

Introdução à Física de Partículas

Pedro Abreu
LIP/IST
Lisboa,
Portugal

Adapted from talks given by Rolf Landua and Angel Uranga at CERN

RESSALVA

Estas são aulas sobre Física de Partículas.

**Cobre aproximadamente 100 anos de ideias,
teorias e experiências**

Mais de 30 galardoados com o Prémio Nobel

Muito difícil ser completo, exacto ou profundo

Apenas breve perspectiva das descobertas principais

O Universo está escrito numa linguagem geométrica e só quem compreender essa linguagem poderá vislumbrar os seus mistérios.

(Galileo Galilei, 1564-1642)

O facto mais incompreensível sobre o Universo é de que este parece ser compreensível.

(Albert Einstein, 1879-1955)

Mecânica

Newton

Electro-
magnetismo

Maxwell

Teoria Cinética,
Termodinâmica

Boltzmann

Partículas

Interações

Detectores

Aceleradores (Raios C3smicos e Aceleradores Artificiais)

Electromagn3tico Fraco Forte

1895

1900

1905

1910

1920

1930

1940

1950

1960

1970

1975

1980

1990

2000

2010

e^-

1

3tomo

N3cleo

p^+

n

μ^-

τ^-

p^-

ν_e

ν_μ

τ^-

ν_τ

massa ν

Fot3o

Movimento
Browniano

Relatividade
Restrita

Mec3nica Qu3ntia
Onda/Corp3sculo
Fermi3es / Bos3es

Dirac
Antimat3ria

2

QED

Radio-
actividade

Dcaimento
Beta (Fermi)

Yukawa
Troca
 π

Viola33o
P, C, CP

Bos3es W

Higgs

GUT

SUSY

Supercordas

Unifica33o E-F

C3r
QCD

W

Z

g

3 fam3lias

Electrosc3pio

Contador Geiger

C3mara de Nuvens

Circuito de
Coincid3ncias

C3mara de Bolhas

C3maras de Fios

Computadores em
Aquisi33o de Dados

Detectores
Modernos

Raios C3smicos

Ciclotr3o

Chuveiros de Part3culas

Sincrotr3o

Colis3o e^+e^-

R.C. Energias Extremas

Arrefecimento Estoc3stico

Colis3o p^+p^-

LEP

WWW

GZK + Anisotropia

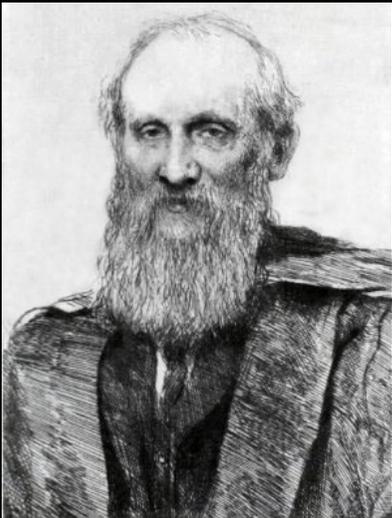
LHC

GRID

Nos idos 1890s, muitos físicos acreditavam que a Física estava finalmente completa, sendo a natureza descrita pela mecânica, termodinâmica, e pela teoria de Maxwell do electromagnetismo.

Tudo o que falta fazer em Física resume-se a preencher o valor da 6ª casa decimal

(Albert Michelson, 1894)



**William Thomson
(Lord Kelvin)**

Mensagem à British Association for the
Advancement of Science, 1900 :

*Não há nada fundamentalmente novo para ser descoberto.
Tudo o que há a fazer é medir com mais precisão...*

(Lord Kelvin, 1900)

Mas Lord Kelvin também mencionou 'nuvens'
no horizonte da Física:

- 1) Radiação do Corpo Negro
- 2) Experiências de resultado nulo de
(Albert)Michelson – (Edward)Morley

1900

Universo = Sistema solar e estrelas à nossa volta (*)

Não se sabia como o Sol produzia a sua Energia

Nada se sabia sobre a estrutura atômica ou os núcleos

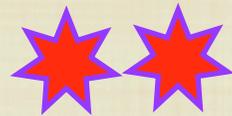
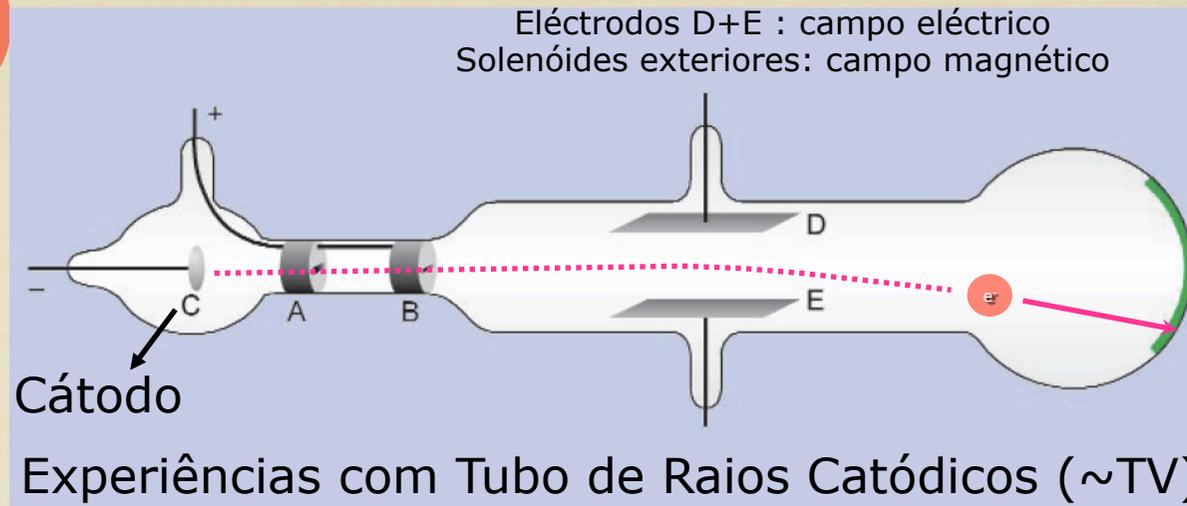
Só duas áreas *conhecidas*: gravidade, electromagnetismo

Ninguém antecipou a incrível jornada em Física nos 100 anos que se seguiram

(*) não havia o conceito de galáxias

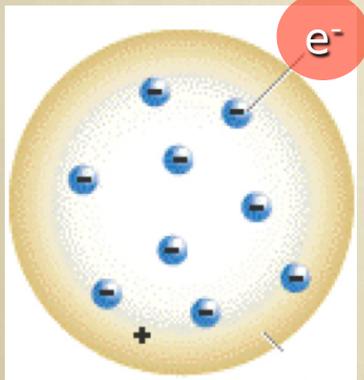


J.J. Thomson

e⁻

'Raios Catódicos' são corpúsculos carregados* com uma única razão carga/massa

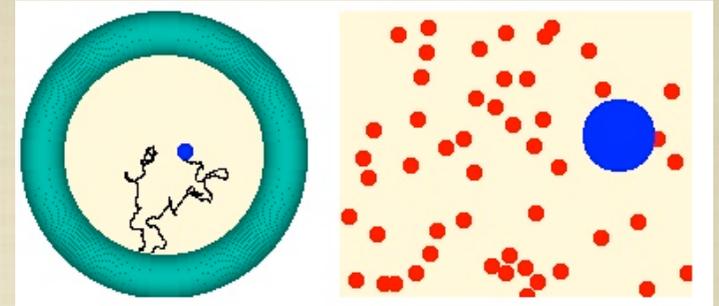
***mais tarde denominados 'electrões'**



Electrões são partículas sub-atômicas!

Modelo do átomo (1904)
'Pudim de passas'

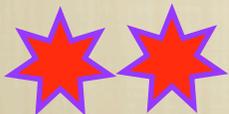
Robert Brown (1827) observa o movimento aleatório de partículas suspensas num fluido



Albert Einstein (1905) explica este efeito usando a teoria cinética, mostrando que o movimento é devido ao bombardeamento das partículas por moléculas do fluido, fornecendo fórmulas para medir o N^o de Avogadro (Tese de Doutorado à ETH, Zurique)

Francois Perrin (1907) usa as fórmulas de Einstein para confirmar a teoria e mede N_A

$$\langle x^2 \rangle = \frac{RT}{3\pi Na\eta} t$$

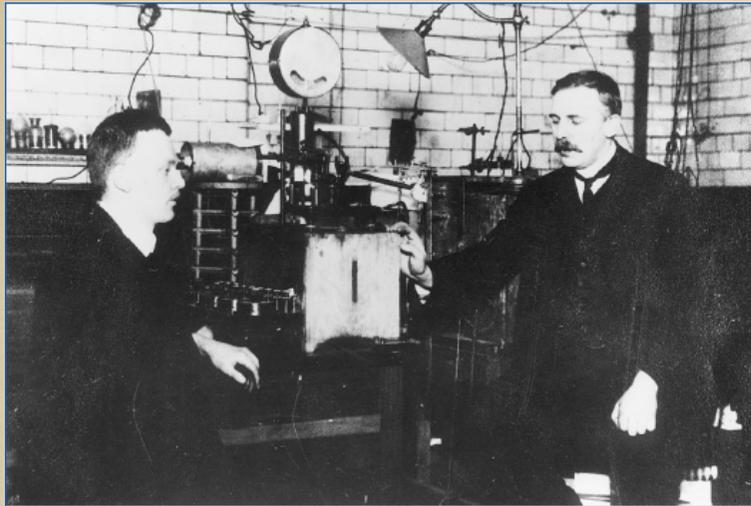


A Existência dos Átomos ficou provada

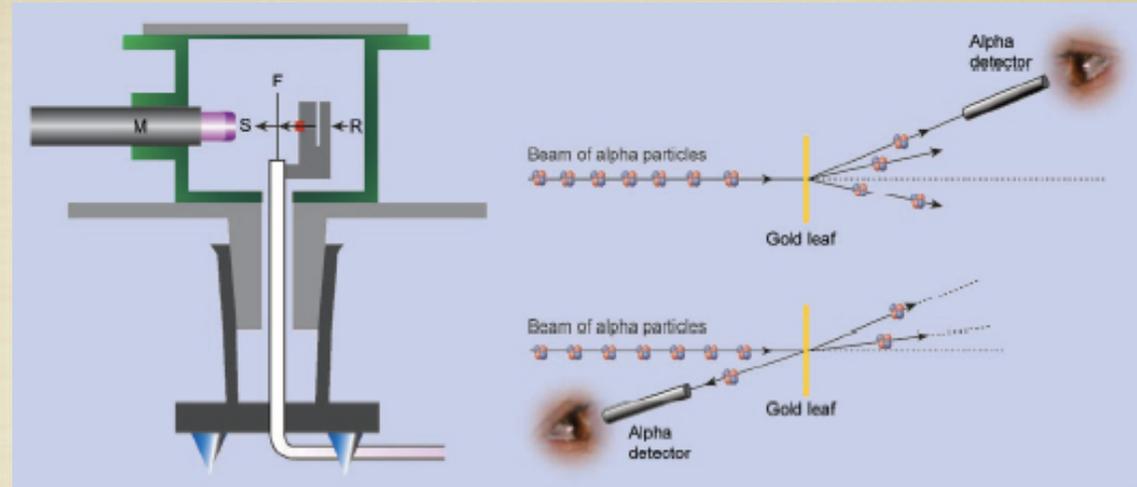
PARTÍCULAS

1911

Núcleo



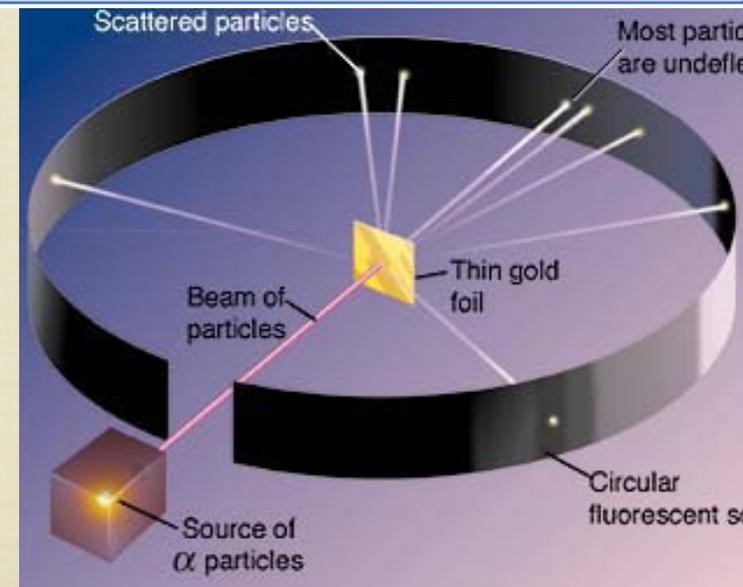
Ernest Rutherford (dta.) e Hans Geiger(esq.) em Manchester



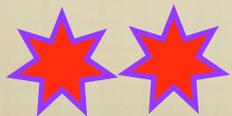
Geiger e Marsden dispararam partículas alfa (${}^4\text{He}$) sobre folhas Ouro
1 em 8000 partículas alfa voltaram para trás (ângulo $> 90^\circ$)

Isto não podia ser explicado pelo 'Modelo do Pudim de Passas'
Explicação de Rutherford:

toda a carga positiva do átomo está concentrada num núcleo central!



À distância mínima \mathbf{D} , repulsão de Coulomb = energia cinética $\rightarrow \mathbf{D} \sim 27 \times 10^{-15} \text{ m}$ (valor real: 7.3)



Descoberta do Núcleo

Núcleo



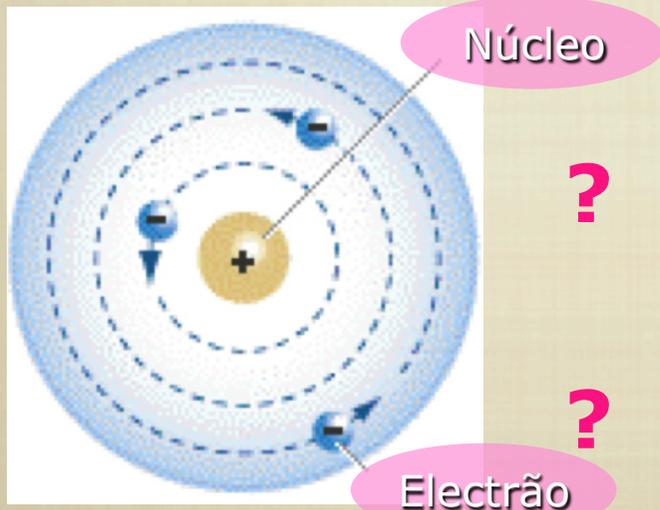
Analogia com o dia-a-dia:

Se o átomo tivesse o tamanho de um estádio de futebol,

O núcleo teria o tamanho da cabeça de um alfinete no centro do campo

e uma questão para mais tarde:

Que força vence a poderosíssima força de repulsão eléctrica ?



? Como podiam os electrões andar à volta do núcleo sem perder energia ?

? O Núcleo é feito de quê ?

quase-modelo de Rutherford
para um átomo vazio

J. J. Balmer (1885) mediu o espectro de emissão do Hidrogénio

656.210 nm

486.074 nm

434.010 nm

410.12 nm



A sua fórmula empírica:

$$\lambda = \frac{hm^2}{(m^2 - n^2)}$$

Niels Bohr visitou Rutherford em 1913

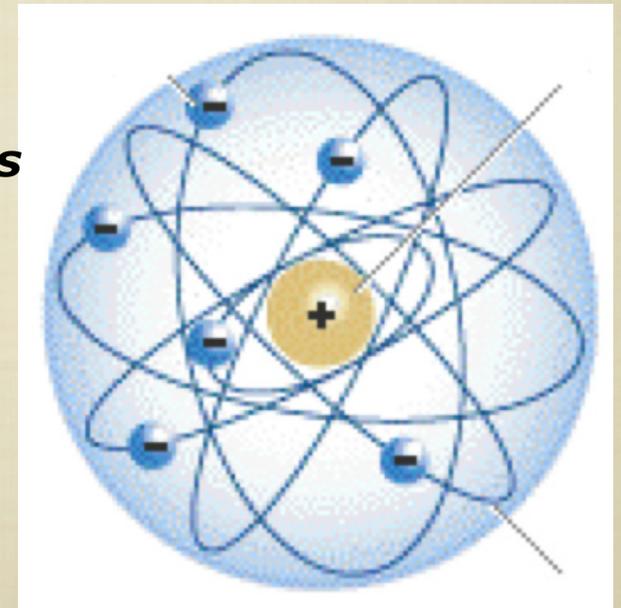
foi o 1º a aplicar as ideias de quantificação aos átomos

- Quantificação do Momento Angular \mathbb{L} Níveis de Energia

$$\mathbf{L} = n \cdot \hbar = n \cdot \frac{h}{2\pi}$$

$$E_n = \frac{-13.6 \text{ eV}}{n^2}$$

- Emissão de radiação só durante as transições
- Energia da radiação = diferença dos níveis de energia



PARTÍCULAS

1922-1927

Part. = Onda

Demorou-se ainda 10 anos para começar a compreender as misteriosas regras do mundo sub-atômico: Mecânica Quântica.

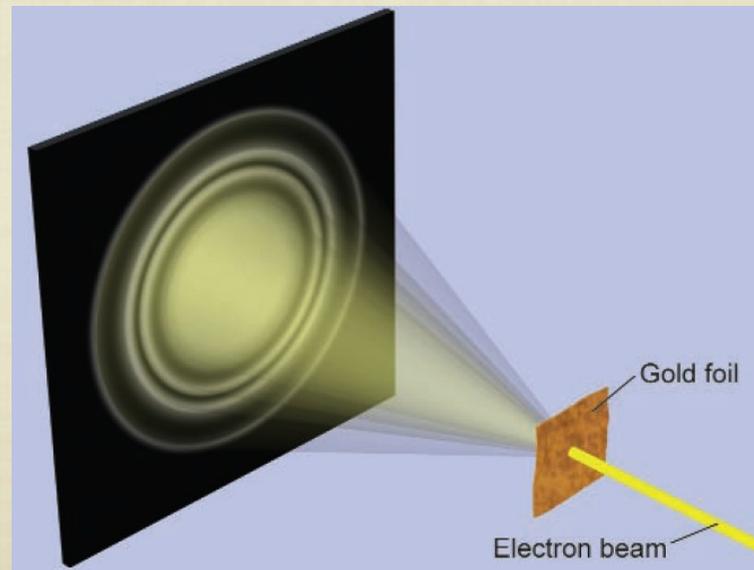


Louis de Broglie (1924)

Partículas que se comportam com ondas!



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



*hipótese confirmada (1927) por difracção de electrões (Davisson/Germer)

PARTÍCULAS

1922-1927

Que Ondas?

Função de Onda de Probabilidade

Descrição Excelente para
 $v \ll c$

Partículas = Ondas ψ descritas por uma Equação de Ondas

De $E=T+V=(P^2/2m)+V$, e com $\psi = \psi(\mathbf{p} \cdot \mathbf{r} + E \cdot t)$

$$H\psi(\mathbf{r}, t) = (T + V) \psi(\mathbf{r}, t) = \left[-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\mathbf{r}) \right] \psi(\mathbf{r}, t) = i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t}(\mathbf{r}, t)$$



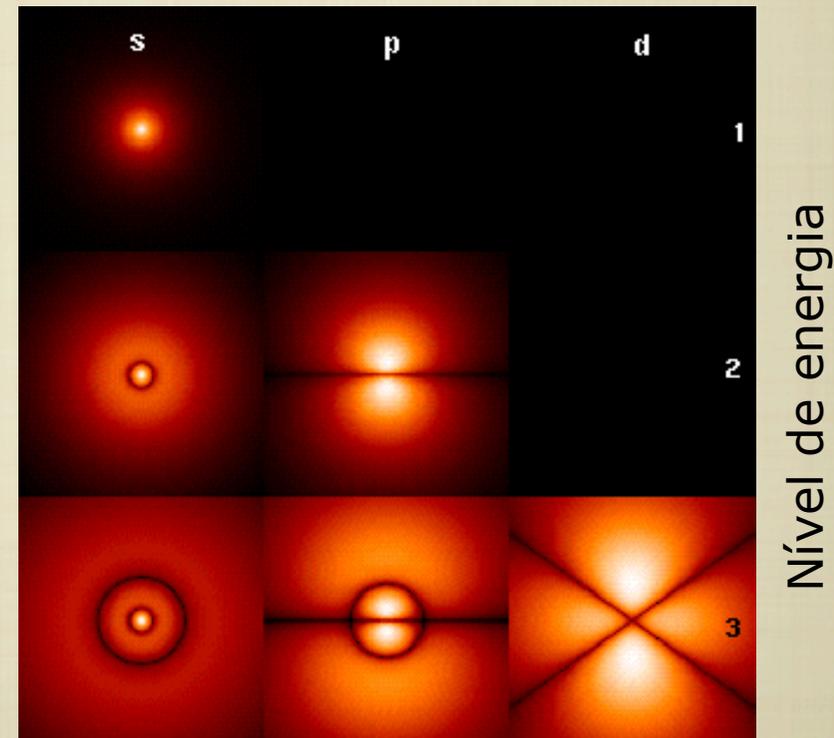
Schrödinger
1926

ψ = função complexa (onda): Interferência!

Interpretação (Bohr, 1927):

ψ = Amplitude de probabilidade

$|\psi|^2 = \psi^* \psi = \text{Probabilidade}$



Funções de onda do electrão no átomo de H
('ondas 3D estacionárias')



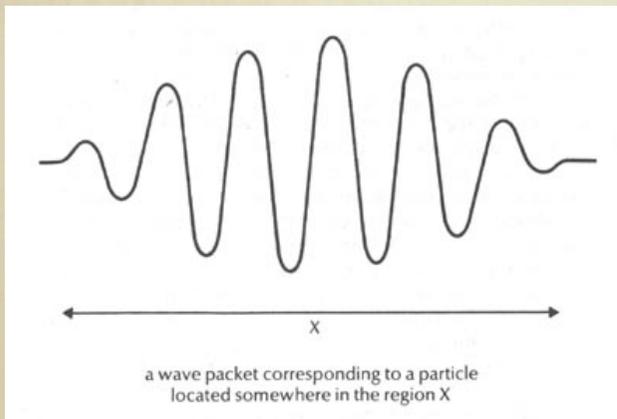
Heisenberg (1925)

Princípio de Incerteza

Se as partículas também são ondas, então tem de existir um limite para a precisão nas medidas simultâneas de:

Posição e Momento

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar/2$$



Analogia:

Medida do tempo Δt de um sinal leva a uma incerteza na frequência (Transform. Fourier):

$$\Delta f \Delta t \sim 1$$

Energia e Tempo

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar/2$$

PARTÍCULAS

1922-1927

SPIN

Spin



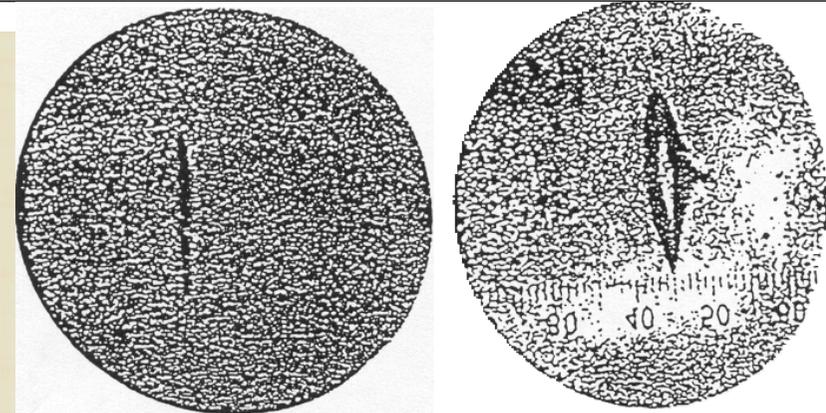
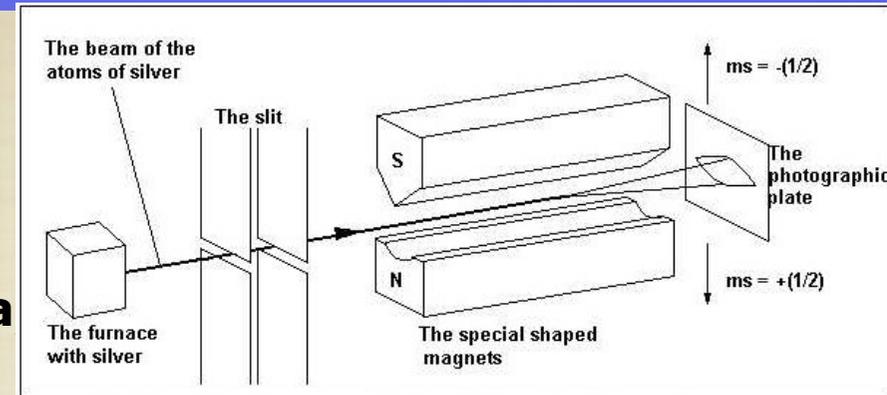
- Experiência de Stern-Gerlach (1922)

estados de rotação intrínsecos da partícula
polarização esquerda ou direita da onda Ψ

- Kronig; Uhlenbeck, Goudsmit (1925):

“spin”: $+1/2, -1/2$ ($\times \hbar \equiv h/2\pi$)

- Pauli (1924): Princípio de Exclusão:
apenas 2 electrões em cada orbital



Fermiões e Bosões

- **Fermiões**: Partículas com spin semi-inteiro (electrão, próton, etc)

Obedecem ao Princípio de exclusão de Pauli:

Não podem existir 2 fermiões no mesmo estado quântico

- **Bosões**: Partículas com spin inteiro (fotão, etc)

Não se aplica o princípio de exclusão de Pauli.

Sistemas de bosões no mesmo estado quântico (p.ex. laser)

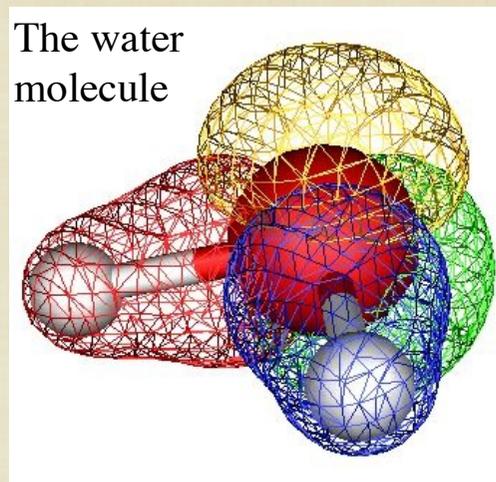
→ **Impenetrabilidade da matéria**

Com a Física Quântica foi possível explicar a estrutura na Natureza



Linus Pauling (1928)

Natureza das Ligações Químicas



Átomos, Moléculas e a origem da estrutura foram compreendidas.

E o núcleo atômico? Não houve grandes progressos de 1911 - 1932.

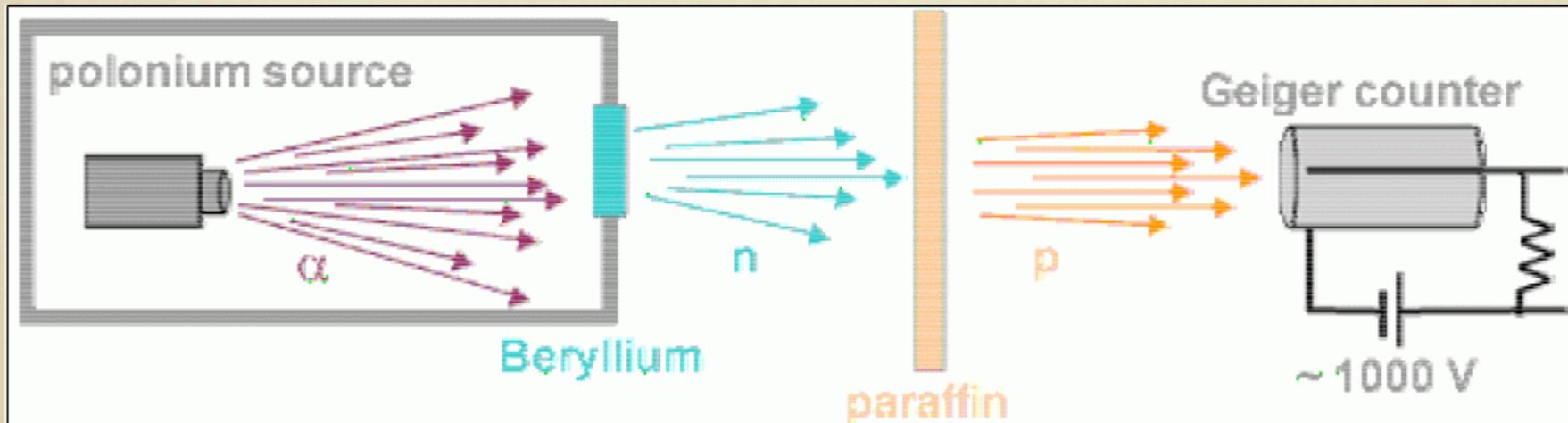
Mas então, de que é feito o núcleo ?

exemplo: He-4 tem $Z=2$; as outras 2 unidades de massa são de quê ?

Heisenberg: Protões e electrões (4 protões e 2 electrões)?

Não pode ser: o princípio de incerteza não permite a presença de electrões no núcleo!

Chadwick (1932): o **neutrão**

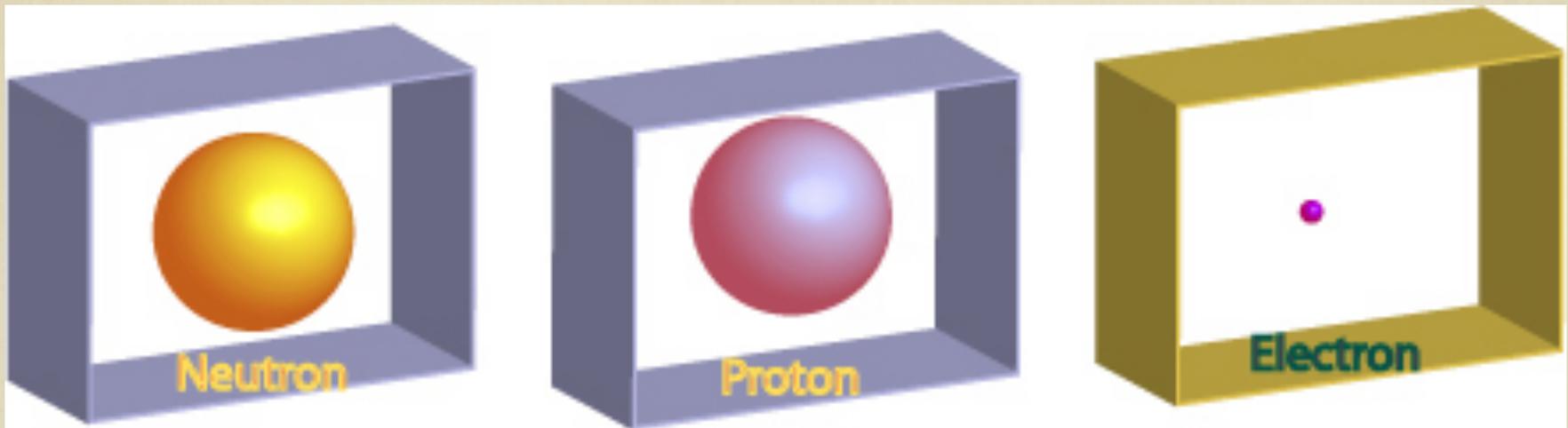


Da cinemática: Massa do neutrão \sim massa do protão

O que mantém o núcleo coeso? Força forte de alcance reduzido?

PARTÍCULAS

Espectro de Partículas Elementares (1932)



neutrão

protão

electrão

**Simples, fácil de fixar
Ainda ensinado nas Escolas**