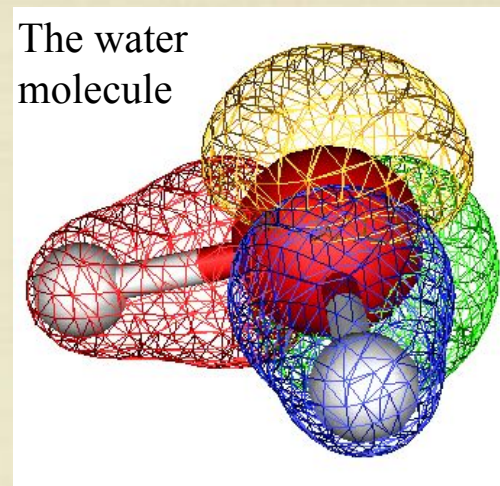


Com a Física Quântica foi possível explicar a estrutura na Natureza



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.

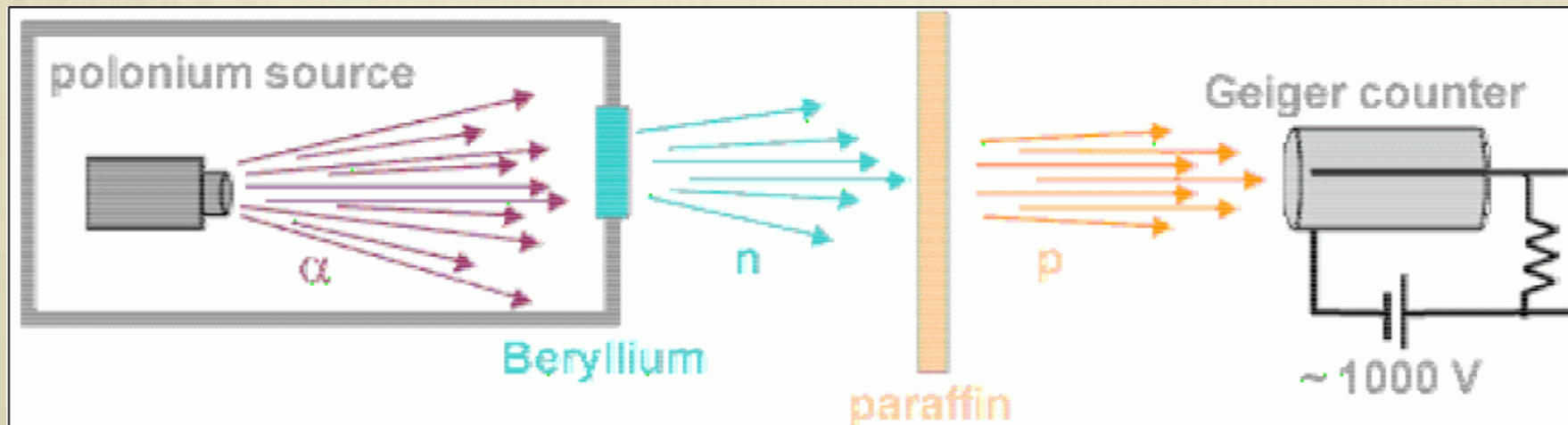
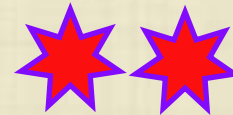
Mas então, de que é feito o núcleo ?

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**

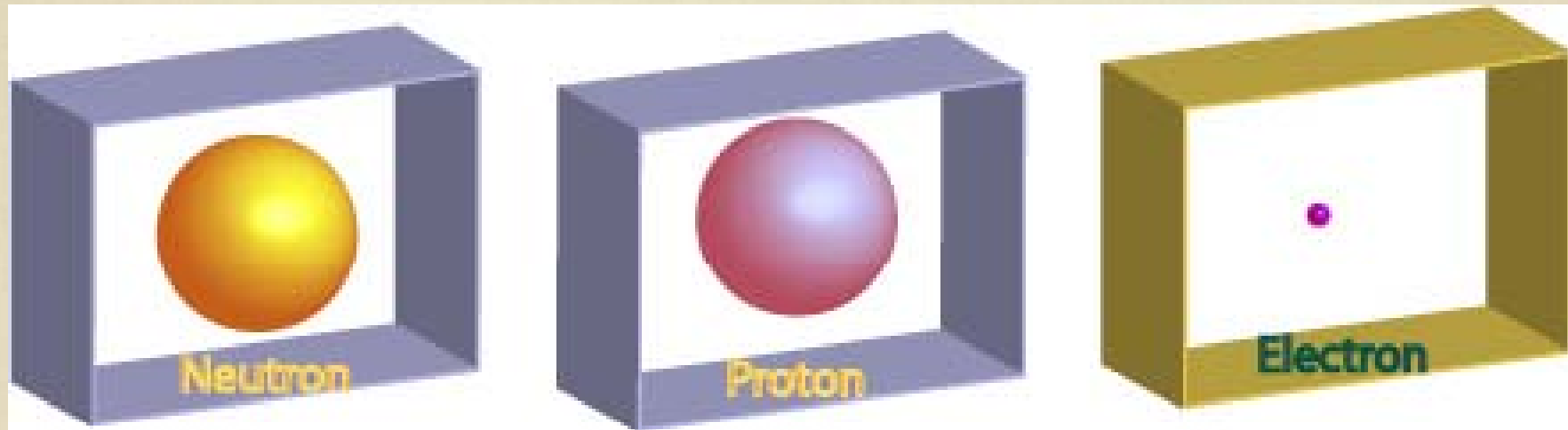


Da cinemática: Massa do neutrão \sim massa do protão

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**

Teoria Cinética,
Termodinâmica

Boltzmann

Electro-
magnetismo

Maxwell

Mecânica

Newton

Partículas

Interações

Universo

Tecnologias

Electromagnético Fraco Forte

Detector

Acelerador

1895

e^-

Movimento Browniano

Fotão

Radio-actividade

3

1900

1905

Átomo

Relatividade Restrita

2

1910

Núcleo

Mecânica Quântica
Onda/Corpúsculo
Fermiões / Bosões

1920

p^+

1930

e^+

n

Dirac
Antimatéria

Decaimento Beta (Fermi)

Yukawa
Troca
 π

Galáxias; Expansão do Universo

Relatividade Geral

Geiger

Nuvens

Ciclotrão

1940

μ^-

Matéria Escura

Fusão Nuclear

1950

τ^-

Zoo Partículas

QED

Violação P, C, CP

Nucleosíntese no Big Bang

Bubble

Sincrotrão

1960

ν_e

Bosões W

Radiação Cósmica de Fundo (Micro-ondas)

Colisão e^+e^-

1970

ν_μ

u d s

Higgs

Unificação E-F

Côr QCD

Inflação (?)

Wire chamber

Arrefecimento

1975

τ^-

MODELO PADRÃO

SUSY

Supercordas

W

Z

g

Detectores Modernos

Colisão p^+p^-

1990

ν_τ

t

3 famílias

Anisotropias RCF (COBE, WMAP)

WWW

2000

massa ν

Energia Escura (?)

GRID

2010

O que mantém juntos os átomos e os núcleos?

1900: conhecidas duas interacções fundamentais:

$$F_G = m_2 G_N m_1 \cdot \frac{1}{r^2} \quad G_1$$

$$F_E = Q_2 K_E Q_1 \cdot \frac{1}{r^2} \quad E_1$$



Gravidade

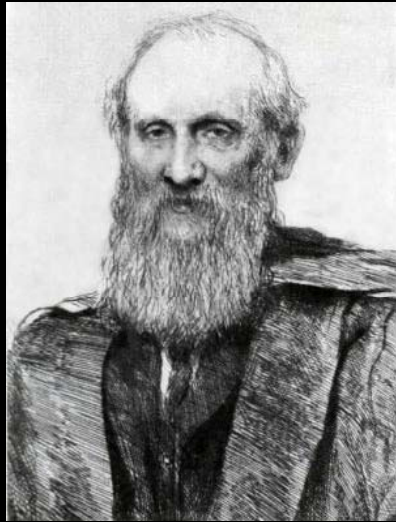


Electromagnetismo

Semelhanças: ambas variam com o inverso do quadrado do raio
 ambas têm alcance muito elevado (ilimitado)
 ambas descritas por Campos Vectoriais (G_1 e E_1)

Diferenças: as intensidades são muito diferentes (38 ordens de grandeza!)

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

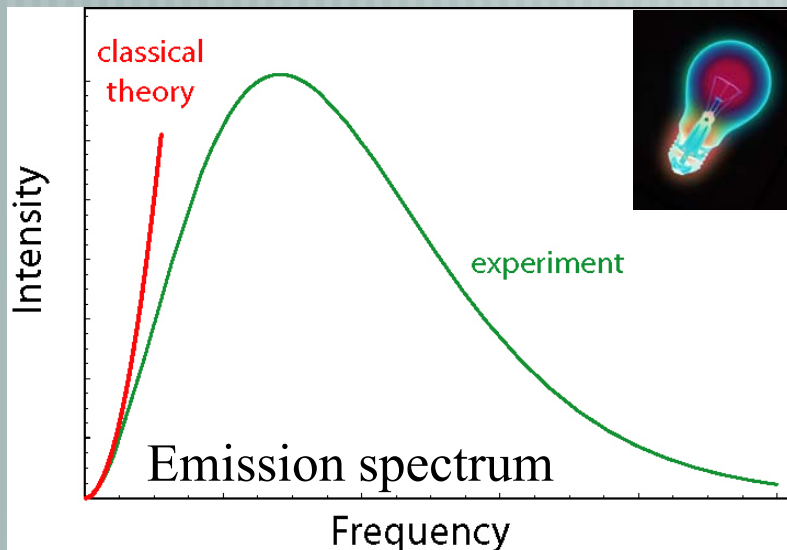
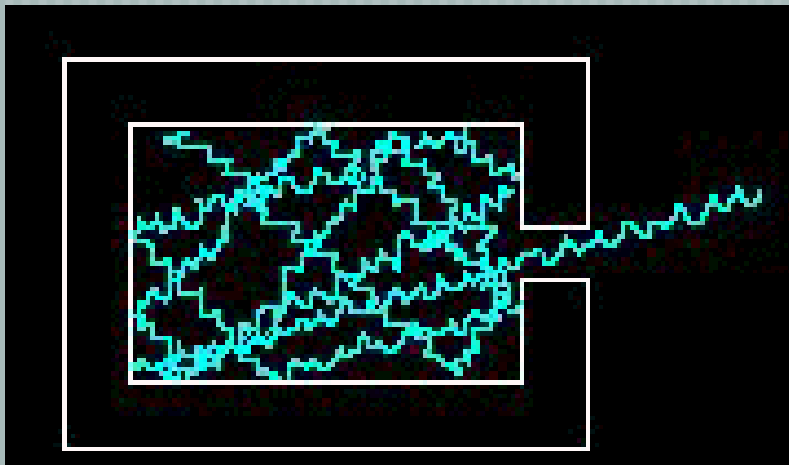
- Teoria Quântica
- Relatividade

Interações

Electromagnetismo

Fotão

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)

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

Interações

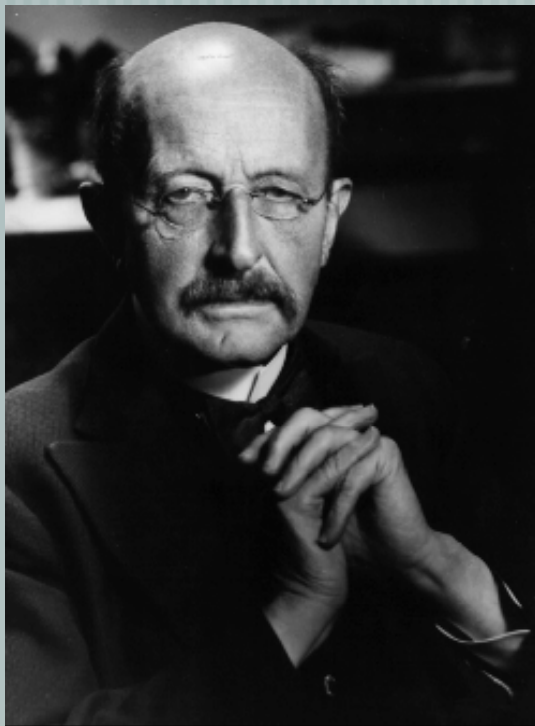
Electromagnetismo

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

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

Fotão

1902

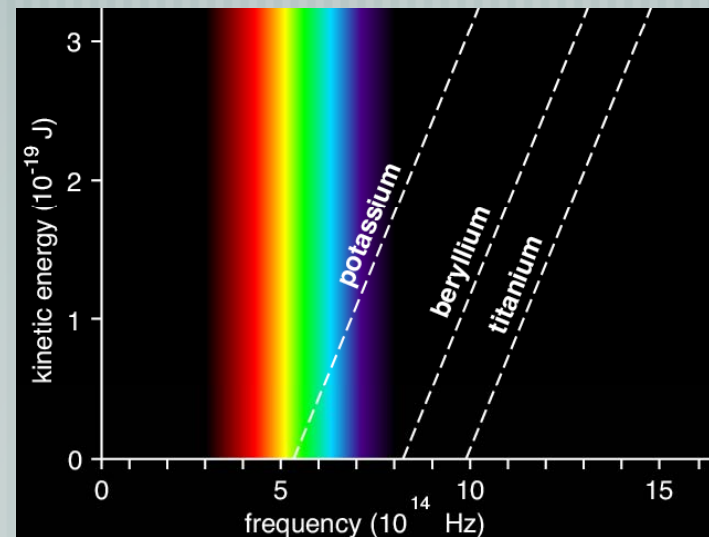


Philipp von Lenard

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



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



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

“1 quantum de luz dá toda a energia a 1 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;**
- 2) **Todos os referenciais inerciais são equivalentes.**

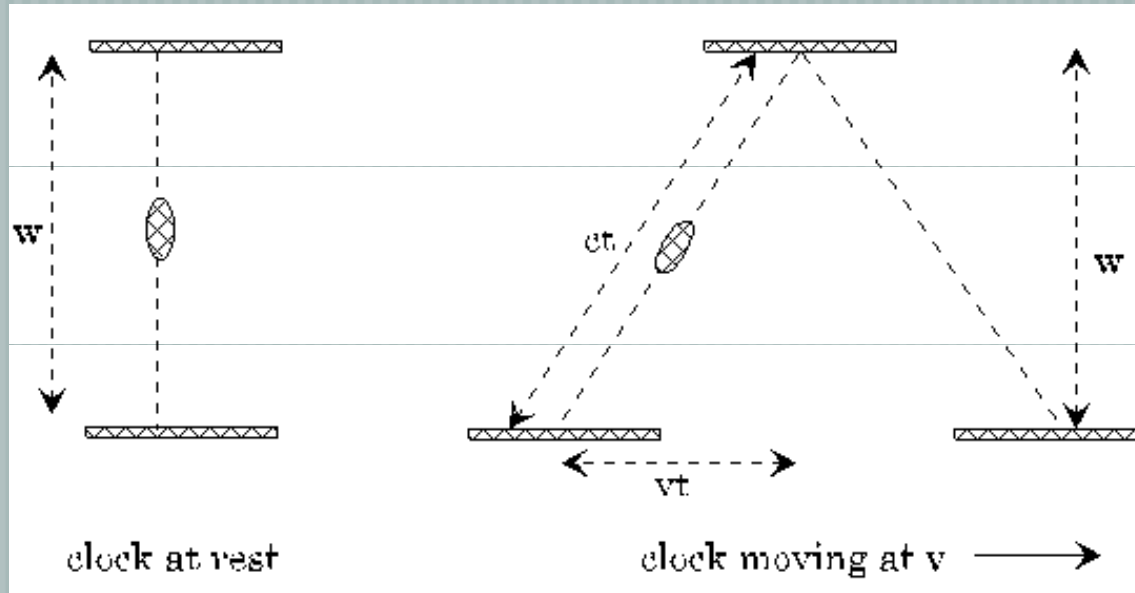
Mas como é que se podia ter a mesma velocidade da luz em todos os referenciais inerciais?!

As suas conclusões:

Como $c = \text{constante}$, e $\text{velocidade} = (\text{espaço}/\text{tempo}) \rightarrow$
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

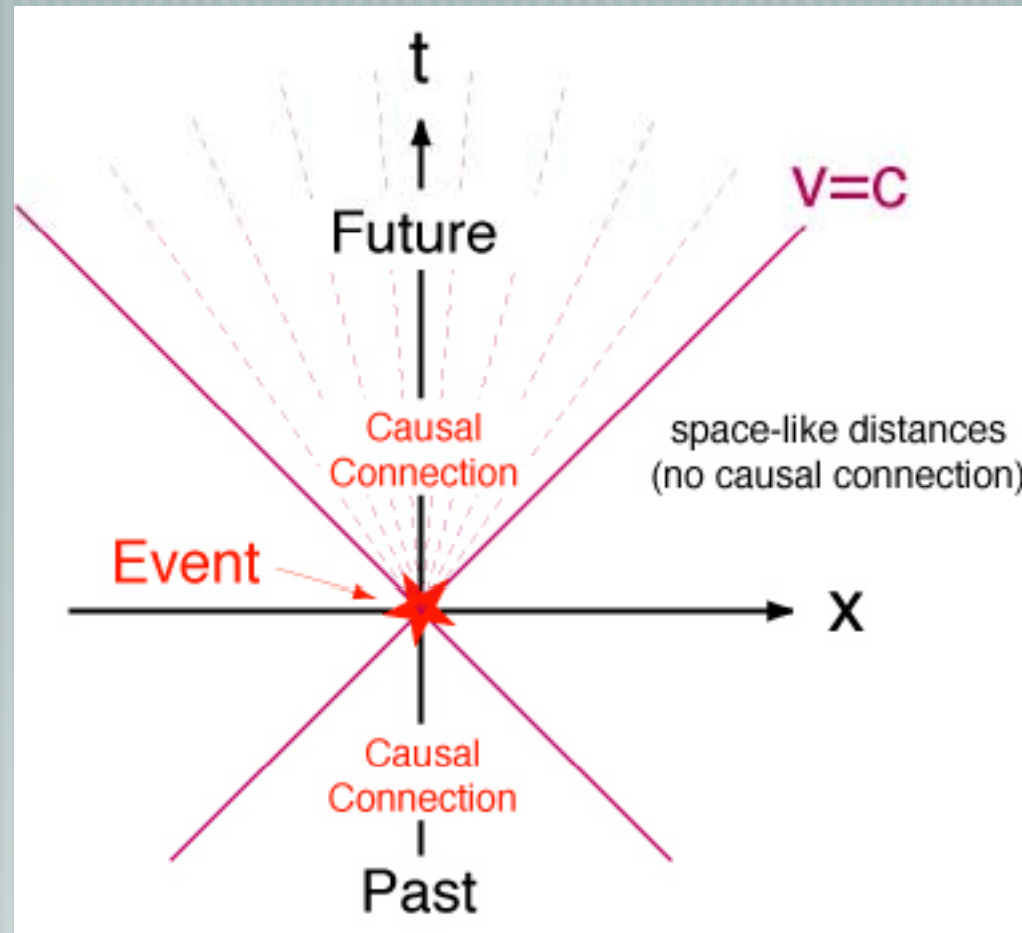
Relatividade

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

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

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

$$E^2 = p^2 + m^2 \rightarrow$$

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

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

CONSEQUÊNCIA: EXISTÊNCIA DE ANTIPARTÍCULAS!

Interacções

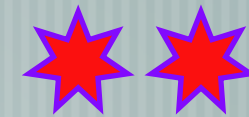
Electromagnetismo

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

A Função de Onda tem 4 componentes (duas partículas, spin $\frac{1}{2}$)

2 componentes para a partícula - e 2 componentes para antipartícula!

Cada partícula tem uma antipartícula !



e^+

PARTÍCULAS

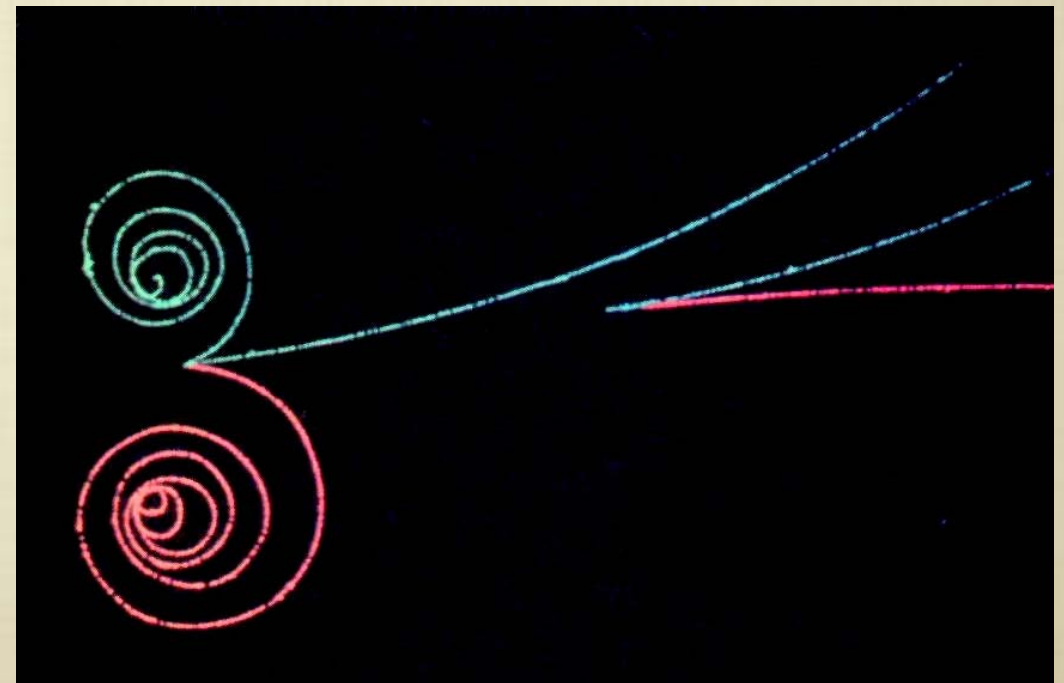
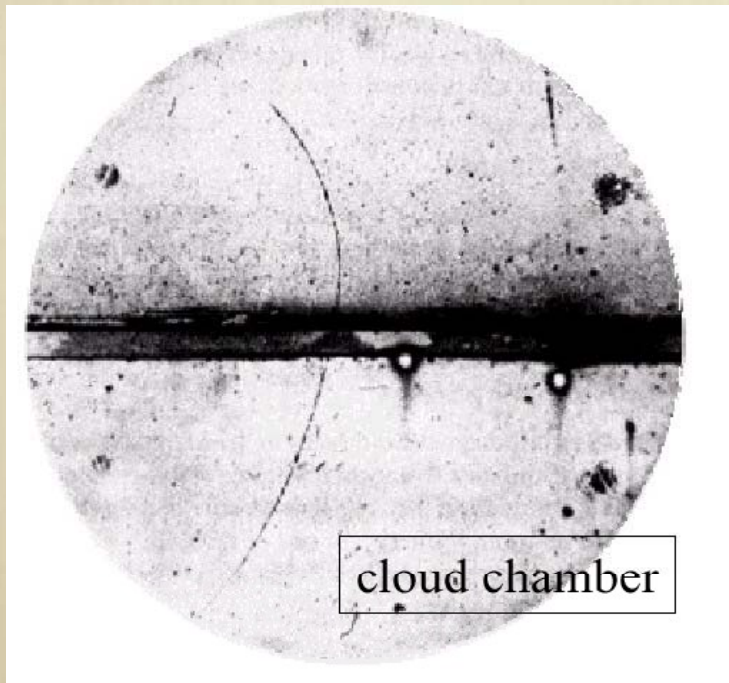
1936



Anderson (1932)

Descoberta do Positrão

Dirac estava certo!



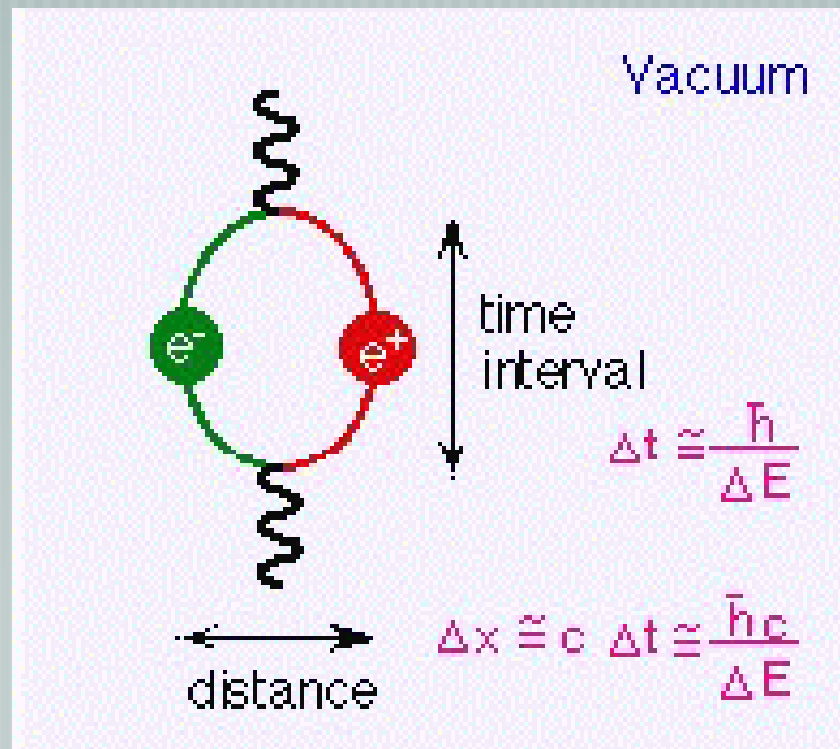
Interacções

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: FLUCTUAÇÕES do VÁCUO

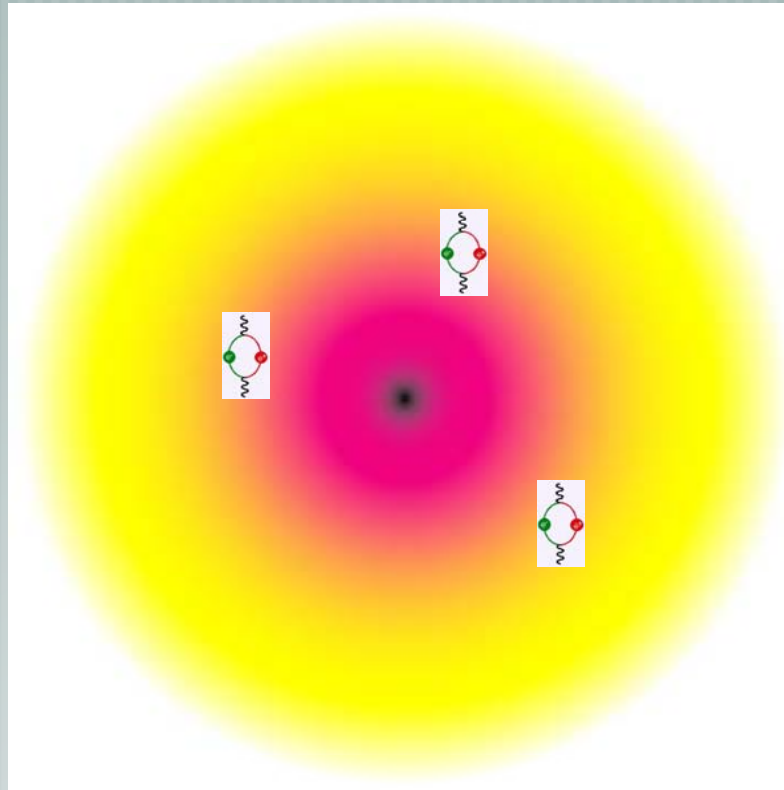
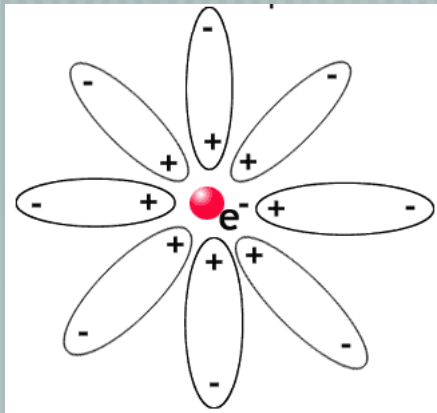


Interações

Electromagnetismo

Como calcular a interacção entre fótons e electrões?

Emergiu uma nova imagem do **electrão "vestido"** :



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

Interações

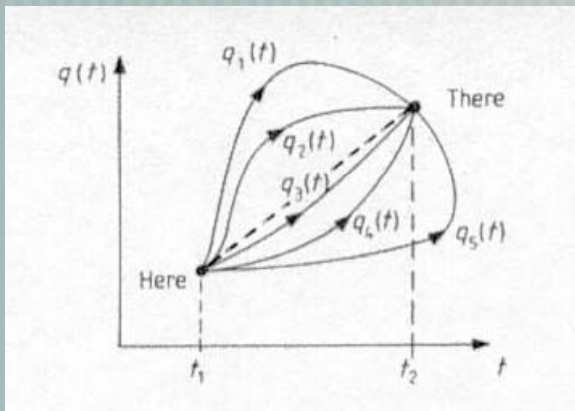
1934 - 1948

Electromagnetismo



R. P. Feynman

Todos os caminhos
são possíveis



QED: Electrodinâmica Quântica

Feynman, Tomonaga, Schwinger

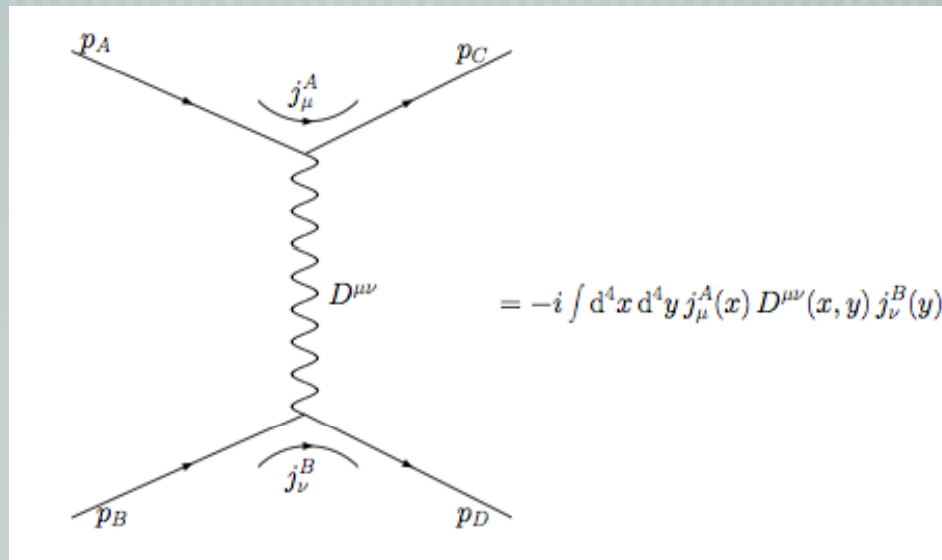
“Renormalização”

electrão 'nu' + flutuações vácuo = electrão medido

(“infinito” - “infinito” = “finito”)

Diagramas de Feynman

Regras de cálculo Exactas – numa forma gráfica



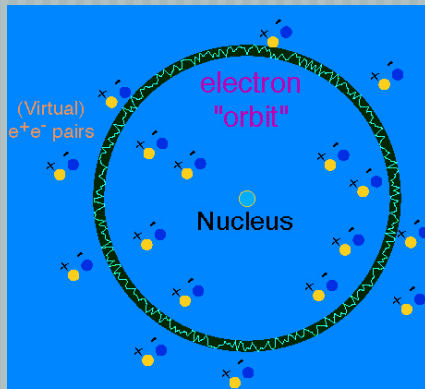
Interações

1948

Electromagnetismo

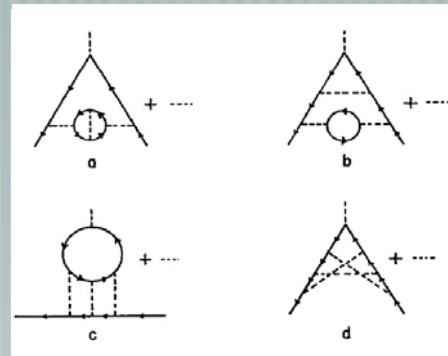
Fluctuações do Vácuo têm efeitos observáveis!

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



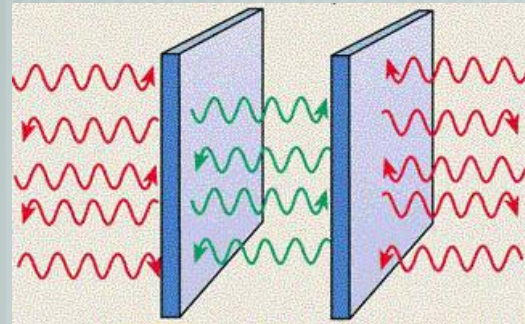
Desvio de Lamb

(desvios nos níveis de energia)



Momento Magnético do electrão (anómalo)

$$\frac{1}{2}(g - 2) = \frac{1}{2} \frac{\alpha}{\pi} - 0.32848 \left(\frac{\alpha}{\pi} \right)^2 + (1.183 \pm 0.011) \left(\frac{\alpha}{\pi} \right)^3.$$



Casimir effect

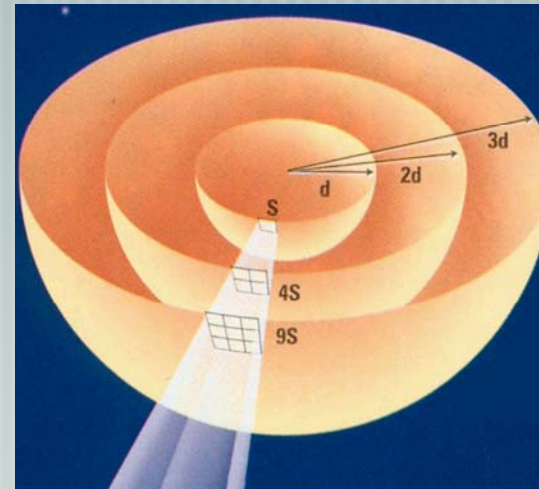
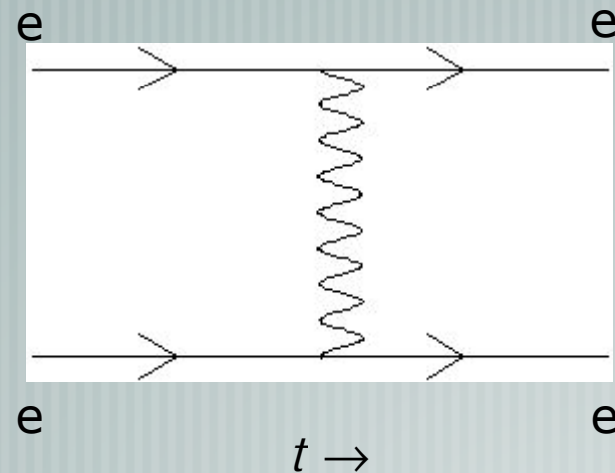
(força entre duas placas metálicas descarregadas)

Interações

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 interações?

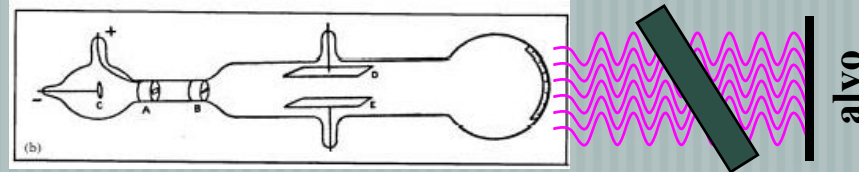
3

Interações

Raios-X + Radioatividade

1895: Wilhelm Conrad **Roentgen** (1845-1923) descobre os Raios-X

P.N. 1901



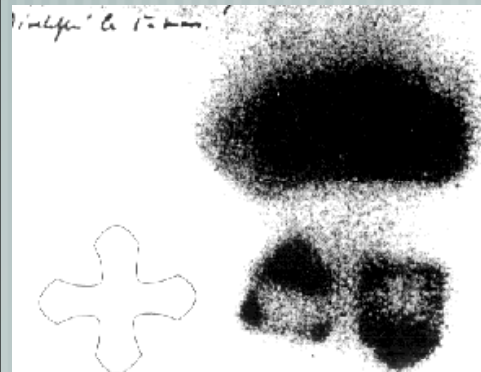
Observou uma radiação muito penetrante, que não sofria reflexão nem refração, nem era sensível a campos electromagnéticos.

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

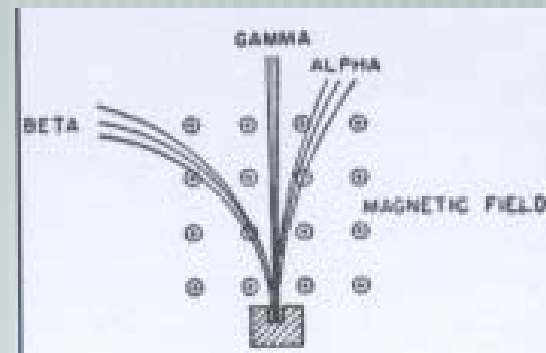


1896: Henri **Becquerel** descobriu uma radiação espontânea em cristais de Urânio: Raios **U**

P.N. 1903



Radioatividade



1898: **Marie & Pierre Curie** : radiação ionizante na 'Pechelblenda' (Urânio + **Polónio**). Descobriram ainda o **Rádio**, ++radioactivo!

P.N. 1903,1911

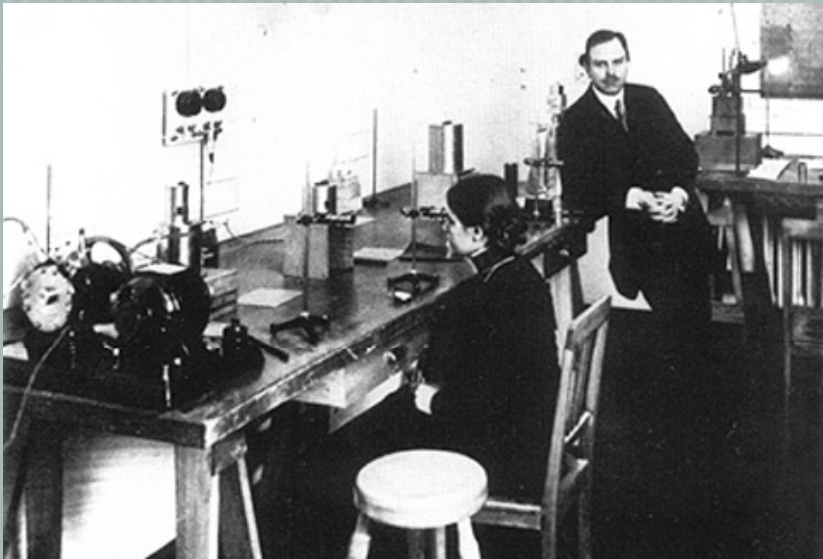
Qual a origem desta radiação ?! ⇒ Transições Nucleares!

Interacções

Interacção Fraca

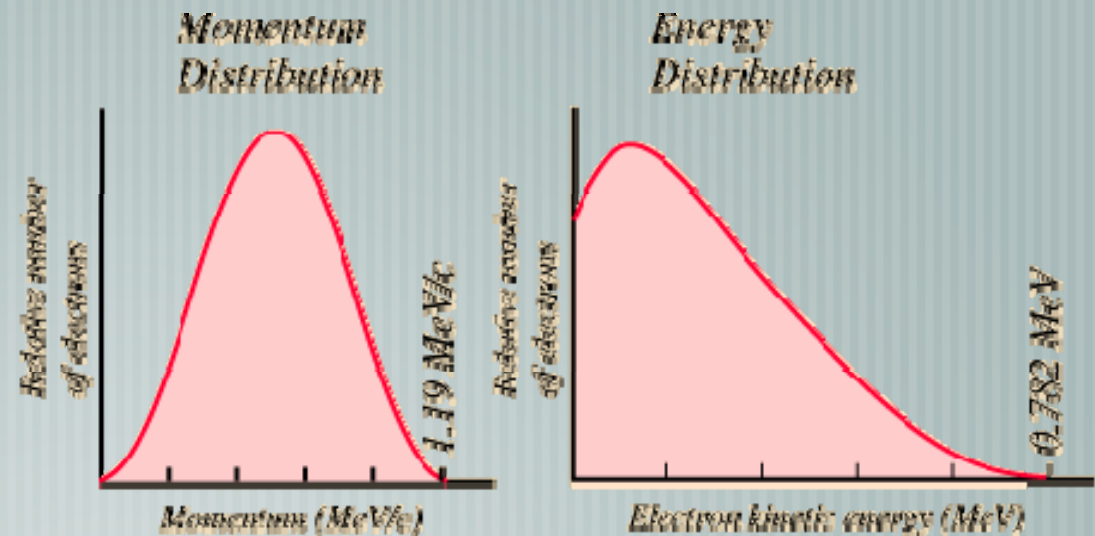
Mistério nas transições nucleares $(A,Z) \rightarrow (A,Z+1) + e^-$ (Declínio Beta):

Electrões emitidos com vários valores de energia e momento !?



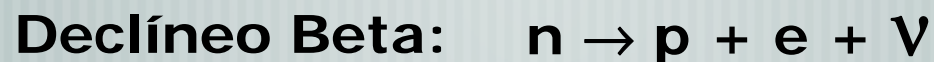
1911 Lise Meitner, Otto Hahn

Violação da Conservação da Energia?



1930 Wolfgang Pauli: **partícula extremamente leve e neutra*** é emitida no declínio β

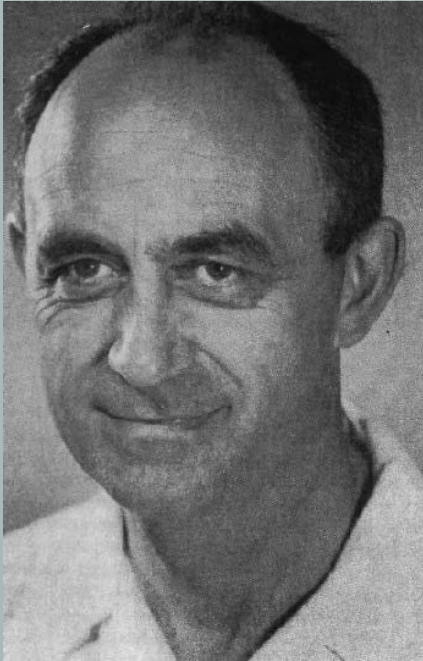
*'neutrão', mas em 1931 Fermi chamou-lhe "neutrino" (pequeno neutrão [italiano])



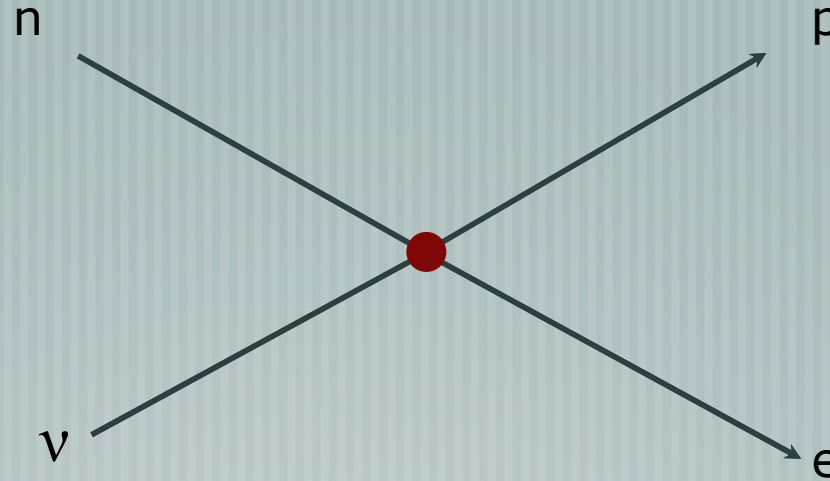
Interacções

Interacção Fraca

Que teoria para o decaimento beta?



Enrico Fermi
(1934)



Propôs um modelo fenomenológico para a interacção fraca

Acoplamento pontual com intensidade $G_F \sim 10^{-5}$ intensidade e.m.

Acoplamento e Interacção entre 'correntes'
(protão-neutrão / electrão-neutrino)

Eficaz para descrever os processos:

$$\begin{aligned} p &\rightarrow n + e^+ + \nu & p + e^- &\rightarrow n + \nu \\ n &\rightarrow p + e^- + \bar{\nu} \end{aligned}$$

Ok até ~1960

$$\nu + n \rightarrow p + e^- \quad \bar{\nu} + p \rightarrow n + e^+$$
$$(\bar{\nu}(\nu) + e^- \rightarrow \bar{\nu}(\nu) + e^-)$$

Interacções

Interacção Forte

E quanto à Interacção Forte: porque é que há núcleos coesos?!



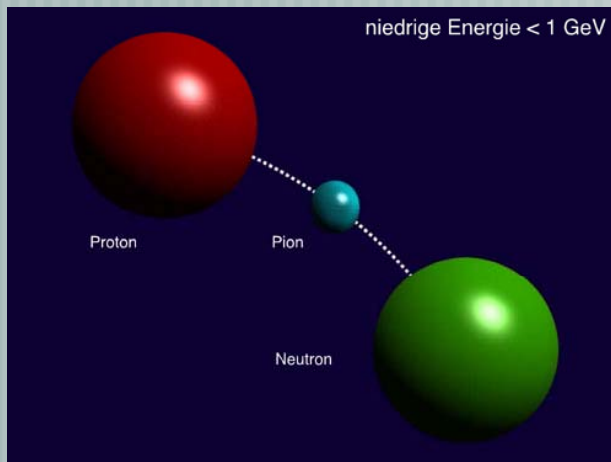
Yukawa propôs a troca de uma partícula com massa

Pião

$$V(r) = -g^2 \frac{e^{-mr}}{r}$$

Lei de Coulomb modificada

Yukawa (1934)



Alcance versus Massa (princ. incerteza): 1.4 fm ~ 140 MeV