas quânticas é obtida exigindo que o momento angular do electrão seja um múltiplo inteiro de $h/2\pi$.

A aplicação destes postulados ao átomo de hidrogénio prevê para o espectro da radiação deste elemento uma série de riscas dadas pela fórmula $\lambda_{nm} = R \cdot (n^{-2} - m^{-2})$

Ondas de matéria

Em 1923, Louis de Broglie deu uma contribuição decisiva para o aprofundamento das teorias quânticas, ao sugerir que tal como a radiação luminosa, as partículas da matéria, por exemplo o electrão, têm uma dupla natureza, ondulatória e corpuscular.

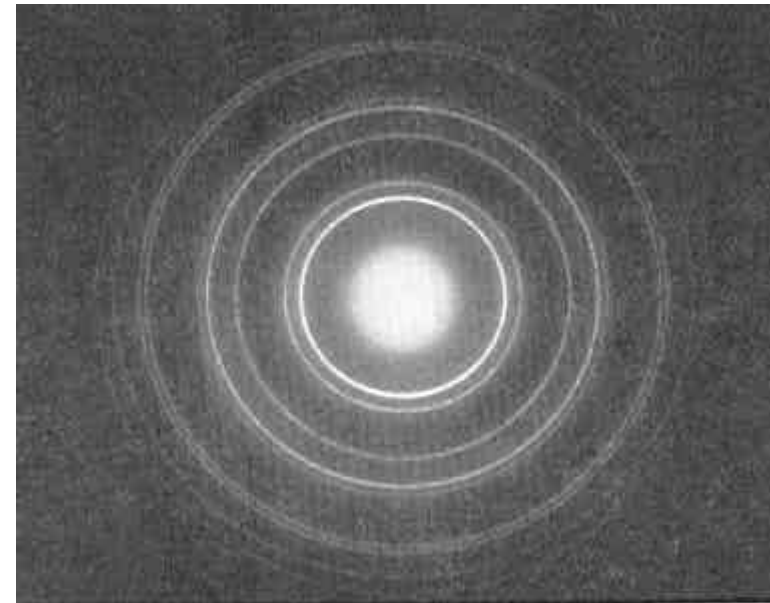
Energia da partícula em termos de frequência de onda

$$E = h \nu$$

Momento de uma partícula em termos do comprimento da onda associada

$$p = h / \lambda$$

Estas expressões são a ponte principal entre as duas representações complementares da realidade.

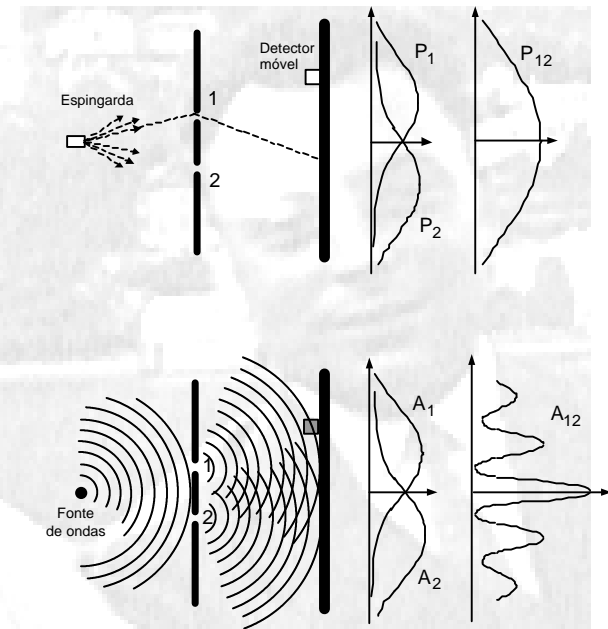


Difracção de electrões de 100 keV

Os princípios quânticos

Os enunciados seguintes resumem a essência da física quântica:

- O conhecimento acessível experimentalmente é de natureza probabilística.
- Qualquer acontecimento é caracterizado por um número complexo F , chamado amplitude de probabilidade.
- A probabilidade de observação experimental desse acontecimento é dado por $|F|^2$.
- Quando um acontecimento pode ocorrer de duas maneiras alternativas, e não for possível determinar experimentalmente qual das alternativas efectivamente ocorre, a amplitude de probabilidade do acontecimento é a soma das amplitudes de probabilidade $F = F_1 + F_2$.
- A probabilidade do acontecimento será então $P = |F_1 + F_2|^2 = |F_1|^2 + |F_2|^2 + 2|F_1||F_2|\cos\phi$
- O termo $2|F_1||F_2|\cos\phi$ é responsável pela interferência quântica entre as duas alternativas
- Se, em contrapartida, realizarmos uma experiência capaz de determinar a alternativa que foi tomada, então as probabilidades comportam-se normalmente e $P = P_1 + P_2 = |F_1|^2 + |F_2|^2$.



Os princípios quânticos estão na base das teorias das partículas elementares desenvolvidas no século XX.

Função de onda

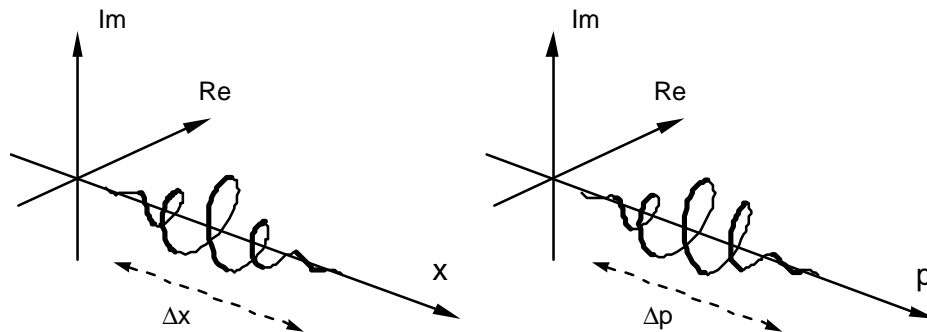
Num dado instante de tempo, uma partícula quântica é descrita por um número infinito de amplitudes de probabilidade, correspondentes aos infinitos pontos do espaço.

Esta colecção de amplitudes de probabilidade forma o estado quântico da partícula e representa-se por uma função $Y(x)$, a função de onda da partícula.

A probabilidade de encontrar a partícula no ponto x quando se faz uma medida experimental é $|Y(x)|^2$.

As funções de onda de posição $\Psi(x)$ e de momento $\Psi(p)$, relacionadas entre si pela transformada de Fourier, são a representação quântica do estado de uma partícula.

A formulação ondulatória da mecânica quântica está intimamente ligada ao princípio de incerteza; Δx e Δp obedecem ao princípio de incerteza de Heisenberg, $\Delta x \cdot \Delta p > h$.



Relação entre as funções de onda de posição e de momento.

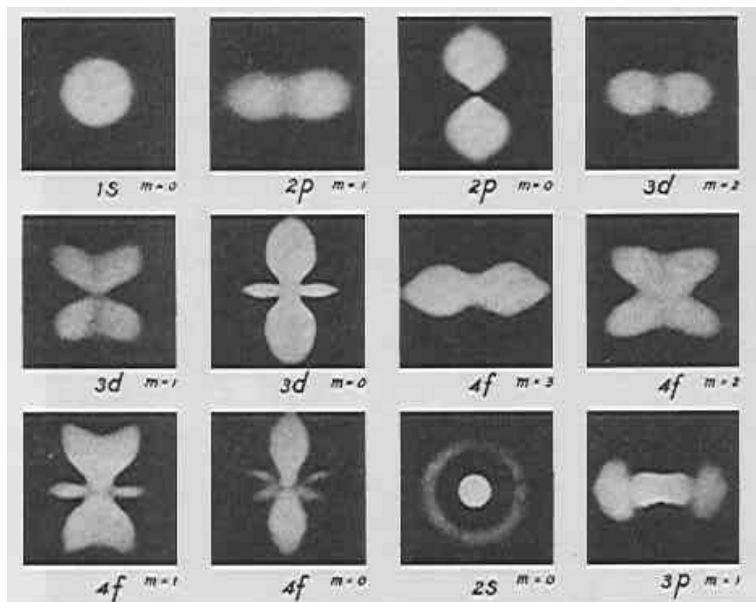
A equação de Schrödinger

Em 1925 Schrödinger encontrou uma equação com a qual é possível determinar a função de onda Ψ .

Schrödinger propôs a seguinte prescrição:

A equação de onda quântica obtém-se da equação clássica que relaciona a energia e o momento, substituindo a energia E pelo operador $i\hbar \frac{\partial}{\partial t}$ e o momento p pelo operador $i\hbar \nabla$.

Partícula livre: $E = p^2/2m$ donde a equação quântica: $i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi$



Electrão num potencial de Coulomb: $E = p^2/2m - e^2/r$, onde e é a carga do electrão e do protão, e r a distância do electrão ao protão.

Schrödinger verificou que neste caso tinha uma equação aos valores próprios

A equação conduz aos níveis de energia quantificados do átomo. E os valores numéricos coincidem com os dados experimentais.

Funções de onda do átomo de hidrogénio

O spin das partículas

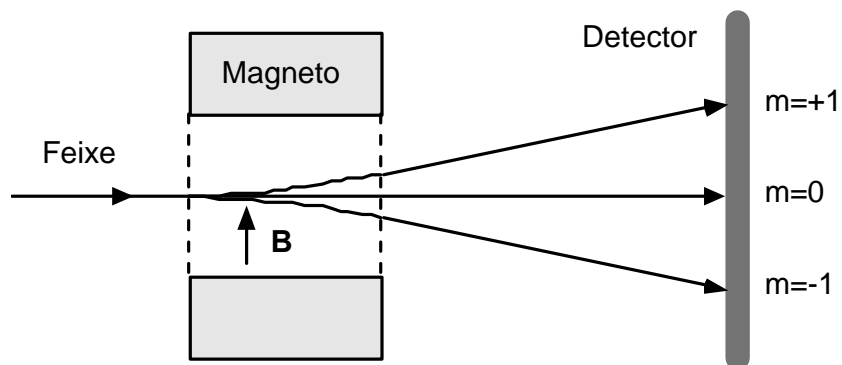
Na experiência de Stern e Gerlach um feixe de átomos com momento angular L atravessa um campo magnético.

A magnitude e a direcção da deflecção dependem da componente do momento angular segundo a direcção do campo magnético.

Utilizando átomos de momento angular $L=1$, verificou-se que estes atingem o detector somente em três pontos! **A componente L_z do vector momento angular tem apenas três valores possíveis,**

$$L_z = +1, L_z = 0 \text{ ou } L_z = -1$$

Em termos de uma órbita electrónica clássica, a experiência mostra que a orientação e o sentido da translação do electrão no átomo estão limitadas a três possibilidades distintas.



Esquema da experiência de Stern e Gerlach.

A análise detalhada dos espectros de emissão atómica obtidos em presença de um campo magnético conduziu em 1925 G.Uhlenbeck e S.Gouldsmit, dois jovens físicos holandeses, à descoberta do **spin do electrão**.

Raios cósmicos.

Desde o início do século observava-se, no trabalho experimental com a câmara de ionização, nomeadamente no estudo das substâncias radioactivas, uma corrente residual entre os eléctrodos.

A explicação era a radioactividade natural que ionizava ligeiramente o gás da câmara tornando-o condutor.

Por forma a esclarecer o problema realizaram-se experiências em balões, longe da superfície da Terra, e de facto o efeito diminuía com a altitude.

No entanto acima de 700 m observou-se um crescimento rápido da corrente na câmara:

A Terra é bombardeada por radiações provenientes do espaço, os raios cósmicos, capazes de ionizar o gás da câmara.

Progressivamente atenuados pela atmosfera, o seu efeito não é notório à superfície.

Entre 1930 e 1950, os raios cósmicos estiveram na origem de importantes descobertas em física das partículas elementares.

Energia das partículas α , β ou γ resultantes da radioactividade: alguns MeV

Energia dos raios cósmicos: espectro até centenas e mesmo milhares de GeV

Laboratórios instalados no cimo das montanhas

Instrumentos

Ao longo do primeiro quarto do século XX surgiram algumas **inovações técnicas** e descobertas que influenciaram fortemente as experiências seguintes:

- câmara de nevoeiro ou de Wilson
- contador de Geiger-Muller
- circuito de coincidência (Rossi), o primeiro antepassado dos modernos circuitos lógicos utilizados nos computadores.

Cascata de electrões e positrões produzida por raios cósmicos, fotografada numa câmara de nevoeiro controlada por um contador Geiger



Descoberta do neutrão



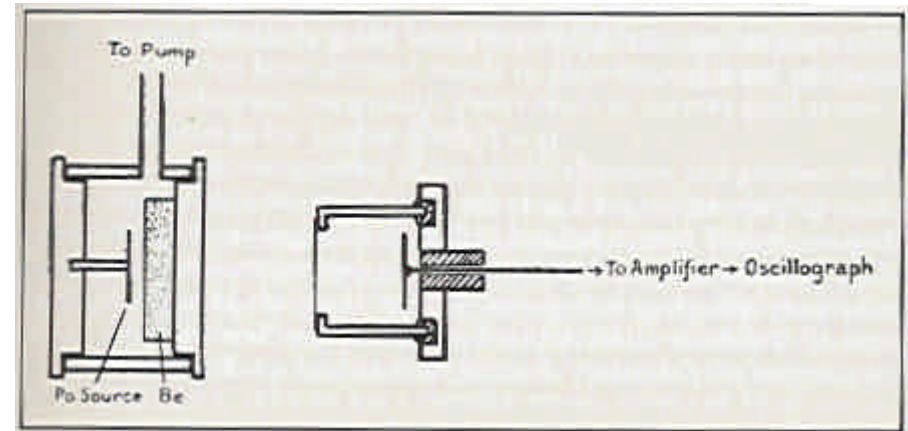
Em 1930 a ciência possuía uma visão simples e elegante do mundo. Três partículas e uma interação, obedecendo aos princípios da teoria quântica e da relatividade, resumiam a constituição microscópica da matéria.

Havia razões para suspeitar da existência do neutrão nos núcleos (composição, spin). E. Rutherford acreditava na existência de uma entidade neutra no núcleo. J. Chadwick realizou uma série de experiências com resultados negativos.

W. Bothe e H. Becker, dois físicos alemães, observaram que quando uma amostra de berílio é bombardeada com partículas α , se produz uma radiação penetrante. Suponham tratar-se de raios X fortemente energéticos.

F. Joliot e I. Curie observaram dois factos surpreendentes: a radiação emitida atravessa facilmente folhas metálicas; ao atravessar um bloco de parafina (composto de carbono e hidrogénio) a radiação provoca a ejeção de prótons com uma energia considerável.

Em 1932, J. Chadwick teve a intuição necessária para associar os resultados experimentais dos Curie à partícula que procurava. Concluiu que o **projectil é uma partícula neutra com uma massa equivalente à do protão**. Era bem o neutrão que procurava há mais de dez anos.



Descoberta do positrão

Anderson trabalhava em Caltech na construção de uma câmara de nevoeiro onde Millikan se interessava pelo espectro de energia dos raios cósmicos.

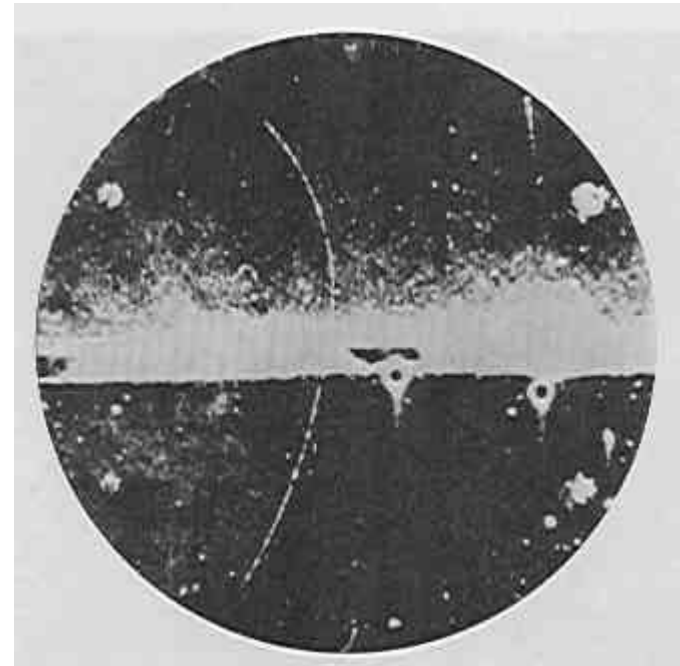
A câmara, colocada num campo magnético, media o momento e carga dos raios cósmicos.

O número de bolhas ao longo da trajectória ajudava a distinguir os protões dos electrões: o protão dá origem a traços mais densos.

Em 1932, Anderson reconheceu alguns traços com deflecção positiva que não podiam ser protões pois a densidade de bolhas era demasiada pequena. Sugeriu que se tratava de electrões movendo-se em sentido contrário.

Anderson colocou uma placa de 6 mm de chumbo no interior da câmara. Ao atravessar a placa a partícula perde energia, o raio de curvatura da trajectória diminui. Pode-se assim determinar o sentido do movimento da partícula.

Na fotografia que mais nitidamente revelava o positrão, a partícula movia-se de baixo para cima! Tratava-se de uma partícula de carga positiva e de massa comparável à do electrão.



Positrão fotografado numa câmara de nevoeiro sujeita a um campo magnético.

Partículas intermediárias das interacções

Classicamente, a repulsão entre dois electrões é explicada em dois passos:

- por um lado, as cargas eléctricas criam na sua vizinhança um campo electromagnético;
- e por outro, as cargas ficam sujeitas a uma força proporcional à intensidade do campo no ponto onde se encontram.

Na teoria quântica o campo electromagnético é quantificado e o **quantum do campo é o fóton** .

A força de interacção é devida à troca de fótons virtuais entre as partículas portadoras de carga eléctrica.

A electrodinâmica quântica não invalida a teoria clássica, mas restringe-lhe o domínio de aplicação:

- Quando o número de fótons trocados é muito grande, o campo pode ser aproximado por uma descrição contínua e a teoria clássica é válida.
- Nos processos envolvendo partículas elementares, e a troca de poucos fótons, a quantificação do campo não pode ser ignorada.

Neutrinos

Aparentemente nos decaimentos β a energia não é conservada!

Nos decaimentos β um núcleo A emite um electrão e transforma-se num núcleo B de acordo com o esquema seguinte:



Nos decaimentos a dois corpos a energia dos produtos é constante. No decaimento β a energia do electrão é dada por:

$$E = c^2 \cdot (m_A^2 - m_B^2 + m_e^2) / (2 m_A)$$

onde m_A e m_B são as massas dos núcleos A e B , m_e é a massa do electrão, e c é a velocidade da luz.

Na desintegração do trítio ${}^3\text{H}_1$, um isótopo de hidrogénio, no isótopo de hélio ${}^3\text{He}_2$ e num electrão, a energia do electrão deveria ser da ordem de 17 keV.

Nos resultados experimentais os electrões detectados têm energias que se distribuem de valores próximos de zero até 17 keV!

Pauli sugeriu que no decaimento β , conjuntamente com o electrão, é emitida uma outra partícula, neutra, que não é detectada nas experiências. Segundo Pauli, estava-se na realidade em presença de um decaimento em três corpos:



Designou a nova partícula por neutrino, que se representa habitualmente pelo símbolo ν .

Interação fraca

Durante o Congresso de Solvay de 1933 as questões relacionadas com o decaimento β foram amplamente debatidas.

Vivia-se novamente um período de grande excitação, o positrão e o neutrão tinham sido descobertos no ano anterior, e a discussão em torno do decaimento β apaixonava os espíritos.

E. Fermi, nesta altura ainda um jovem, encontrou nestes novos elementos os ingredientes necessários para elaborar a sua famosa teoria da desintegração β .

Segundo Fermi, a emissão do electrão e do neutrino resulta da transformação de um neutrão pertencente ao núcleo, num protão:



Comparando as características deste processo com as de fenómenos similares mas de natureza electromagnética, em particular as desintegrações com emissão de fotões γ , Fermi concluiu que uma nova força de interacção está em jogo.

Em particular, os núcleos que decaem com emissão β caracterizam-se por terem tempos de vida relativamente grandes. Este facto significa que a interacção tem uma intensidade muito pequena. Por esta razão, a nova força passou a designar-se por interacção fraca.



Mesões e interacção forte

Um núcleo atómico só pode ser estável se uma força de interacção suficientemente forte, capaz de vencer a repulsão electromagnética entre as cargas positivas, mantiver ligados os protões e os neutrões. Esta força designou-se por interacção forte .

Após a descoberta do neutrão e da reformulação do modelo da composição nuclear, procurava-se uma teoria capaz de explicar a natureza desta interacção. **A primeira teoria da interacção forte veio do Japão em 1934 e o seu autor foi Yukawa.**

Yukawa supôs que, tal como na interacção electromagnética, uma partícula serve de mediadora da interacção forte. A força de ligação entre os protões e os neutrões no núcleo é devida à troca de uma nova partícula, que designou de mesão p (π), ou pião.

O raio de acção ou alcance da interacção forte deve estar limitado às dimensões do núcleo, pois só assim se compreende a ausência de efeitos observáveis à escala macroscópica.

Para explicar o alcance limitado da interacção forte, Yukawa concluiu que o seu mesão devia ter uma massa da ordem de 100 MeV (para comparação, a massa do electrão é de 0.51 MeV e a massa do protão é de 938 MeV).

Descoberta do muão

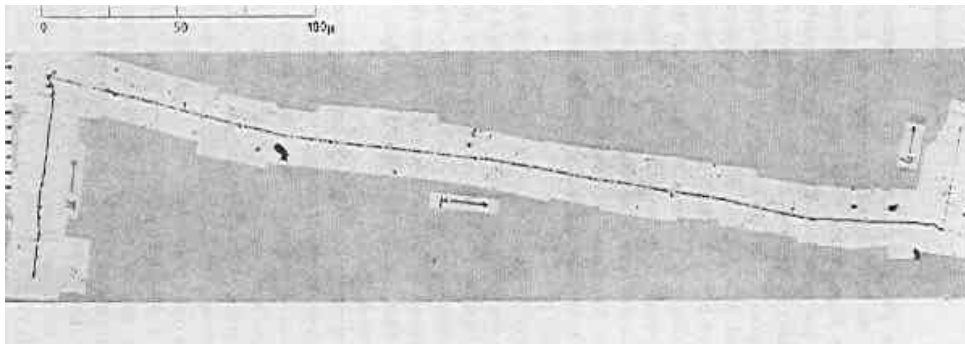
Os estudos dos raios cósmicos mostravam dois tipos de acontecimentos nas câmaras de nevoeiro:

- Cascatas electromagnéticas, ou seja um Chuveiro de electrões, positrões e fotões.
- Traços de partículas que atravessavam, sem se multiplicarem, espessuras significativas de chumbo.

Após inspecção de um grande número de fotografias, concluiu-se que estas partículas penetrantes não podiam ser protões, electrões ou positrões, mas sim **partículas de massa da ordem da centena de MeV**. Passaram a ser designadas por **mesotrões** (partícula que hoje é conhecida por muão m).

Algumas fotografias mostravam muões pouco energéticos que paravam no interior da emulsão fotográfica. Verificou-se que **o muão é instável**, na mesma fotografia via-se a trajectória do muão e a do electrão de desintegração. O electrão é acompanhado de dois neutrinos, $m \rightarrow e + 2n$.

O mesão p de Yukawa foi descoberto em 1947, em placas fotográficas expostas no Pic du Midi.



Uma partícula (o pião) abranda até parar e desintegra-se num muão e num neutrino, $p \rightarrow m + n$. Por sua vez o muão desintegra-se num electrão e em dois neutrinos. O pião tem uma massa de 140 MeV e um tempo de vida médio de 10^{-8} segundos, mais pequeno que a vida média do muão (10^{-6} segundos).

Qual é o lugar do muão na estrutura da matéria ou na descrição das interacções fundamentais?

O muão parecia uma partícula aparentemente inútil.