

Mecânica

Newton

Electro-  
magnetismo

Maxwell

Teoria Cinética,  
Termodinâmica

Boltzmann

### Partículas

### Interações

### Detectores

### Aceleradores (Raios Cósmiticos e Aceleradores Artificiais)

Electromagnético Fraco Forte

1895

$e^-$

Movimento  
Browniano

Fotão

Radio-  
actividade

3

Electroscópio

Raios Cósmiticos

1900

Átomo

Relatividade  
Restrita

2

Contador Geiger

Raios Cósmiticos

1905

Núcleo

Mecânica Quântia  
Onda/Corpúsculo  
Fermiões / Bosões

Câmara de Nuvens

1910

$p^+$

1920

$n$

1930

$e^+$

Dirac  
Antimatéria

Dcaimento  
Beta (Fermi)

Yukawa  
Troca  
 $\pi$

Circuito de  
Coincidências

Ciclotrão

1940

$\mu^-$

1950

$\tau^-$

$p^-$

$\pi$   
Zoo  
Partícu-  
las

QED

Violação  
P, C, CP

Câmara de Bolhas

Sincrotrão

1960

$\nu_e$

u d s

Higgs

Bosões W

Câmaras de Fios

Colisão  $e^+e^-$

R.C. Energias Extremas

1970

$\nu_\mu$

c

GUT

Unificação E-F

Côr  
QCD

Computadores em  
Aquisição de Dados

Arrefecimento Estocástico

1975

$\tau^-$

MODELO PADRÃO

SUSY

Supercordas

W

Z

g

Detectores  
Modernos

Colisão  $p^+p^-$

1980

$\nu_\tau$

b

1990

t

3 famílias

LEP

WWW

GZK + Anisotropia

2000

massa  $\nu$

LHC

GRID

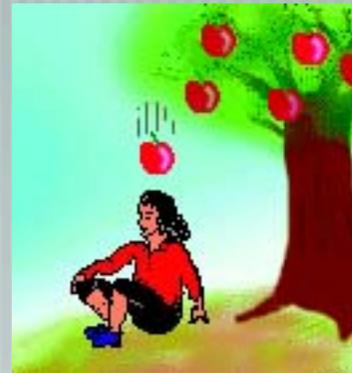
2010

O que mantém juntos os átomos e os núcleos?

1900: conhecidas duas interacções fundamentais:

$$F_G = G_N m_1 m_2 \frac{1}{r^2} \quad \mathbf{G}_1$$

$$F_E = K_E Q_1 Q_2 \frac{1}{r^2} \quad \mathbf{E}_1$$



Gravidade

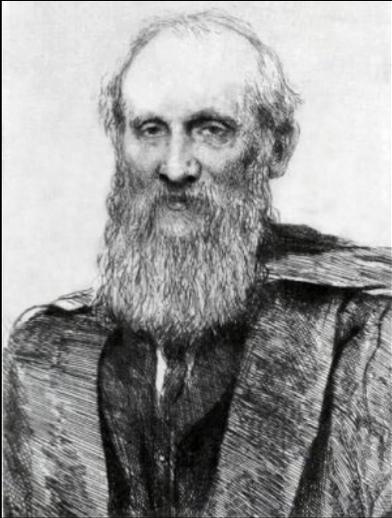


Electromagnetismo

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

Diferenças: as intensidades são muito "diferentes"  
 (36 ordens de grandeza para 2 prótons)

**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**

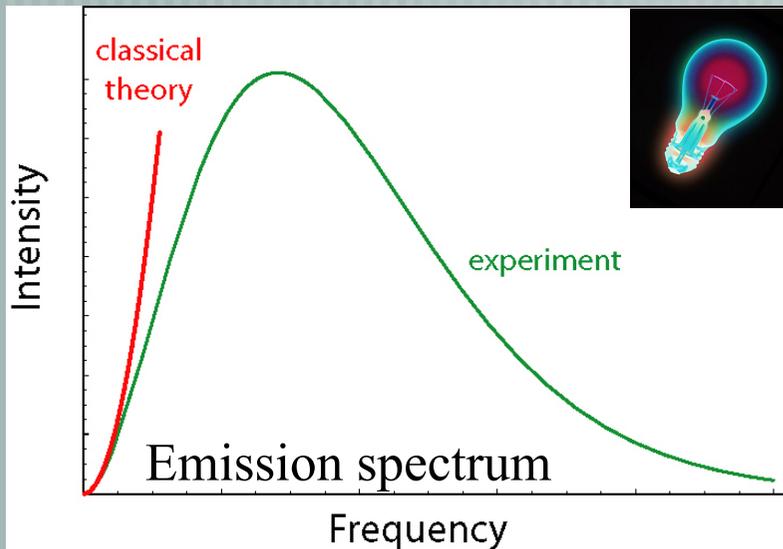
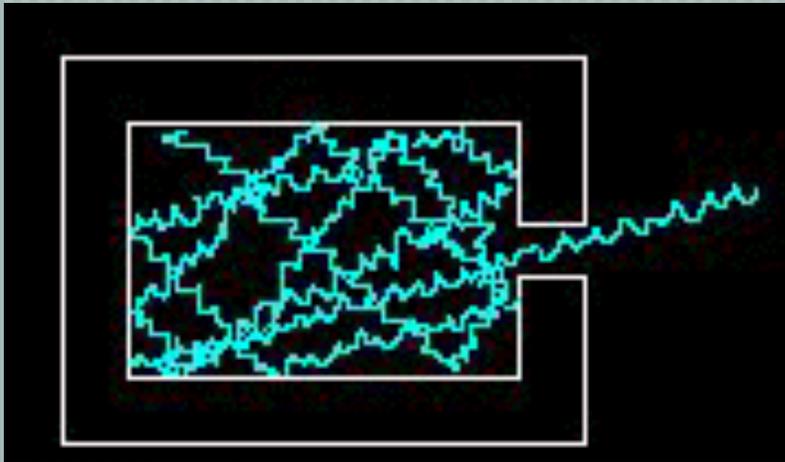
- Teoria Quântica**
- Relatividade**

# 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.

# Interacções

Electromagnetismo

Fotão

um “Acto de Desespero”

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

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

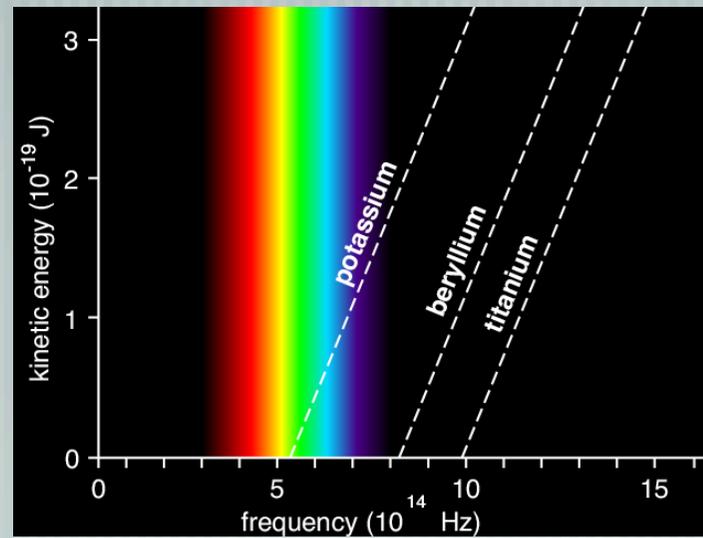
## O Efeito Fotoelétrico

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**



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

“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;**

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

**2) Todos os referenciais inerciais são equivalentes.**

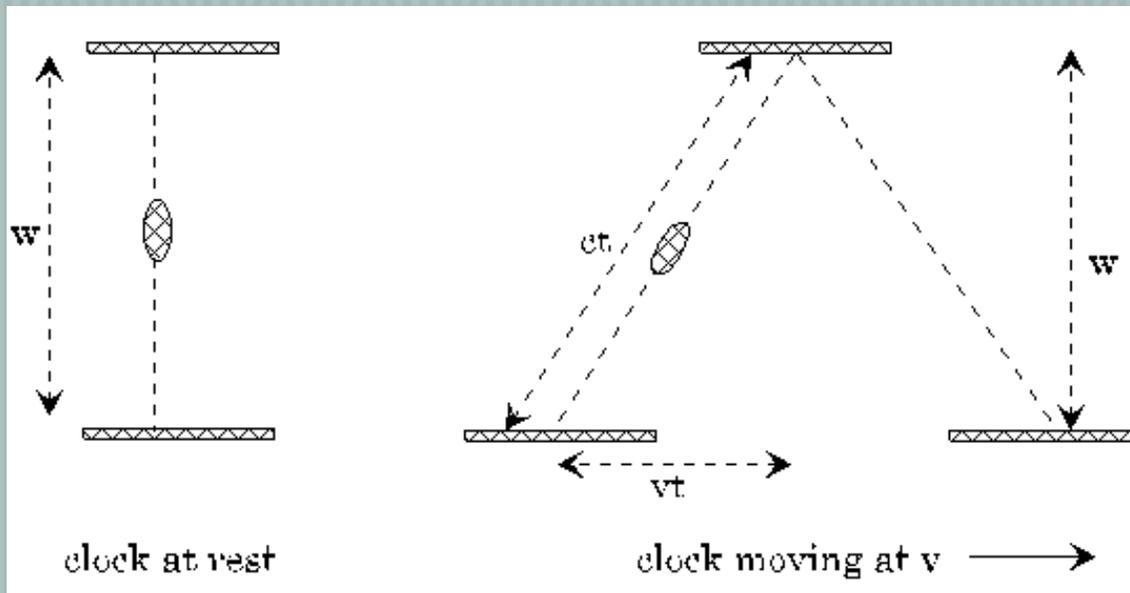
***Mas como é que se pode ter a mesma velocidade da luz em todos os referenciais inerciais?!***

### 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

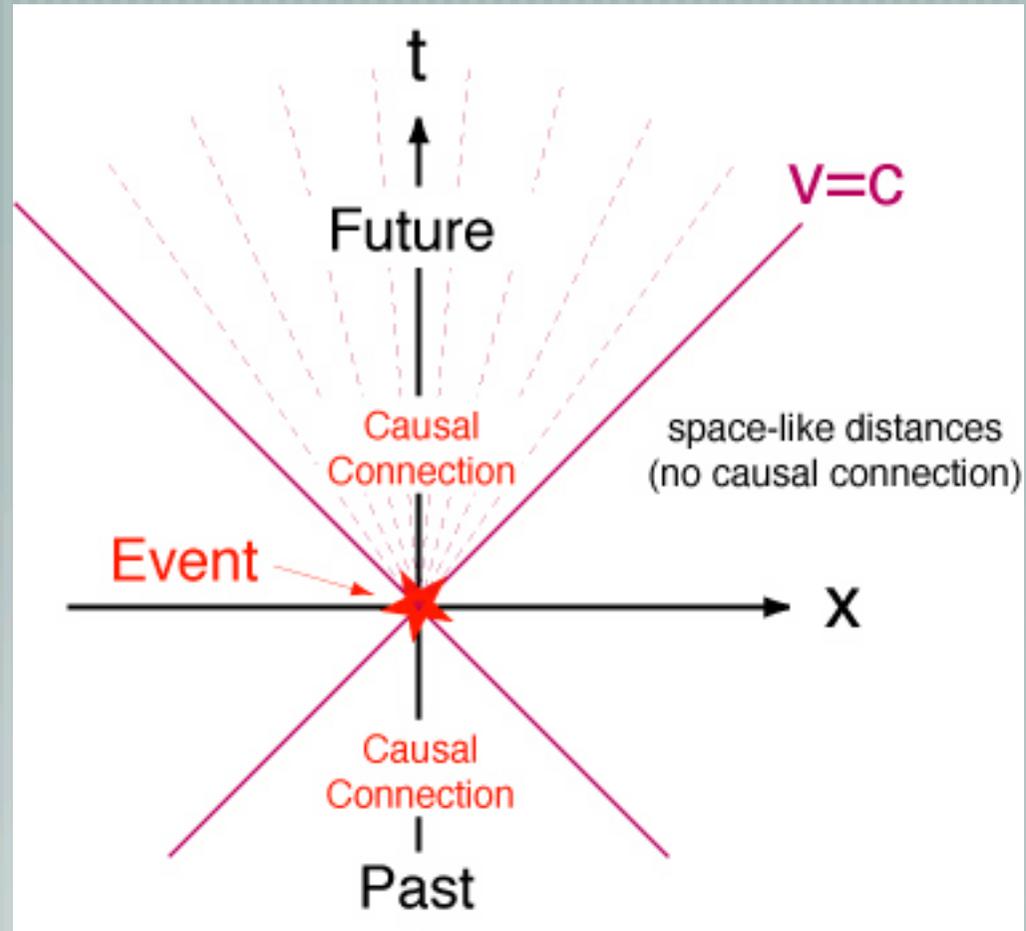
Relatividade

## 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!**

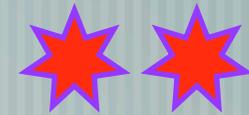
# Interacções

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

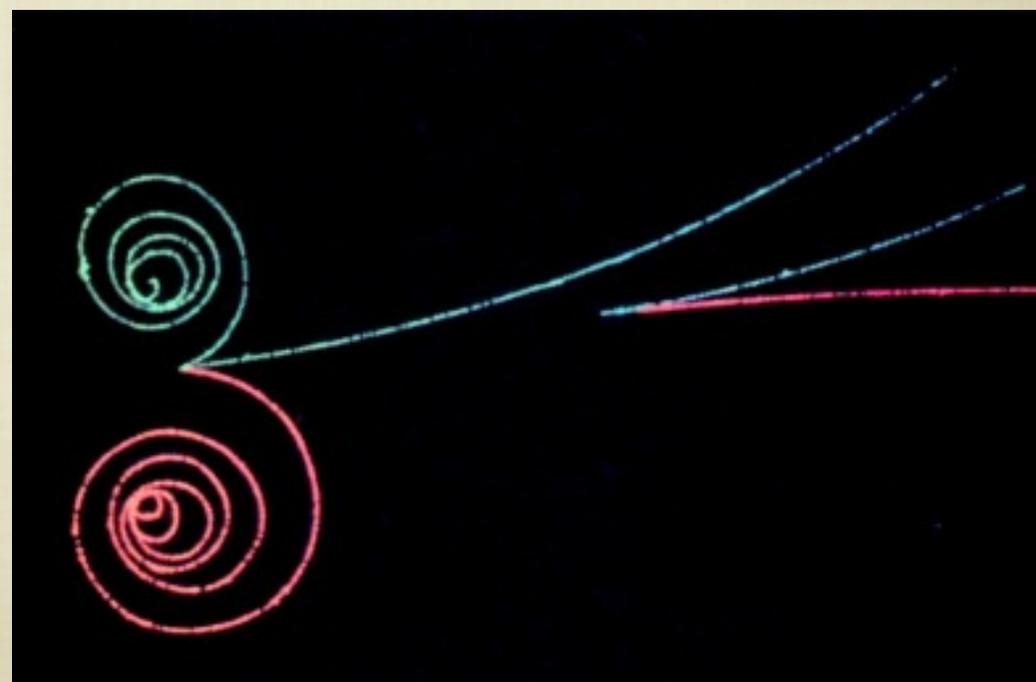
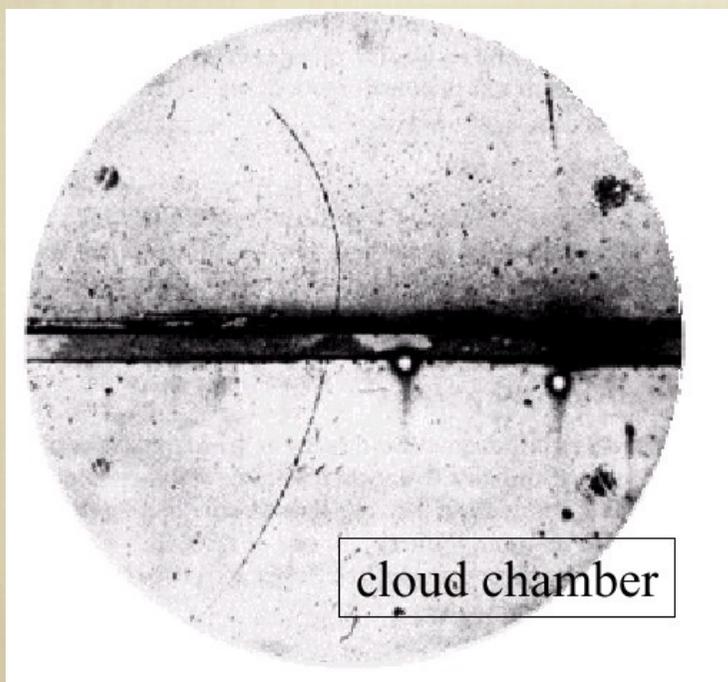
1936



Anderson (1932)

## Descoberta do Positrão

*Dirac estava certo!*



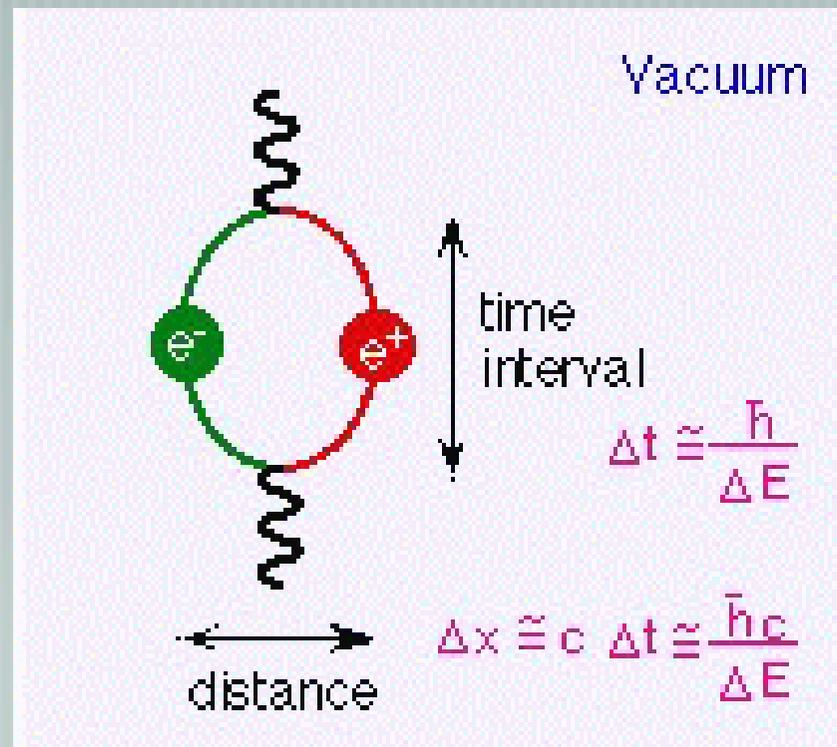
# Interacções

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**

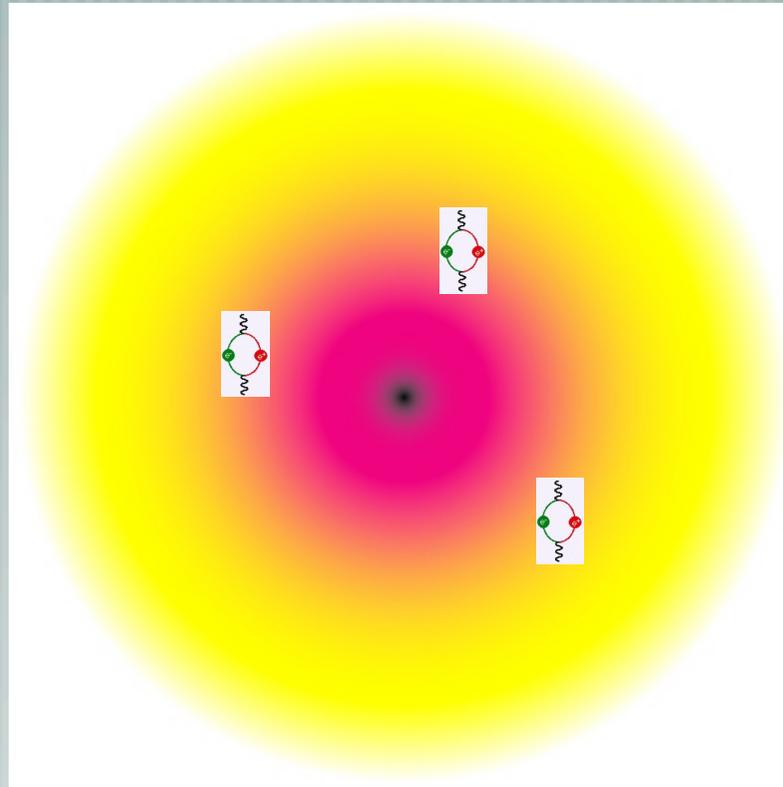
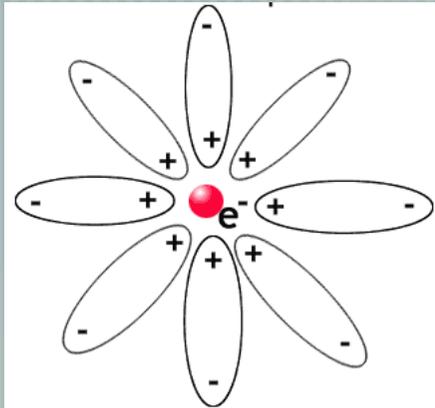


# Interações

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’)

# Interacções

Electromagnetismo

1934 - 1948



R. P. Feynman

## QED: Electrodinâmica Quântica

Feynman, Tomonaga, Schwinger

### “Renormalização”

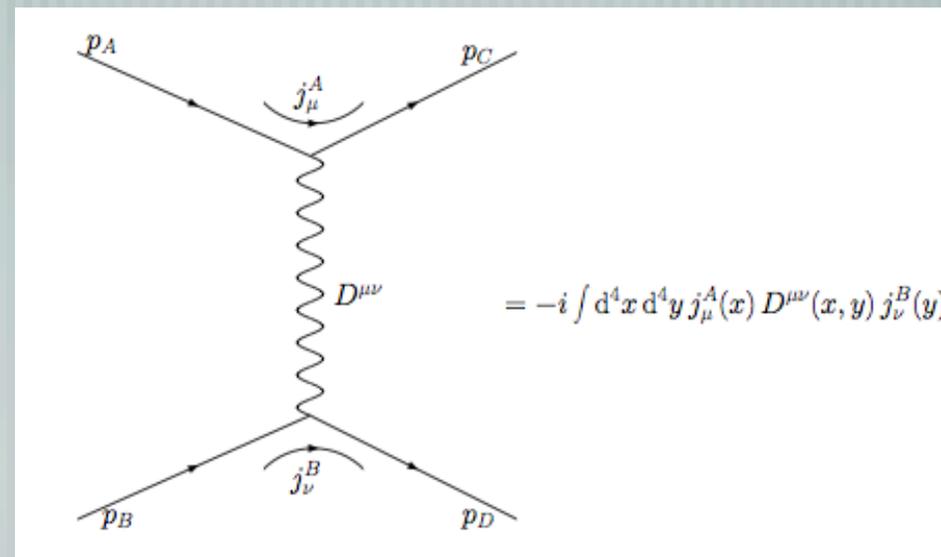
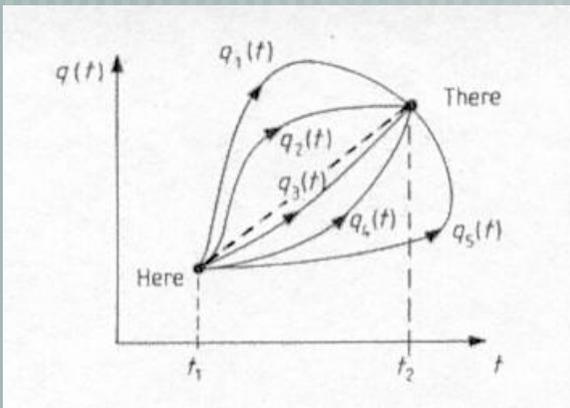
electrão ‘nu’ + flutuações vácuo = electrão medido

(“infinito” - “infinito” = “finito”)

### Diagramas de Feynman

Regras de cálculo Exactas – numa forma gráfica

Todos os caminhos  
são possíveis



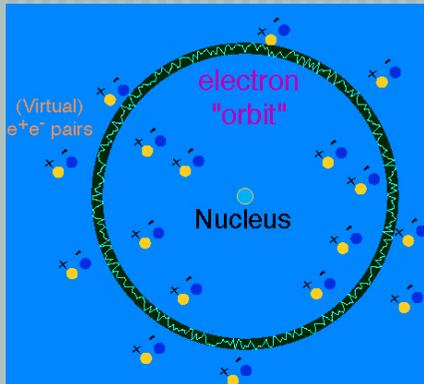
# Interações

1948

Electromagnetismo

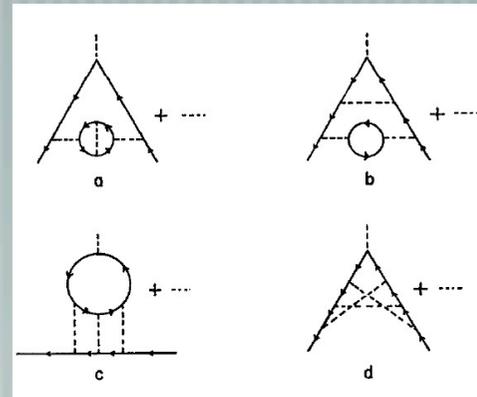
**Flutuações do Vácuo têm efeitos observáveis!**

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



**Desvio de Lamb**

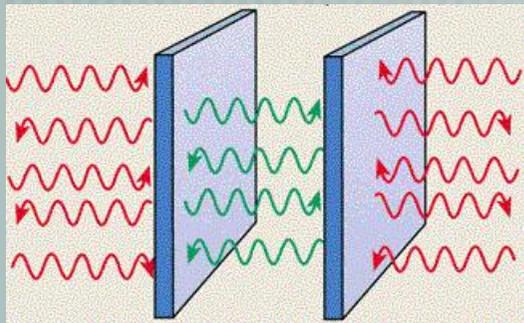
(desvios nos níveis de energia)



**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)

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

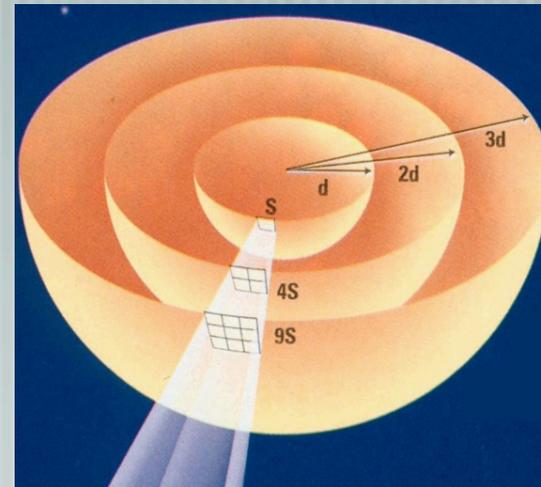
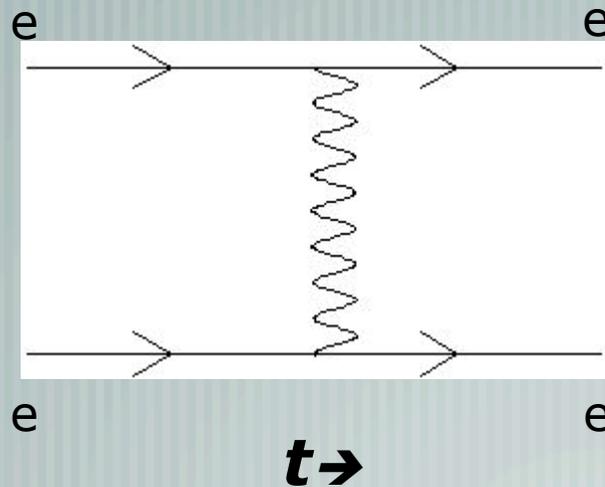
$$g_{EX} = 1,00115965218073 \pm 0,0000000000000028$$

# 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?**

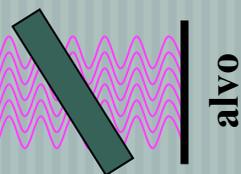
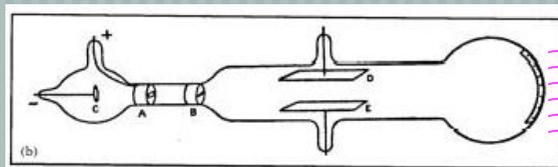
# 3

# Interacções

Raios-X + Radioactividade

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

P.N. 1901



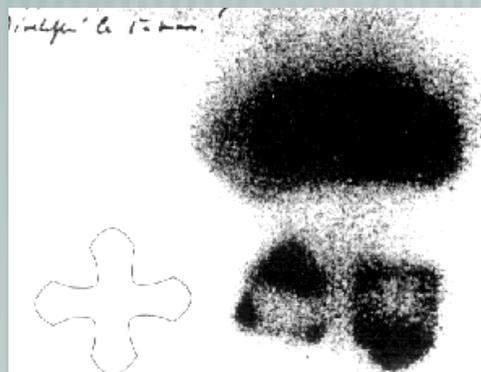
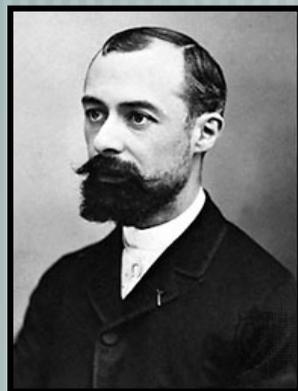
Observou uma radiação muito penetrante, que não sofria reflexão nem refacção, nem era sensível a campos electromagnéticos.

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

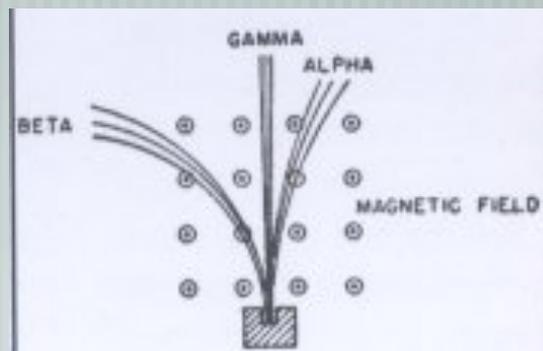


**1896:** Henri **Becquerel** descobriu uma radiação espontânea em cristais de Urânio: Raios **U**

P.N. 1903



## Radioactividade



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

P.N. 1903, 1911

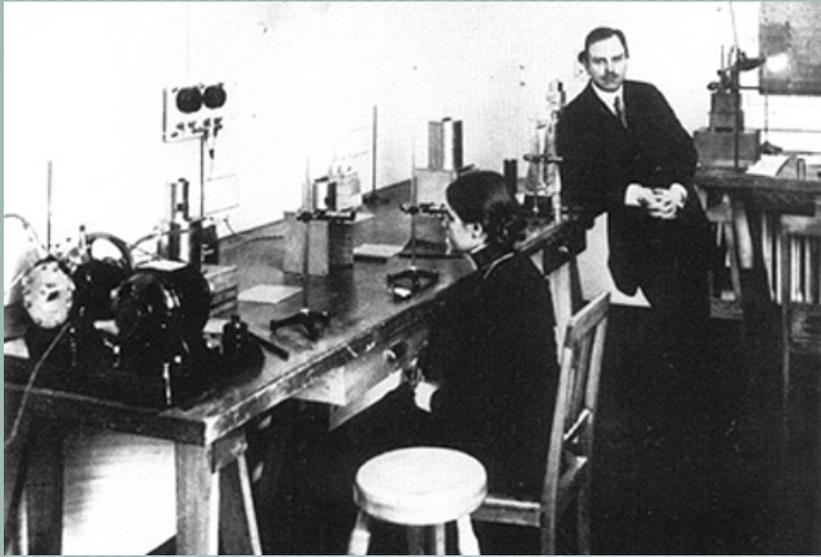
Qual a origem desta radiação ?! → Transições Nucleares!

# Interacções

## Interacção Fraca

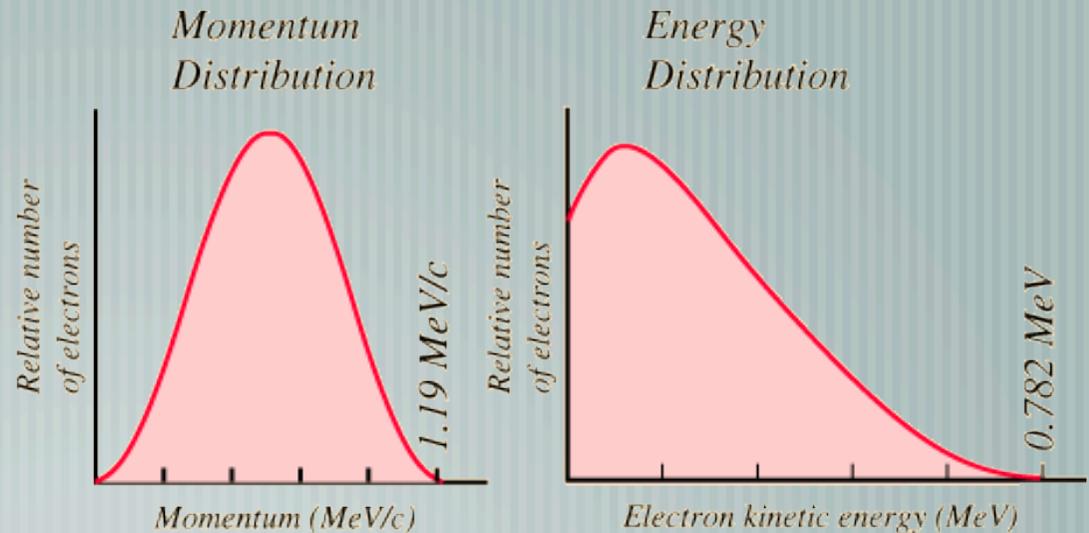
Mistério nas transições nucleares  $(A,Z) \rightarrow (A,Z+1) + e^-$  (**Declíneo Beta**):

**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 declíneo  $\beta$

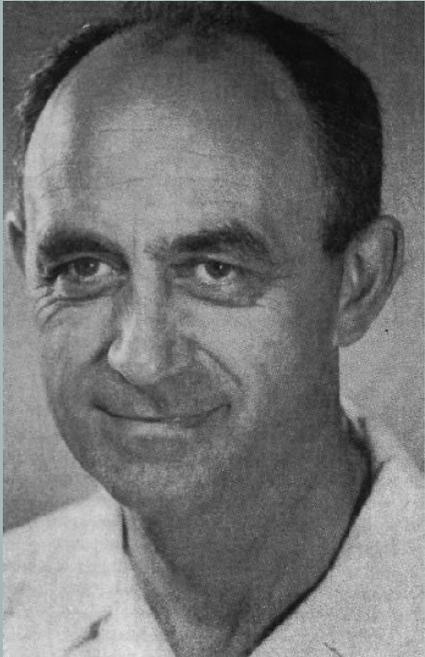
\*'neutrão', mas em 1931 Fermi chamou-lhe "neutrino" (pequeno neutrão [italiano])



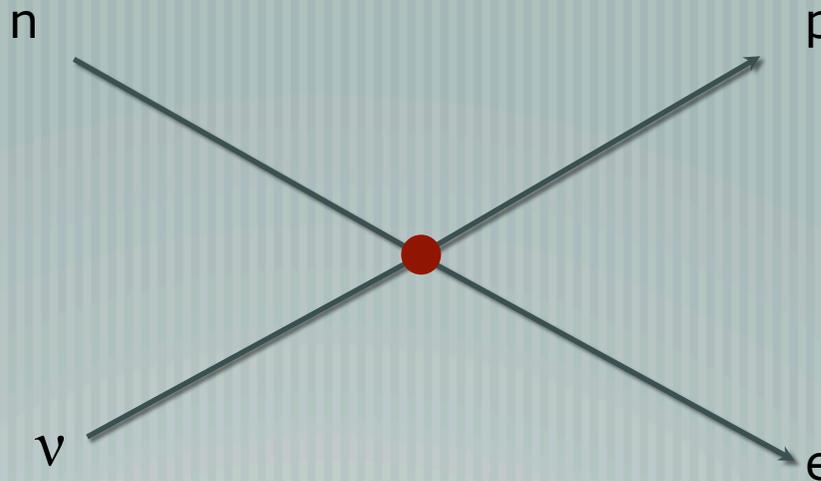
# Interacções

## 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:

$$p \rightarrow n + e^+ + \nu$$

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

**Ok até ~1960**

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

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

# Interações

## Interação Forte

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



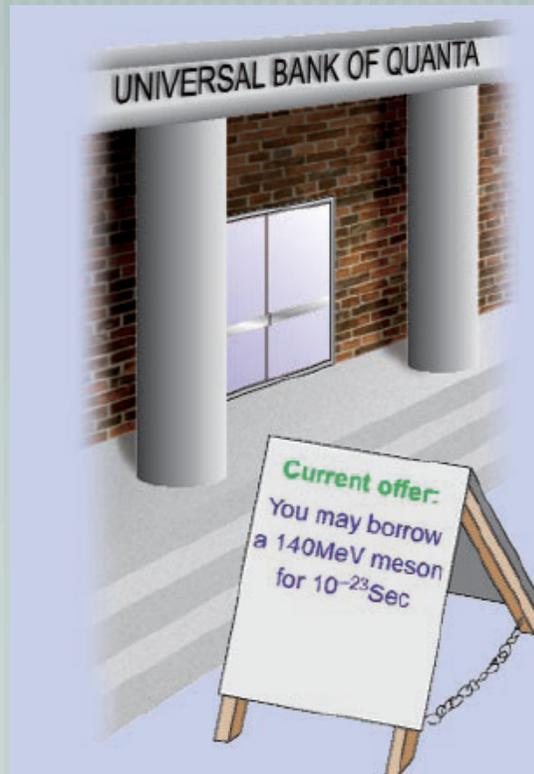
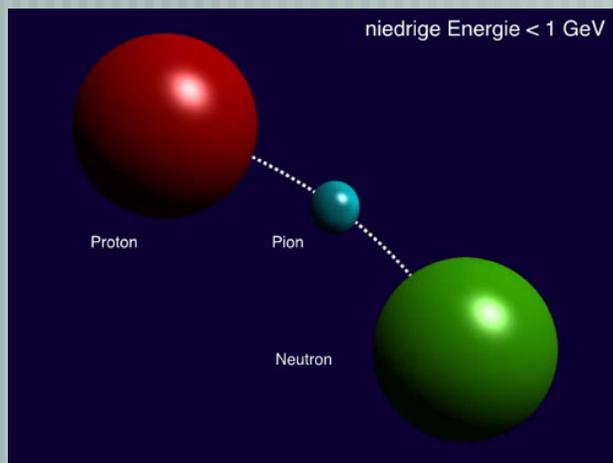
Yukawa propôs a troca de uma partícula com massa

**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

Mecânica

Newton

Electro-  
magnetismo

Maxwell

Teoria Cinética,  
Termodinâmica

Boltzmann

### Partículas

### Interações

### Detectores

### Aceleradores (Raios Cósmitos e Aceleradores Artificiais)

1895

$e^-$

Movimento  
Browniano

Fotão

Radio-  
actividade

1900

Átomo

Relatividade  
Restrita

1905

1910

Núcleo

Mecânica Quântia  
Onda/Corpúsculo  
Fermiões / Bosões

1920

$p^+$

1930

$e^+$

$n$

Dirac  
Antimatéria

Decaimento  
Beta (Fermi) / Yukawa  
Troca  
 $\pi$

1940

$\mu^-$   
 $\tau^-$   
 $p^-$

Zoo  
Partícu-  
las

QED

Violação  
P, C, CP

1950

1960

$\nu_e$

u d s

Higgs

Unificação E-F

Bosões W

1970

$\nu_\mu$

c

GUT

Côr  
QCD

1975

$\tau^-$

MODELO PADRÃO

SUSY

1980

$\nu_\tau$

b

Supercordas

W Z g

1990

t

3 famílias

2000

massa  $\nu$

2010

4

5

Detecutores  
Modernos

Electroscópio

Contador Geiger

Câmara de Nuvens

Circuito de  
Coincidências

Câmara de Bolhas

Câmaras de Fios

Computadores em  
Aquisição de Dados

Raios Cósmitos

Ciclotrão

Chuveiros de Partículas

Sincrotrão

Colisão  $e^+e^-$

R.C. Energias Extremas

Arrefecimento Estocástico

Colisão  $p^+p^-$

LEP

WWW

GZK + Anisotropia

LHC

GRID

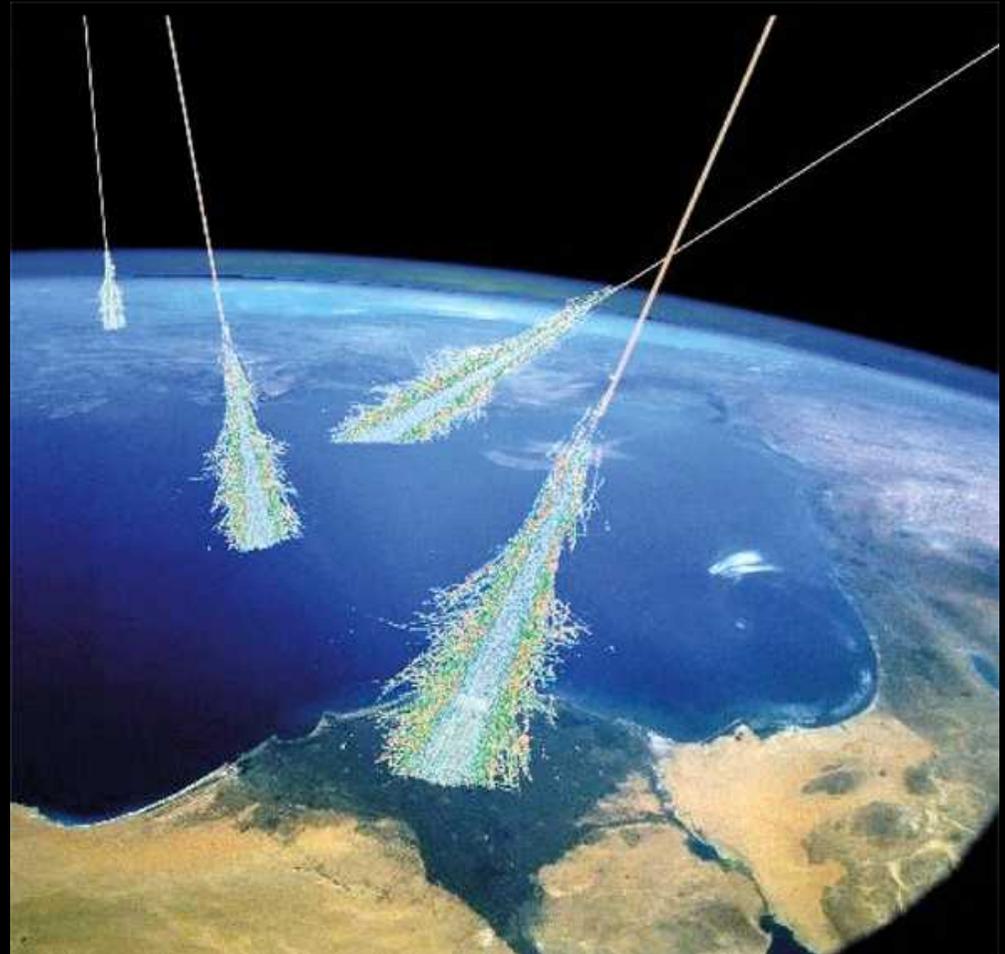
Em 1912, primeiras sugestões de um universo violento apareceram



Victor Hess

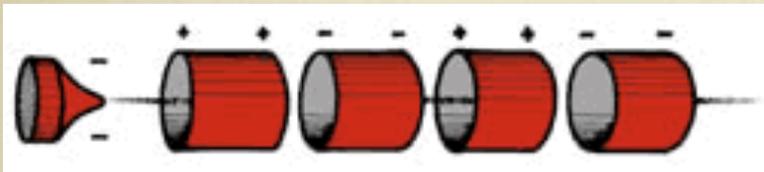


## Descoberta dos raios cósmicos





Rolf Wideroe, 1928

Scanned at the American  
Institute of Physics

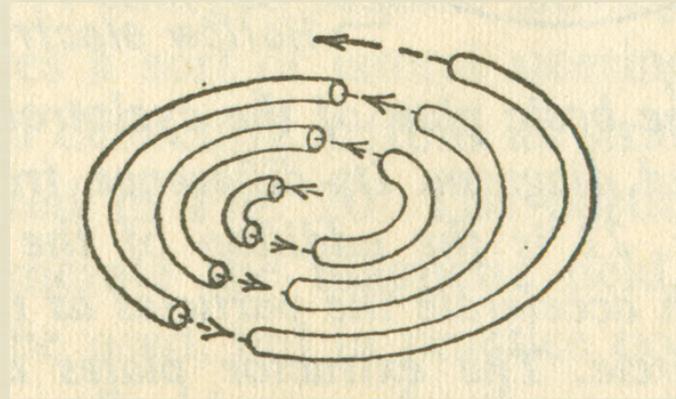
## Acelerador Linear

Acelera partículas nos intervalos entre eléctrodos  
Radiofrequência ajustada para compensar mov. part.

## Aceleradores

*"Raios cósmicos feitos pelo Homem"*

Ernest Lawrence, 1931



## Ciclotrão

Usa-se um campo magnético para obrigar as partículas a descrever trajetórias semi-circulares.  
Partículas passam muitas vezes pelo mesmo intervalo de aceleração e atingem energias muito elevadas:

1931: 80 keV

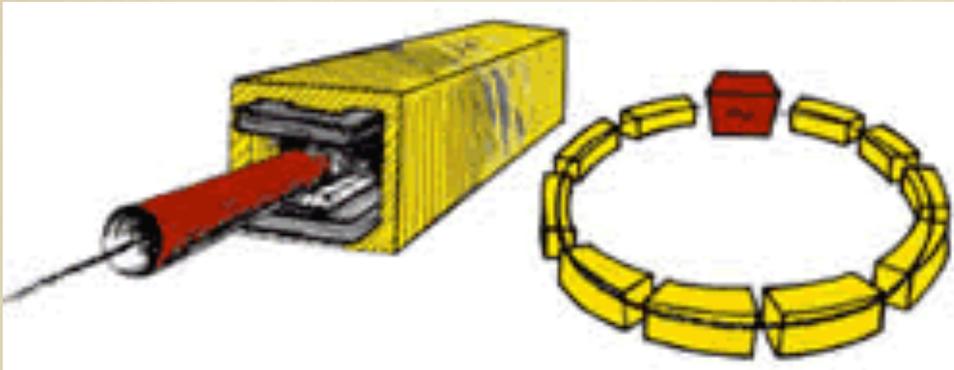
1932: 1000 keV

1939: 19 MeV\*

1946: 195 MeV ("synchrocyclotron")

\*primeiras limitações devido à relatividade

## **Aceleradores (2)**



### **Sincrotrão**

Idêntico ao ciclotrão, mas campo magnético também é alterado para manter as partículas na **mesma órbita** resolvendo também o problema das velocidades relativistas.

### **1947: US constrói 2 'sincrotrões'**

Brookhaven (1952) - 3 GeV

Berkeley (1954) - 6.2 GeV ('antiprotão')

### **1954: Europe compete com US**

CERN (1959) - 24 GeV

Brookhaven (1960) - 30 GeV

## **Detectores**

Contadores Geiger

Câmaras de Nuvens

Emulsões Fotográficas

Câmaras de Bolhas

Contadores Cherenkov

Fotomultiplicadores

Câmaras de Faíscas

Cintiladores

### **Após 1967:**

Câmaras de Fios

Câmaras de Deriva

Calorímetros

Detectores de Silício!

Depois da previsão de Yukawa da existência de um 'pião' (1934), para explicar a interacção forte, houve muitos à procura dessa partícula (com massa  $\sim 100-200$  MeV).

Não havia aceleradores, e mais uma vez, colocaram-se os detectores no topo das montanhas para analisar os raios cósmicos...

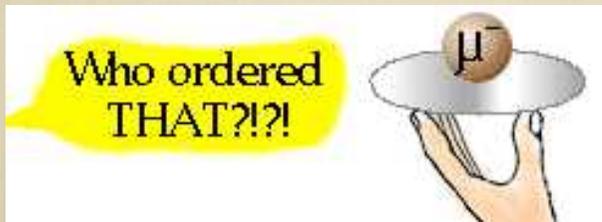
**Em 1937 foi descoberta uma nova partícula com essa massa (106 MeV)!**

Seria esta o pião de Yukawa?!

Mas: alcance na matéria muitíssimo elevado !! ?

Isto é: não pode ter interacção forte com os núcleos, logo não poderia ser o pião de Yukawa!

Mas então é o quê?! => Muão



**Muão = 'electrão pesado' (206 x  $m_e$ )**

**I. Rabi: "Mas quem o encomendou ?!"**

$\pi$

# PARTÍCULAS

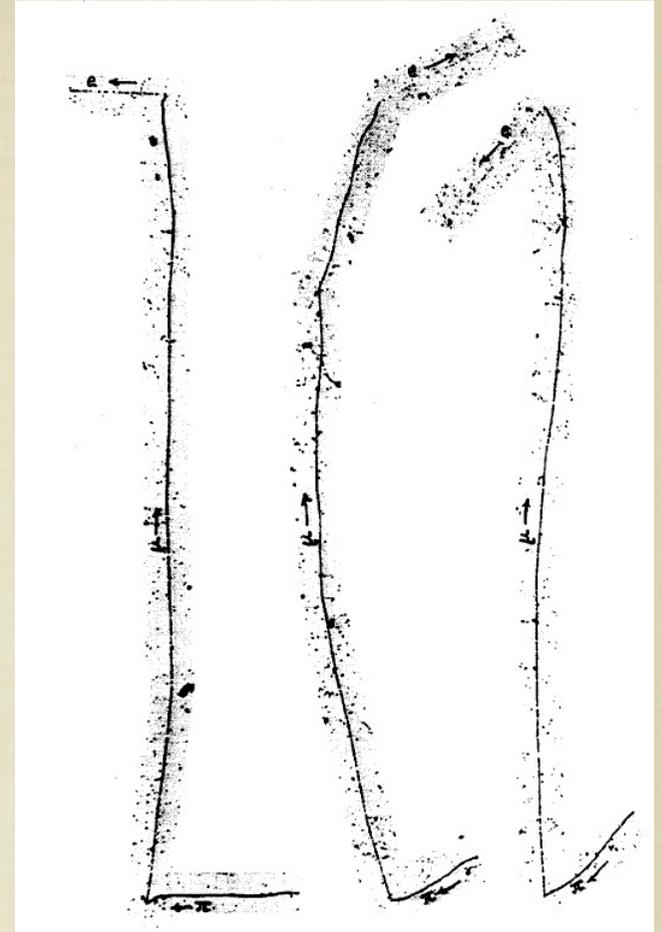
1947

## Descoberta do pião (carregado)



Cecil Powell

Ouff!



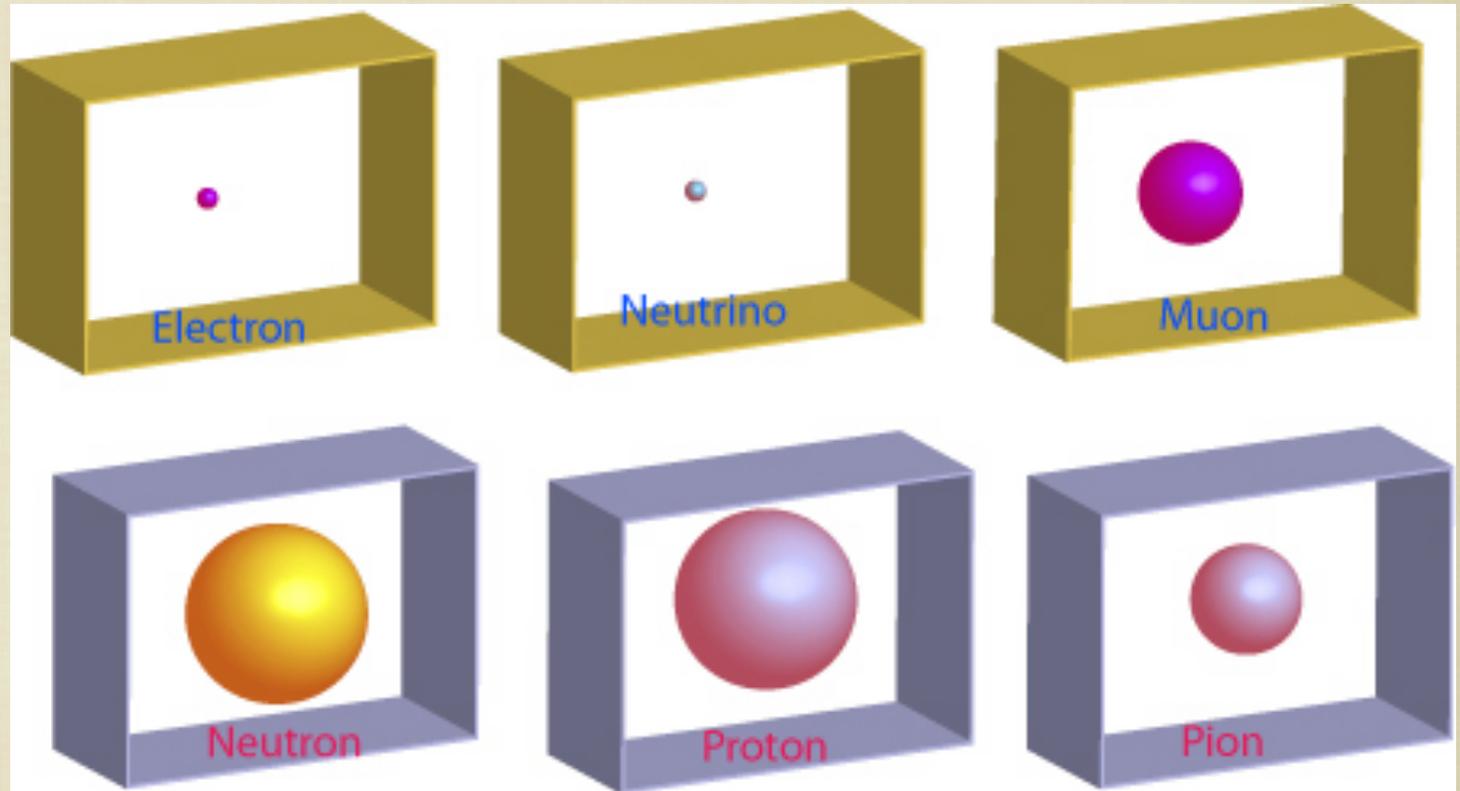
Técnica **Emulsão Fotográfica**

Raios Cósmicos a **grande altitude** (Pic du Midi, Pirinéus)

Traços dos Piões identificados ao microscópio

Um ano +tarde: Piões produzidos no Ciclotrão de Berkeley (Alfa+Carbono)

## LEPTÕES



## HADRÕES