

Introdução à Física de Partículas e à Cosmologia

Pedro Abreu
LIP/IST
Lisboa,
Portugal

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

RESSALVA

Estas aulas são 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)

Preâmbulo: do que falamos nós?

Standard Model of FUNDAMENTAL PARTICLES AND INTERACTIONS

The Standard Model is a quantum theory that summarizes our current knowledge of the physics of fundamental particles and fundamental interactions (interactions are manifested by forces and by decay rates of unstable particles).

FERMIONS

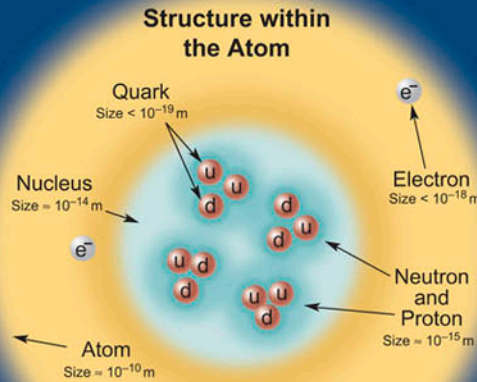
matter constituents
spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...

BOSONS

force carriers
spin = 0, 1, 2, ...

Leptons spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c ²	Electric charge
ν_e lightest neutrino*	$(0-0.13) \times 10^{-9}$	0
e electron	0.000511	-1
ν_μ middle neutrino*	$(0.009-0.13) \times 10^{-9}$	0
μ muon	0.106	-1
ν_τ heaviest neutrino*	$(0.04-0.14) \times 10^{-9}$	0
τ tau	1.777	-1

Quarks spin = 1/2		
Flavor	Approx. Mass GeV/c ²	Electric charge
u up	0.002	2/3
d down	0.005	-1/3
c charm	1.3	2/3
s strange	0.1	-1/3
t top	173	2/3
b bottom	4.2	-1/3



Unified Electroweak spin = 1		
Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
γ photon	0	0
W^-	80.39	-1
W^+	80.39	+1
Z^0 Z boson	91.188	0

Strong (color) spin = 1		
Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
g gluon	0	0

Color Charge
Only quarks and gluons carry "strong charge" (also called "color charge") and can have strong interactions. Each quark carries three types of color charge. These charges have nothing to do with the colors of visible light. Just as electrically-charged particles interact by exchanging photons, in strong interactions, color-charged particles interact by exchanging gluons.

Quarks Confined in Mesons and Baryons

Quarks and gluons cannot be isolated – they are confined in color-neutral particles called hadrons. This confinement (binding) results from multiple exchanges of gluons among the color-charged constituents. As color-charged particles (quarks and gluons) move apart, the energy eventually is converted into new quark-antiquark pairs. This energy eventually is converted into new quarks and gluons, which then combine into hadrons; these

<http://www.cpepphysics.org/particles.html>

Properties of the Interactions

The strengths of the interactions (forces) are shown relative to the strength of the electromagnetic force for two u quarks separated by the specified distances.

Property	Gravitational Interaction	Weak Interaction (Electroweak)	Electromagnetic Interaction	Strong Interaction
Acts on:	Mass – Energy	Flavor	Electric Charge	Color Charge
Particles experiencing:	All	Quarks, Leptons	Electrically Charged	Quarks, Gluons
Particles mediating:	Graviton (not yet observed)	W^+ W^- Z^0	γ	Gluons
Strength at $\left\{ \begin{array}{l} 10^{-16} \text{ m} \\ 3 \times 10^{-17} \text{ m} \end{array} \right.$	10^{-41} 10^{-41}	0.8 10^{-4}	1 1	25 60

Visit the award-winning web feature *The Particle Adventure* at **ParticleAdventure.org**

This chart has been made possible by the generous support of:

U.S. Department of Energy
U.S. National Science Foundation
Lawrence Berkeley National Laboratory

©2008 Contemporary Physics Education Project. CPEP is a non-profit organization of teachers, physicists, and educators. For more information see

CPEPweb.org

*See the neutrino paragraph below.
Spin is the intrinsic angular momentum of particles. Spin is given in units of \hbar , which is the quantum unit of angular momentum where $\hbar = h/2\pi = 6.58 \times 10^{-25} \text{ GeV s} = 1.05 \times 10^{-34} \text{ J s}$.

Electric charges are given in units of the proton's is 1.60×10^{-19} coulombs.

The energy unit of particle physics is the electron volt in crossing a potential difference of one (remember $E = mc^2$) where $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-10} \text{ J}$. The proton is $0.938 \text{ GeV}/c^2 = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$.

Neutrinos

Neutrinos are produced in the sun, supernovae, reactors, accelerator collisions, and many other processes. Any produced neutrino can be described as one of three neutrino flavor states ν_e , ν_μ , or ν_τ , labelled by the type of charged lepton associated with its production. Each is a defined quantum mixture of the three definite mass neutrinos ν_1 , ν_2 , and ν_3 for which currently allowed mass ranges are shown in the table. Further exploration of the properties of neutrinos may yield powerful clues to puzzles about matter and antimatter and the evolution of stars and galaxy structures.

Matter and Antimatter

For every particle type there is a corresponding antiparticle type, denoted by a bar over the particle symbol (unless + or - charge is shown). Particle and antiparticle have identical mass and spin but opposite charges. Some electrically neutral bosons (e.g., Z^0 , γ , and $\eta_c = c\bar{c}$ but not $K^0 = d\bar{s}$) are their own antiparticles.

Particle Processes

These diagrams are an artist's conception. Blue-green shaded areas represent the cloud of gluons.

A free neutron (udd) decays to a proton (uud), an electron, and an antineutrino via a virtual (mediating) W^- boson. This is neutron β (beta) decay.

An electron and positron (antielectron) colliding at high energy can annihilate to produce B^0 and \bar{B}^0 mesons via a virtual Z boson or a virtual photon.

Universe Accelerating?

The expansion of the universe appears to be accelerating. Is this due to Einstein's Cosmological Constant? If not, will experiments reveal a new force of nature or even extra (hidden) dimensions of space?

Why No Antimatter?

Matter and antimatter were created in the Big Bang. Why do we now see only matter except for the tiny amounts of antimatter that we make in the lab and observe in cosmic rays?

Dark Matter?

Invisible forms of matter make up much of the mass observed in galaxies and clusters of galaxies. Does this dark matter consist of new types of particles that interact very weakly with ordinary matter?

Origin of Mass?

In the Standard Model, for fundamental particles to have masses, there must exist a particle called the Higgs boson. Will it be discovered soon? Is supersymmetry theory correct in predicting more than one type of Higgs?

Partículas e Interações!

FERMIONS

matter constituents
spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...

BOSONS

force carriers
spin = 0, 1, 2, ...

Leptons spin = 1/2

Flavor	Mass GeV/c ²	Electric charge
ν_L lightest neutrino*	$(0-0.13)\times 10^{-9}$	0
e electron	0.000511	-1
ν_M middle neutrino*	$(0.009-0.13)\times 10^{-9}$	0
μ muon	0.106	-1
ν_H heaviest neutrino*	$(0.04-0.14)\times 10^{-9}$	0
τ tau	1.777	-1

Quarks spin = 1/2

Flavor	Approx. Mass GeV/c ²	Electric charge
u up	0.002	2/3
d down	0.005	-1/3
c charm	1.3	2/3
s strange	0.1	-1/3
t top	173	2/3
b bottom	4.2	-1/3

Unified Electroweak spin = 1

Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
γ photon	0	0
W⁻	80.39	-1
W⁺ W bosons	80.39	+1
Z⁰ Z boson	91.188	0

Strong (color) spin = 1

Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
g gluon	0	0



Properties of the Interactions

The strengths of the interactions (forces) are shown relative to the strength of the electromagnetic force for two u quarks separated by the specified distances.

Property	Gravitational Interaction	Weak Interaction (Electroweak)	Electromagnetic Interaction	Strong Interaction
Acts on:	Mass – Energy	Flavor	Electric Charge	Color Charge
Particles experiencing:	All	Quarks, Leptons	Electrically Charged	Quarks, Gluons
Particles mediating:	Graviton (not yet observed)	W⁺ W⁻ Z⁰	γ	Gluons
Strength at				
$\left\{ \begin{array}{l} 10^{-18} \text{ m} \\ 3 \times 10^{-17} \text{ m} \end{array} \right.$	10^{-41} 10^{-41}	0.8 10^{-4}	1 1	25 60

Fim do preâmbulo!

Mecânica

Newton

Electro-magnetismo

Maxwell

Teoria Cinética, Termodinâmica

Boltzmann

Partículas

Interações

Detectores / Aceleradores

Universo (Raios Cósmicos e Cosmologia)

1895

1900

1905

1910

1920

1930

1940

1950

1960

1970

1975

1980

1990

2000

2010

1

e^-

Átomo

Núcleo

p^+

e^+

n

Electromagnético Fraco Forte

Movimento Browniano

Fotão

Radio-actividade

Relatividade Restrita

Mecânica Quântica Onda/Corpúsculo Fermiões / Bosões

Dirac

Antimatéria

Dcaimento Beta (Fermi)

Yukawa Troca π

2

QED

Violação P, C, CP

Electroscópio

Contador Geiger

Câmara de Nuvens

Ciclotrão

Circuito de Coincidências

Sincrotrão

Câmara de Bolhas

Colisão e^+e^-

Câmaras de Fios

Raios Cósmicos

Relatividade Geral

Matéria Escura

Chuveiros de Partículas

R.C. Energias Extremas

Zoo Partículas

π

τ^-

p^-

ν_e

ν_μ

ν_τ

u d s

c

b

MODELO PADRÃO

Higgs

GUT

SUSY

Supercordas

Unificação E-F

Bosões W

Côr QCD

g

W Z

3 famílias

ENERGIA ESCURA ??

h^0

Computadores em Aquisição de Dados

Arrefecimento Estocástico

Colisão p^+p^- SPS

Detectores Modernos

WWW

LEP

GRID

LHC

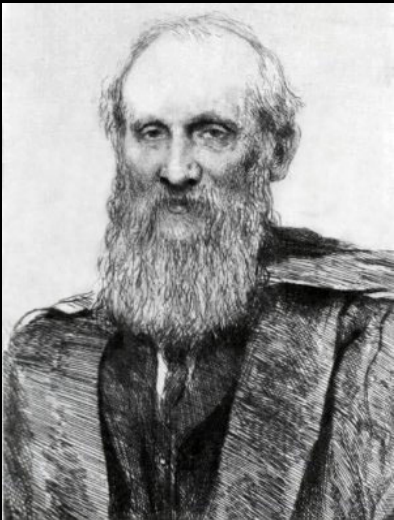
Expansão ACELERADA do Universo / Energia Escura

GZK + Anisotropia

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

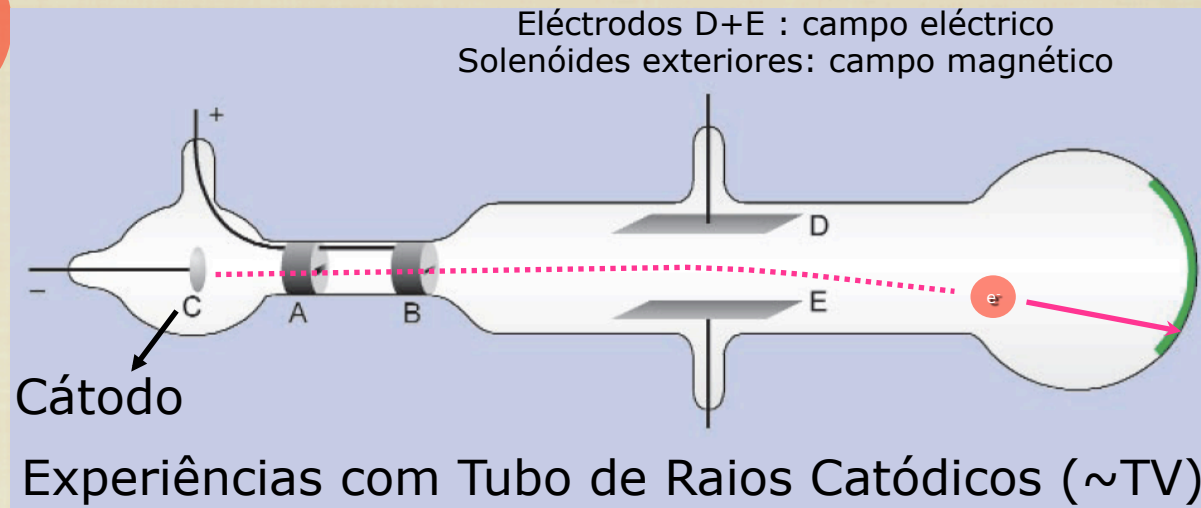
Só duas áreas *conhecidas*: gravidade, electromagnetismo

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

(*) não havia o conceito de galáxias

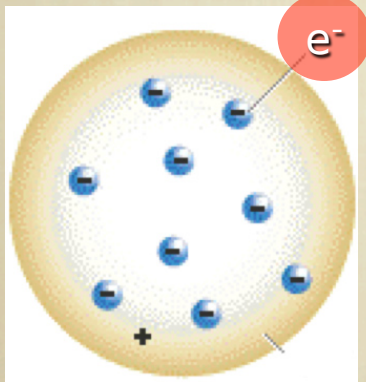


J.J. Thomson

e⁻

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

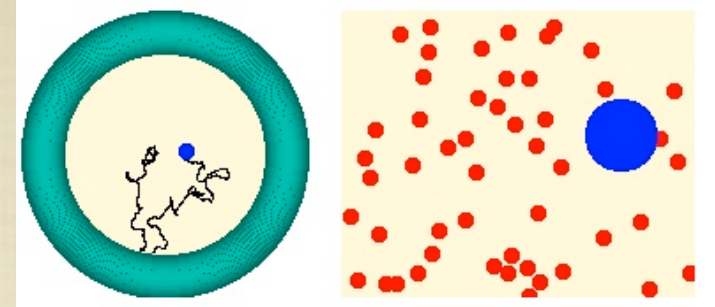
***mais tarde denominados 'electrões'**



Electrões são partículas sub-atômicas!

Modelo do átomo (1904)
'Pudim de passas'

Robert Brown (1827) observa o movimento aleatório de grãos (pólen) suspensos num fluido



Albert Einstein (1905) explica este efeito usando a teoria cinética, mostrando que o movimento é devido ao bombardeamento dos grãos de pólen 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 (N na expressão:)

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

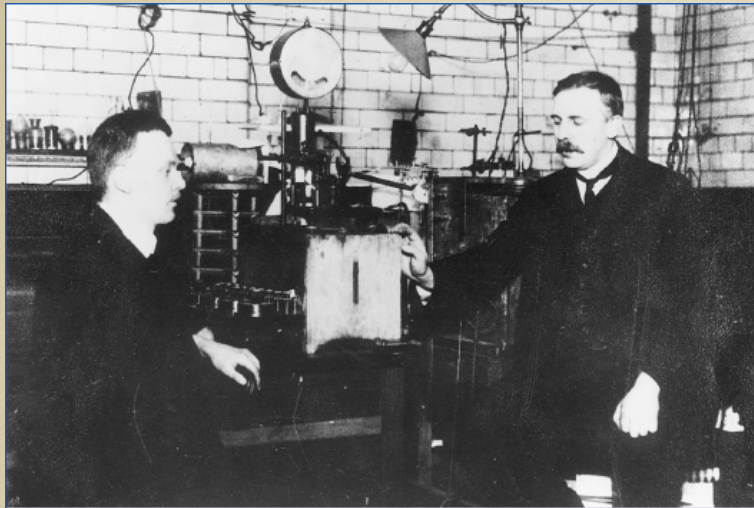


A Existência dos Átomos ficou provada

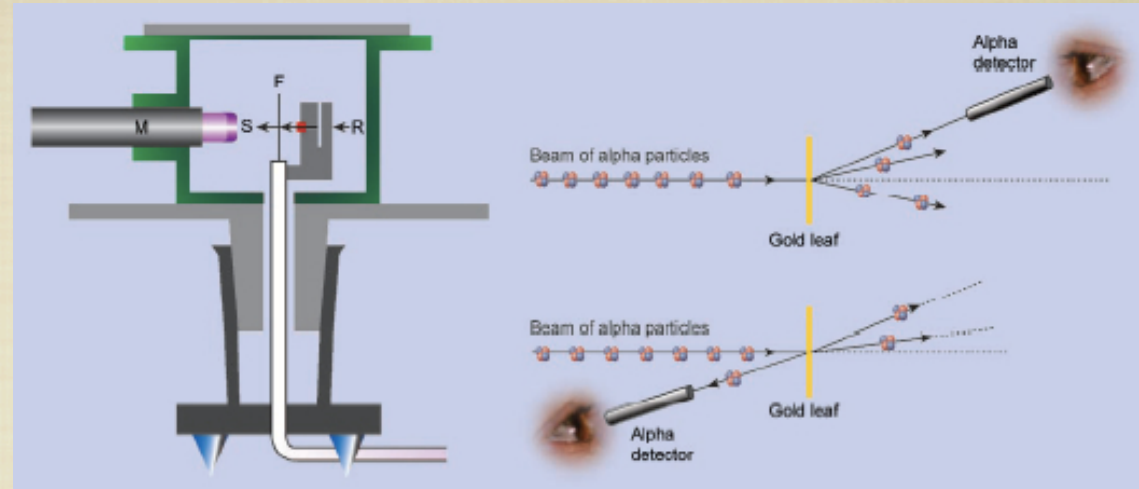
PARTÍCULAS

1911

Núcleo



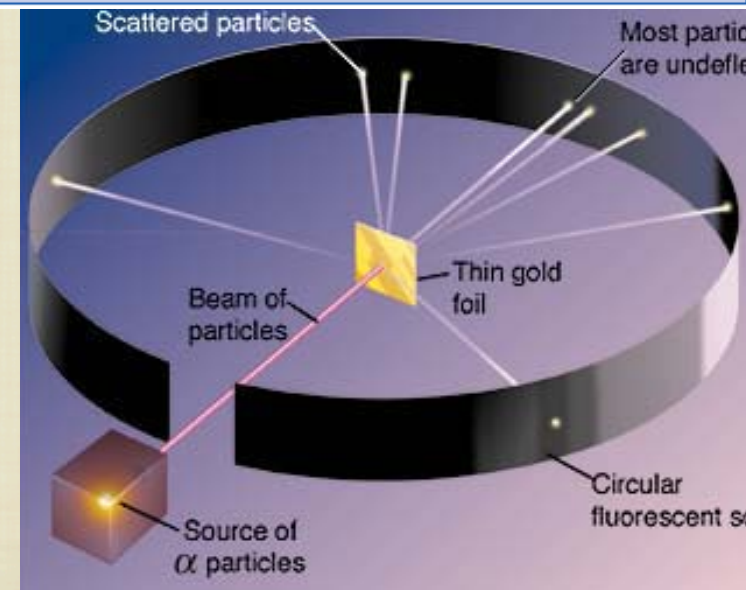
Ernest Rutherford (dta.) e Hans Geiger(esq.) em Manchester



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



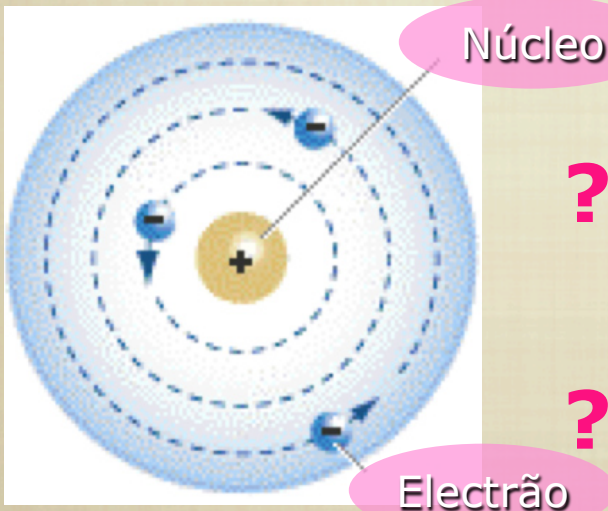
Analogia com o dia-a-dia:

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 (~ 260 N) ?



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

? O Núcleo é feito de quê ?

quase-modelo de Rutherford
para um átomo vazio

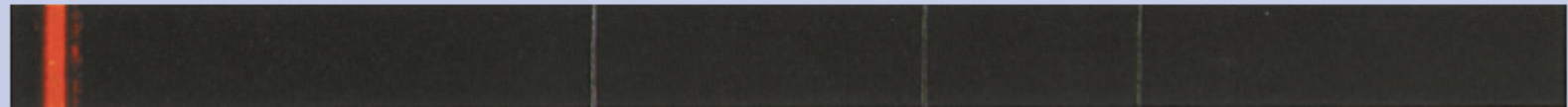
J. J. Balmer (1885) mediu o espectro de emissão do Hidrogénio

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

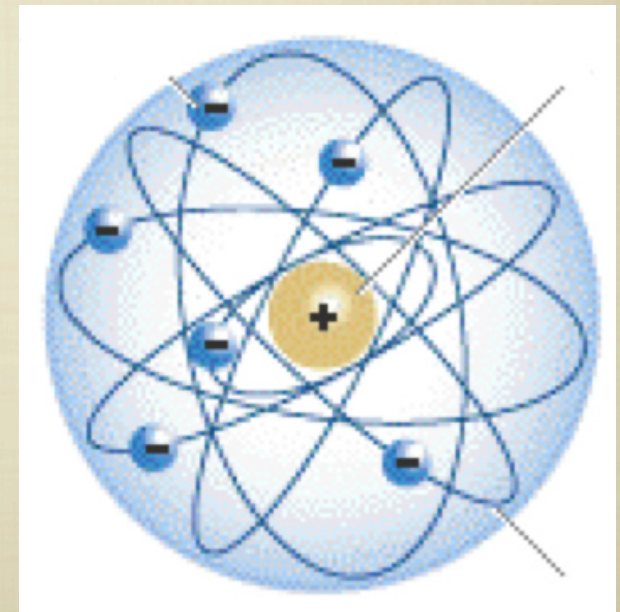
foi o 1º a aplicar as ideias de quantificação aos átomos

- Quantificação do Momento Angular → 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.

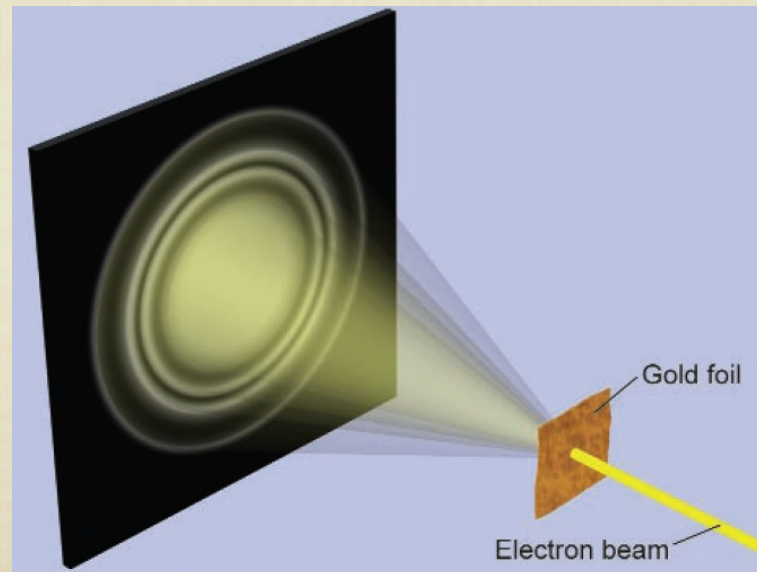


Louis de Broglie (1924)

Partículas que se comportam como 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 $\psi = \psi(\mathbf{p} \cdot \mathbf{r} + E \cdot t)$

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



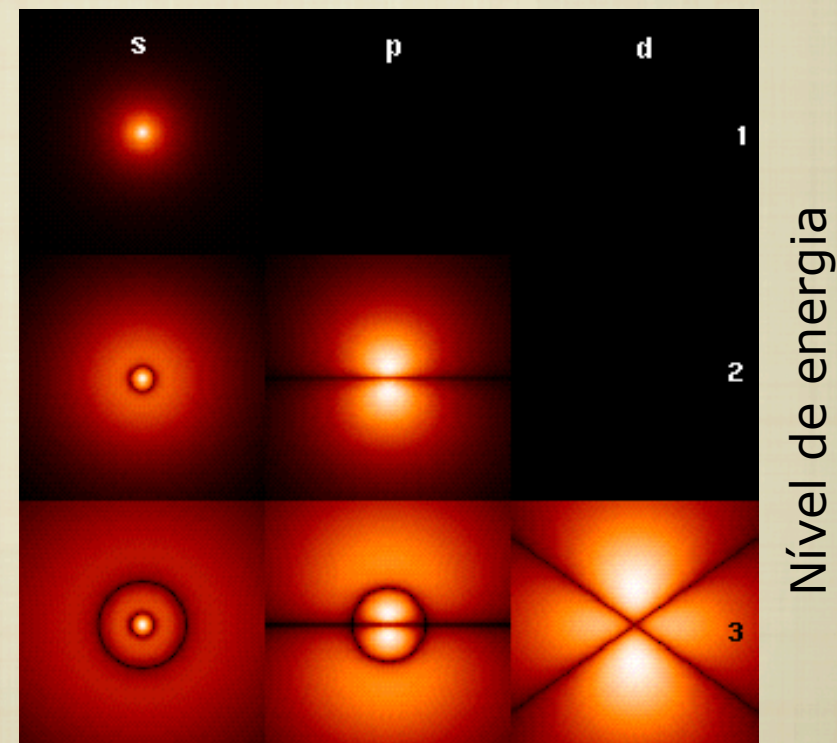
Schrödinger
1926

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')



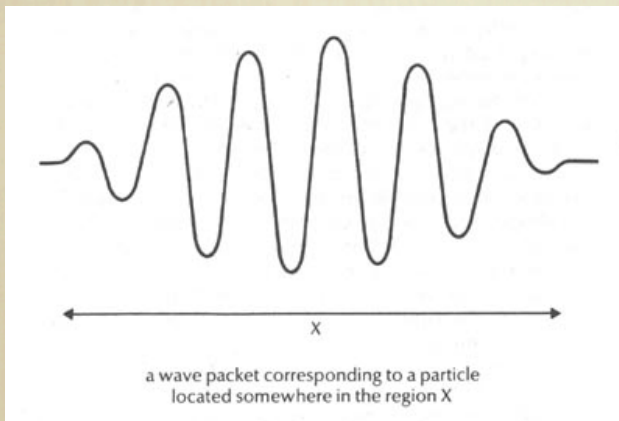
Heisenberg (1925)

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



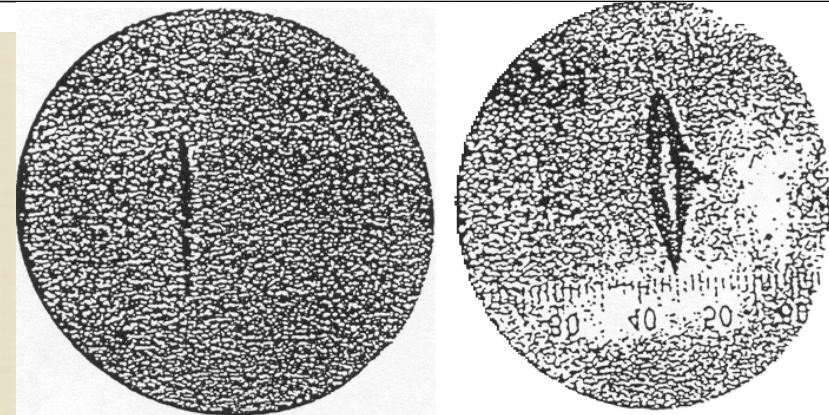
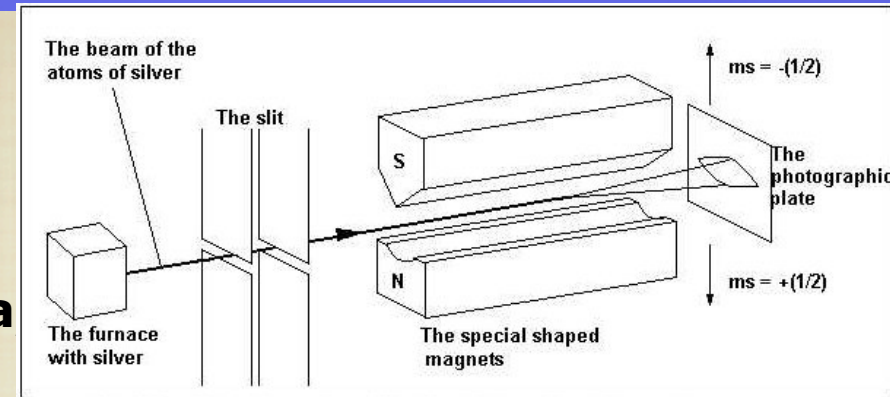
- Experiência de Stern-Gerlach (1922)

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)

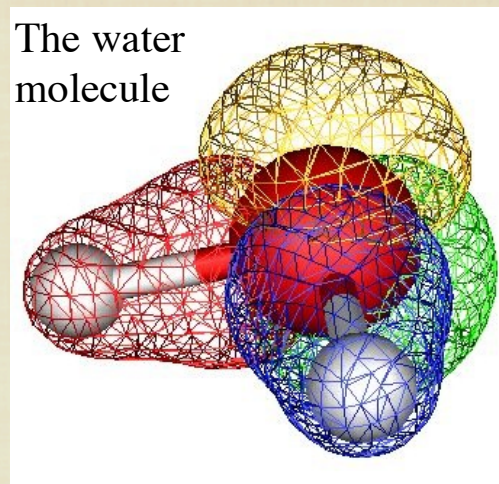
→ **Impenetrabilidade da matéria**

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.

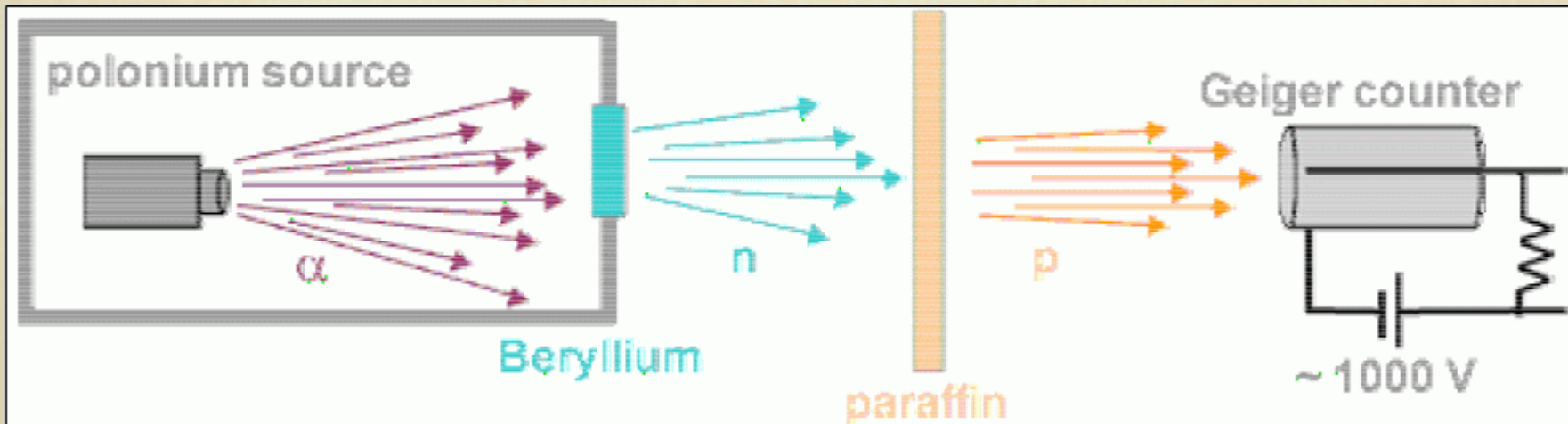
Mas então, de que é feito o núcleo ?

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

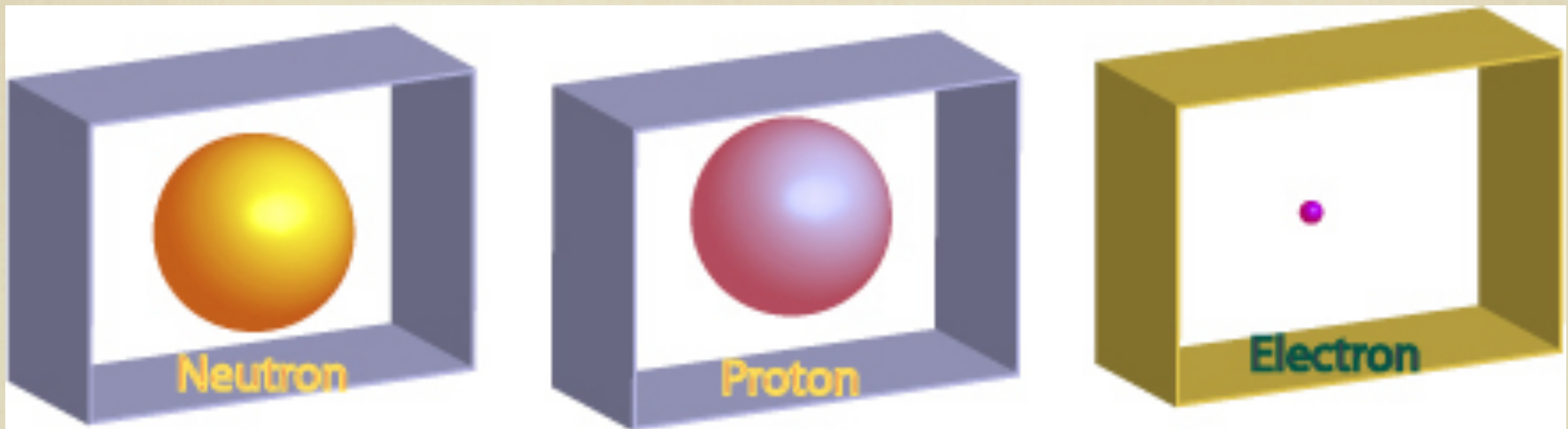


Da cinemática: Massa do neutrão \sim massa do protão

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**

O que mantém juntos os átomos e os núcleos?

1900: conhecidas duas interacções fundamentais:

$$F_G = G_N m_1 m_2 \frac{1}{r^2}$$

\mathbf{G}_1

$$F_E = K_E Q_1 Q_2 \frac{1}{r^2}$$

\mathbf{E}_1



Gravidade
Um tipo de
"Carga" (m_1)

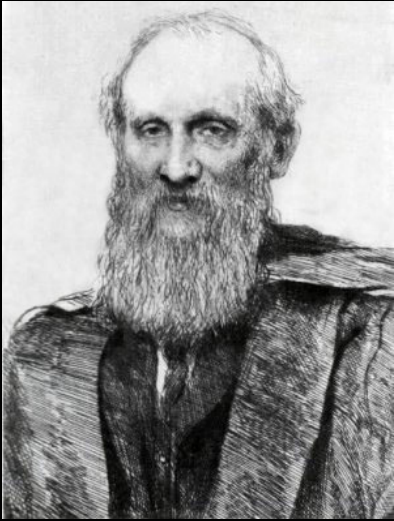


Electromagnetismo
Dois tipos de cargas
(positivas e negativas)

Semelhanças: ambas variam com o inverso do quadrado do raio
ambas têm alcance muito elevado (ilimitado)
ambas descritas por Campos Vectoriais (\mathbf{G}_1 e \mathbf{E}_1)

Diferenças: as intensidades são muito "diferentes" ; Gravidade = Atractiva
(36 ordens de grandeza para 2 protões) Electromagnetismo = Atr./Rep.

Lembram-se? em 1900, havia apenas 2 'nuvens' no horizonte da Física:



**William Thomson
(Lord Kelvin)**

- 1) Radiação do Corpo Negro**
- 2) Experiências Michelson-Morley**

A sua investigação levou à

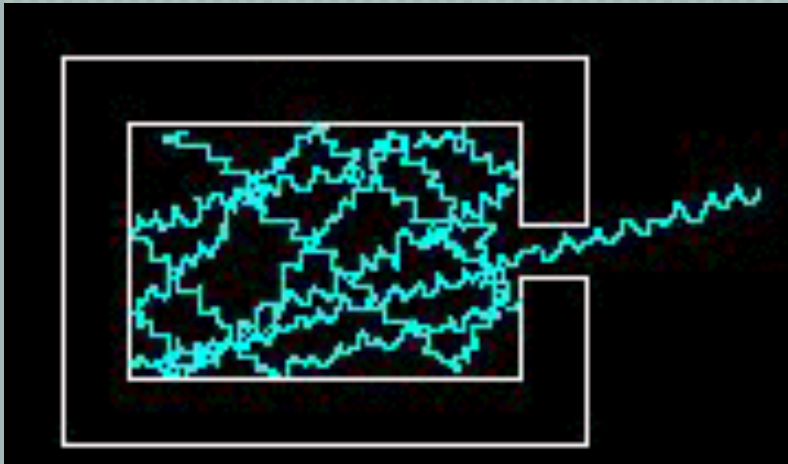
- Teoria Quântica**
- Relatividade**

Interações

Electromagnetismo

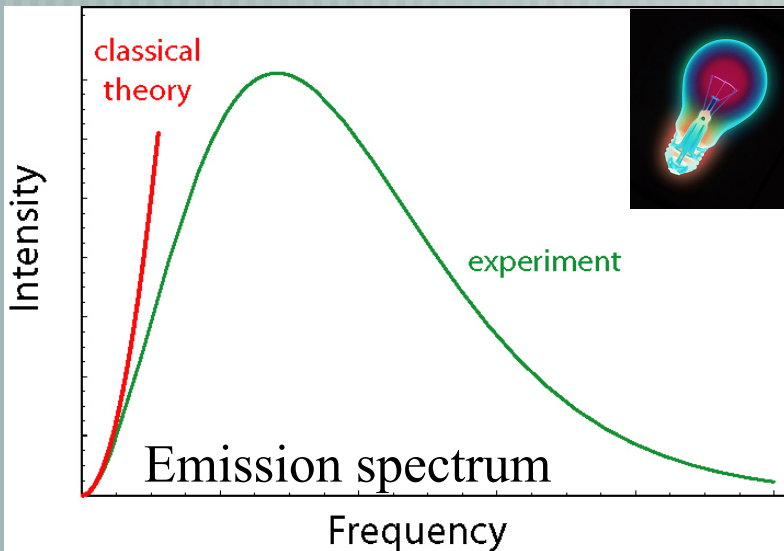
Fotão

Problema 1: Radiação do Corpo Negro



“Corpo Negro” absorve toda a luz incidente;
re-emite radiação em equilíbrio térmico: $P \sim T^4$

“Função de Radiação” =
Intensidade(frequência) = $f(T)$ apenas



$$I(\nu) \sim \nu^2 \langle E \rangle$$

Energia média de osciladores
(proporcional à temperatura, $\langle E \rangle = kT$)

Ok para temperaturas baixas (Rayleigh-Jeans)
e para frequências baixas.

Interacções

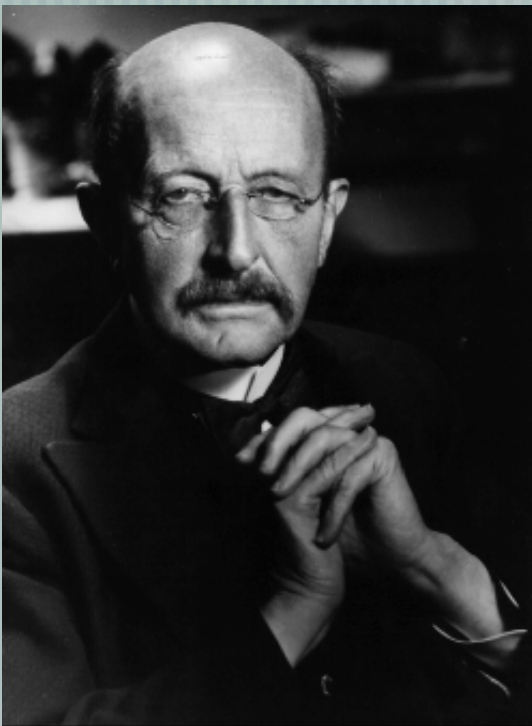
Electromagnetismo

Fotão

um “Acto de Desespero”

Osciladores (nas paredes do corpo negro)
emitem apenas ‘bocadinhos de energia’ $\epsilon = h \nu$

14 Dezembro 1900



Max Planck

h = nova constante fundamental

Frequências maiores \Leftrightarrow bocados maiores, e portanto é
menos provável obter $E \gg kT$

Energia média osciladores

$$I(\nu) \sim \nu^2 \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

$\left[\begin{array}{l} h\nu \ll kT \Rightarrow \langle E \rangle = kT \\ h\nu \gg kT \Rightarrow \langle E \rangle = h\nu e^{-h\nu/kT} \end{array} \right]$

Interacções

Electromagnetismo

Fotão

1902

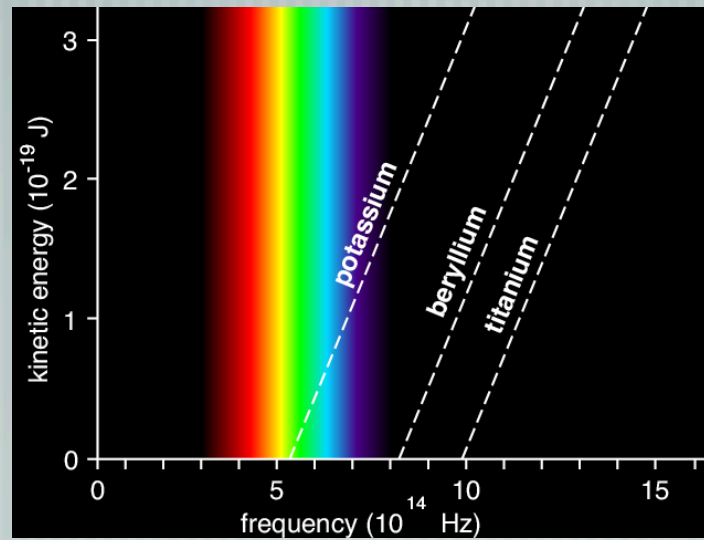
Problema 2: O Efeito Fotoelétrico

Raios catódicos (electrões) são produzidos quando a luz incide em superfícies metálicas.

Esperava-se que a Energia do electrão fosse proporcional à intensidade da luz



Philipp von Lenard



Mas:
Energia proporcional à
frequência (declive "h")

"A energia do electrão não mostra a mais pequena dependência com a intensidade da luz"

Interacções

Electromagnetismo

Fotão

“a minha Única contribuição revolucionária”

17 Março 1905



Albert Einstein

Luz é **emitida** e **absorvida** em **quanta**



$$E_{\max} = h\nu - W$$

“Um quantum de luz dá toda a energia a um único electrão.”

(Compton, 1917, provou isto)

Interações

Relatividade

Relatividade Restrita



Einstein pensou na estrutura do 'meio' para as ondas electromagnéticas

Os seus postulados:

1) Velocidade da Luz = constante;

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$$

2) Todos os referenciais inerciais são equivalentes.

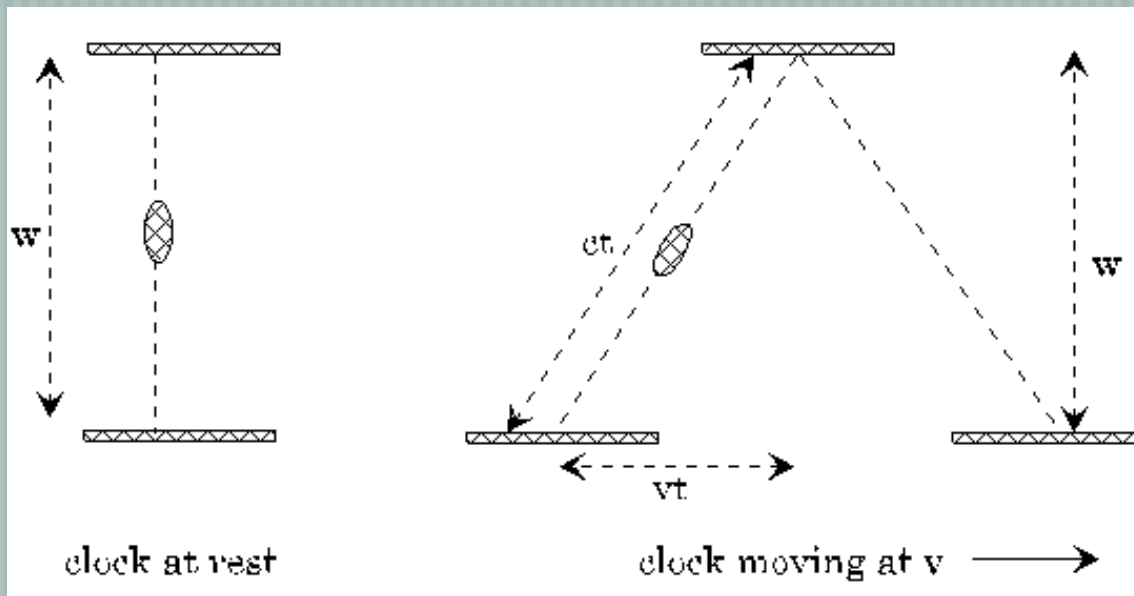
Mas como é que se pode ter a mesma velocidade da luz em todos os referenciais inerciais?!

As suas conclusões:

Como $c = \text{constante}$, e velocidade = (espaço/tempo) -->
espaço e tempo não podem ser absolutos!

Interações

Relatividade



$$c^2 t^2 = v^2 t^2 + w^2$$

$$t^2 (c^2 - v^2) = w^2$$

$$t = \frac{w/c}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma \cdot \tau$$

1) Dilatação do Tempo, Contração do espaço

2) Modificação das Leis de Newton, Massa efectiva aumenta!

$$E=mc^2$$

Interacções

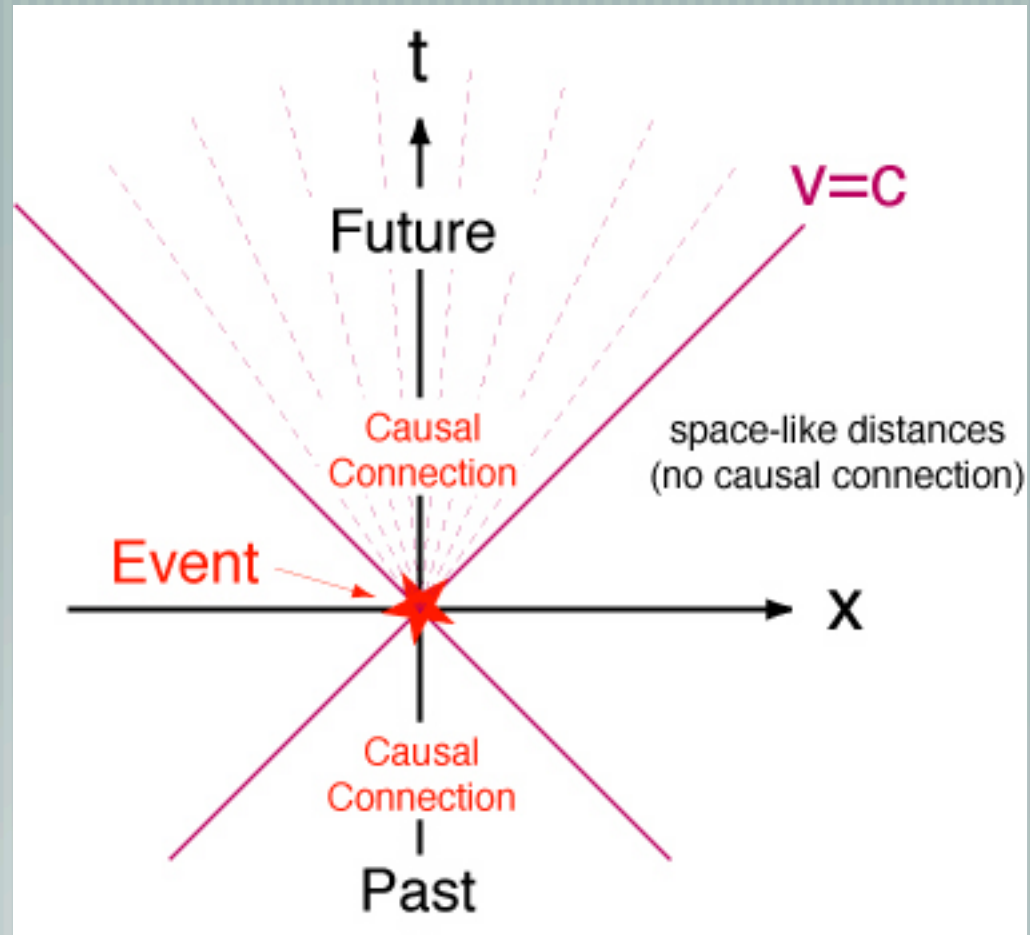
Relatividade

CAUSALIDADE

Nada pode andar mais depressa do que a luz



Só acontecimentos no “cone de luz” podem estar relacionados por uma relação de causa-efeito



Interações

Electromagnetismo



Paul A.M. Dirac
(1928)

Equação de Dirac: relatividade restrita+física quântica

$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\Psi = 0$$

$$E^2 = p^2 + m^2 \rightarrow$$
$$E = \pm(\alpha \cdot p) + \beta m$$

Compare-se com a equação de Schrödinger
(não-relativística)

$$E = \frac{p^2}{2m} \rightarrow i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi$$

CONSEQUÊNCIA: EXISTÊNCIA DE ANTIPARTÍCULAS!

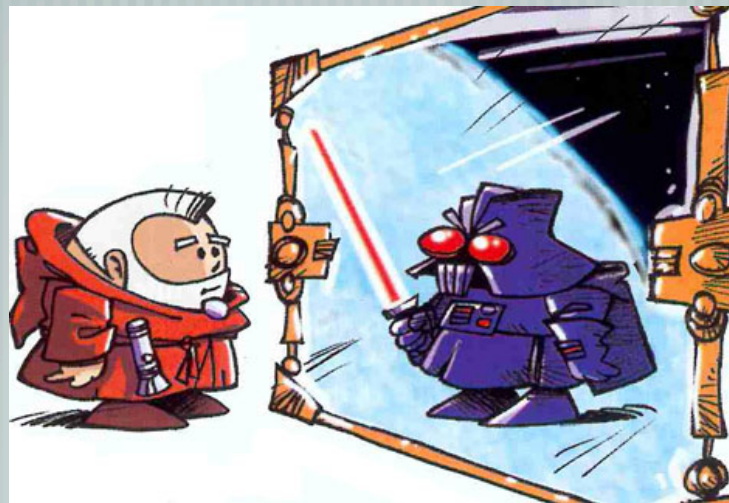
Interacções

Electromagnetismo

Duas **previsões** cruciais de Dirac (teóricas):

**A Função de Onda tem 4 componentes (duas partículas, spin $\pm 1/2$)
2 componentes para a partícula - e 2 componentes para antipartícula!**

Cada partícula tem uma antipartícula !



e^+

PARTÍCULAS

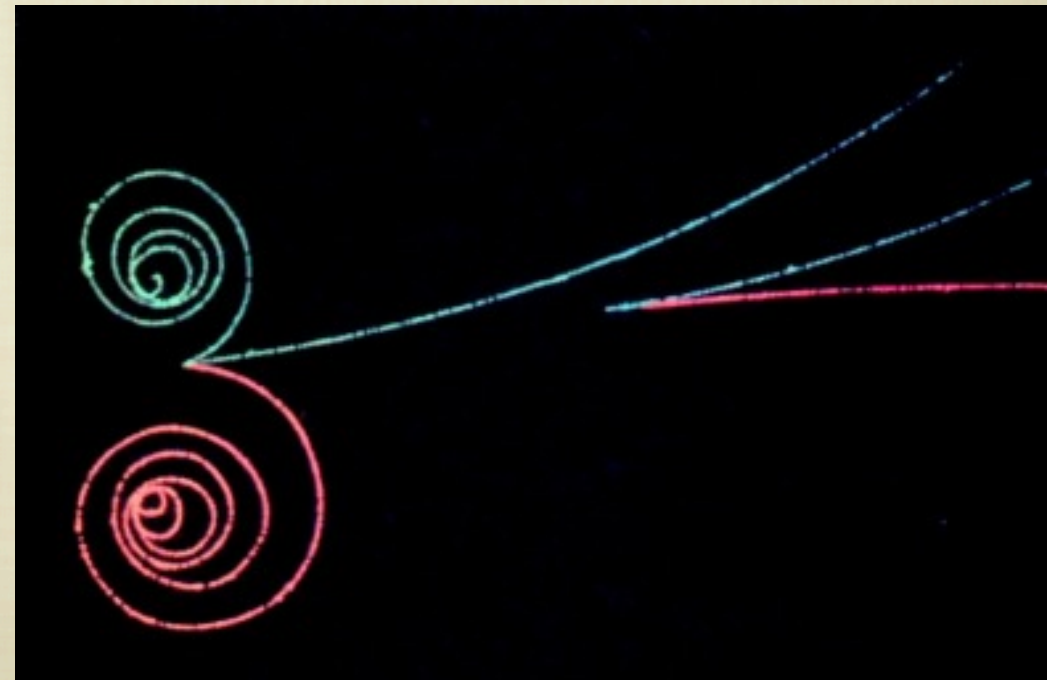
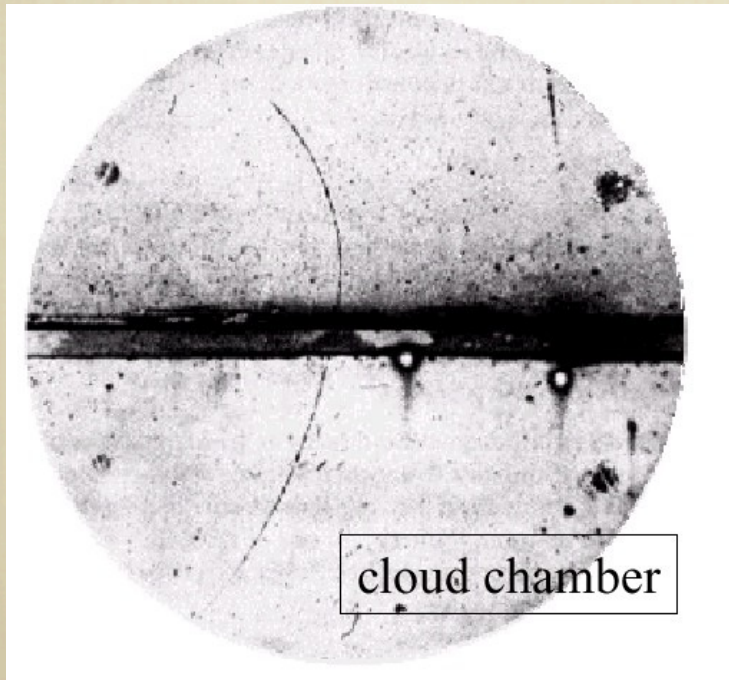
1936



Anderson (1932)

Descoberta do Positrão

Dirac estava certo!



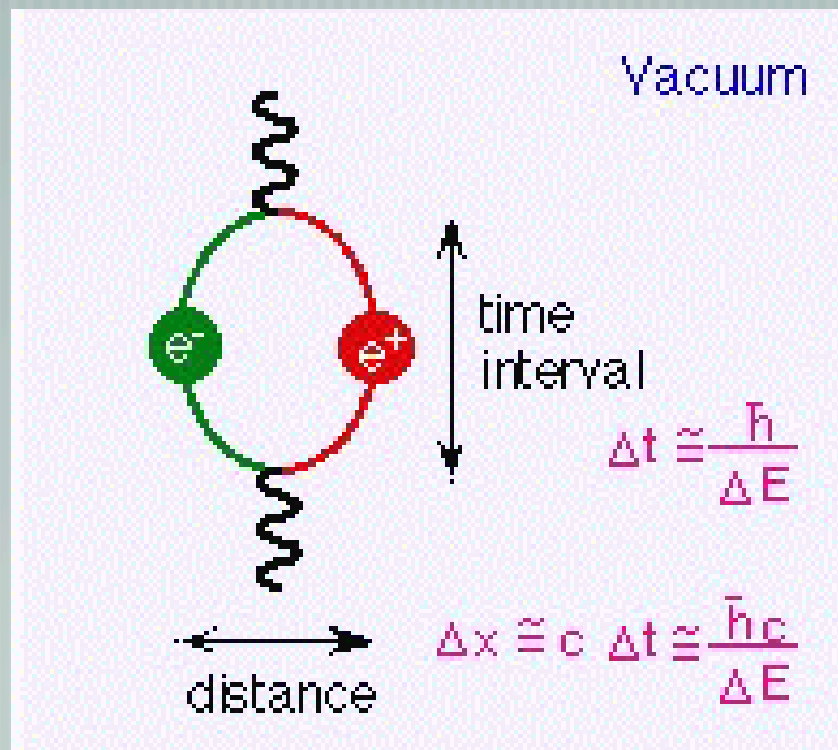
Interacções

Electromagnetismo

AGORA O VÁCUO FICOU MESMO CONFUSO!

Física Quântica diz que 'osciladores' (e.g. quanta) não podem estar em repouso absoluto (princípio de incerteza)

Os estados de energia mais baixos dos campos electromagnéticos podem produzir pares (virtuais) electrão-positrão: FLUTUAÇÕES do VÁCUO

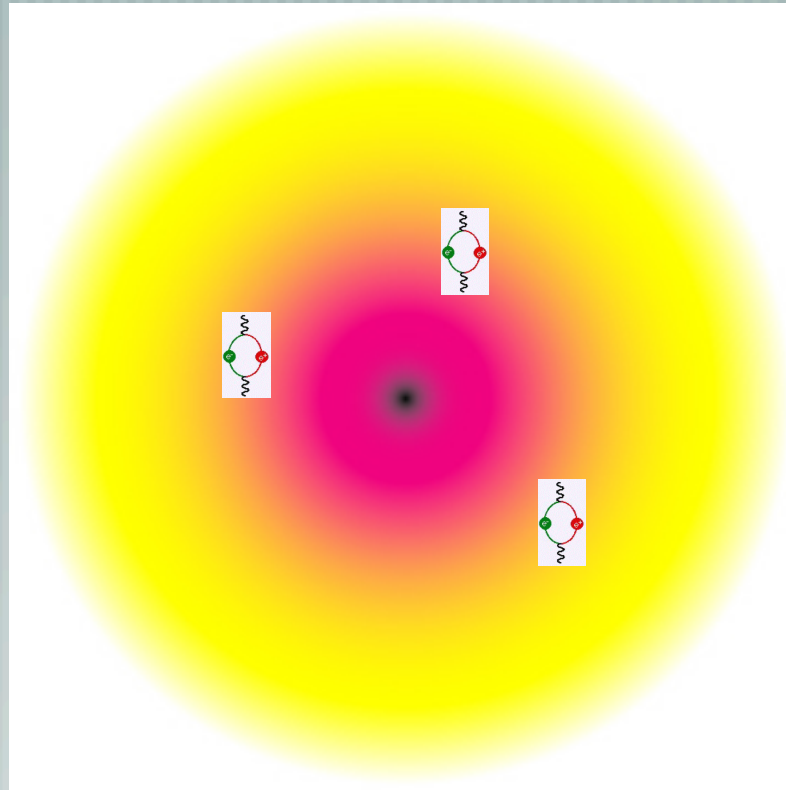
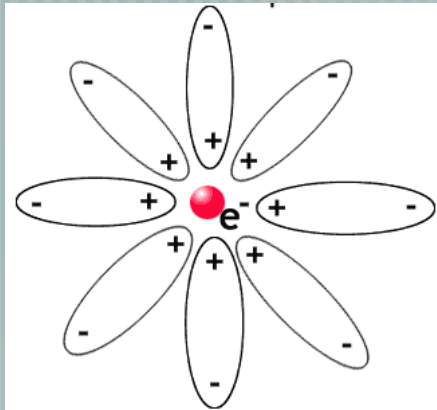


Interações

Electromagnetismo

Como calcular a interacção entre fótons e electrões?

Emergiu uma nova imagem do **electrão “vestido”** :



$$\alpha \equiv \frac{e^2}{4\pi} \cong \frac{1}{137.036}$$

MAS

$$\alpha(\sqrt{s} = M_{Z^0}) \cong \frac{1}{128}$$

Fluctuações do vácuo modificam a sua carga e massa (‘Écran de Debye’)

Interações

Electromagnetismo

1934 - 1948



R. P. Feynman

QED: Electrodinâmica Quântica

Feynman, Tomonaga, Schwinger

“Renormalização”

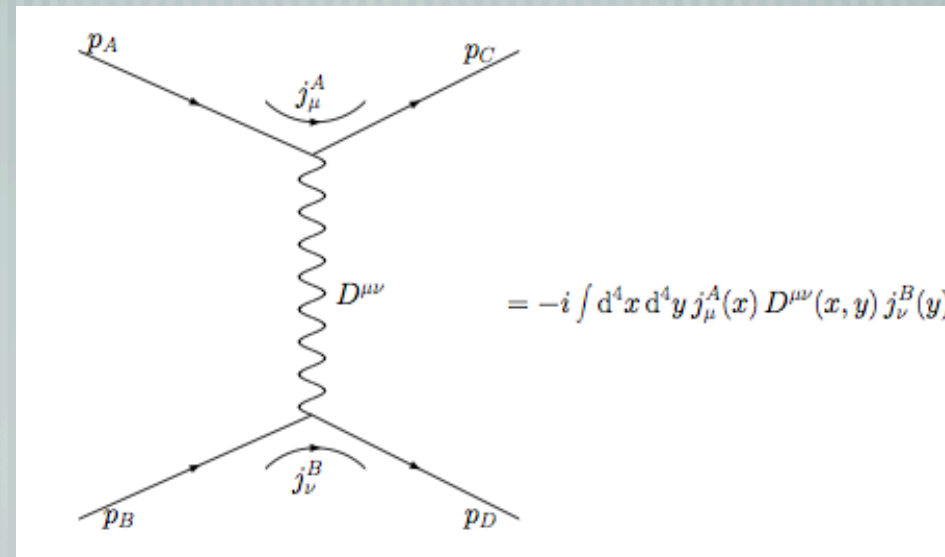
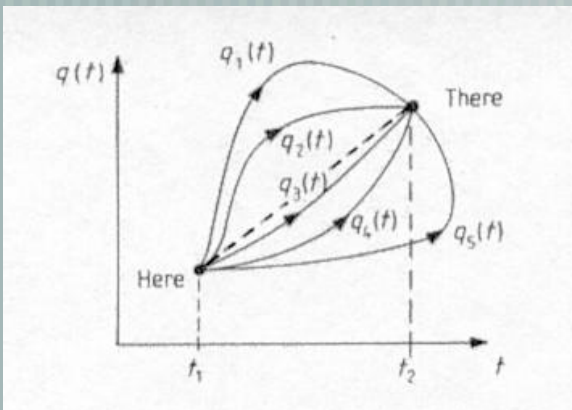
electrão ‘nu’ + flutuações vácuo = electrão medido

(“infinito” - “infinito” = “finito”)

Diagramas de Feynman

Regras de cálculo Exactas – numa forma gráfica

Todos os caminhos
são possíveis



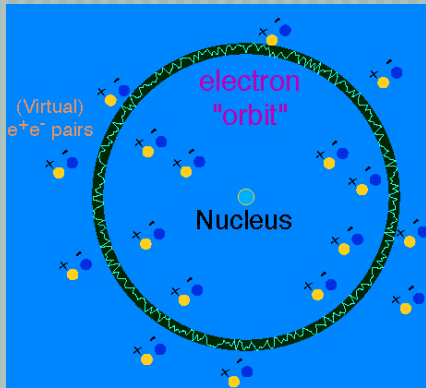
Interações

1948

Electromagnetismo

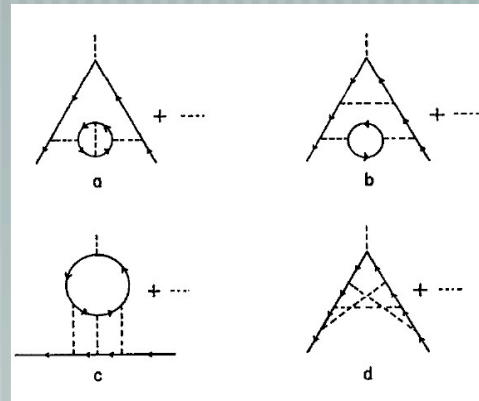
Flutuações do Vácuo têm efeitos observáveis!

... e a QED permitiu calculá-los com grande precisão



Desvio de Lamb

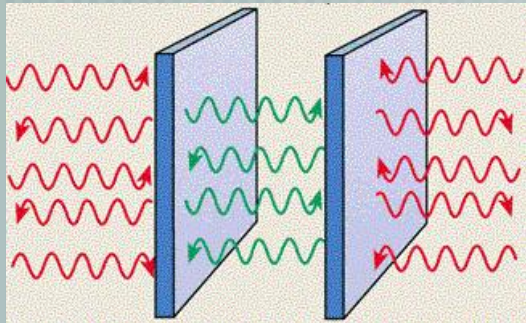
(desvios nos níveis de energia)



Momento Magnético do electrão (anómalo)

$$\vec{\mu} = g \frac{e\hbar}{2mc} \vec{s}$$

$$\frac{1}{2}(g-2) = \frac{1}{2} \frac{\alpha}{\pi} - 0,328478965579 \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^2 + 1,181241456 \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^3 - 1,9144 \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^4 \dots$$



Casimir effect

(força entre duas placas metálicas descarregadas)

$$\frac{1}{2} g_{TH} = 1,00115965218073 \pm 0,0000000000000052$$

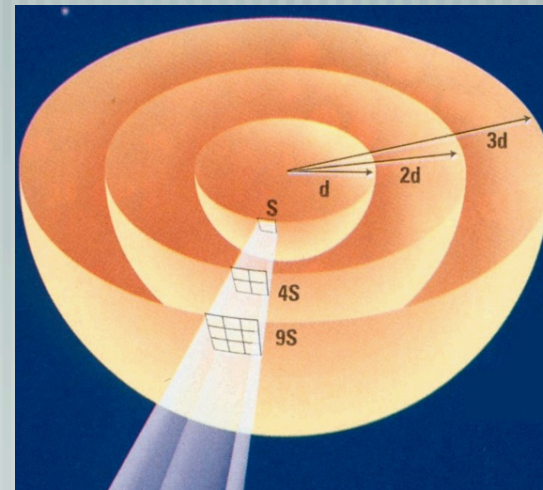
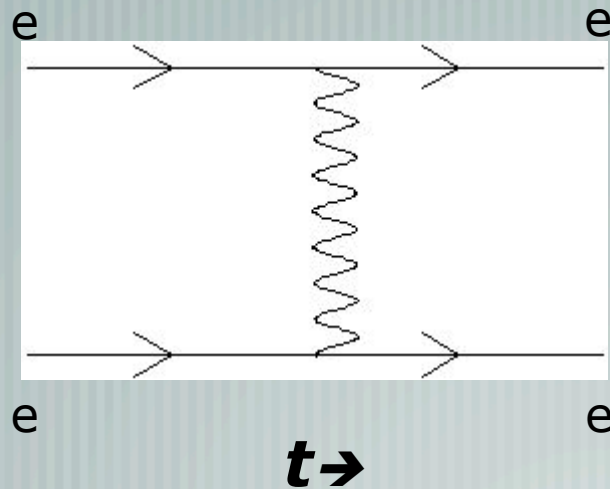
$$\frac{1}{2} g_{EX} = 1,00115965218073 \pm 0,0000000000000028$$

Interacções

Electromagnetismo

QED: Partículas carregadas interagem trocando fótons

- 1) **Cargas eléctricas emitem continuamente fótons virtuais de massa nula**
- 2) A **Lei $1/r^2$** vem da probabilidade de atingir outra partícula à distância r



lei $1/r^2$

Poderia ser um modelo para outras interacções?