Introdução à Física de Partículas e à Cosmologia

do Infinitamente pequeno…ao Infinitamente grande!

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 e Cosmologia.

Cobre aproximadamente 100 anos de ideias, teorias e experiências

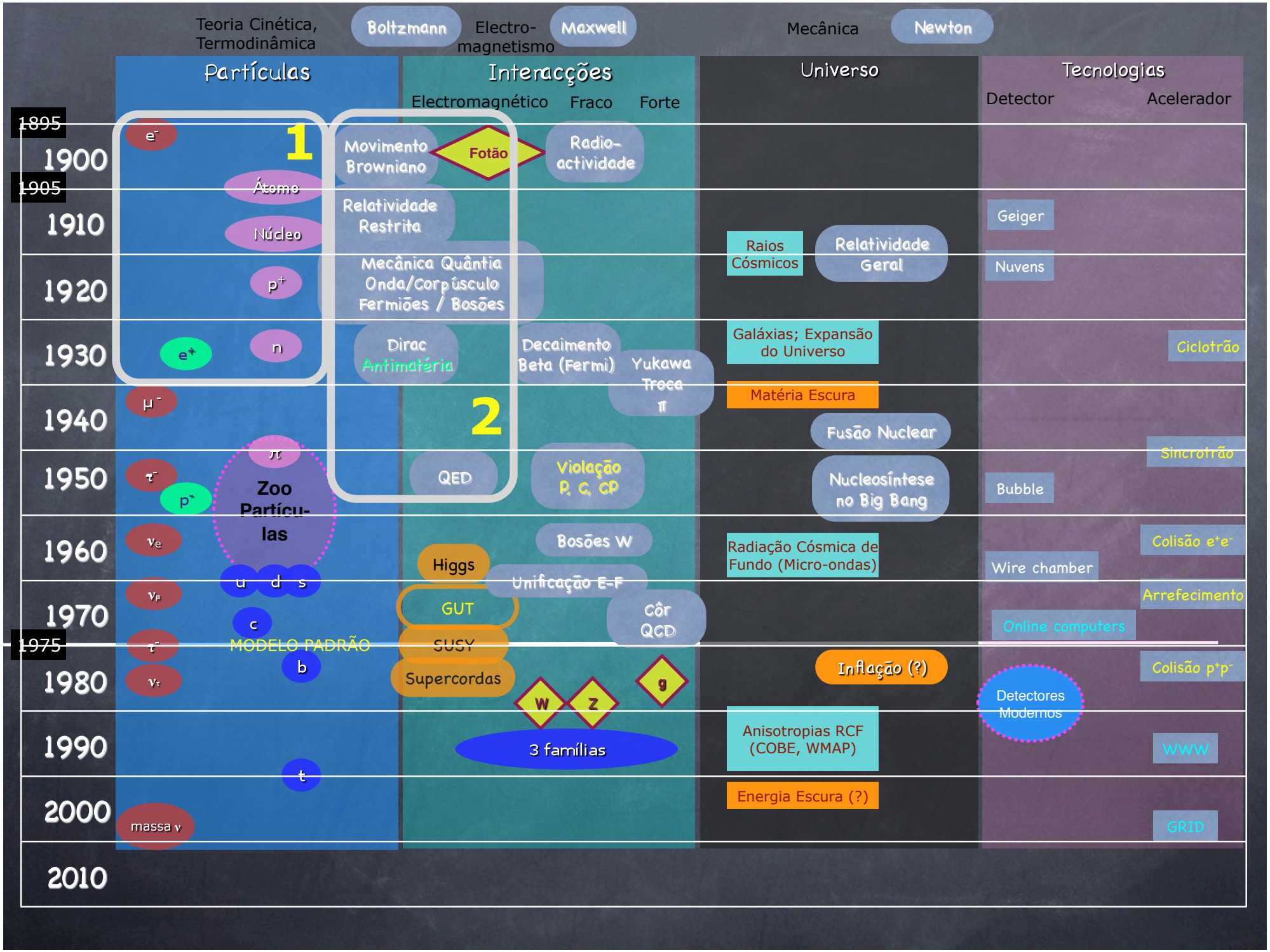
Mais de 50 galardoados com o Prémio Nobel

Muito difícil ser completo, exacto ou profundo

Apenas breve perspectiva das descobertas principais

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

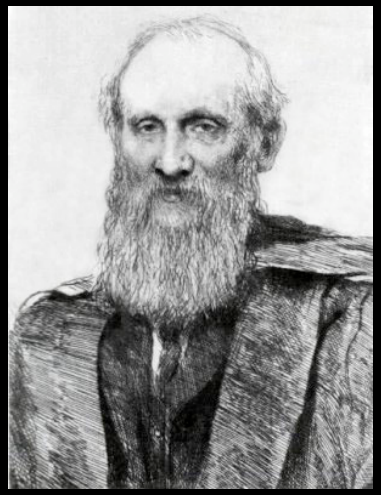
(Albert Einstein, 1879-1955)


Teoria Cinética, Termodinâmica
Boltzmann
Electro-magnetismo
Maxwell
Mecânica
Newton
Partículas
Interacções
Universo
Tecnologias
Electromagnético
Fraco
Forte
Detector
Acelerador
1895
1900
1905
1910
1920
1930
1940
1950
1960
1970
1975
1980
1990
2000
2010
e⁻
1
Movimento Browniano
Fotão
Radio-actividade
Átomo
Relatividade Restrita
Núcleo
Mecânica Quântia Onda/Corpúsculo Fermiões / Bosões
p⁺
n
e⁺
Dirac Antimatéria
Decaimento Beta (Fermi)
Yukawa Troca π
μ⁻
2
π
τ⁻
p⁻
Zoo Partícu-las
QED
Violação P, C, CP
νe
Bosões W
Higgs
u
d
s
νμ
Unificação E-F
GUT
Côr QCD
c
MODELO PADRÃO
SUSY
ντ
b
Supercordas
W
Z
g
3 famílias
t
massa ν
Raios Cósmicos
Relatividade Geral
Galáxias; Expansão do Universo
Matéria Escura
Fusão Nuclear
Nucleosíntese no Big Bang
Radiação Cósmica de Fundo (Micro-ondas)
Inflação (?)
Anisotropias RCF (COBE, WMAP)
Energia Escura (?)
Geiger
Nuvens
Ciclotrão
Sincrotrão
Bubble
Colisão e⁺e⁻
Wire chamber
Arrefecimento
Online computers
Colisão p⁺p⁻
Detectores Modernos
WWW
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 atómica ou os núcleos

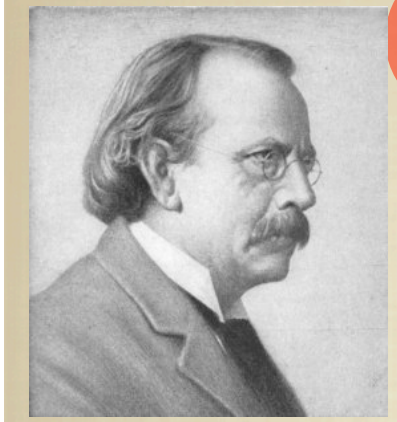
Só duas áreas *conhecidas*: gravidade, electromagnetismo

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

(*) não havia o conceito de galáxias

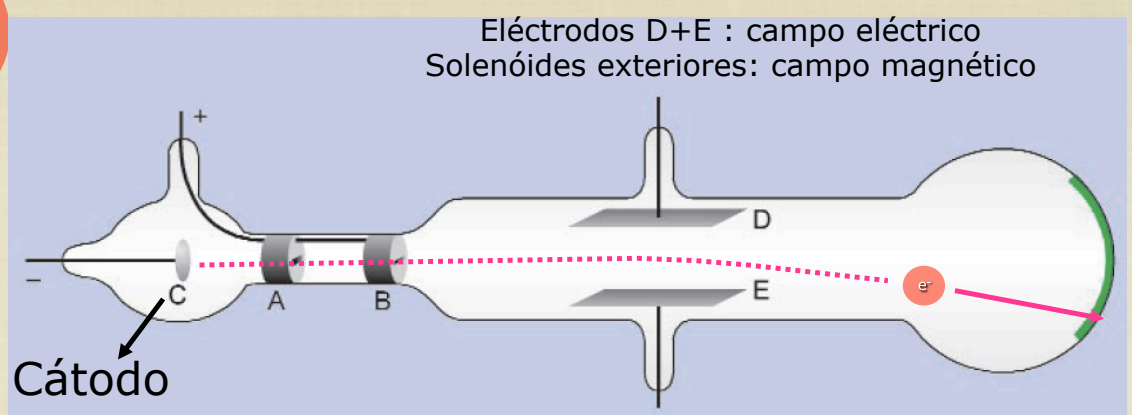
1 PARTÍCULAS

1897



J.J. Thomson

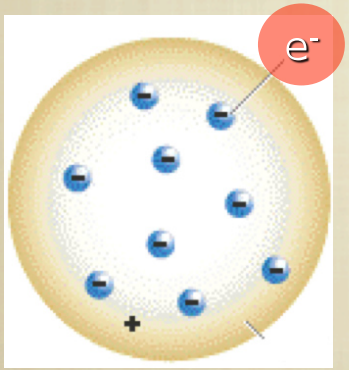
e^-



Experiências com Tubo de Raios Catódicos (~TV)

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

***mais tarde denominados 'electrões'**



Modelo do átomo (1904)
'Pudim de passas'

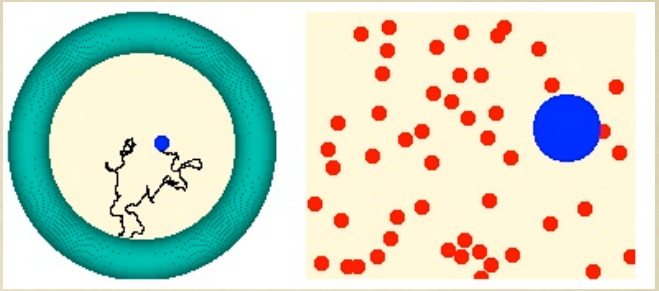
Electrões são partículas sub-atómicas!

Átomo

PARTÍCULAS

1905

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



Albert Einstein (1905) explica este efeito usando a teoria cinética, mostrando que o movimento é devido ao bombardeamento das partículas por moléculas do fluído, fornecendo fórmulas para medir o Nº de Avogadro (Tese de Doutoramento à ETH, Zurique)

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

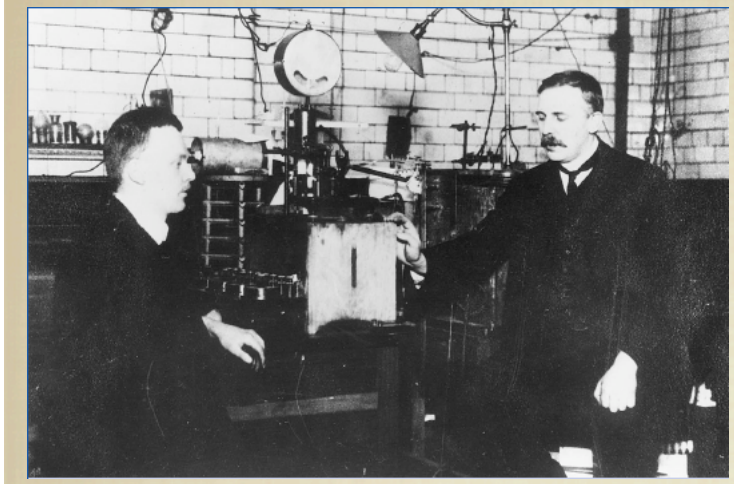
$$\left\langle x^2 \right\rangle = \frac{RT}{3\pi N a \eta} t$$

A Existência dos Átomos ficou provada

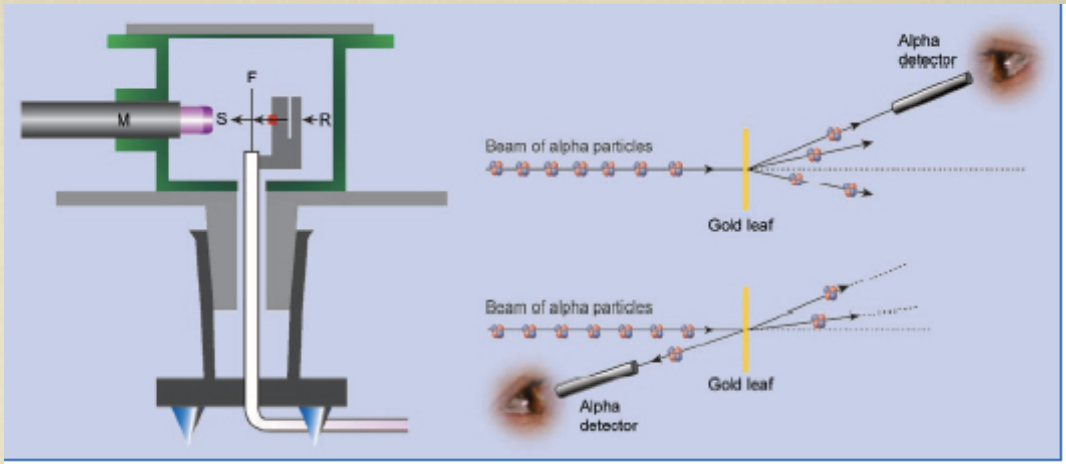
PARTÍCULAS

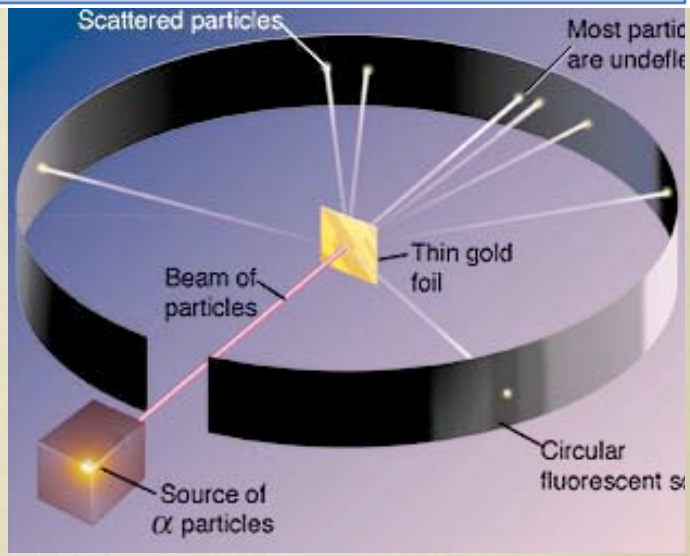
Núcleo

1911



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





Geiger e Marsden dispararam partículas alfa (^{4}He) sobre folhas Ouro

1 em 8000 partículas alfa voltaram para trás (ângulo > 90°)

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!

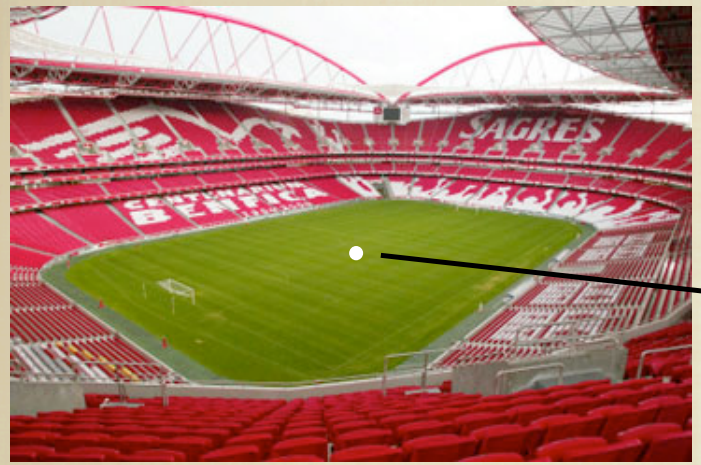
À distância mínima **D**, repulsão de Coulomb = energia cinética ⇒ **D** ~ 27 $\times 10^{-15}$ m (valor real: 7.3)

Descoberta do Núcleo

PARTÍCULAS

Núcleo

1911

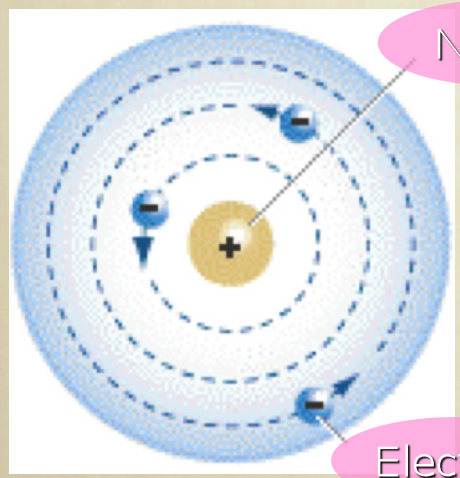


Analogia com o dia-a-dia:

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 ?



quase-modelo de Rutherford
para um átomo vazio

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

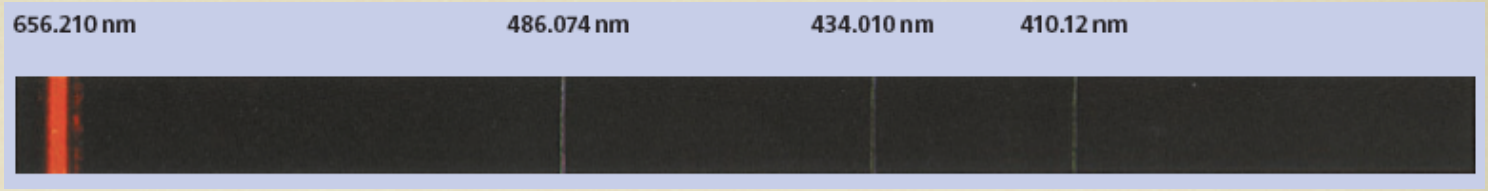
? **O Núcleo é feito de quê ?**

PARTÍCULAS

Quantificação

1913

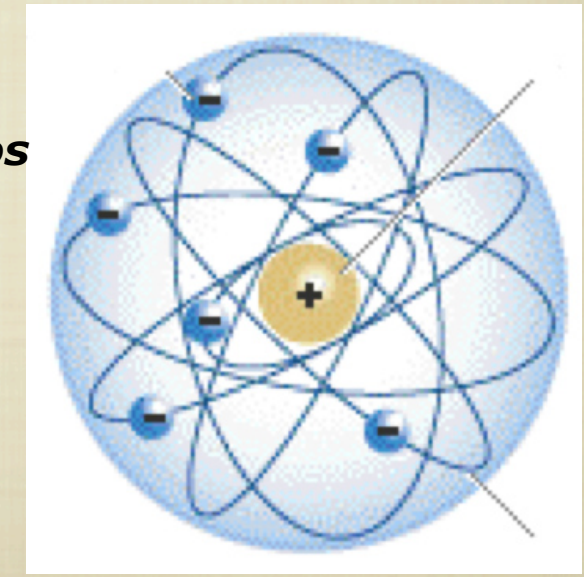
J. J. Balmer (1885) mediu o espectro de emissão do Hidrogénio



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 ⇒ Níveis de Energia

$$\mathbf{L} = n \cdot \hbar = n \cdot \frac{h}{2\pi} \qquad E_n = \frac{-13.6\ \text{eV}}{n^2}$$

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

PARTÍCULAS

Part.=Onda

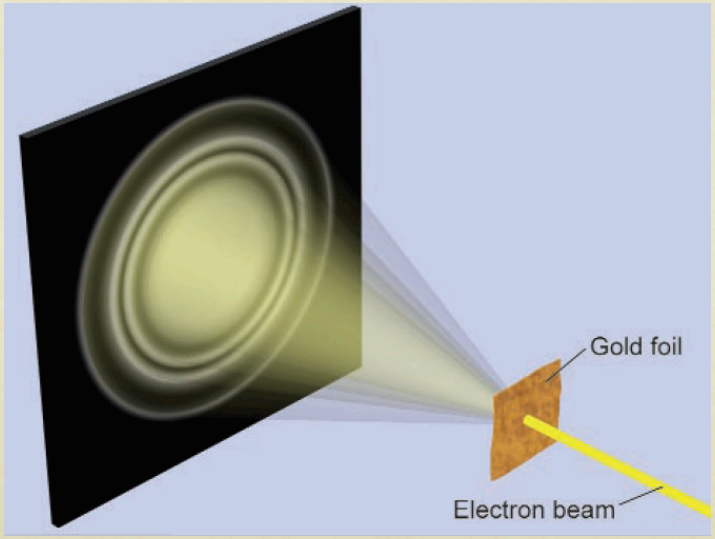
1922-1927

Demorou-se ainda 10 anos para começar a compreender as misteriosas regras do mundo sub-atómico: 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

Incerteza

1922-1927

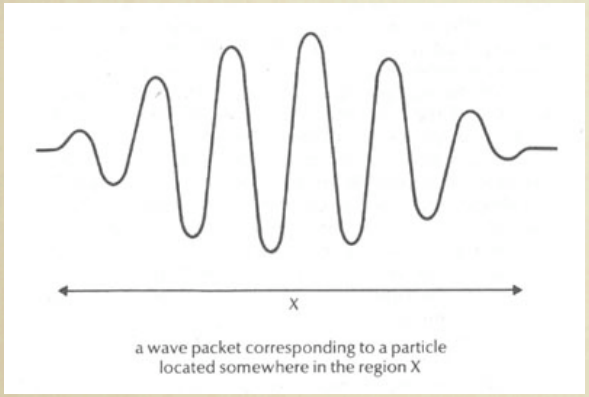
Heisenberg (1925)

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

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$



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

$$\Delta E \Delta t \geq \hbar$$

PARTÍCULAS

Que Ondas?

1922-1927

Schrödinger
1926

Função de Onda de Probabilidade

Descrição Excelente para
v << c

Partículas = Ondas ⇒ descritas por uma Equação de Ondas

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

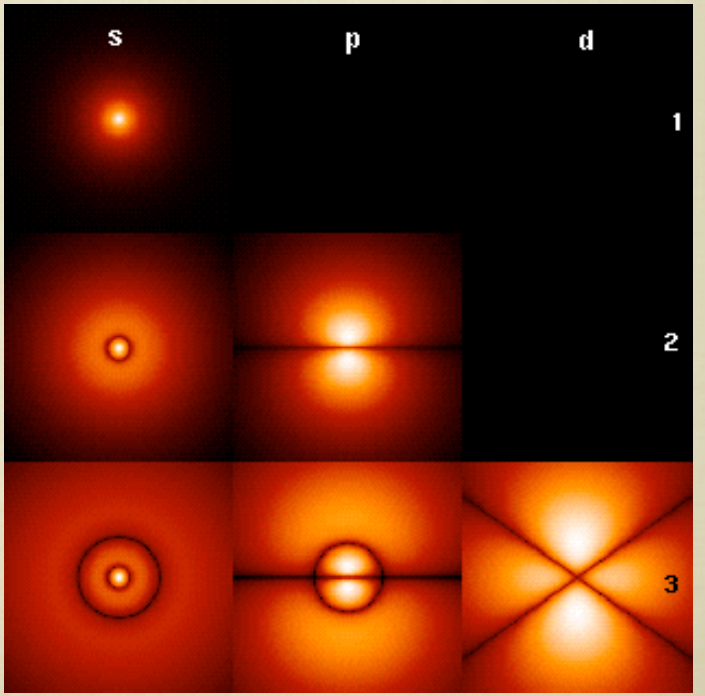
$$H\psi(\mathbf{r},t) = (T+V)\,\psi(\mathbf{r},t) = \left[-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 + V(\mathbf{r})\right]\psi(\mathbf{r},t) = i\hbar\frac{\partial\psi}{\partial t}(\mathbf{r},t)$$

ψ = função complexa (onda): Interferência!

Interpretação (Bohr, 1927):

ψ = Amplitude de probabilidade

$|\psi|^2 = \psi^*\psi$ = **Probabilidade**



Nível de energia

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

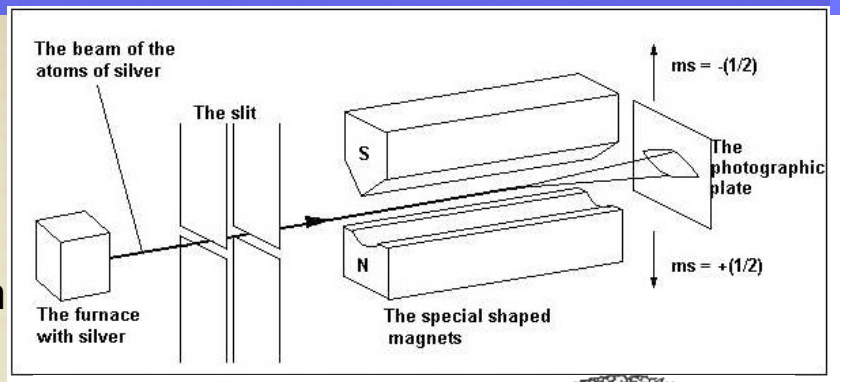
PARTÍCULAS

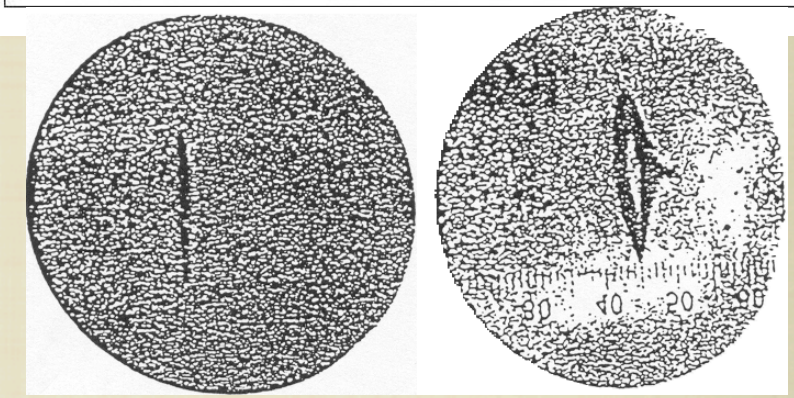
SPIN

1922-1927

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 (x h/2π)
- Pauli (1924): Princípio de Exclusão:
  apenas 2 electrões em cada orbital

Fermiões e Bosões

-**Fermiões**: Partículas com spin semi-inteiro (electrão, protão, etc)
Obedecem ao Principio de exclusão de Pauli:
Não podem existir 2 fermiões no mesmo estado quântico

-**Bosões**: Partículas con 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**

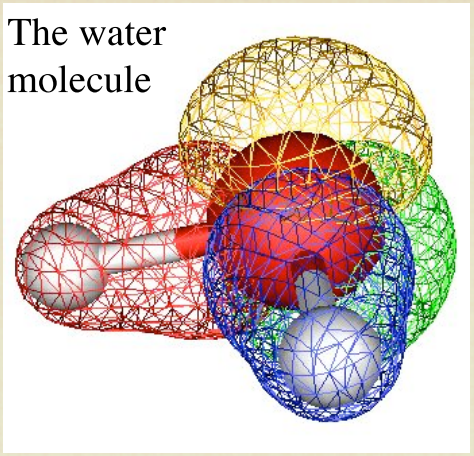
PARTÍCULAS

1928

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 atómico? Não houve grandes progressos de 1911 - 1932.

PARTÍCULAS

n

1932

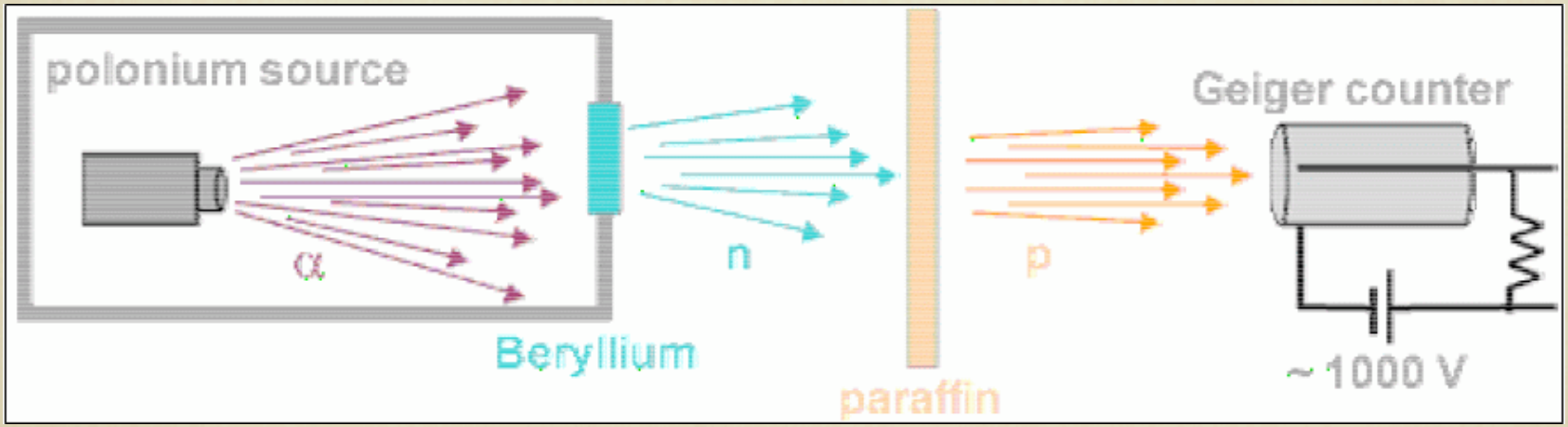
Mas então, de que é feito o núcleo ?

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

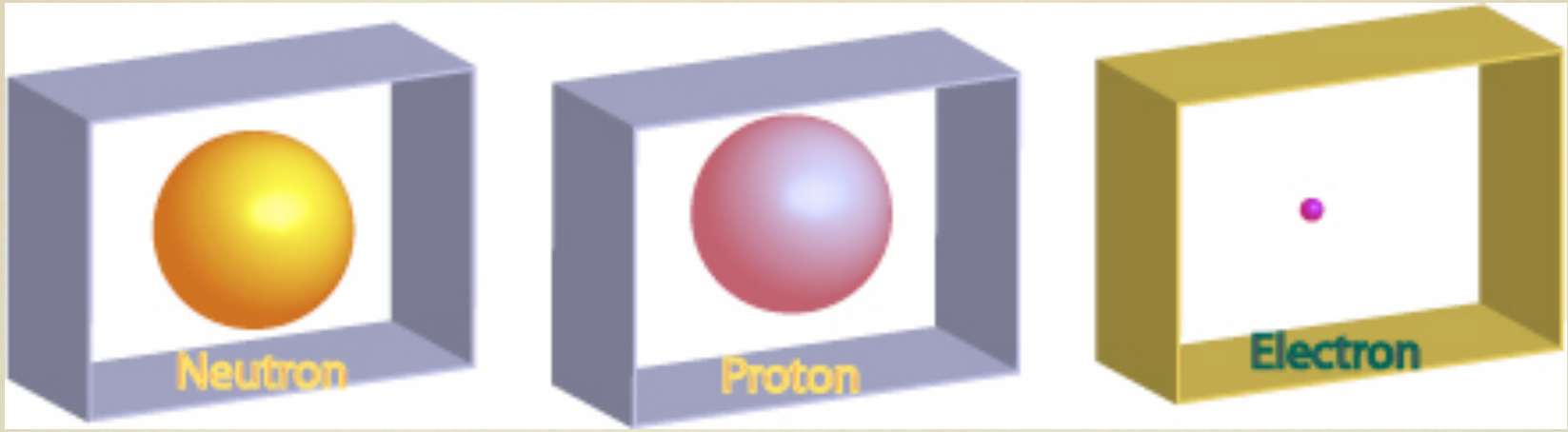


Da cinemática: Massa do neutrão ~ massa do protão

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