

4

O Universo

Antes do séc.XX, o Universo parecia um local calmo. Não acontecia grande coisa.

Cientistas assumiam o Universo como sendo infinito e eterno.

Contudo, obviamente havia um pequeno problema:

A Noite é Escura!

Isto não é compatível com um Universo infinito e eterno.

“Paradoxo” de Olbers

Heinrich Wilhelm Olbers (1823)

Se o Universo é infinito e eterno (e com uma densidade de estrelas +-uniforme), então todas as linhas de visão deveriam terminar na superfície de uma estrela.

Formalmente:

Cada camada contribui com n° estrelas $\sim r^2$

A luz diminui de intensidade com $\sim 1/r^2$

Contribuição de luz de cada camada = constante

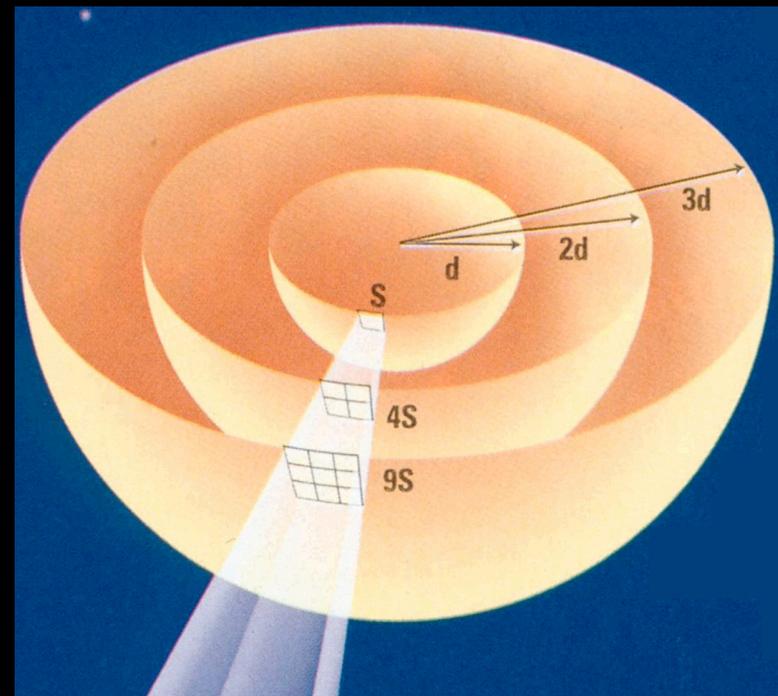
O Céu deveria ser cheio de luz

Consequência:

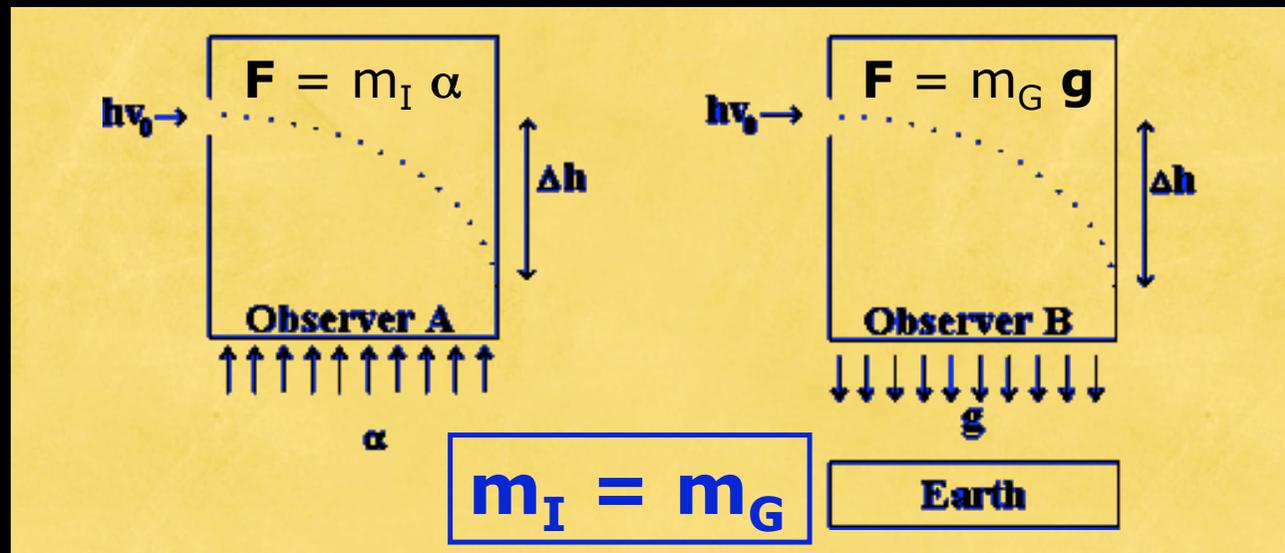
Universe não existiu sempre, ou ...

Universo tem um tamanho finito, ou ...

Ambos!



Princípio de Equivalência



Massa Inercial = Massa Gravítica

Aceleração = Gravitação

"A Ideia mais feliz da minha vida" (Albert Einstein)

Universo

1915

O caminho mais curto no espaço definido pelos raios de luz.

Elevador acelerado: luz segue uma trajectória parabólica

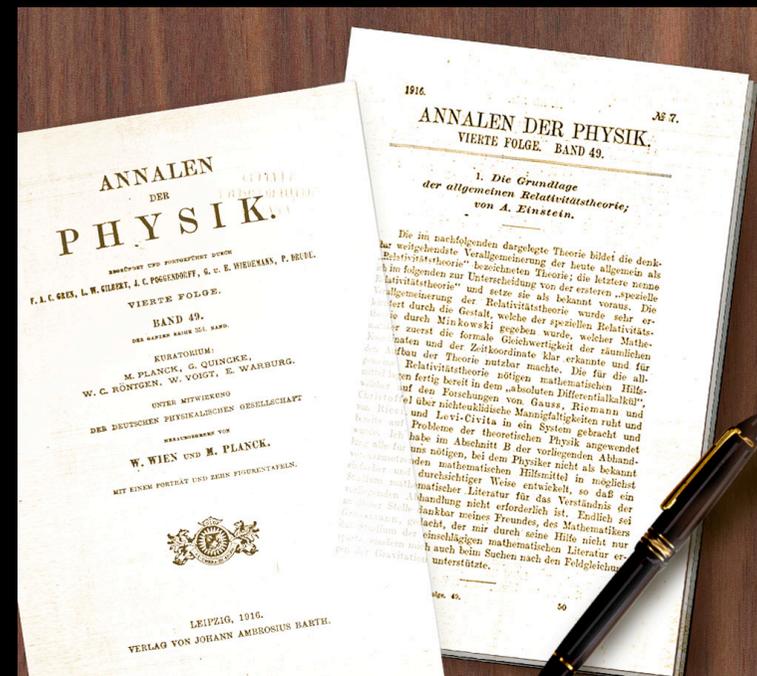
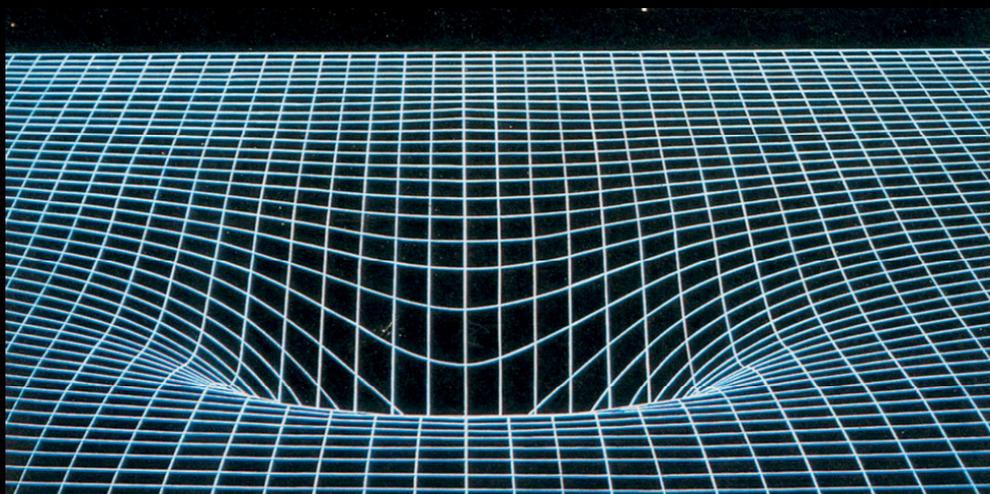
Campo Gravítico: raios de luz são curvados!

Espaço e Tempo são curvos!

Albert Einstein (1912-15) : Relatividade Geral

Matéria diz ao Espaço como se curva

Espaço diz à Matéria como é que se move

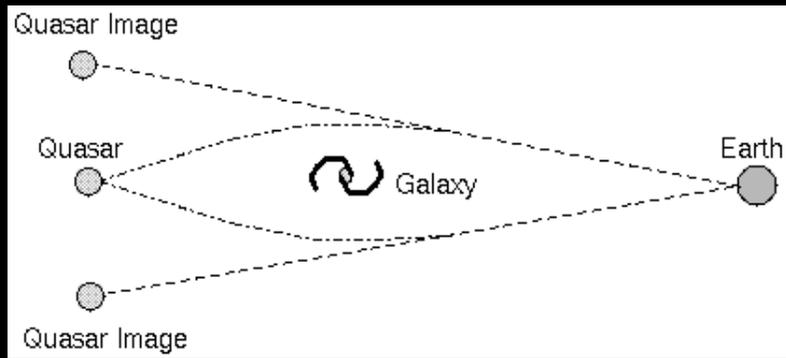


$$G_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}$$

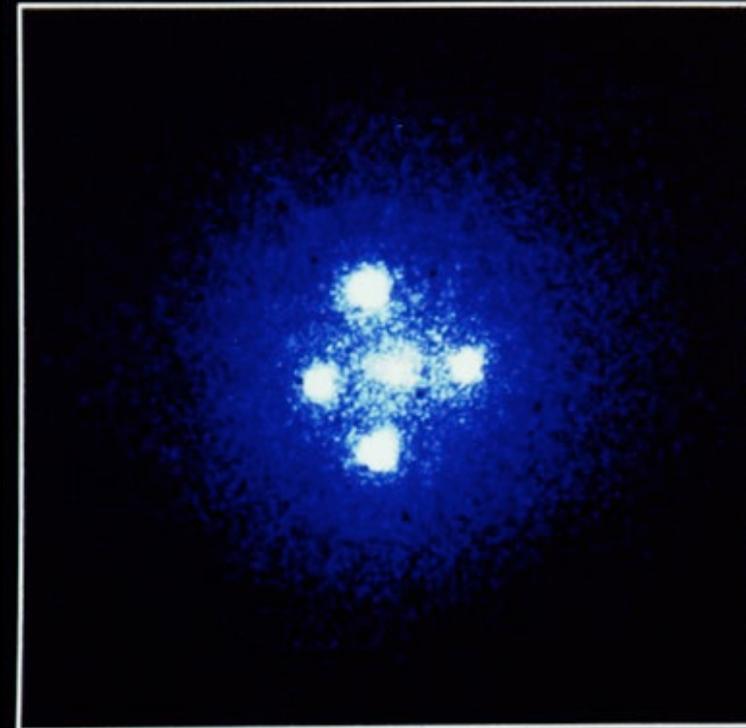
$$\begin{aligned}
 R_{\eta\eta} = & -\frac{2a^2 \frac{\partial \psi}{\partial \delta} \cot \theta}{\delta \psi} + \frac{2ac \frac{\partial \psi}{\partial \eta} \cot \theta}{\delta \psi} + \frac{a \frac{\partial c}{\partial \eta} \cot \theta}{\delta \psi} - \frac{\frac{\partial a}{\partial \eta} c \cot \theta}{\delta \psi} - \frac{a \frac{\partial a}{\partial \delta} \cot \theta}{\delta \psi} - \frac{2a^2 \frac{\partial^2 \psi}{\partial \delta^2}}{\delta \psi^2} \\
 & - \frac{a \frac{\partial a}{\partial \delta} c \frac{\partial c}{\partial \delta}}{a^2 c^2} - \frac{a \frac{\partial a}{\partial \eta} b \frac{\partial c}{\partial \delta}}{a^2 c^2} - \frac{a \frac{\partial b}{\partial \eta} c \frac{\partial c}{\partial \eta}}{a^2 c^2} - \frac{a^2 \frac{\partial b}{\partial \delta} \frac{\partial c}{\partial \eta}}{a^2 c^2} + \frac{a \frac{\partial a}{\partial \eta} \frac{\partial b}{\partial \delta} c}{a^2 c^2} - \frac{a \frac{\partial a}{\partial \delta} \frac{\partial b}{\partial \eta} c}{a^2 c^2} \\
 & - \frac{2a^2 \left(\frac{\partial \psi}{\partial \delta}\right)^2}{\delta \psi^2} \\
 & + \frac{ab \frac{\partial b}{\partial \eta} c \frac{\partial \psi}{\partial \eta}}{\delta^2 \psi} + \frac{\frac{\partial a}{\partial \eta} b^2 c \frac{\partial \psi}{\partial \eta}}{\delta^2 \psi} - \frac{a^2 b \frac{\partial b}{\partial \delta} \frac{\partial \psi}{\partial \eta}}{\delta^2 \psi} - \frac{a \frac{\partial a}{\partial \delta} b^2 \frac{\partial \psi}{\partial \eta}}{\delta^2 \psi} + \frac{\frac{\partial d}{\partial \eta} \frac{\partial d}{\partial \delta}}{4d^2} - \frac{\frac{\partial a}{\partial \delta} c \frac{\partial d}{\partial \delta}}{4\delta d} \\
 & - \frac{3a \frac{\partial a}{\partial \delta} \frac{\partial \psi}{\partial \delta}}{\delta \psi} \\
 R_{\eta\theta} = & -\frac{2}{\delta} \\
 & + \frac{a^2 \frac{\partial a}{\partial \delta} b}{\delta^2 \psi} \\
 & - \frac{2}{\delta} \\
 & + \frac{ac \frac{\partial d}{\partial \delta} \frac{1}{d}}{\delta d \psi} \\
 & - \\
 & + \frac{2a^2 b \frac{\partial c}{\partial \delta} \frac{\partial \psi}{\partial \eta}}{\delta^2 \psi} \\
 & + \frac{2ab}{\delta} \\
 & + \\
 & + \frac{a^2 \psi}{\delta} \\
 & + \frac{2b}{\delta} \\
 R_{\theta\theta} = & -\frac{2ab \frac{\partial \psi}{\partial \delta} \cot \theta}{\delta \psi} + \frac{2bc \frac{\partial \psi}{\partial \eta} \cot \theta}{\delta \psi} - \frac{\frac{\partial d}{\partial \delta} \cot \theta}{d} - \frac{c \frac{\partial c}{\partial \delta} \cot \theta}{\delta} + \frac{\frac{\partial b}{\partial \eta} c \cot \theta}{2\delta} + \frac{a \frac{\partial b}{\partial \delta} \cot \theta}{2\delta} \\
 & - \frac{2ab \frac{\partial^2 \psi}{\partial \delta^2}}{\delta \psi} - \frac{2 \frac{\partial^2 \psi}{\partial \delta^2}}{\psi} - \frac{2ab \left(\frac{\partial \psi}{\partial \delta}\right)^2}{\delta \psi^2} + \frac{6 \left(\frac{\partial c}{\partial \delta}\right)^2}{\psi^2} + \frac{4bc \frac{\partial \psi}{\partial \eta} \frac{\partial \psi}{\partial \delta}}{\delta \psi^2} - \frac{ab \frac{\partial d}{\partial \delta} \frac{\partial \psi}{\partial \delta}}{\delta d \psi}
 \end{aligned}$$

Universo

1915



Confirmado por Sir Arthur Eddington
Ilha do Príncipe, 1919



Gravitational Lens G2237+0305

Universo

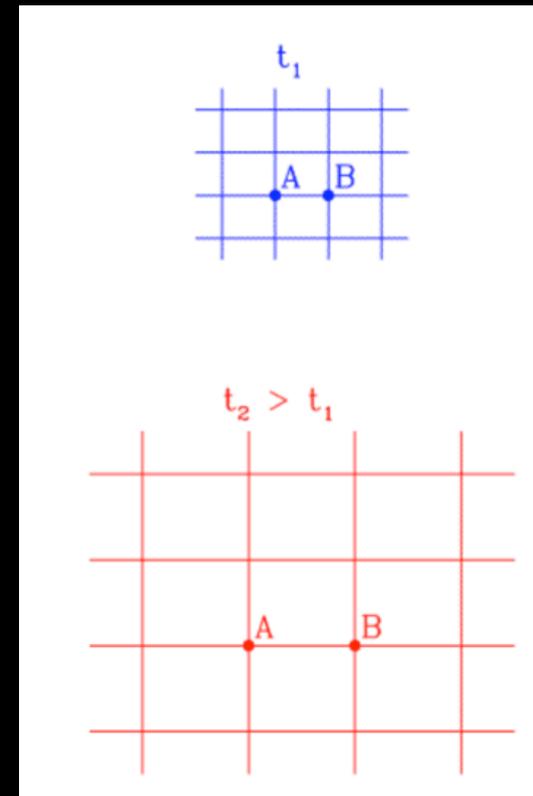
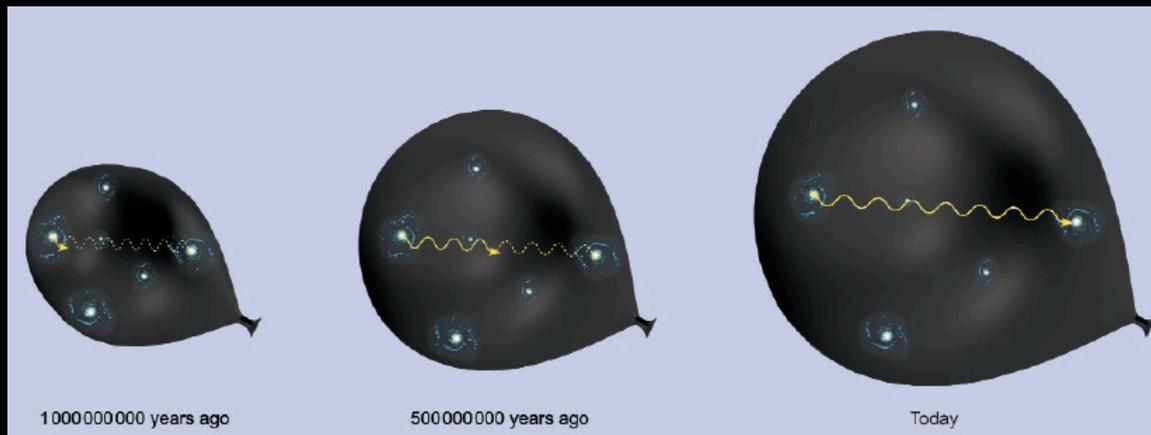
1915

Friedmann escreveu a evolução do Universo em função da escala $a(t)$

$$r_{AB}(t) = a(t)x_{AB}$$

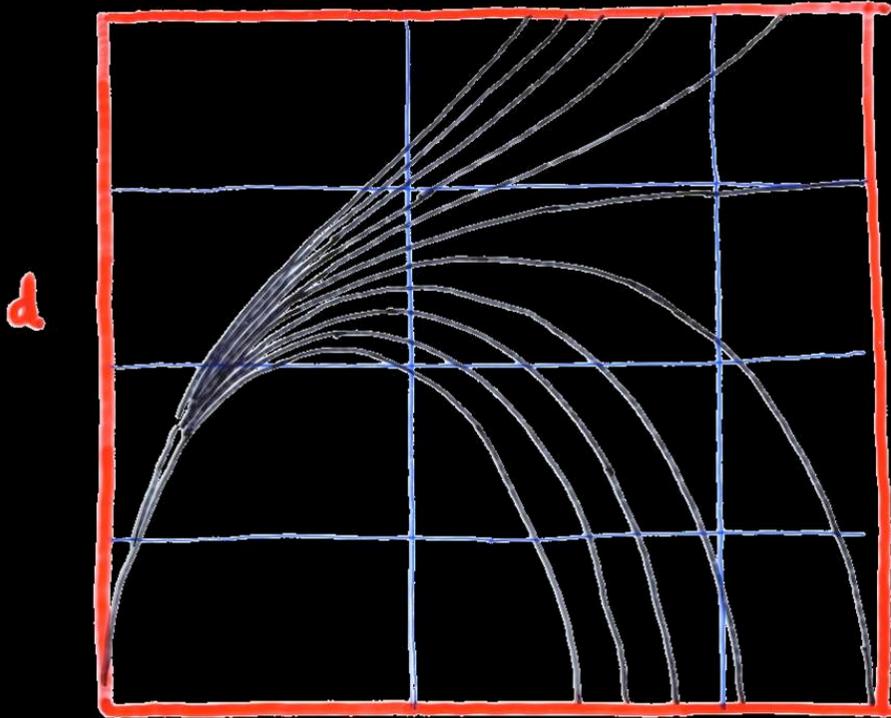
As suas equações relacionam a densidade média " ρ " e a curvatura K com a taxa de expansão da escala:

$$\left(\frac{1}{a} \frac{da}{dt}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \bar{\rho} - \frac{K}{a^2}$$

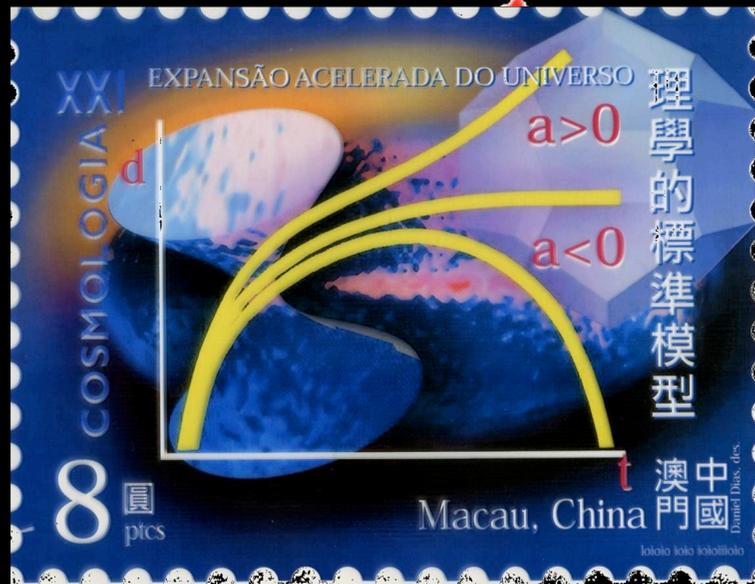


Universo

1927



G. Lemaitre, 1927

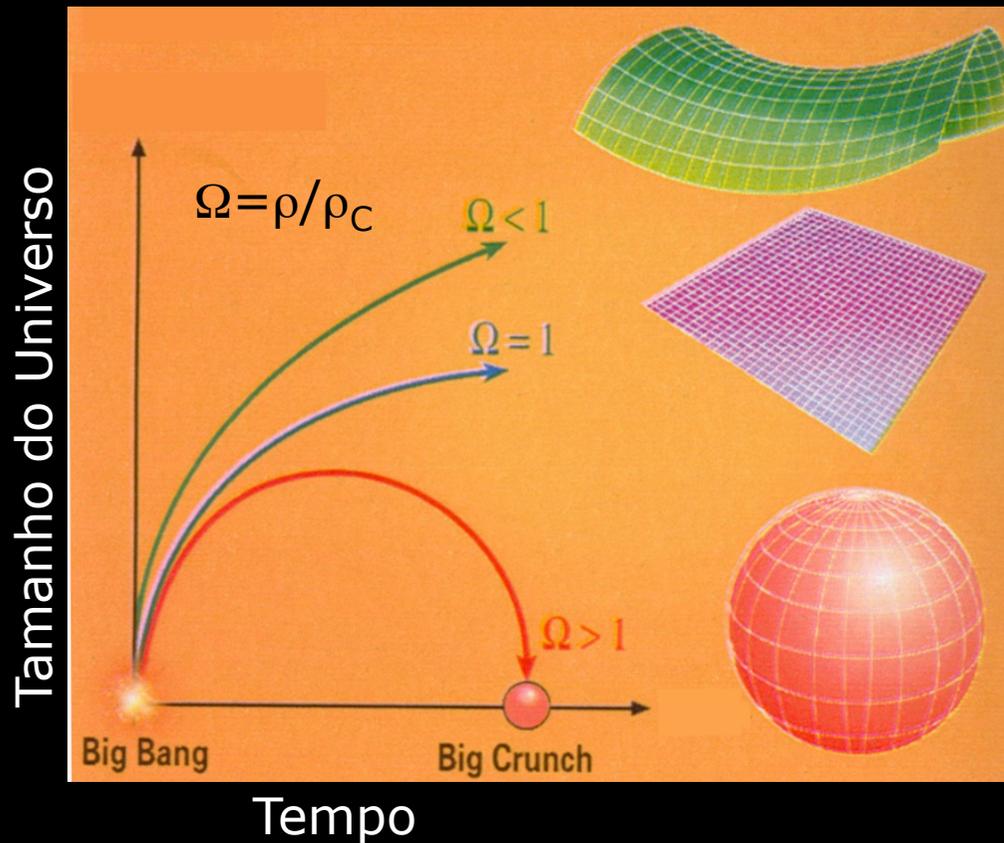


George Lemaitre (1927)

Todo o Universo Expande!
Um 'átomo primordial quente' ?

Universo

A questão crucial é a massa (densidade de energia) do Universo. À partida, pode tomar qualquer valor. Contudo, existe uma 'densidade crítica de energia'. Se a densidade de energia média do Universo for superior a esta densidade crítica, o Universo parará a sua expansão e voltará a comprimir um dia no futuro.



Simple,
Fácil de
fixar,
Ainda
ensinado
nas Escolas

ERRADO!

Universo

Einstein não gostava de um Universo 'dinâmico'.

Acreditava num Universo estático e eterno.

Mas as suas equações, sem outros termos, previam outra coisa!

Assim decidiu 'aldrabá-la' juntando uma

'constante cosmológica'


$$\left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 - \frac{8}{3}\pi G\rho - \frac{1}{3}\Lambda c^2 = -\frac{kc^2}{R^2}$$

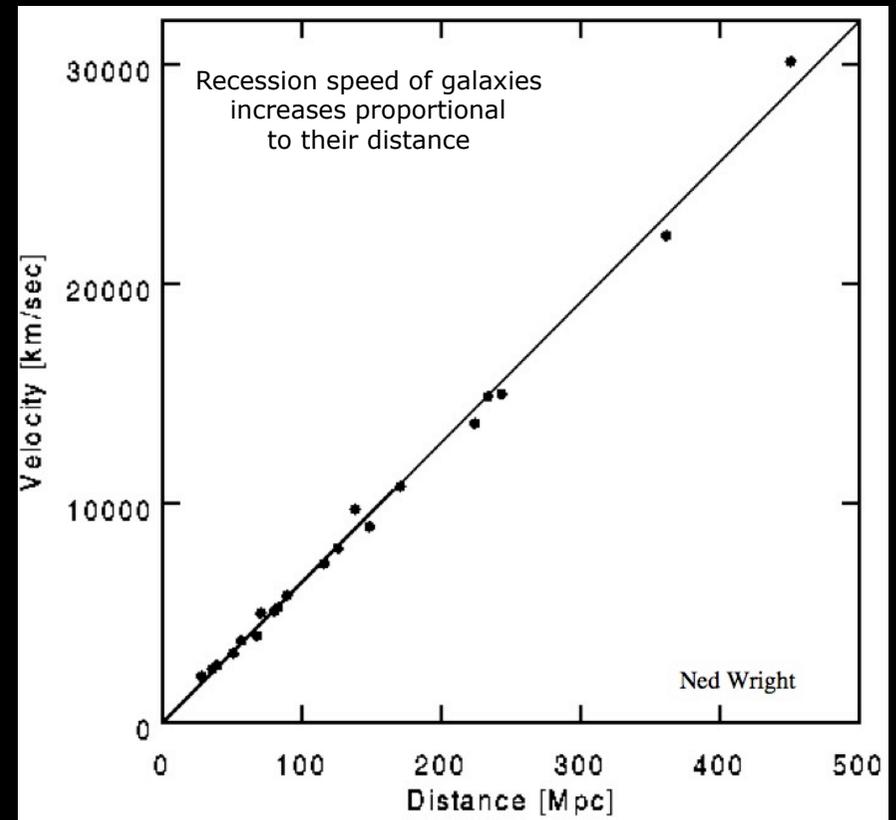
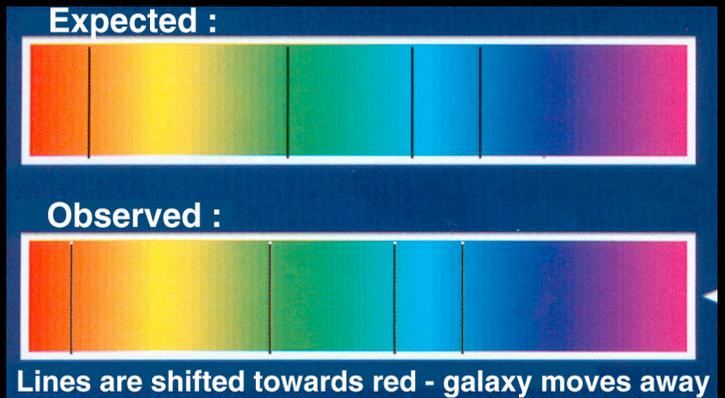
EXPANSÃO DO UNIVERSO!



Edwin Hubble (1929)
Mt. Palomar telescope

Einstein afirma:

a constante cosmológica = 'o meu maior erro'



Universo

Observação de muitas estrelas e galáxias revelou **factos espantosos**:

O Universo é o mesmo em qualquer direcção e a qualquer distância ...

Hydrogénio ~ 75 %

Hélio-4 ~ 25 %

Hélio-3 ~ 0.003 %

Deutério ~ 0.003 %

Lítio-7 ~ 0.00000002 %

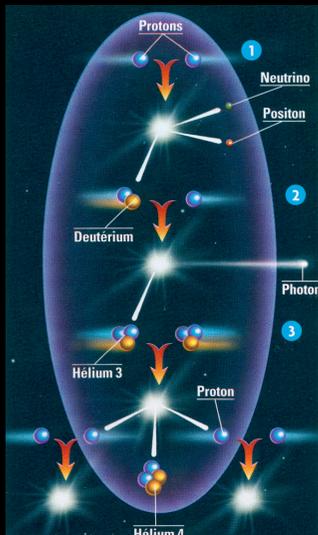
TEM que haver uma razão! ...

1948: O Modelo do 'Big Bang'* para o início do Universo



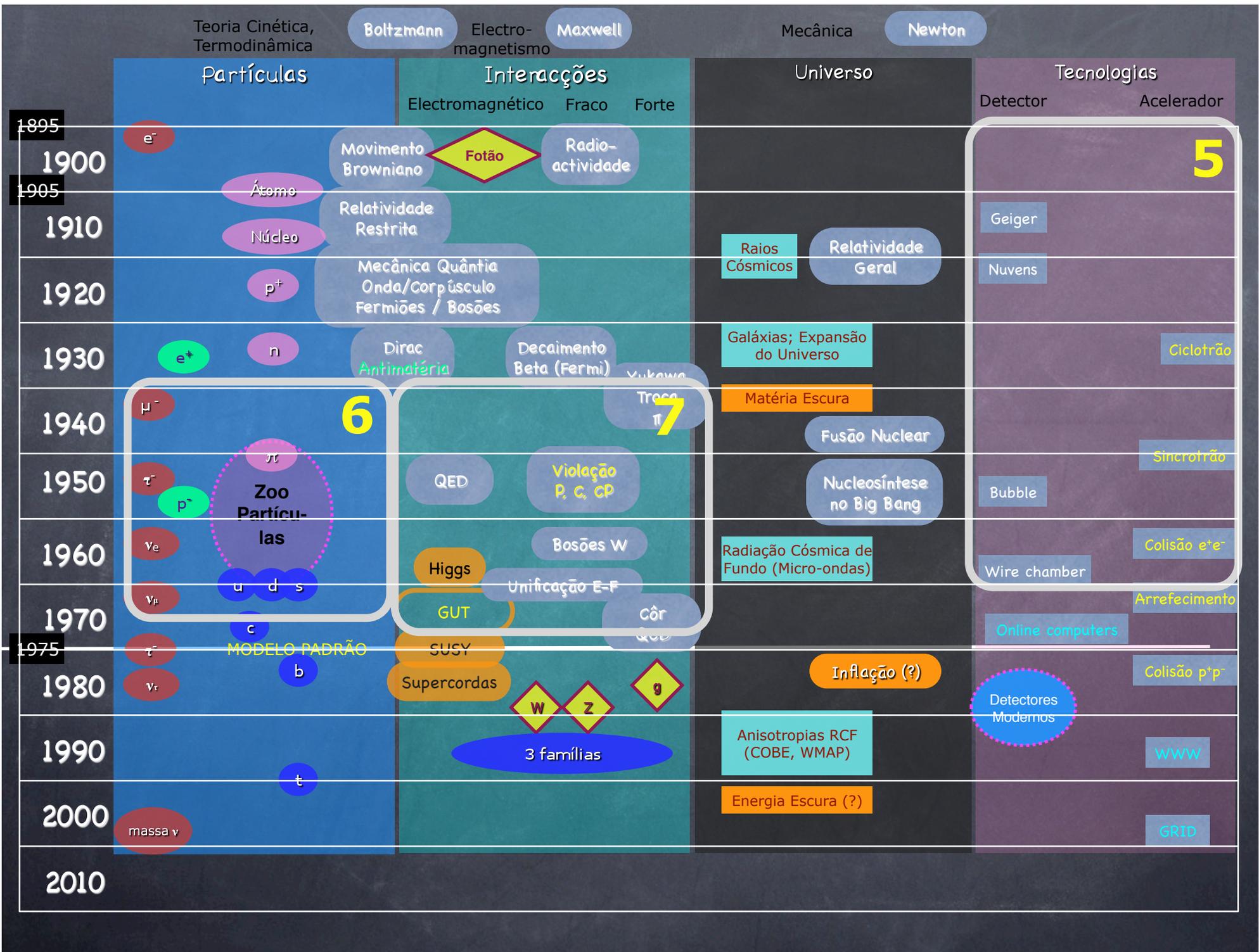
George Gamov

O Universo começou por um estado inicial MUITO QUENTE!
Depois expandiu rapidamente, enquanto arrefecia
Nos primeiros tempos, o Universo era quase só Radiação
Radiação produzia partículas (protões, neutrões, electrões)



- Nos primeiros minutos, só houve tempo para criar os elementos mais leves
- Mas deveria haver um 'eco' na forma de uma radiação de corpo negro ($T \sim 5 \text{ K}$)

*O nome "Big Bang" foi usado por Fred Hoyle para gozar com a ideia de Gamov. Mais tarde foi Fred Hoyle o ridicularizado.



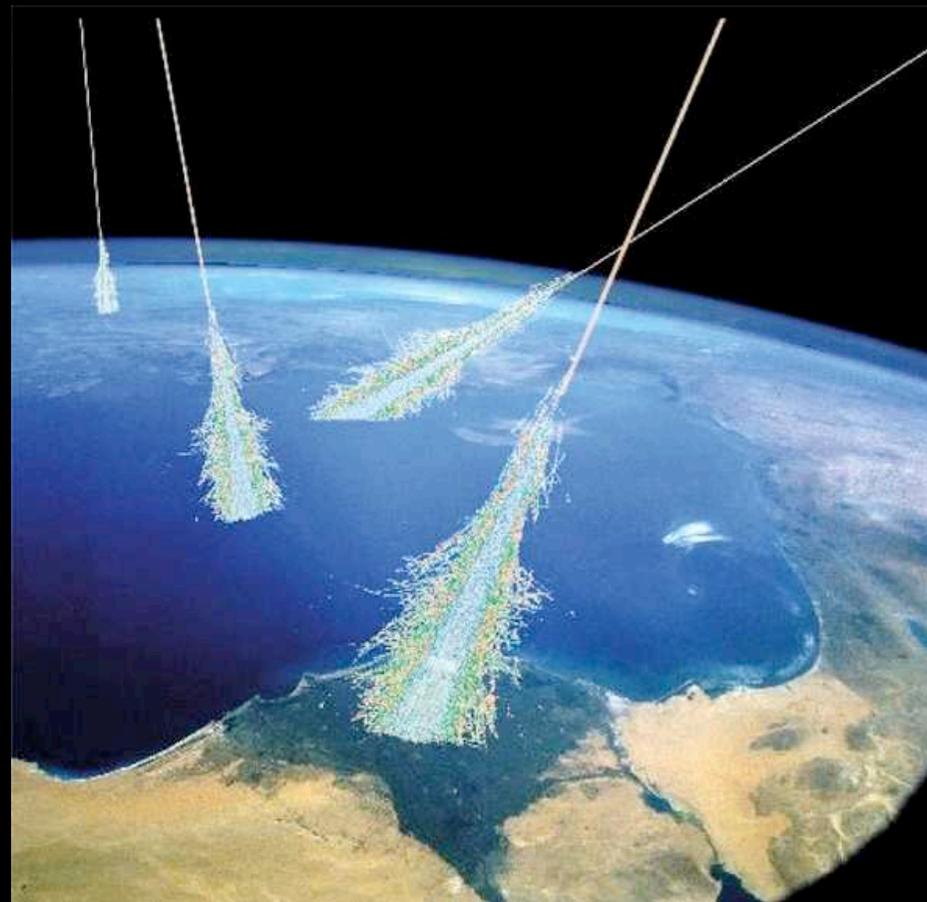
Em 1912, primeiras sugestões de um universo violento apareceram



Victor Hess

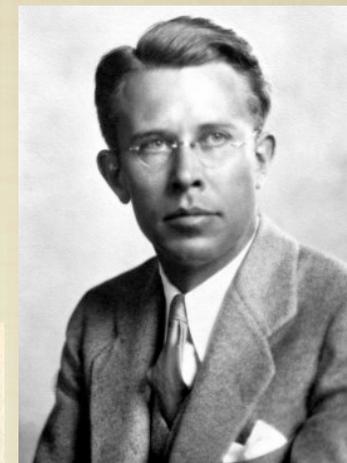


Descoberta dos raios cósmicos





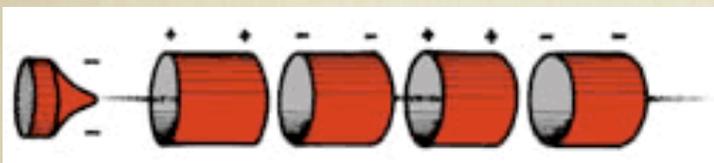
Rolf Wideroe, 1928



Ernest Lawrence, 1931

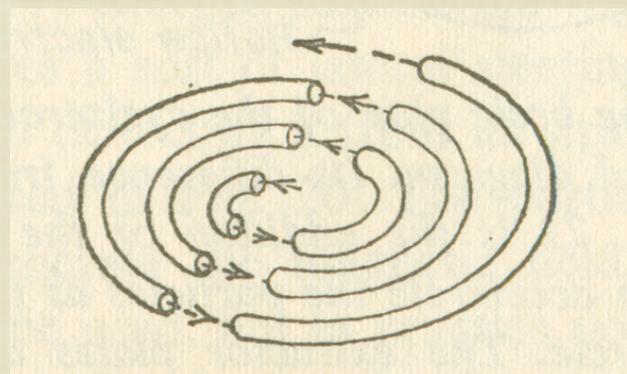
Aceleradores

"Raios cósmicos feitos pelo Homem"



Acelerador Linear

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



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

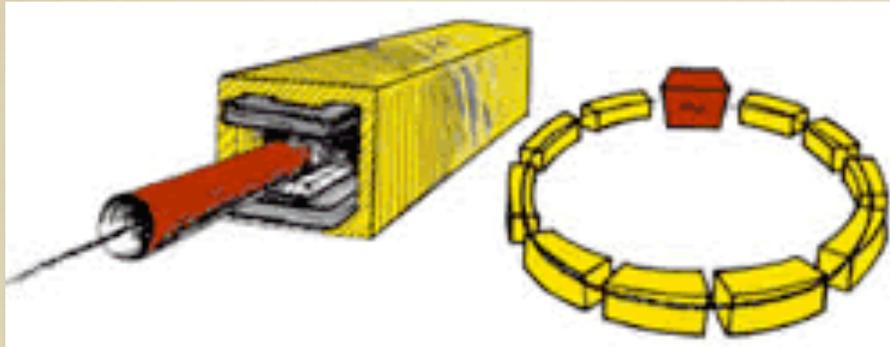
1932: 1000 keV

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...

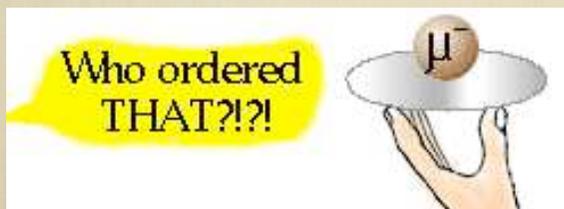
Em 1937 foi descoberta uma nova partícula com essa massa (106 MeV)!

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 ?!"

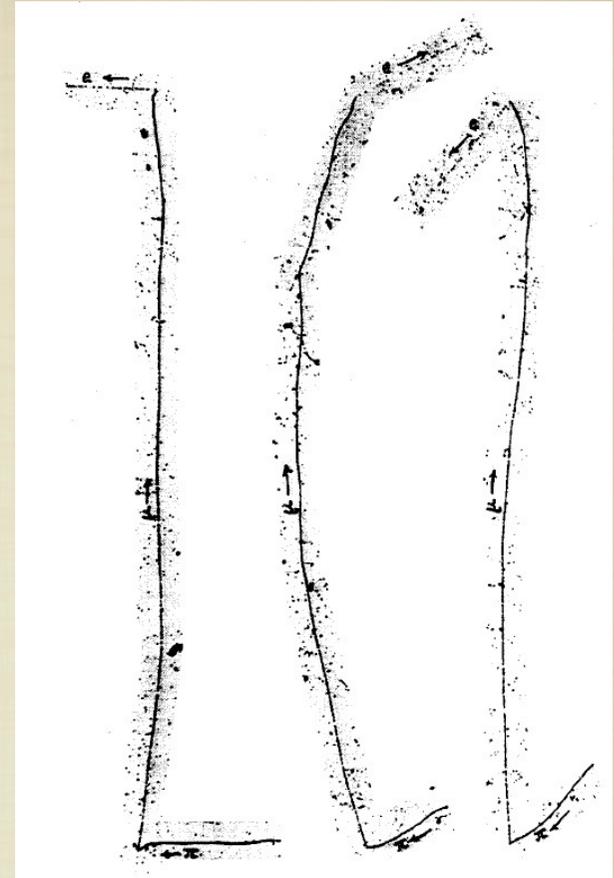


Descoberta do pião (carregado)



Ouff!

Cecil Powell



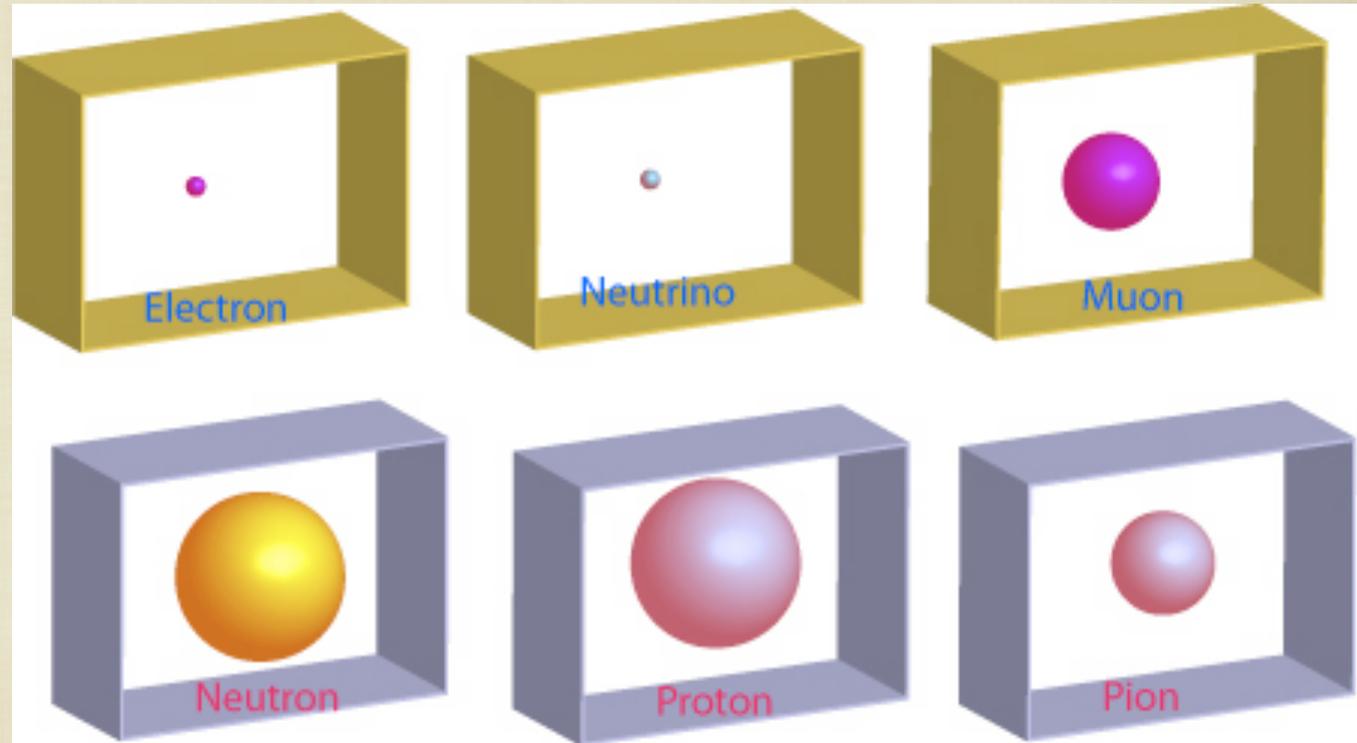
Técnica **Emulsão Fotográfica**

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

Jardim
Zoológico

Com novos aceleradores e detectores,
o "Zoo das Partículas" tem mais de ~ 200 'partículas elementares'

HADRÕES

π^+ π^- π^0

Pions

K^+ K^- K^0

Kaons

η'

Eta-Prime

η

Eta

ϕ

Phi

ρ^+ ρ^- ρ^0

Rho

MESÕES

Δ^{++} , Δ^+ , Δ^0 , Δ^-

Delta

Λ^0

Lambda (estranho!)

Σ^+ , Σ^0 , Σ^-

Sigma (estranho!)

Ξ^0 , Ξ^-

Sigma(muito estranho!)

BARIÕES

Qual seria a estrutura de base, a 'nova tabela periódica' ?

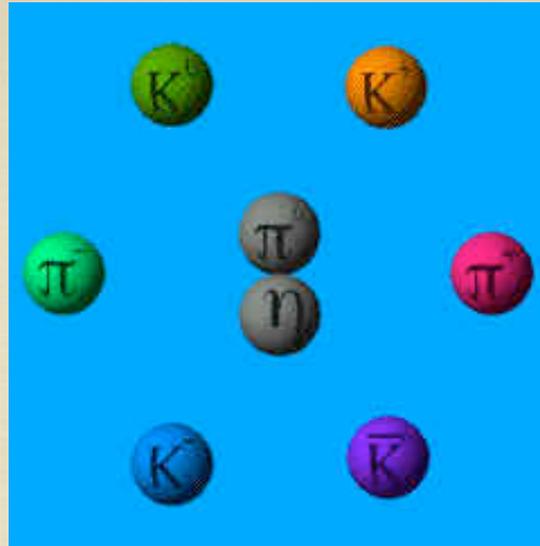
PARTÍCULAS

The Eightfold Way (1963)

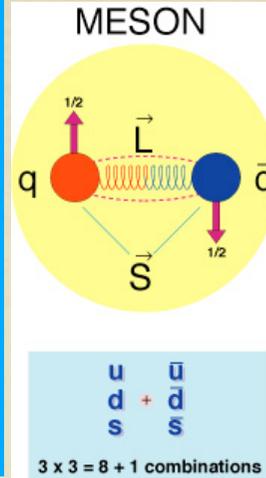


Fig. 6.35 Murray Gell-Mann (b.1929).

Gell-Mann, 1963
(G. Zweig, 1963, CERN)



SU(3)-Classificação baseada em QUARKS



$+2/3 e$ $-1/3 e$ $-1/3 e$

3 tipos de "quarks" : up, down, estranho

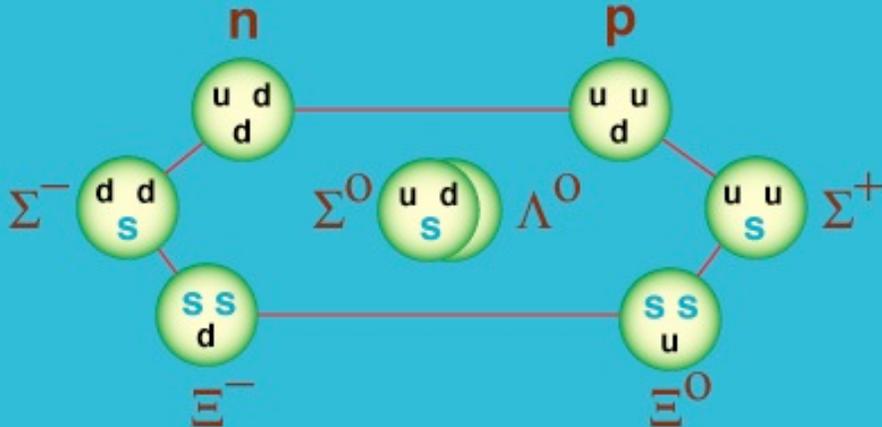
Aparecem **apenas** nas combinações:

Mesão = quark+antiquark

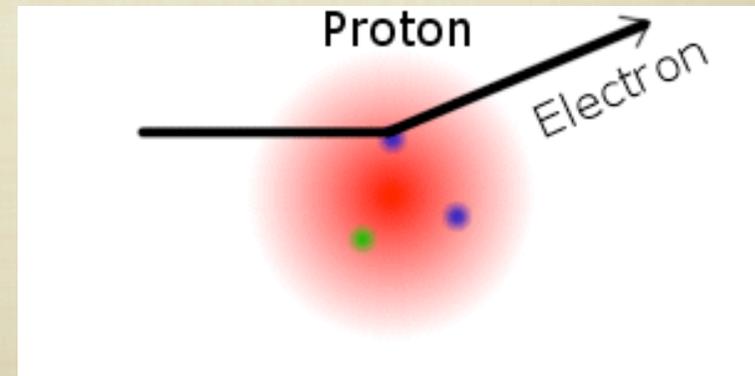
Barião = quark1 + quark2 + quark3

SPIN 1/2 BARYON OCTET

Protão, Neutrão; Lambda, Sigma's, Xi's



1967 Friedmann, Kendall, Taylor (SLAC):
'difusão inelástica profunda' de
electrões em 3 'partículas pontuais'

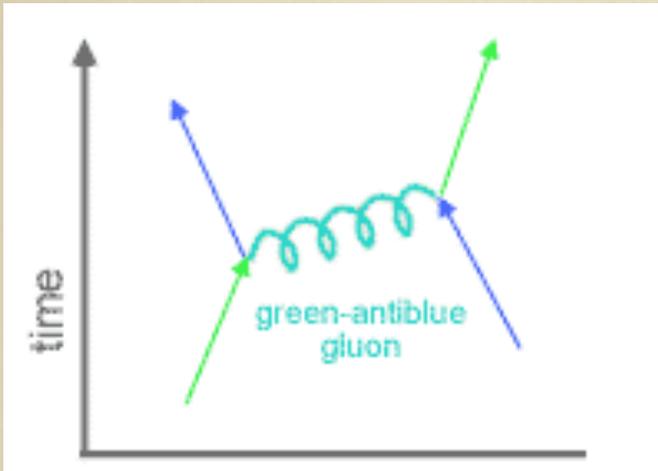
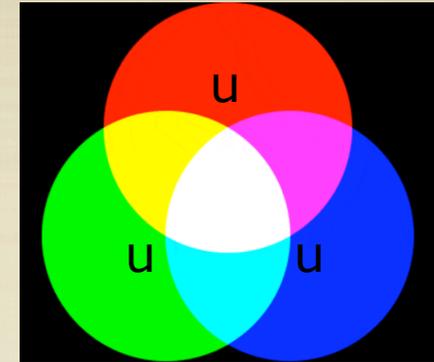


Mas e o Δ^{++} ?! uuu ??!!

PARTÍCULAS

1973

Carga de cõr



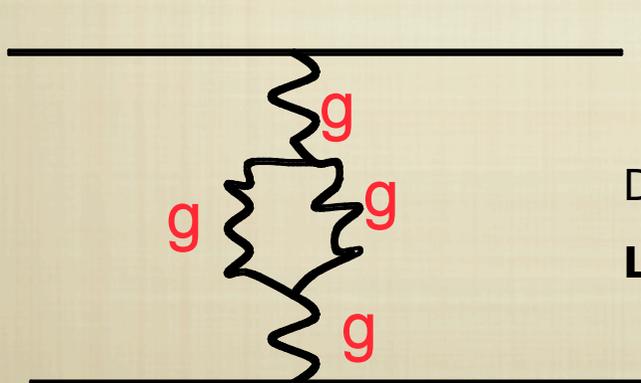
Gluões

Gluões são os portadores da interacção forte

Há $3 \times 3 - 1 = 8$ gluões

Gluões têm carga de cõr \rightarrow auto-interacção

Auto-interacção dos gluões

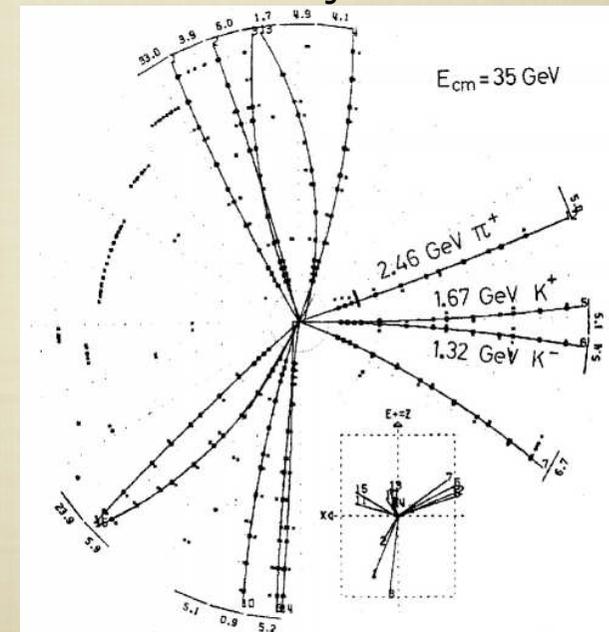


$$V_{QCD} = -\frac{4}{3} \frac{\alpha_s}{r} + kr$$

Distâncias pequenas:

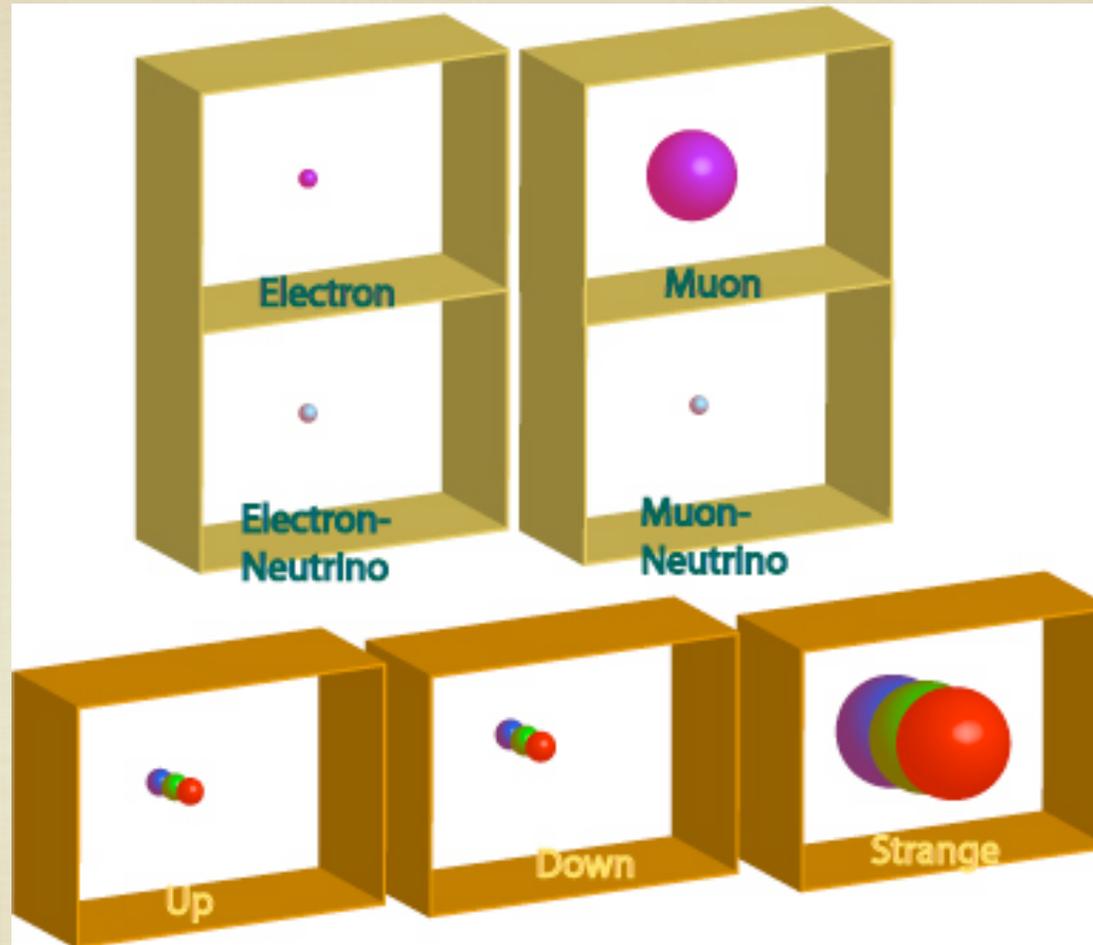
Liberdade Assimptótica

Quarks/Gluões não podem andar sós!



PETRA Storage Ring, 1979, DESY

LEPTÕES



QUARKS

Constroem os hadrões

Que Ligação?

Chave: 'interacção electrofraca' e o 'sabor' das partículas

7

Electrofraca

Interações

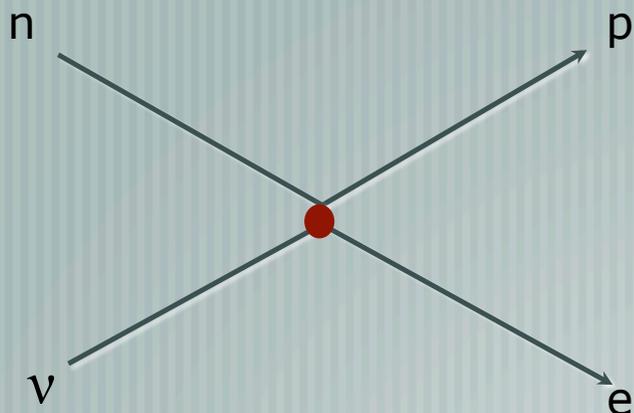
1958 Glashow

Havia um pequeno problema (teórico):

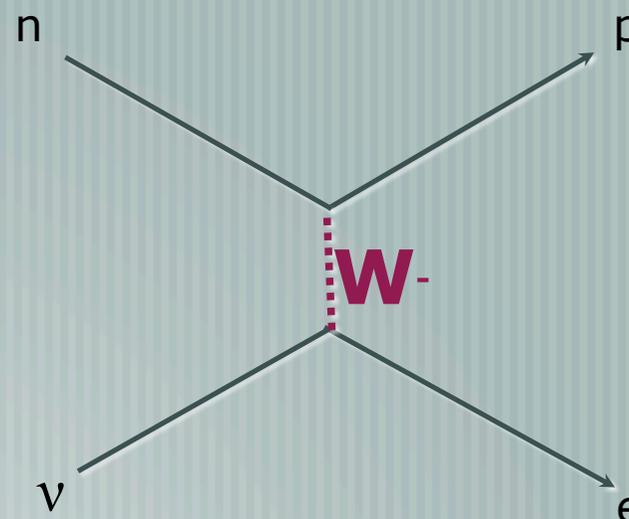
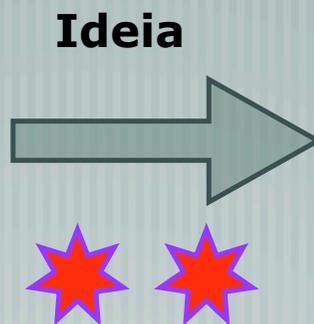
Probabilidade Neutrino-Proton $\sim (G_F E_V)$
viola Princípio da Unitaridade* for $E > 300 \text{ GeV}$

(*probabilidade da interação $> 100\%$)

$$G_F = (1/294 \text{ GeV})^2$$



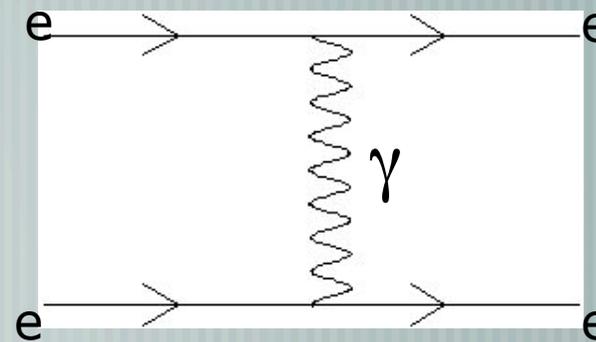
Modelo de Fermi



Modelo Glashow

**Interação Fraca mediada por Bosões Massivos
(analogia com a troca do fóton!)**

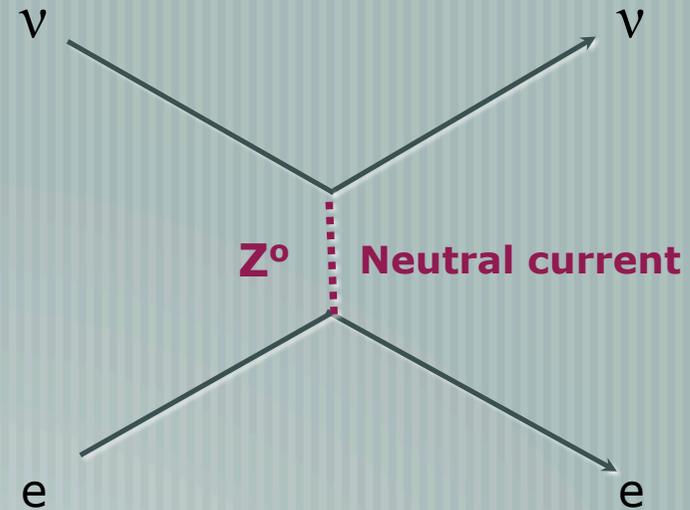
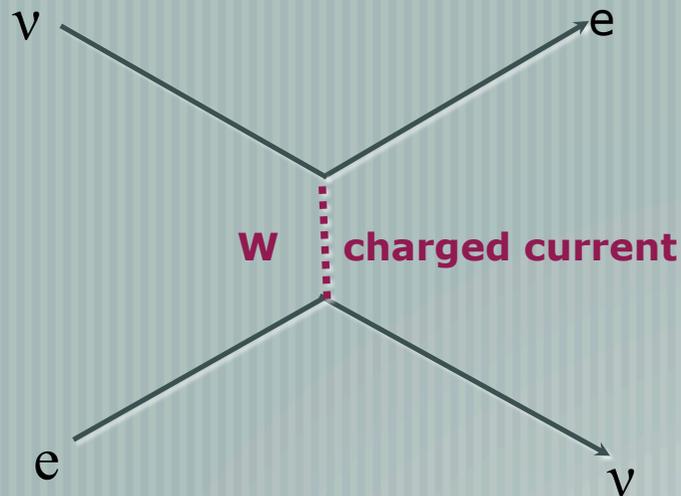
**Grande massa (80 GeV) explica
curto alcance ($2 \cdot 10^{-18} \text{ m}$) e baixas probabilidades**



Interações

Electrofraca

1968



Glashow, Salam, Weinberg (1968) – Força Electrofraca

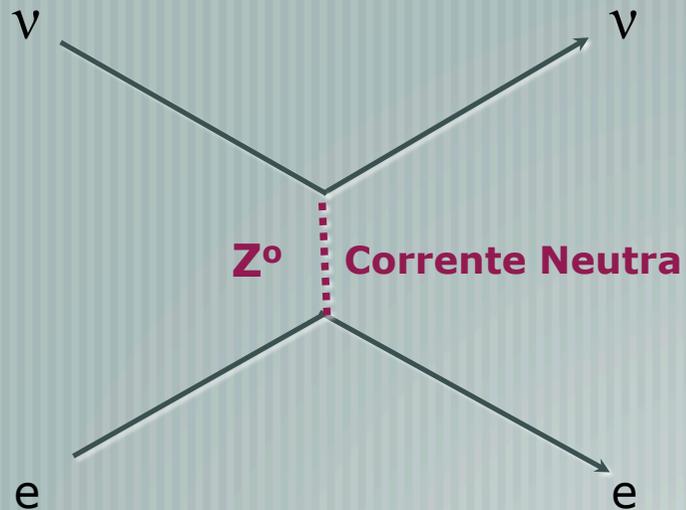
- As interações electromagnética e fraca são dois aspectos da mesma força 'electrofraca'
- Todos os quarks e os leptões têm uma carga 'fraca'
- Devia haver um 'fotão massivo' (Z^0) e 2 bosões carregados (W^\pm) de massas $\sim 50-100$ GeV
- Estes recebem a sua massa apenas devido a um nova "Interação de Higgs" H.
- Só havia interações fracas carregadas com partículas 'esquerdas'!

Interacções

Electrofraca

1973

Descoberta das correntes neutras no CERN:



- Feixe de neutrinos dirigido a uma câmara de bolhas
- Um traço de um electrão surge do 'nada'

Nuclear Physics B73 (1974) 1–22 North-Holland Publishing Company

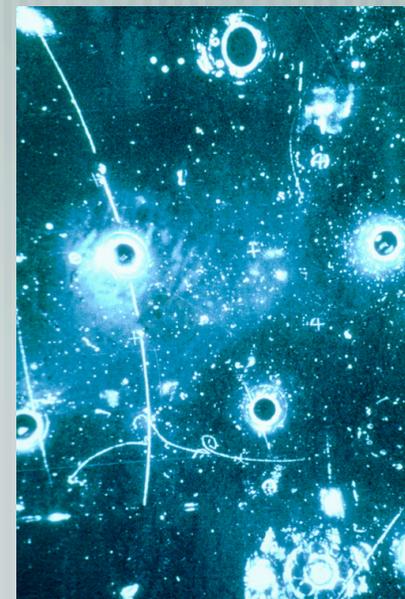
OBSERVATION OF NEUTRINO-LIKE INTERACTIONS WITHOUT MUON OR ELECTRON IN THE GARGAMELLE NEUTRINO EXPERIMENT

F.J. HASERT, S. KABE, W. KRENZ, J. VON KROGH, D. LANSKE,
J. MORFIN, K. SCHULTZE and H. WEERTS
III. Physikalisches Institut der Technischen Hochschule, Aachen, Germany

G. BERTRAND-COREMANS, J. SACTON, W. VAN DONINCK and P. VILAIN*
Interuniversity Institute for High Energies, U.L.B., V.U.B., Brussels, Belgium

R. BALDI, U. CAMERINI**, D.C. CUNDY, I. DANILCHENKO***, W.F. FRY**
D. HAIDT, S. NATALI†, P. MUSSET, B. OSCULATI, R. PALMER††,
J.B.M. PATTISON, D.H. PERKINS‡, A. PULLIA, A. ROUSSET,
W. VENUS†† and H. WACHSMUTH
CERN, Geneva, Switzerland

V. BRISSON, B. DEGRANGE, M. HAGUENAUER, L. KLUBERG,
U. NGUYEN-KHAC and P. PETIAU
Laboratoire de Physique Nucleaire des Hautes Energies, Ecole Polytechnique, Paris France



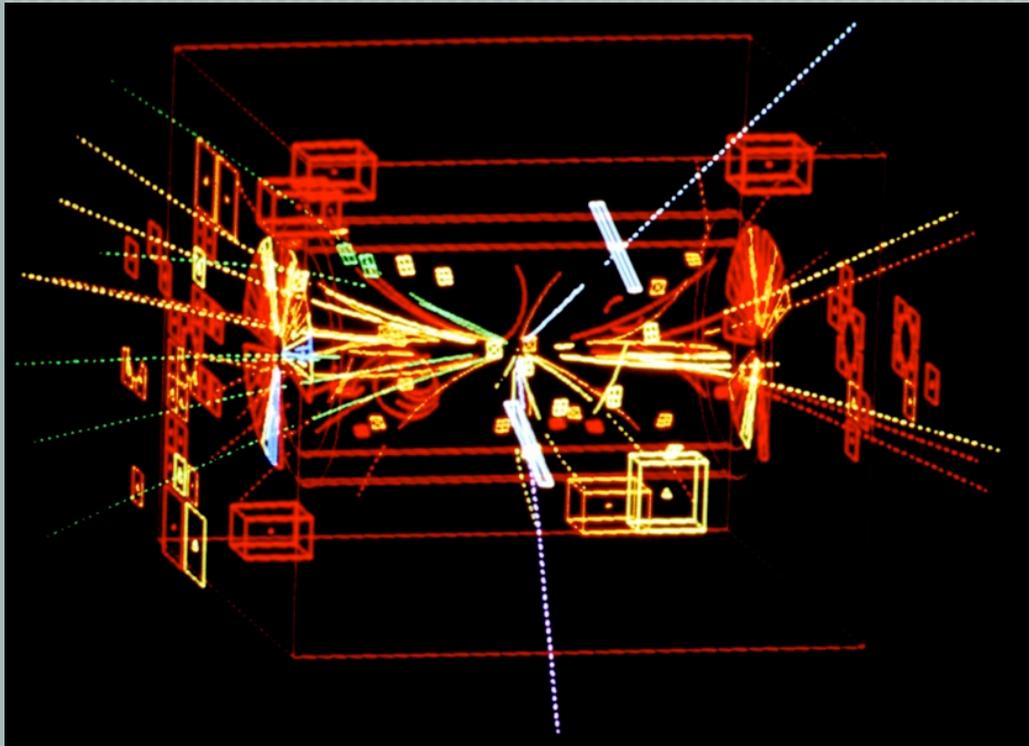
Interações

Electrofraca

1983

Descoberta dos Bosões W, Z no CERN (1983)

(Carlo Rubbia – Responsável pela Colaboração UA1, e proponente do collisionador próton-antipróton SpS)
(Simon van der Meer - inventor do arrefecimento estocástico do feixe de anti-prótons)



Interações

Electrofraca

1970

Artigo de Referência (Glashow, Iliopoulos, Maiani)

PHYSICAL REVIEW D

VOLUME 2, NUMBER 7

1 OCTOBER 1970

Weak Interactions with Lepton-Hadron Symmetry*

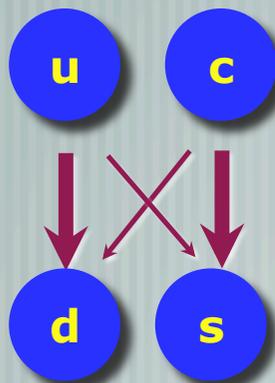
S. L. GLASHOW, J. ILIOPOULOS, AND L. MAIANI†

Lyman Laboratory of Physics, Harvard University, Cambridge, Massachusetts 02139

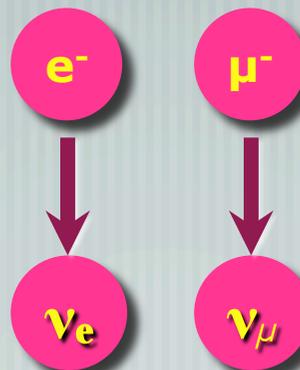
(Received 5 March 1970)

We propose a model of weak interactions in which the currents are constructed out of four basic quark fields and interact with a charged massive vector boson. We show, to all orders in perturbation theory, that the leading divergences do not violate any strong-interaction symmetry and the next to the leading divergences respect all observed weak-interaction selection rules. The model features a remarkable symmetry between leptons and quarks. The extension of our model to a complete Yang-Mills theory is discussed.

Quarks



Leptons

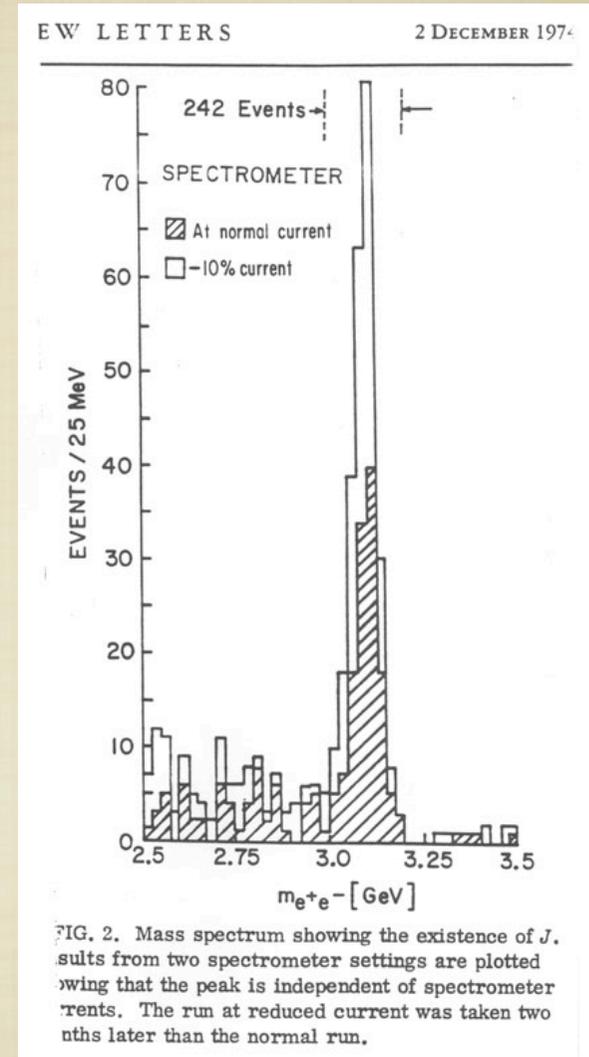
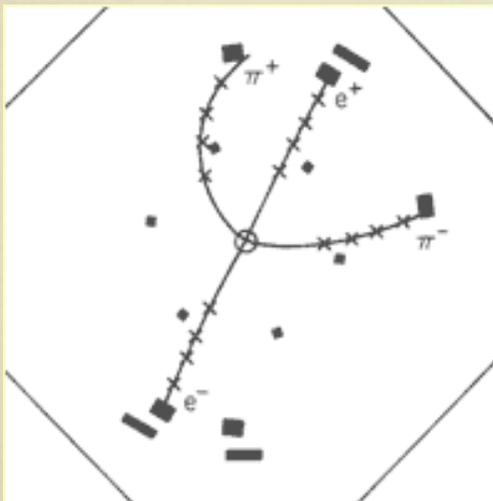


*'Standard Model'
(com duas famílias)*

E o quark c (*charm* – encanto) foi descoberto pouco depois :

A REVOLUÇÃO DE NOVEMBRO (11 Novembro 1974)

Dois grupos descobriram ~ simultaneamente uma nova partícula, denominada '**Psi**' em SLAC (Burton Richter) e '**J**' em Brookhaven (Samuel J. Ting).



A ressonância J/psi era 'vida-longa' ($\sim 10^{-20}$ sec). Só podia decair através da interacção fraca, preferencialmente em quarks estranhos. Daí o estreito pico.