



Sabores Elementares

Sandro Fonseca de Souza
DFNAE/UERJ

Sumário

- Contexto histórico
- Pre-era dos quarks - muons, mésons e outros hadrons
- Descoberta do méson pi
- Modelo dos Quarks
- Interações fundamentais e o Modelo Padrão das Partículas Elementares

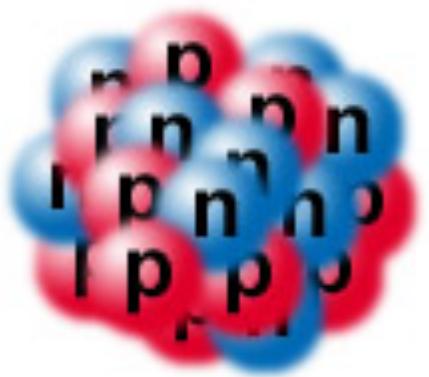
Primórdios da Física de Partículas



1900



- A Física de Partículas moderna começa no início do século XX com exploração da estrutura interna do átomo. A descoberta do núcleo atômico no experimento de folha de ouro de Geiger, Marsden and Rutherford foi a pedra fundamental para este campo.
- Os componentes do núcleo foram subsequentemente descobertos em 1919 (próton) e 1932 (nêutron)
- Na década de 1920, teve início o desenvolvimento da Mecânica Quântica, que possibilitou a descrição da estrutura do átomo.
- Em meados de 1930, Yukawa propôs a existência de uma nova força fundamental - a Força Forte Nuclear - que justificaria a coesão do núcleo atômico através de uma nova partícula mediadora, que ele batizou de méson.

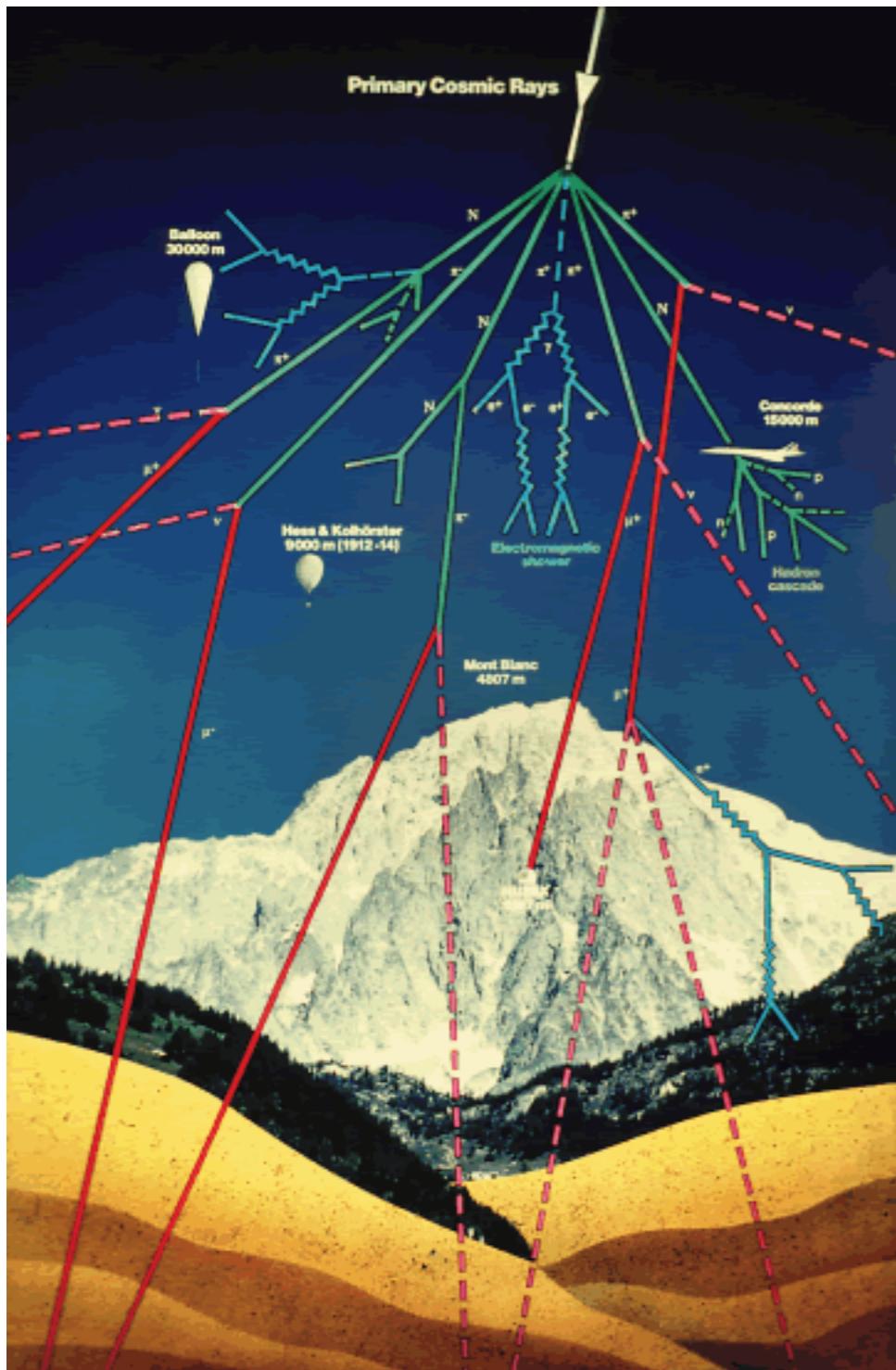


Primórdios da Física de Partículas

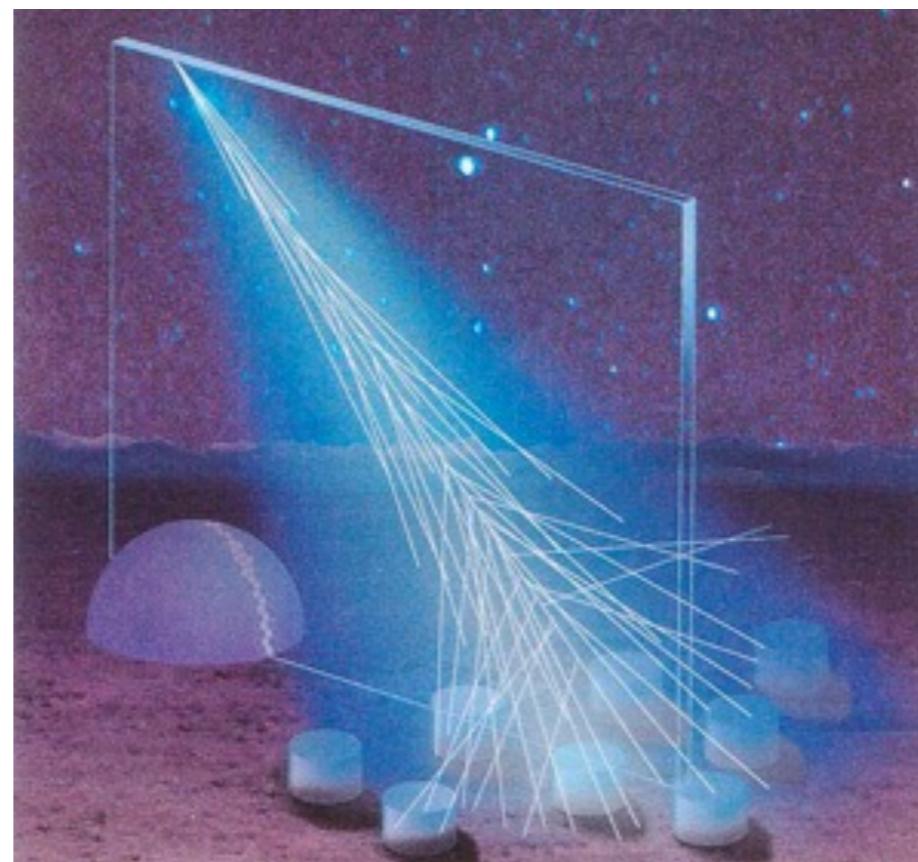
Também na década de 1920, Wolfgang Pauli postulou a existência do neutrino (foi batizado por Fermi) como uma explicação para a observação do espectro de energia do decaimento Beta e propôs uma teoria efetiva para a Força Eletrofraca. Separadamente, o pósitron e o múon foram descobertos por Anderson.

O méson de Yukawa foi descoberto na forma do píon em 1947. Com o tempo, o foco do campo mudou da compreensão do núcleo para as partículas mais fundamentais e suas interações e a Física de Partículas tornou-se um campo distinto da Física Nuclear. Ao longo dos anos de 1950-1960, uma grande variedade de partículas adicionais (Particle Zoo) foram descobertas em diversas experiências.

Raios Cósmicos

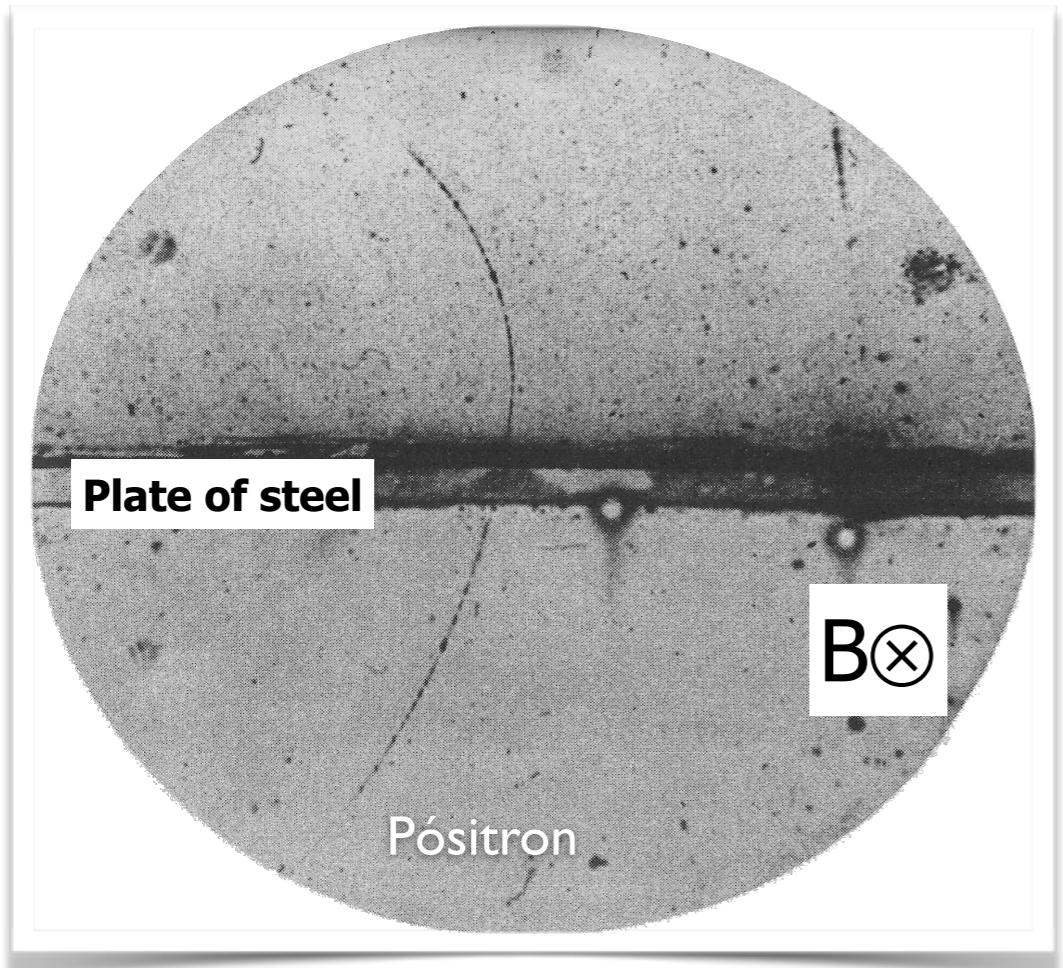


Os raios cósmicos em sua maioria são partículas subatômicas com carga elétrica positiva: prótons ou núcleos atômicos.



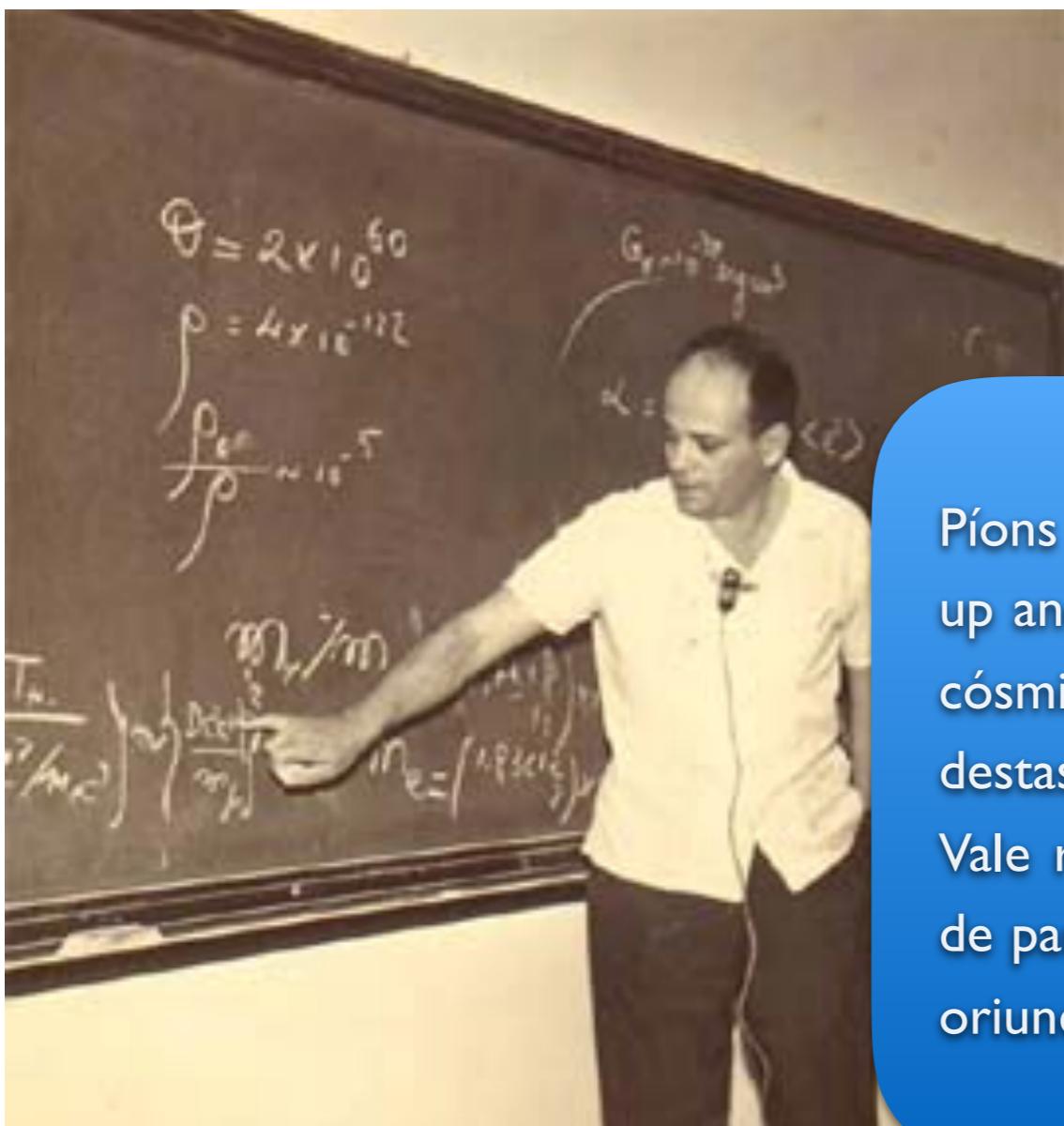
Observatório Pierre Auger
em Malargüe na Argentina

Pósitron

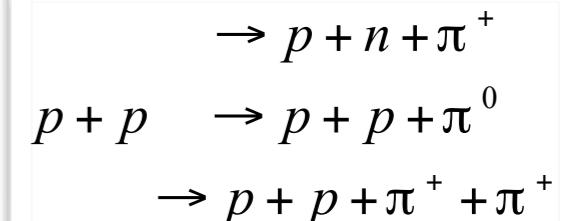
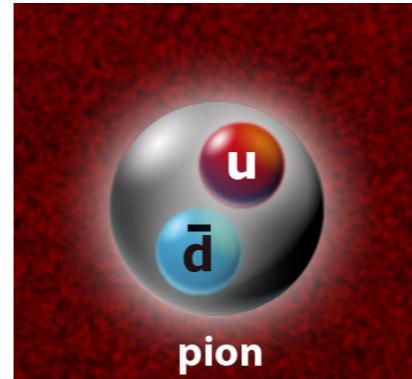


C.D. Anderson (Berkeley) - prêmio Nobel de Física pela descoberta do pósitron.

1947 - Ano do Méson Píon



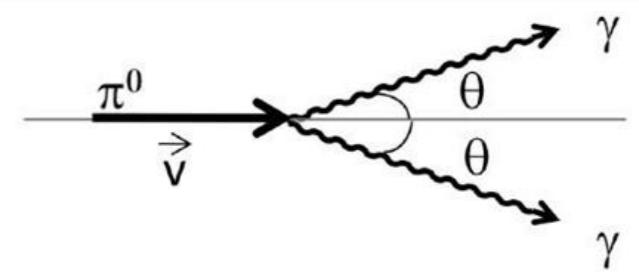
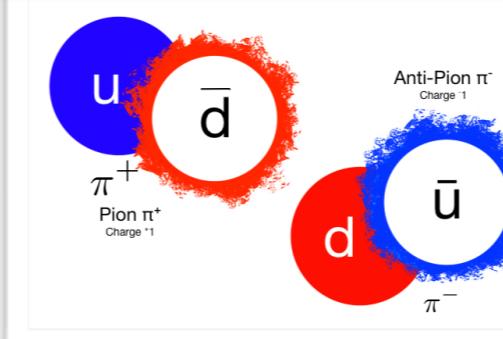
César Lattes, (Curitiba, 11 de julho de 1924 — Campinas, 8 de março de 2005) foi importante físico brasileiro, co-descobridor do méson pi.



Algumas reações induzidas por raios cósmicos

Píons e nucléons são partículas super leves contendo quarks do tipo up and down, que foram descobertos em 1947 em eventos de raios cósmicos usando emulsões fotográficas como técnica de detecção destas partículas.

Vale ressaltar que alguns podem ser reproduzidos em aceleradores de partículas, com uma alta taxa de produção; entretanto, os eventos oriundos de raios cósmicos são bem mais energéticos.



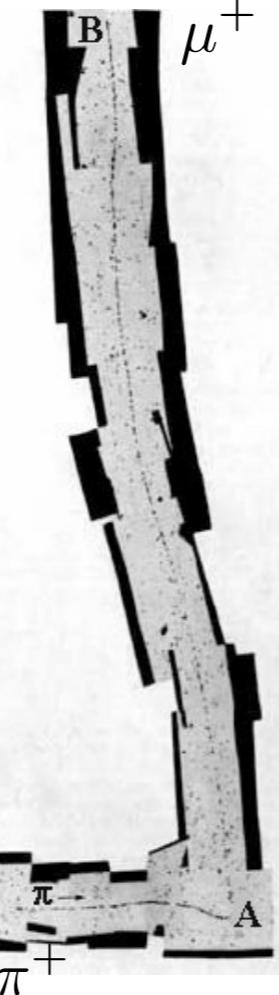
1947- Ano do Méson Píon



Cesar Lattes

Em 1935, Hideki Yukawa propôs uma teoria para explicar as forças nucleares. Ele sugeriu a existência de uma partícula ainda desconhecida, com uma massa cerca de 200 vezes maior do que a do elétron, que poderia ser emitida e absorvida por prótons e nêutrons. A troca dessa partícula entre os constituintes do núcleo atômico produziria uma atração entre eles, de curto alcance, que poderia explicar a estabilidade nuclear.

<http://www.ifi.unicamp.br/~ghtc/meson.htm>



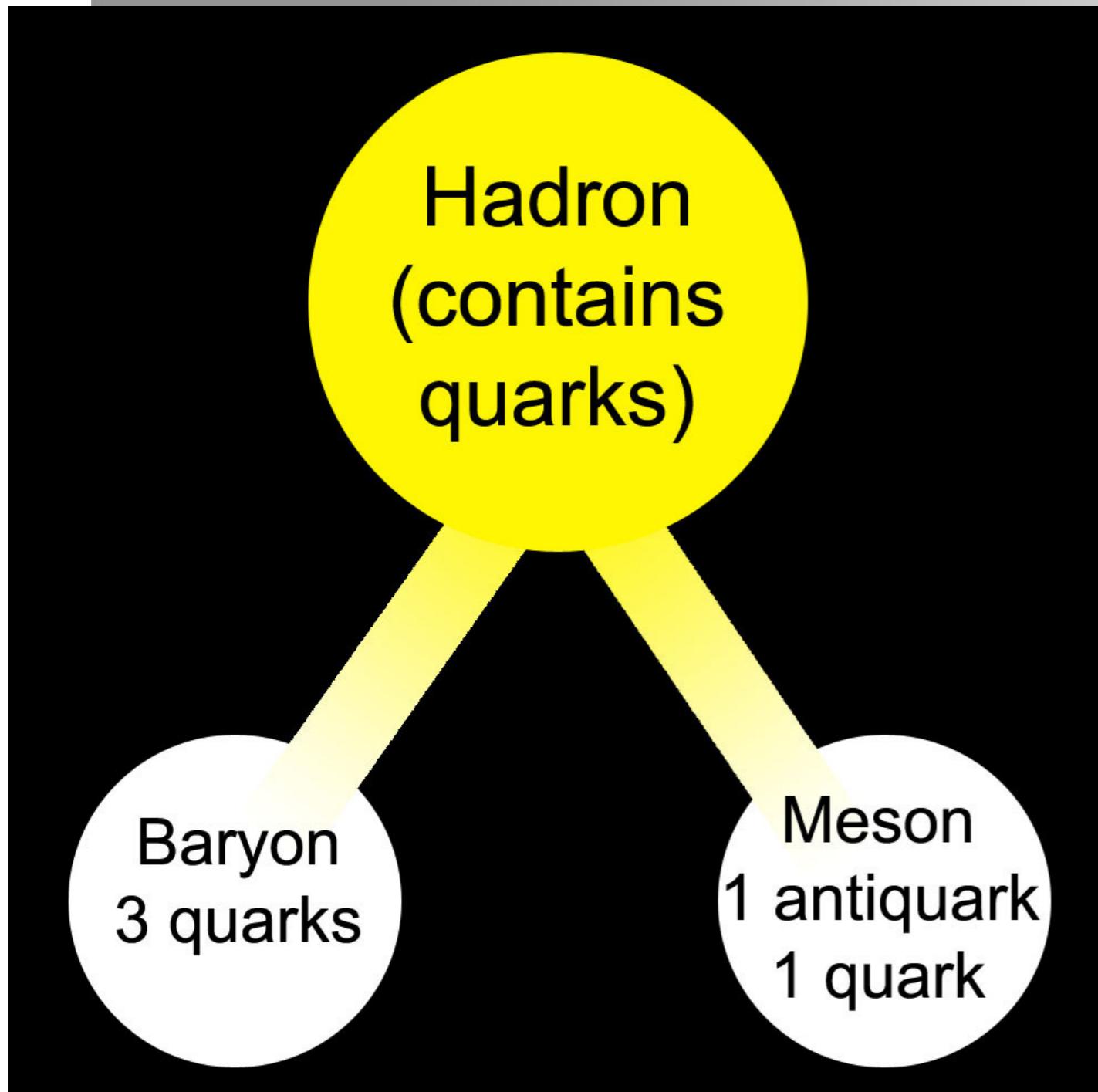
Em 1947, foi estabelecida a existência do méson pi pelo grupo de Bristol, na Inglaterra, sob a coordenação de Cecil F. Powell.



A obra de Cesar Lattes - que marcou a emergência da física das partículas elementares - deu um grande impulso à pesquisa científica no Brasil pós-guerra. Além da fundação do CBPF, a repercussão de seus trabalhos na sociedade brasileira serviu como grande estímulo para a criação do Conselho Nacional de Pesquisas (CNPq), em 1951.

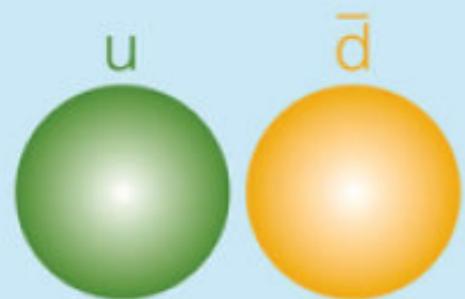
<http://www.cbpf.br/meson/meson.html>





Well understood

meson

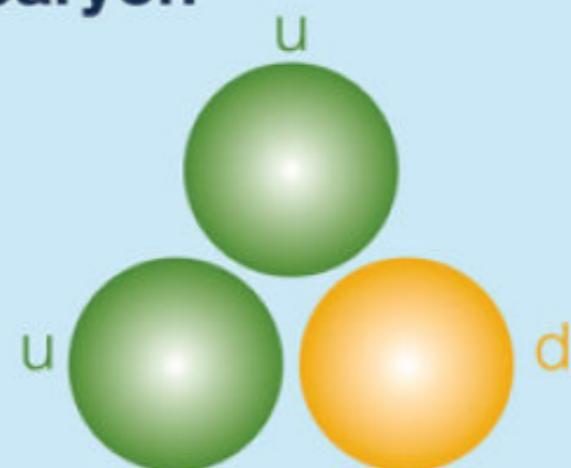


Mesons are made
of two quarks

Shown here is a pion, made of an up and a down quark.

New species

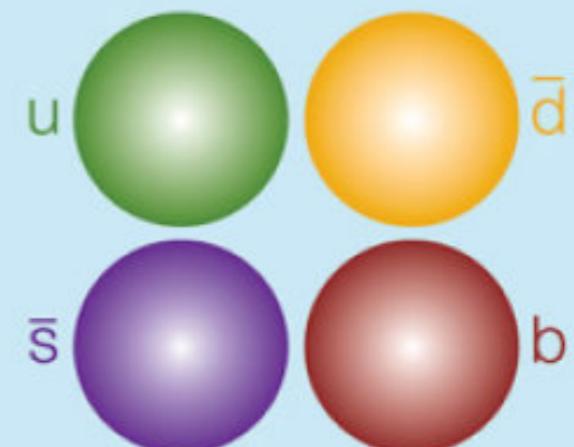
baryon



Baryons are made
of three quarks

Shown here is a proton, made of two ups and a down.

tetraquark



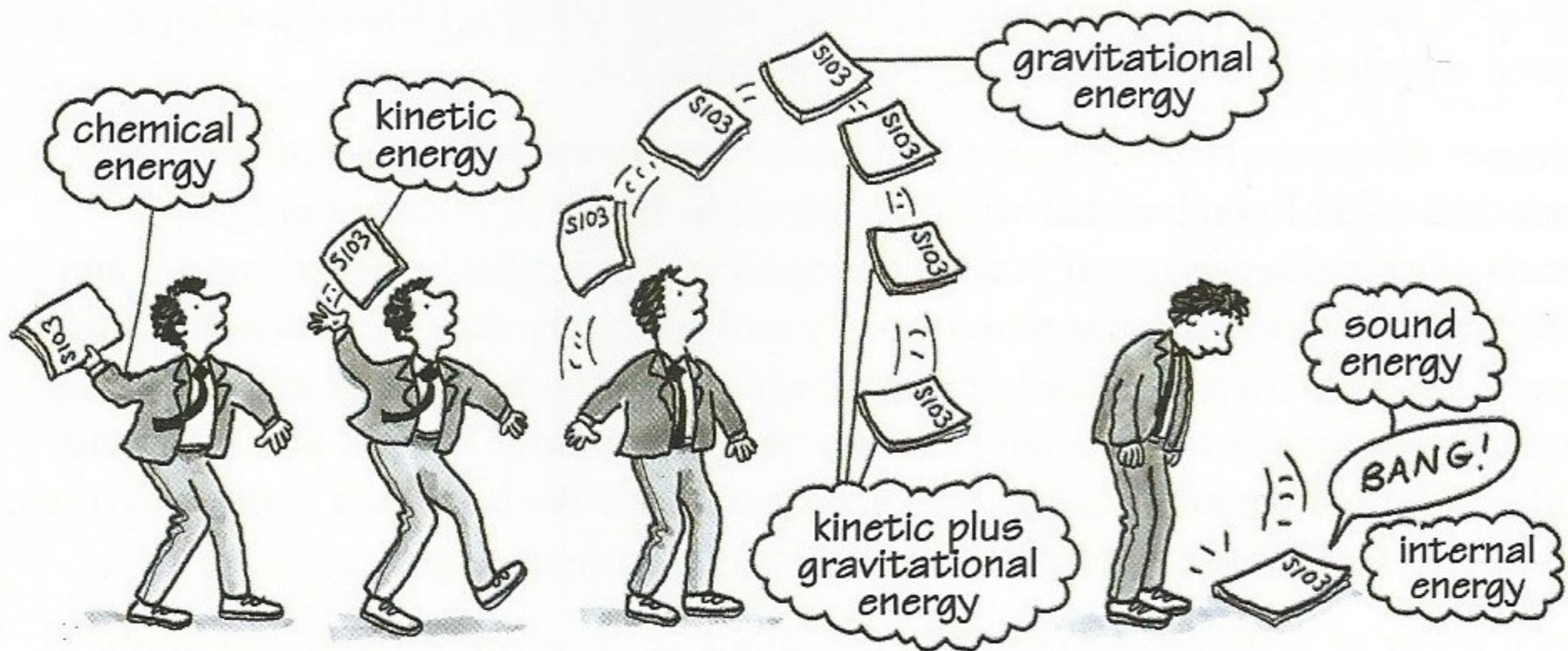
Tetraquarks are
made of four quarks

This is $X(5568)$, which is made of an up, down, strange and bottom quark.

Lei de Conservação na Natureza

Na natureza as leis de conservação que temos usado constantemente são a da conservação de energia, conservação de carga elétrica e de quantidade de movimento.

Essas leis empíricas são verificadas sistematicamente e não se conhece desrespeito em nenhum caso.



Lei de Conservação em Física de Partículas

Os processos de decaimento frequentemente se deparam com a ausência não esperada de algumas partículas ou de algum processo semelhante a outro já observado.

São novos números quânticos atribuídos às partículas os quais devem ser conservados numa interação ou num decaimento para descrever coerentemente o que é ou não é observado experimentalmente.

- Conservação do número leptônico
- Conservação do número bariônico
- Conservação de estranheza

Conservação do número leptônico

Para todos os léptons é atribuído um número leptônico +1 e para o anti-lepton se atribui o número leptônico -1.

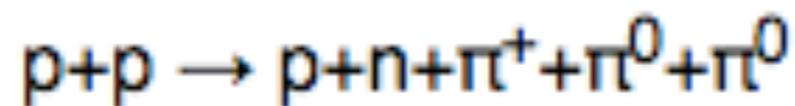
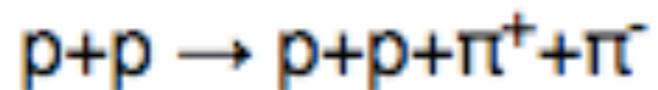
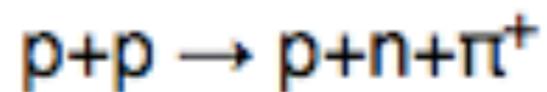
Todas outras partículas tem número leptônico 0 (zero).

No caso do número leptônico existem três números que devem ser conservados em qualquer interação.

particula	L_e	L_μ	L_τ	anti-part.	L_e	L_μ	L_τ
e^-	+1	0	0	e^+	-1	0	0
ν_e	+1	0	0	$\bar{\nu}_e$	-1	0	0
μ	0	+1	0	$\bar{\mu}$	0	-1	0
ν_μ	0	+1	0	$\bar{\nu}_\mu$	0	-1	0
τ	0	0	+1	$\bar{\tau}$	0	0	-1
ν_τ	0	0	+1	$\bar{\nu}_\tau$	0	0	-1

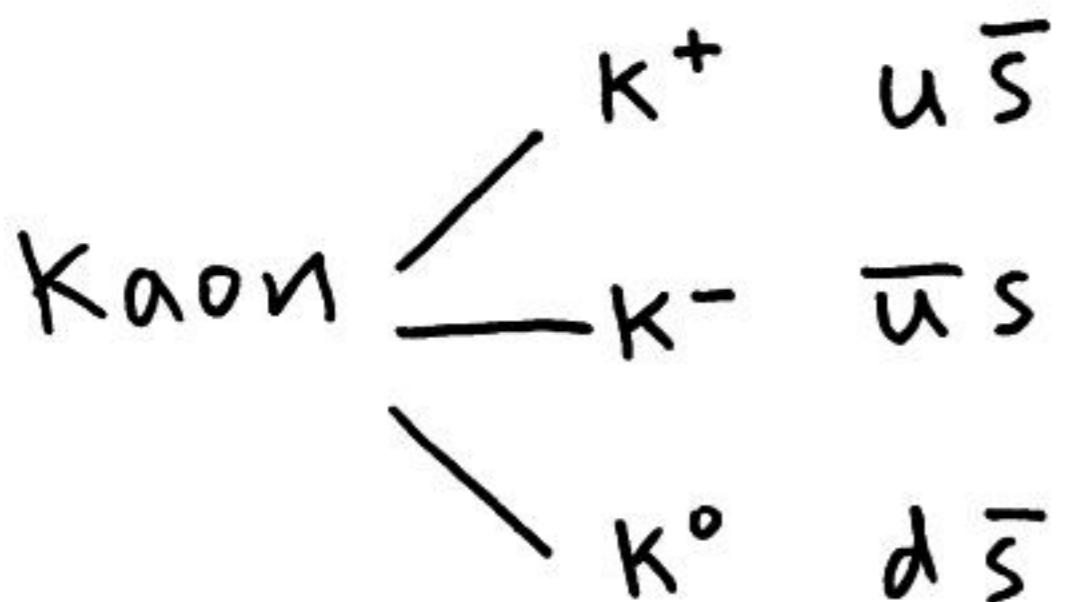
Conservação do número bariônico

Para cada bárion, como o p e o n, se atribui o número bariônico $B = +1$ e a cada anti-bárion atribuímos o número $B=-1$. Todas as demais partículas tem número bariônico igual a zero.



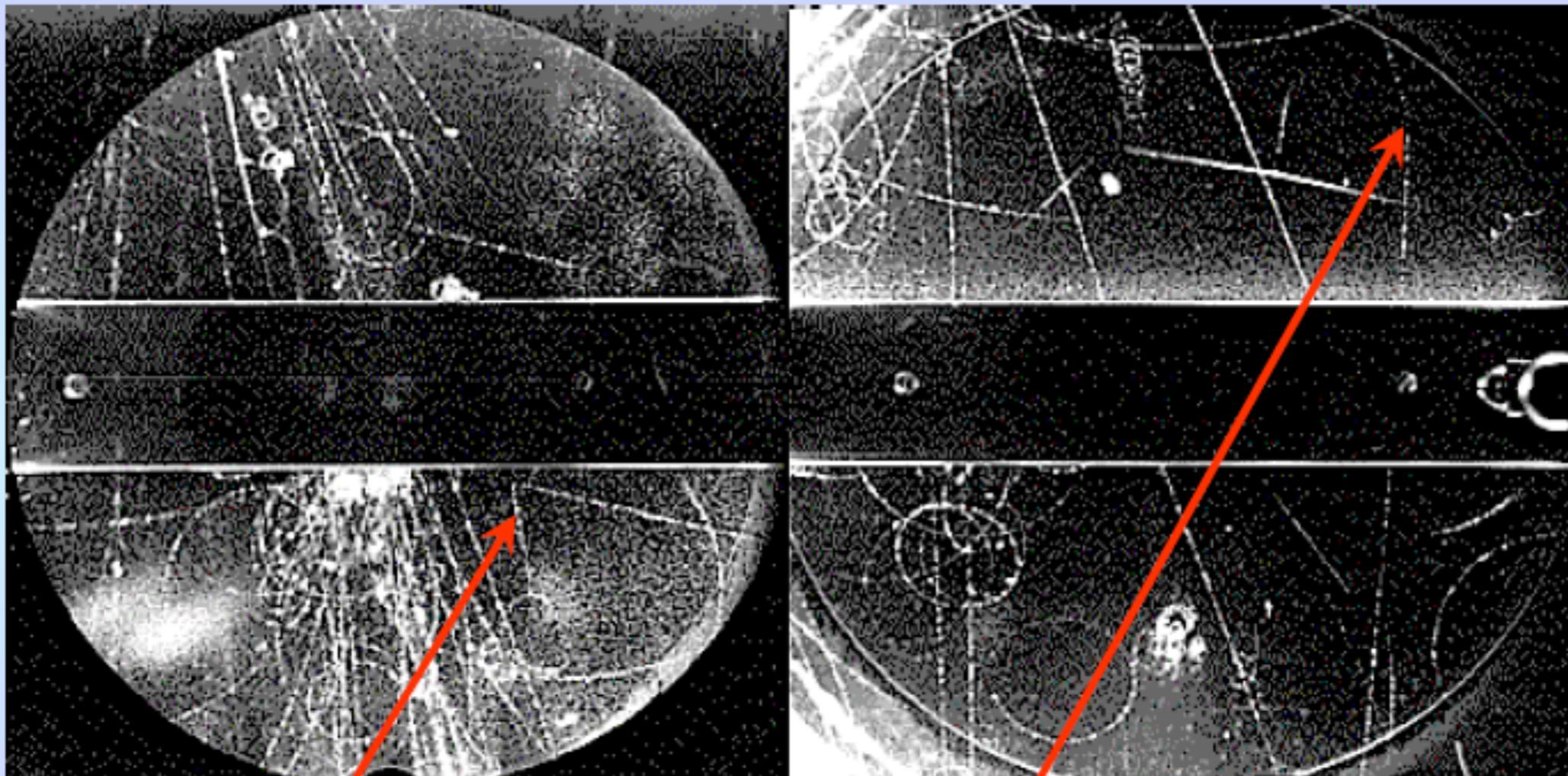
Mésons Estranhos e Bárions

- São produzidos em Interações Fortes com grande tempo de vida e decaem fracamente ao invés de fortemente
- A maioria das partículas leves contém um quark s (estranho).



Partículas Estranhas: Káons

[Rochester & Butler, 1947 (Manchester group)]



Neutral Kaon (V_0)
 $K^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$

Charged Kaon (kink)
 $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$

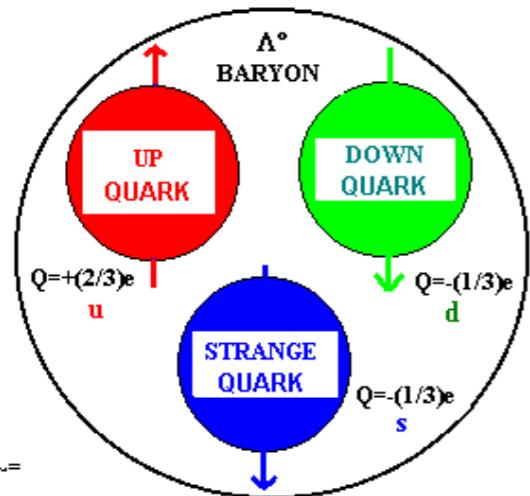


Weak interactions do not conserve “strangeness” S

Bárion

Λ^0

SPIN: 1/2



SYMBOL : Λ^0

MASS = 1,116 Gev ~=
~ = 1,116 Mp

$Q = 0$



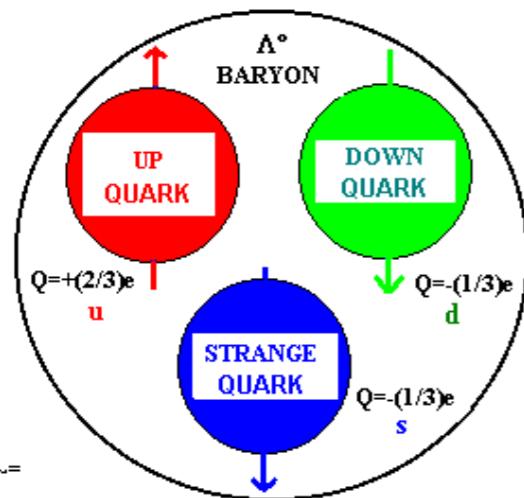
uds $\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$ $S = -1 \neq 0 + 0$	uud $\bar{u}d$ $\Lambda^0 \rightarrow n + \pi^0$ $S = -1 \neq 0 + 0$	$\bar{u}u + \bar{d}d$ $\sqrt{2}$
---	---	-------------------------------------

Particle	Symbol	Makeup	Rest mass MeV/c ²	Spin	B	S	Lifetime	Decay Modes
Lambda	Λ^0	uds	1115.6	1/2	+1	-1	2.6×10^{-10}	pπ, nπ ⁰
Lambda	Λ_c^+	udc	2281	1/2	+1	0	2×10^{-13}	...

Bárion

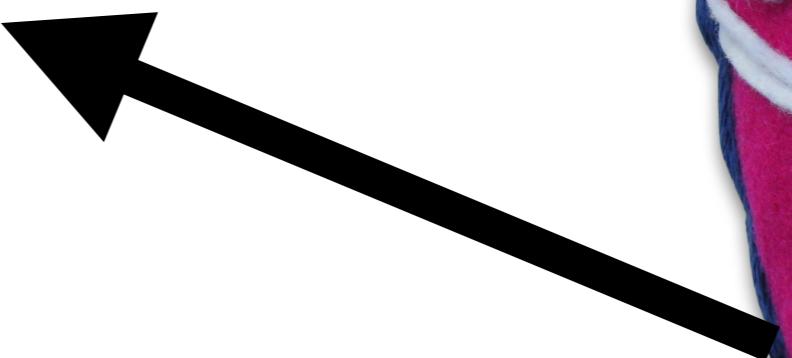
Λ^0

SPIN: 1/2



SYMBOL : Λ^0
 MASS = 1,116 GeV ~=
 $\sim 1,116 \text{ Mp}$

$Q = 0$



uds $\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$ $S = -1 \neq 0 + 0$	uud $\bar{u}d$ $\Lambda^0 \rightarrow n + \pi^0$ $S = -1 \neq 0 + 0$	$\bar{u}u + \bar{d}d$ $\sqrt{2}$
---	---	-------------------------------------

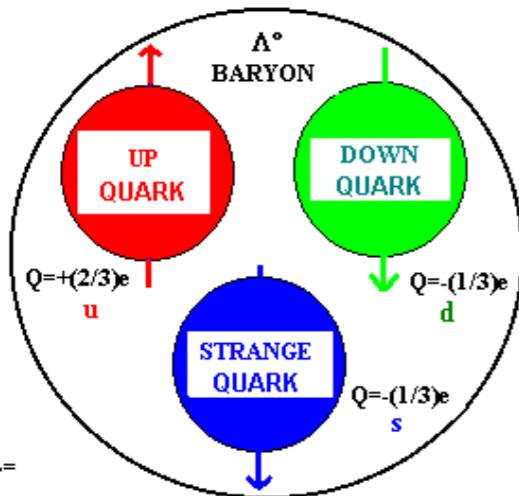
"Introdução" de
um novo quark

Particle	Symbol	Makeup	Rest mass MeV/c ²	Spin	B	S	Lifetime	Decay Modes
Lambda	Λ^0	uds	1115.6	1/2	+1	-1	2.6×10^{-10}	pπ, nπ ⁰
Lambda	Λ_c^+	udc	2281	1/2	+1	0	2×10^{-13}	...

Bárion

Λ^0

SPIN: 1/2

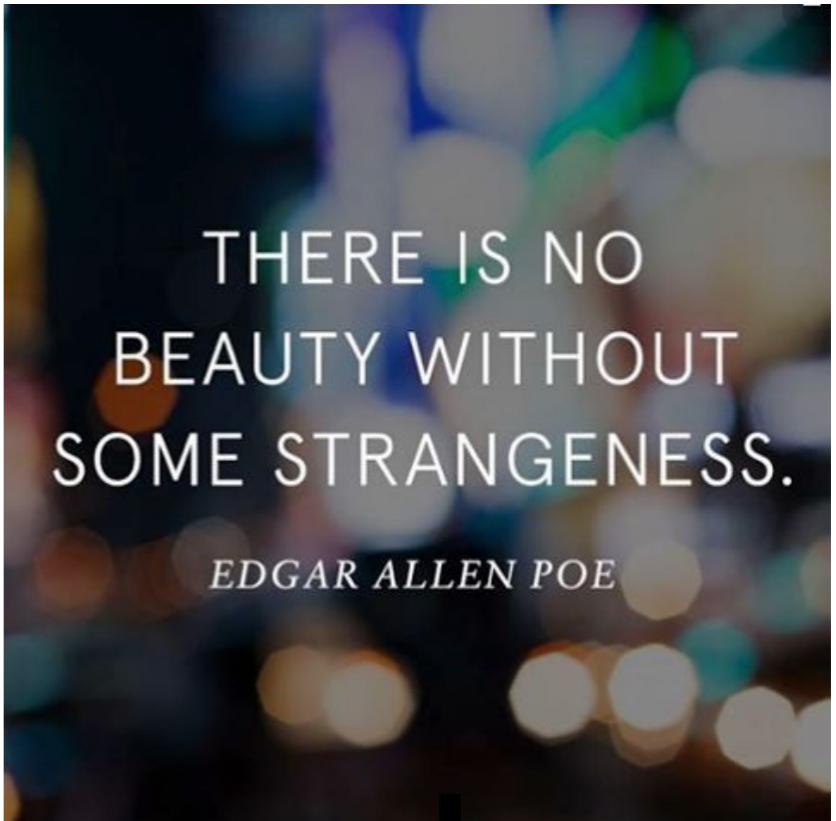


SYMBOL : Λ^0
MASS = 1,116 GeV ~=
~ = 1,116 Mp

$Q = 0$

$$\begin{array}{c} \text{uds} \quad \text{uud} \quad \bar{u}d \\ \Lambda^0 \rightarrow p + \pi^- \end{array} \quad S = -1 \neq 0 + 0$$

$$\begin{array}{c} \text{uds} \quad \text{udd} \quad \frac{\bar{u}u + \bar{d}d}{\sqrt{2}} \\ \Lambda^0 \rightarrow n + \pi^0 \end{array} \quad S = -1 \neq 0 + 0$$

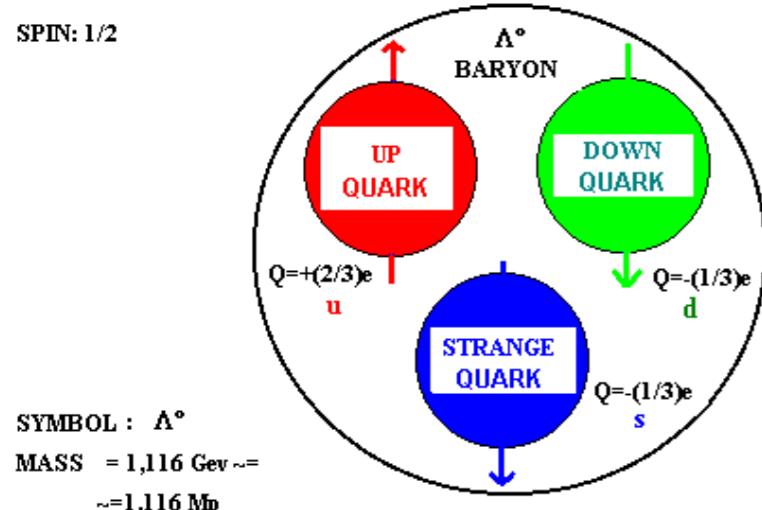


Particle	Symbol	Makeup	Rest mass MeV/c ²	Spin	B	S	Lifetime	Decay Modes
Lambda	Λ^0	uds	1115.6	1/2	+1	-1	2.6×10^{-10}	$p\pi, n\pi^0$
Lambda	Λ_c^+	udc	2281	1/2	+1	0	2×10^{-13}	...

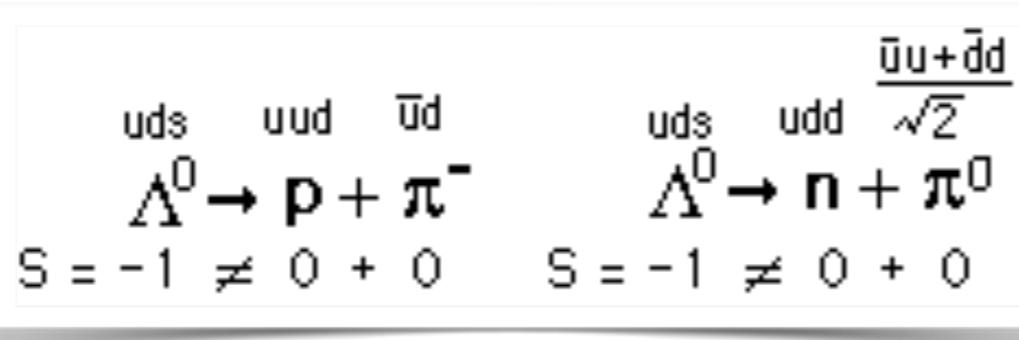
Bárion

Λ^0

SPIN: 1/2

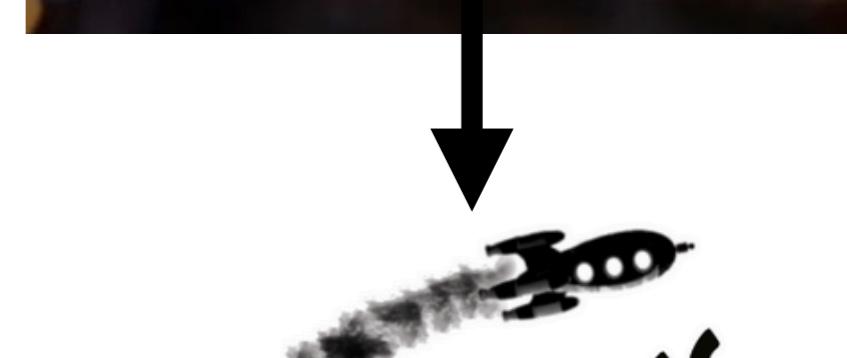


$Q = 0$



THERE IS NO
BEAUTY WITHOUT
SOME STRANGENESS.

EDGAR ALLEN POE



Um novo número de quarks - "estranheza" - que não precisa ser conservado em interações fracas e em interações fortes as partículas estranhas têm que ser em pares afim de conservar a "estranheza"

Particle	Symbol	Makeup	Rest mass MeV/c ²	Spin	B	S	Lifetime	Decay Modes
Lambda	Λ^0	uds	1115.6	1/2	+1	-1	2.6×10^{-10}	$p\pi, n\pi^0$
Lambda	Λ_c^+	udc	2281	1/2	+1	0	2×10^{-13}	...

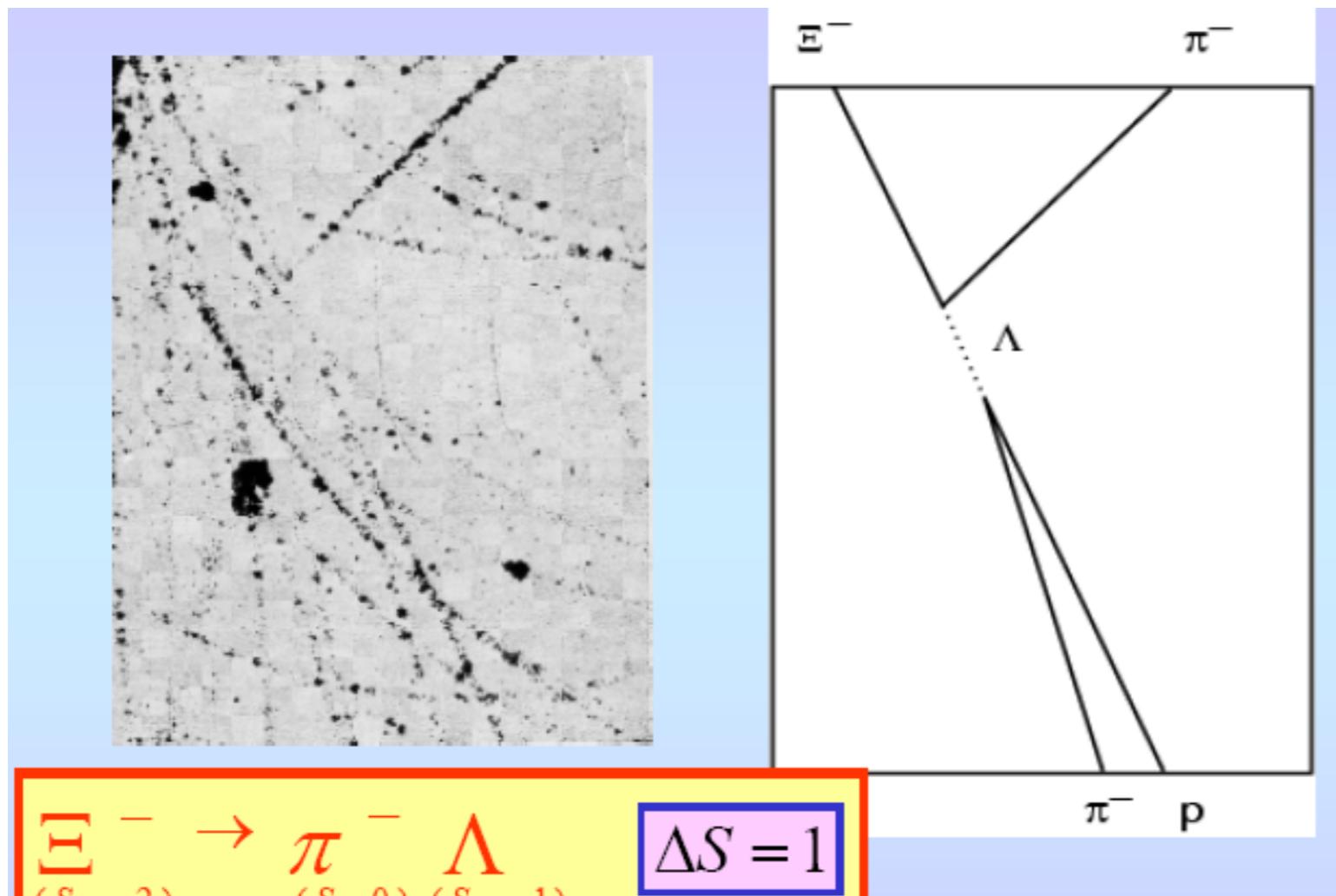


Conservação da estranheza

Para cada méson estranhos, como o káons se atribui o número de estranheza $S = +1$ e a cada anti-káons atribuímos o número $S=-1$. Todas as demais partículas não estranhas tem estranheza igual a zero.

Em processos governados por interações fortes ou por interações eletromagnéticas, a estranheza total deve permanecer constante. Em processos governados pela interação fraca, a estranheza total ou permanece constante ou muda de uma unidade.

Partículas Estranhas

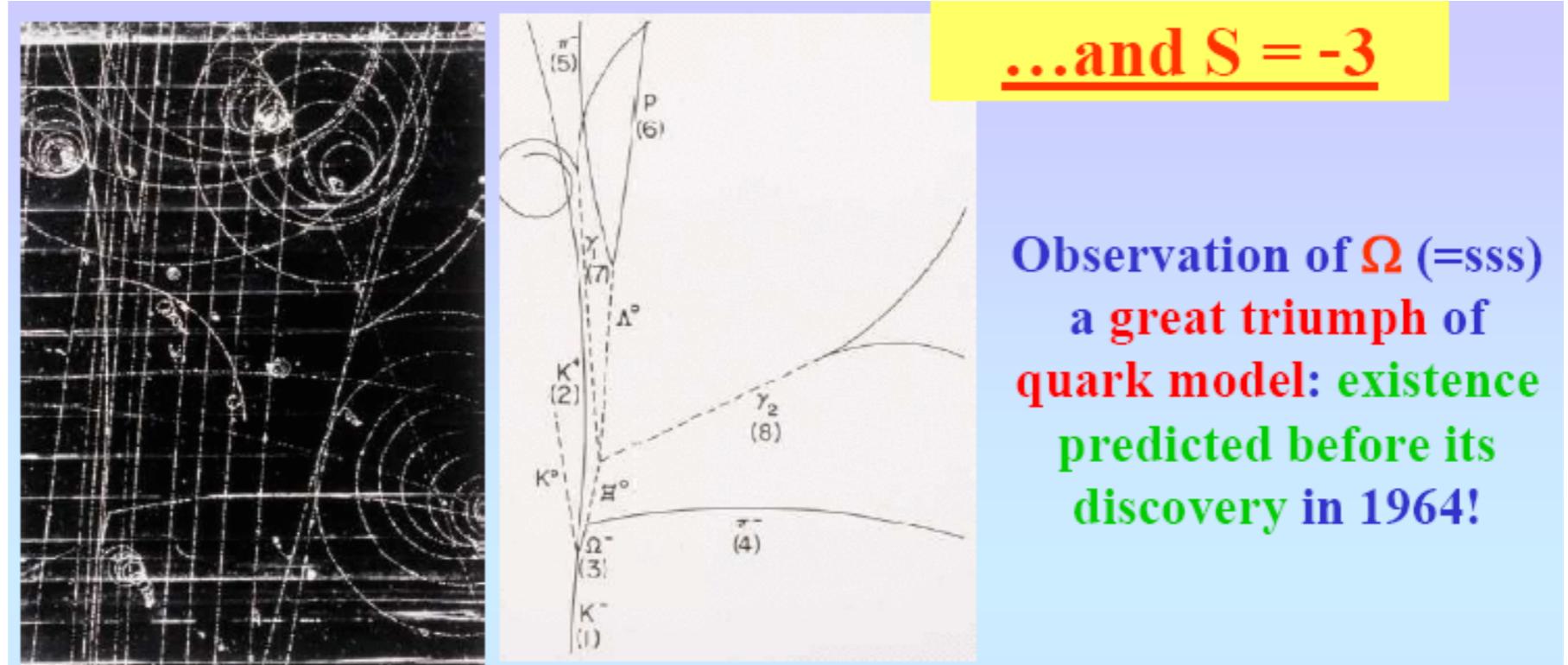
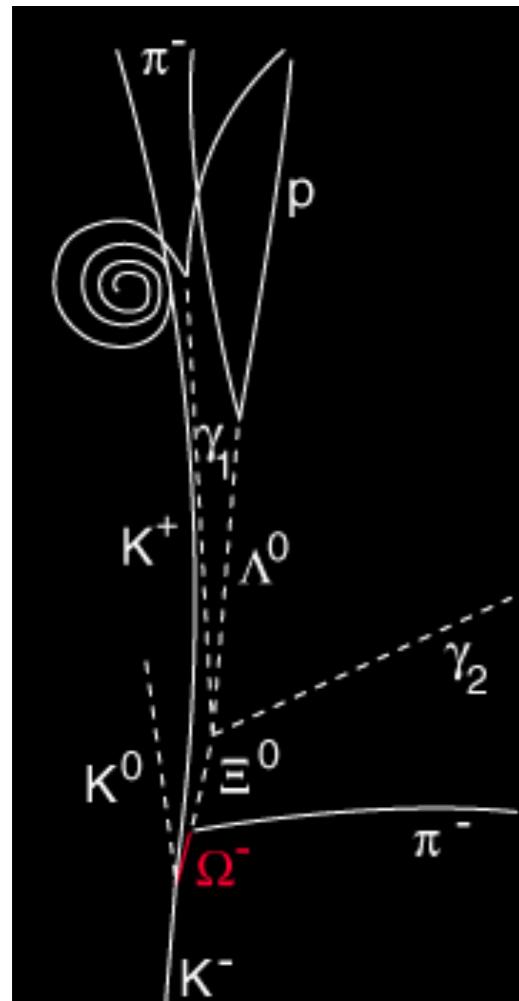


$$\Xi^-(S=-2) \rightarrow \pi^-(S=0) \Lambda(S=-1) \quad \Delta S = 1$$

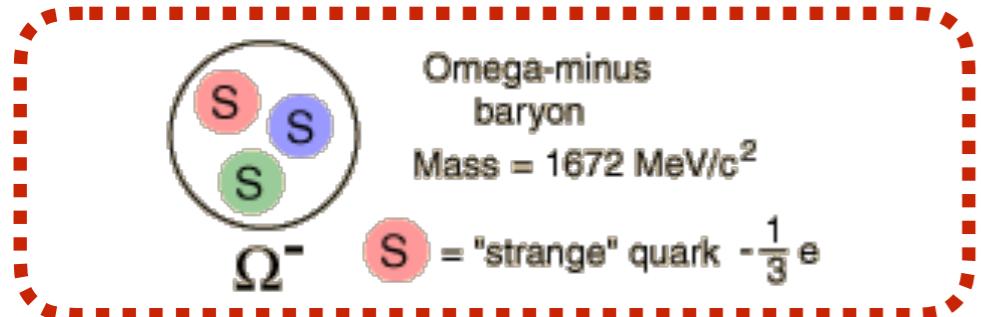
$$\mapsto \pi^-(S=0) p(S=0) \quad \Delta S = 1$$

Quark	symbol	charge	baryon number	strangeness
up	u	+ 2/3 e	1/3	0
down	d	- 1/3 e	1/3	0
strange	s	- 1/3 e	1/3	-1

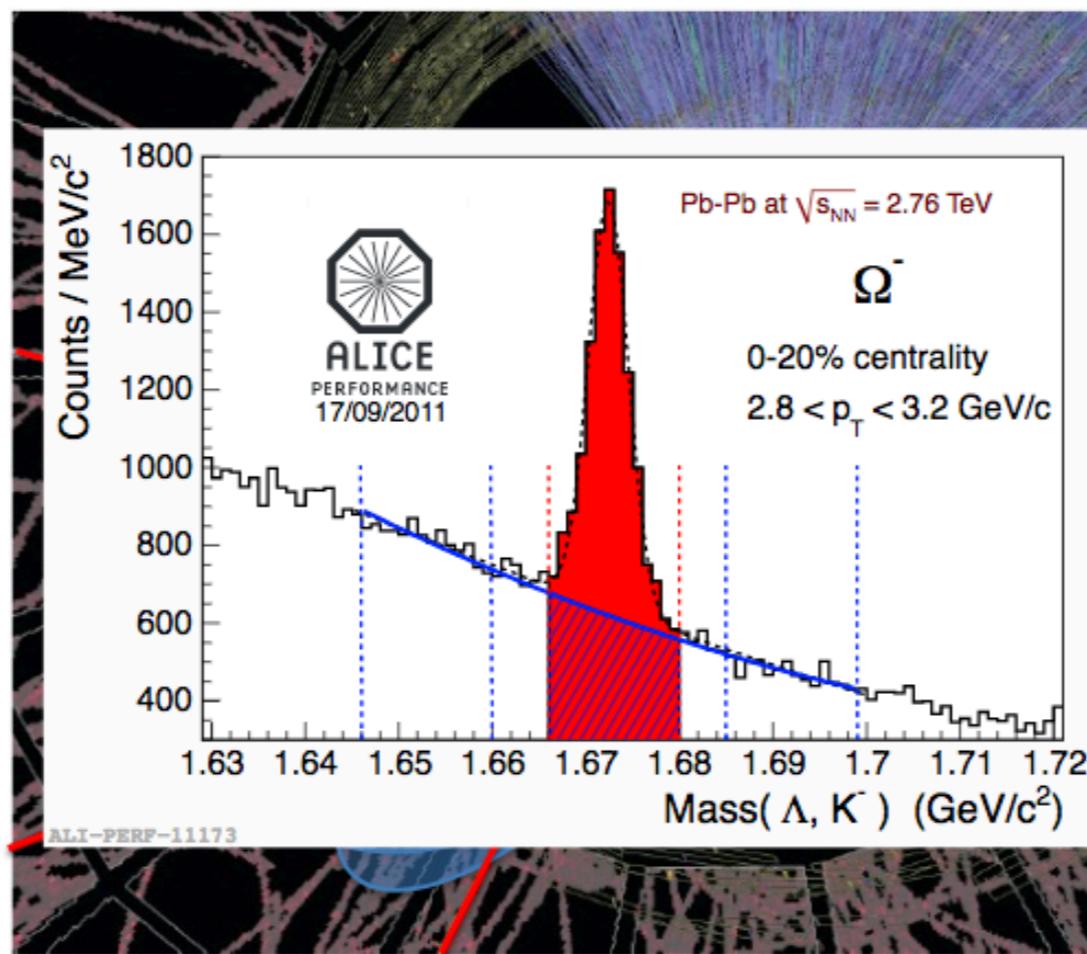
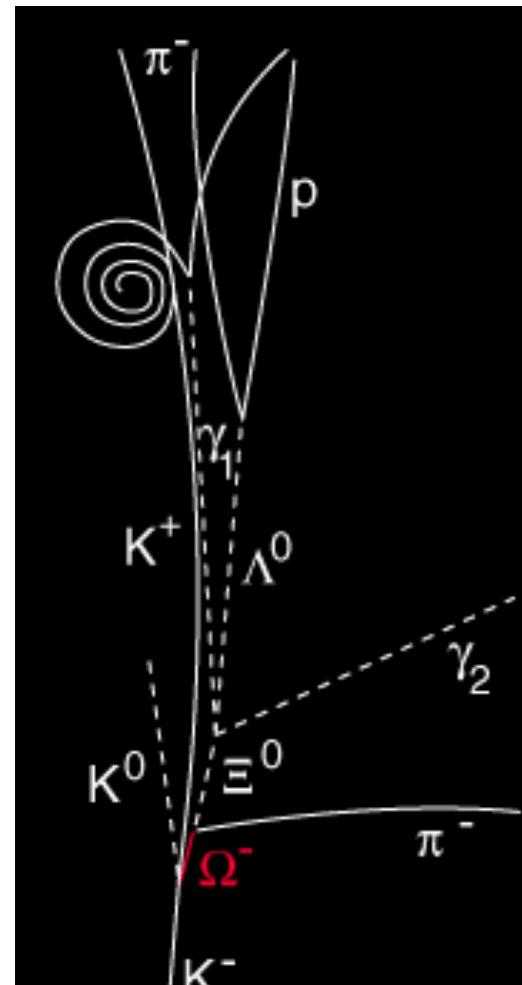
Triunfo do Modelo dos Quarks



Strangeness
conserved in strong
production process but
violated in weak decays



Produção de Estranheza no ALICE



$K_S^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ (69.2%)

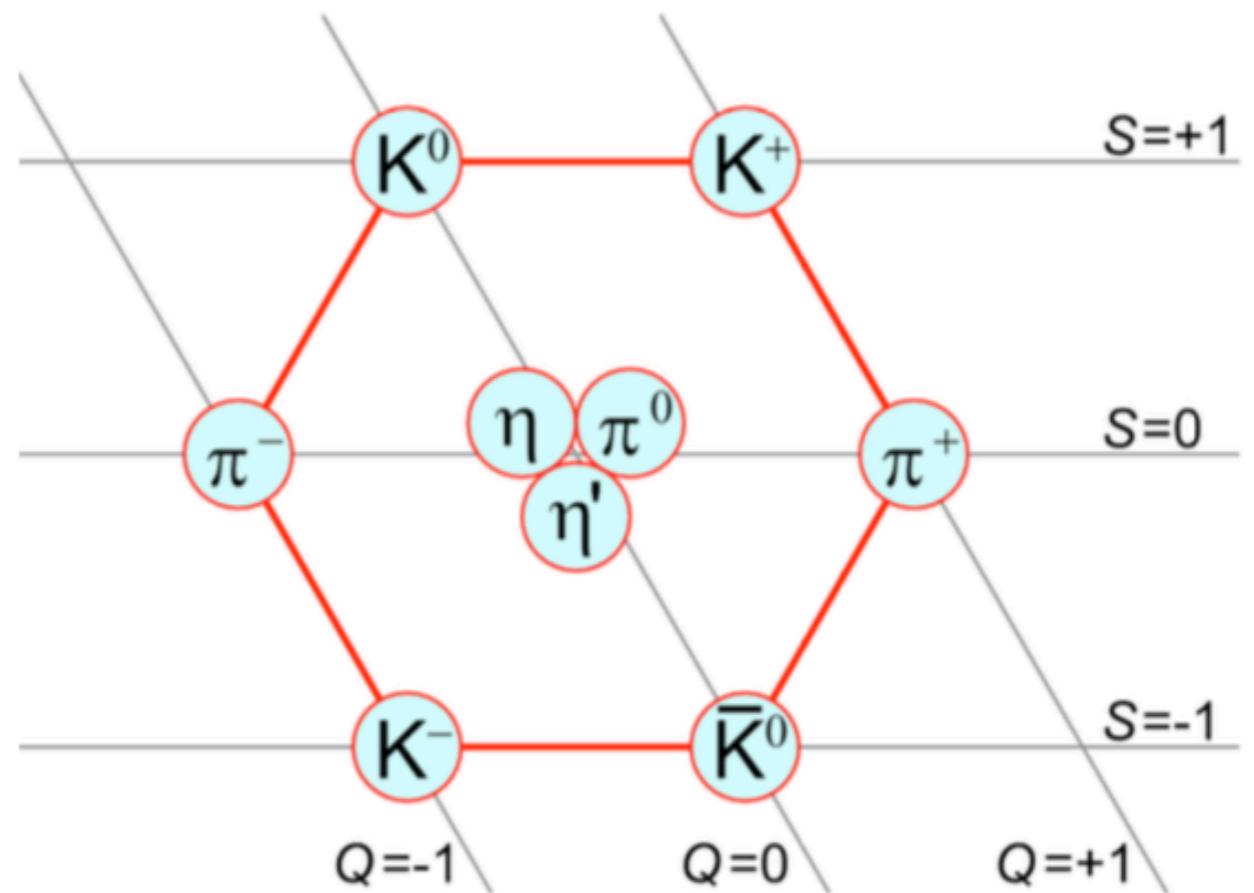
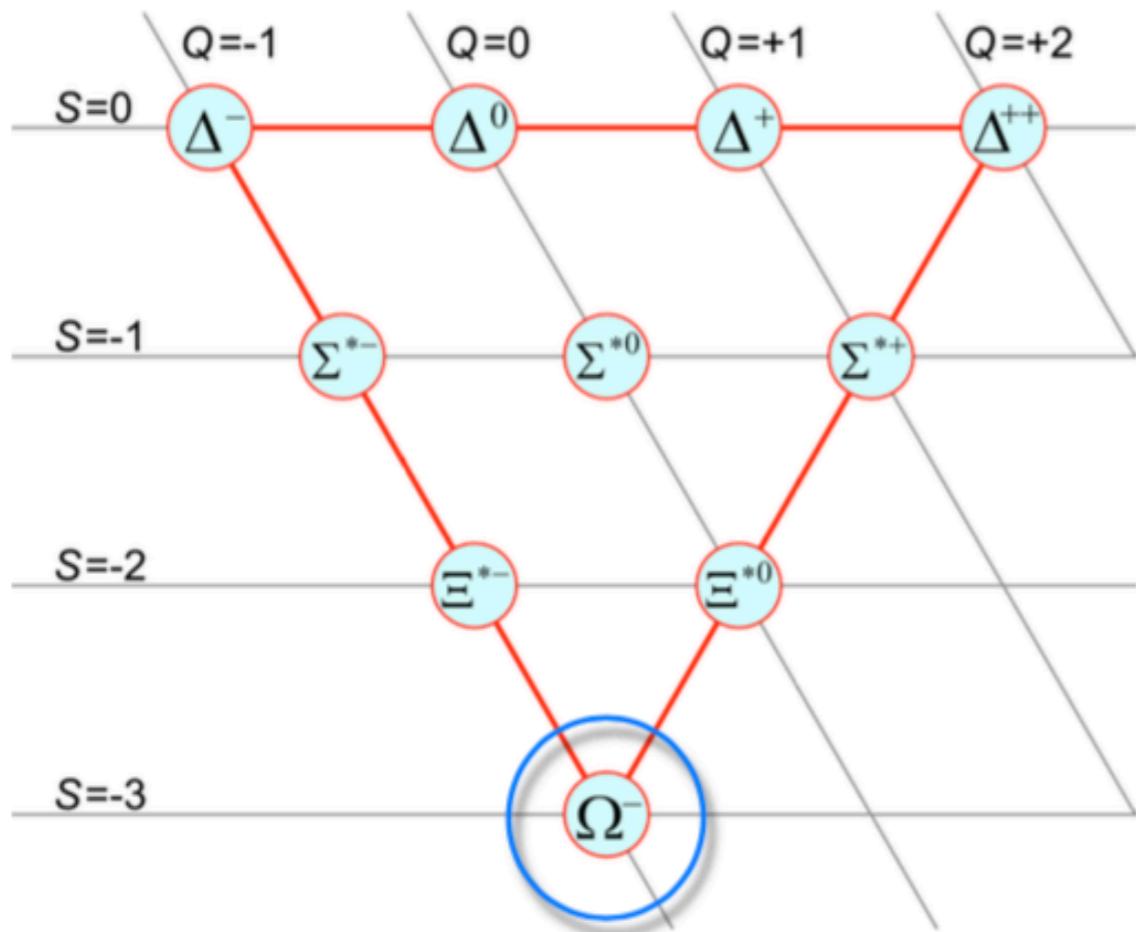
$\Lambda \rightarrow p + \pi^-$ (63.9%)

$\Xi^- \rightarrow \Lambda + \pi^-$ (100%)

$\Omega^- \rightarrow \Lambda + K^-$ (67.8%)

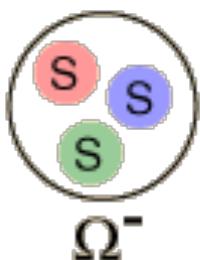
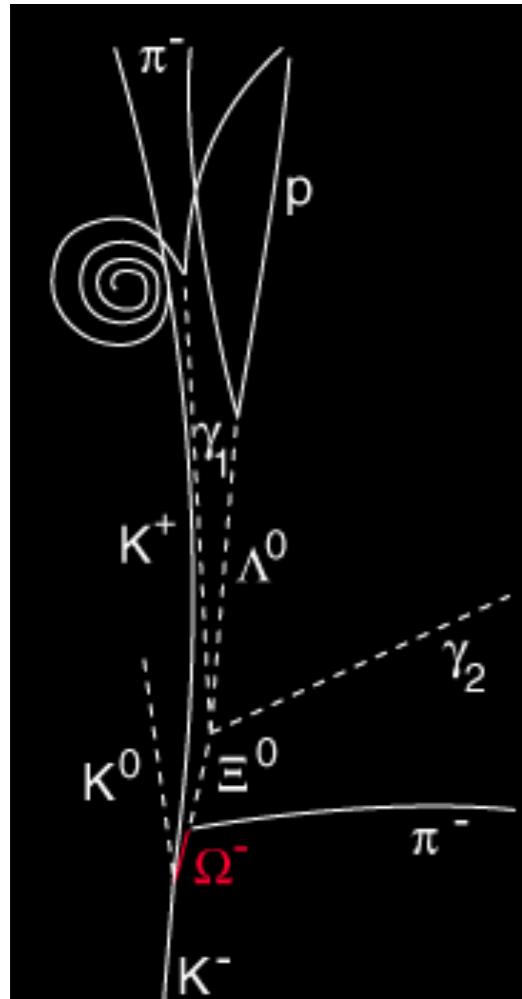
Caminho Óctuplo - The eightfold way (1961)

Por que os hadrons (mésons e bárions) obedecem esta classificação?



Descoberta e predição do bárion em 1964

Triunfo do Modelo dos Quarks



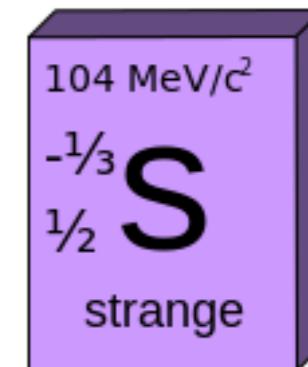
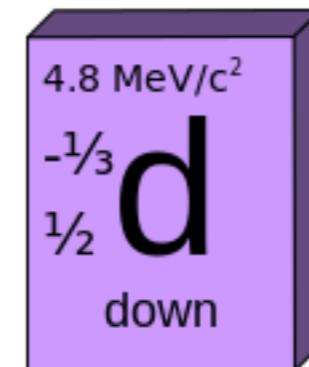
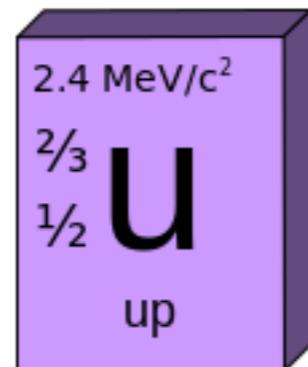
Omega-minus
baryon

Mass = 1672 MeV/c²

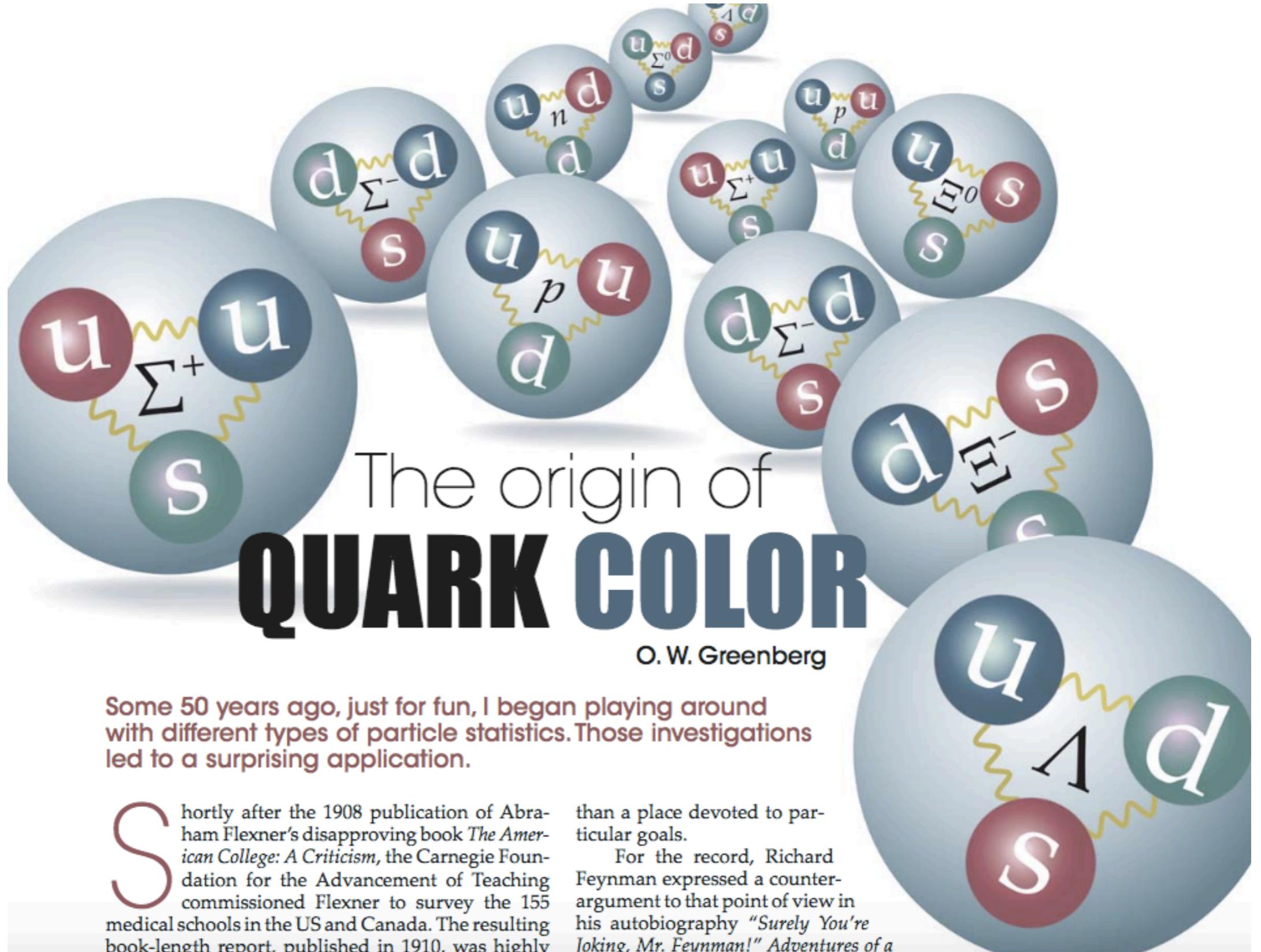
S = "strange" quark $-\frac{1}{3}$ e

Triunfo do Modelo dos Quarks

O modelo de quarks foi proposto de forma independente pelos físicos Murray Gell-Mann e George Zweig em 1964



Quark	symbol	charge	baryon number	strangeness
up	u	+ 2/3 e	1/3	0
down	d	- 1/3 e	1/3	0
strange	s	- 1/3 e	1/3	-1



Nascimento da QCD

As leis de conservação de carga (Q) e de estranheza (S) são observadas em decaimentos e reações envolvendo mésons e bárions. Isso sugere que possa haver alguma conexão entre carga elétrica Q e estranheza S de uma partícula. Os pesquisadores perguntavam-se sobre a possibilidade haver todas as combinações possíveis de Q e de S de num grupo de partículas semelhantes (os mésons de spin zero ou os bárions de spin $\frac{1}{2}$, por exemplo) ou se haveriam apenas alguns certos valores. Se existe um conjunto restrito de combinações, isso sugere que as partículas são construídas de acordo com um conjunto de regras a partir de unidades mais fundamentais cujas cargas e estranhezas tenham certos valores.

Nascimento da QCD

O pilar principal para o sucesso da QCD é a aplicação da teoria de perturbação, que torna-se aplicável quando a constante de acoplamento é pequena. A QCD evolui de uma teoria de quarks e glúons assintoticamente livres a pequenas distâncias a uma teoria confinante de hadrons a grandes distâncias.

Um dos testes experimentais para “provar” o sucesso da QCD como a teoria das interações fortes é a evolução da constante de acoplamento da QCD.

A idéia de graus de liberdade de cor surgiu com forma de responder ao problema de como construir a função de onde para delta ++, que um bárion carregado com spin 3/2 sendo obtido pela combinação de três quarks idênticos em seus estados ligados. Sendo assim, a QCD é uma teoria baseada no grupo $SU_c(3)$.

Nascimento da QCD

Delta(1232) Resonance

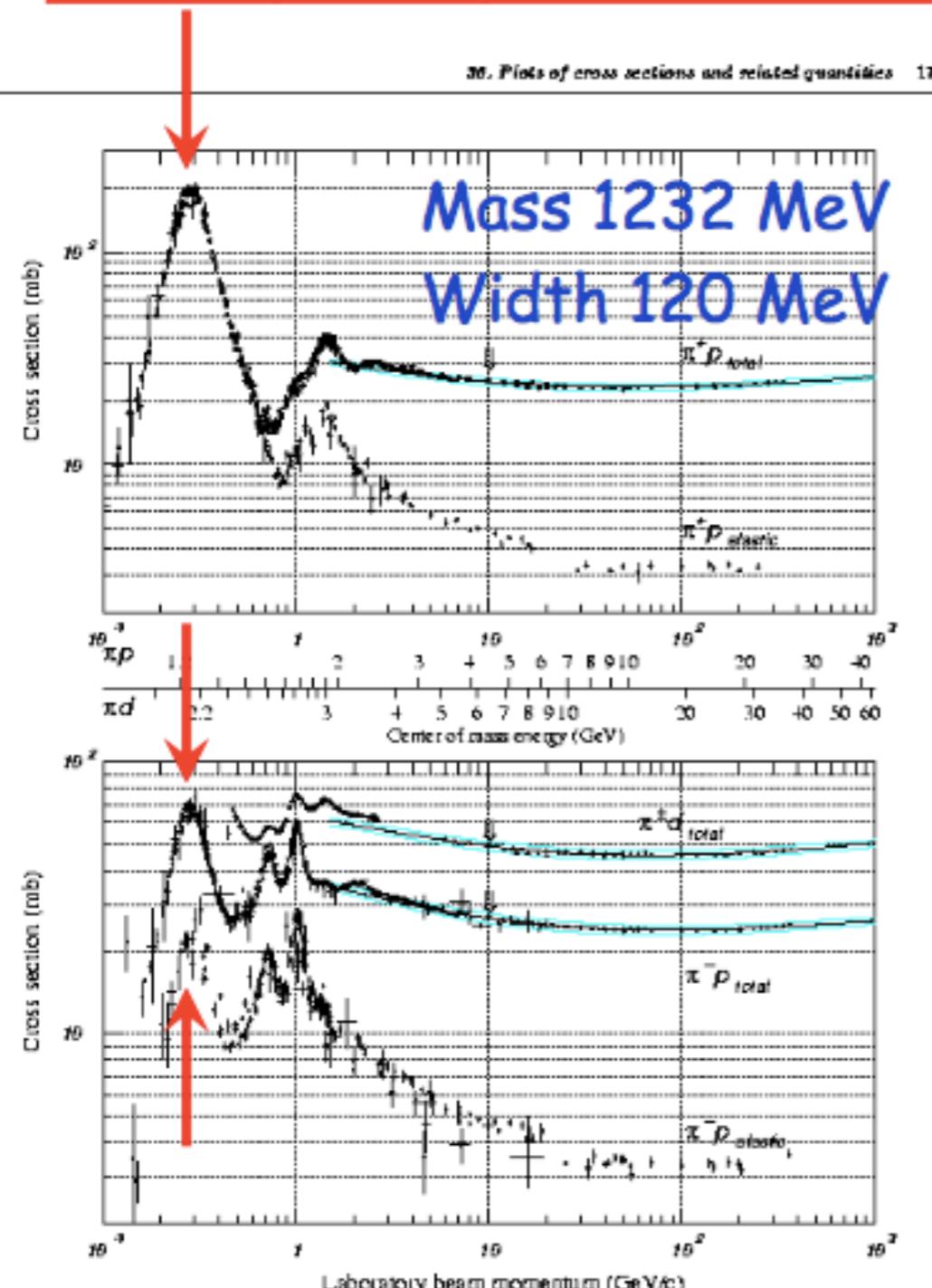
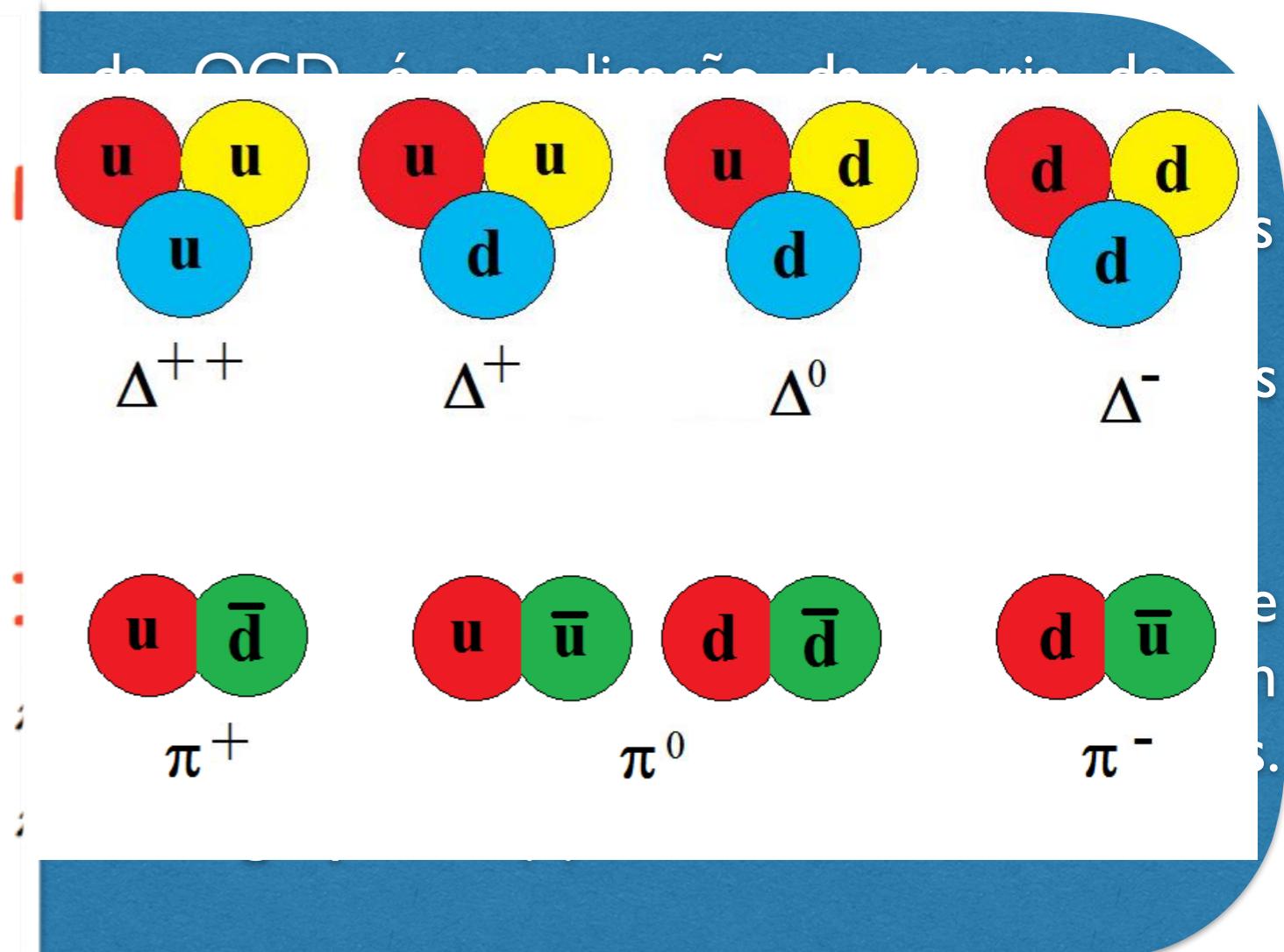
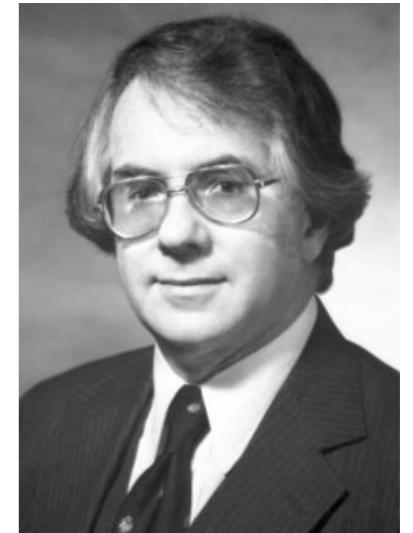


Figure 36.39 Total and elastic cross sections for $\pi^+ p$, $\pi^0 p$ (total only), and $\pi^- p$ collisions as a function of laboratory beam momentum and total center-of-mass energy. Computer-readable data files may be found at <https://pdg.lbl.gov/2007/charms/total>. (Courtesy of the COMPASS Group, JINR, Protvino, Russia, 1995.)



Descoberta do Charme

e	μ
ν_e	ν_μ
u	?
d	s



- Bjorken e Glashow propuseram um quarto quark para se adequar ao padrão.
- GIM mechanism (1970)

Descoberta do Charme

Observation of Muon Pairs in High-Energy Hadron Collisions*

J. H. Christenson,[†] G. S. Hicks,[‡] L. M. Lederman, P. J. Limon, and B. G. Pope[§]
Columbia University, New York, New York 10027
and Brookhaven National Laboratory, Upton, New York 11973

E. Zavattini
CERN Laboratory, Geneva, Switzerland
(Received 30 March 1973)

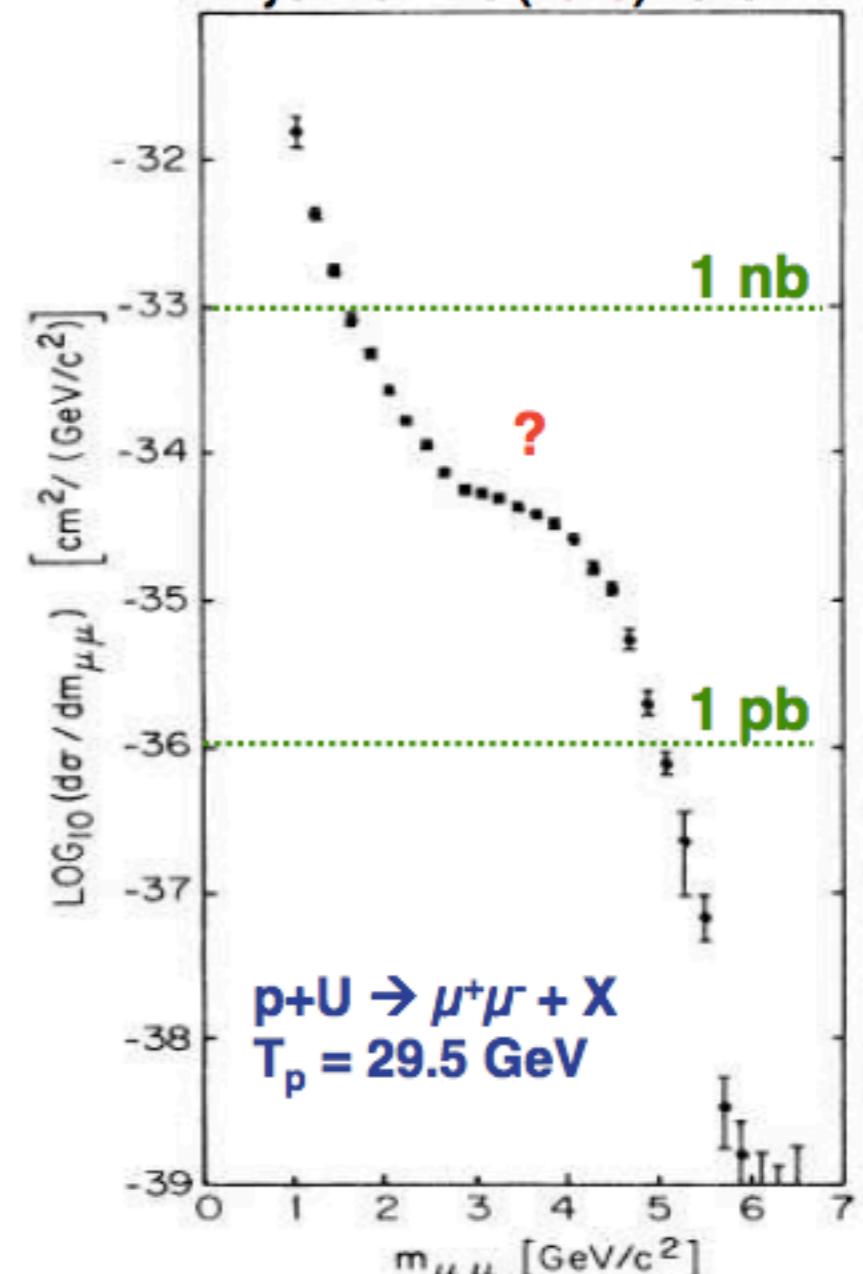
"Muon pairs with effective masses $1 \text{ GeV}/c^2$ and $6.5 \text{ GeV}/c^2$ have been observed in the collisions of 30-GeV protons with a uranium target. The production cross section was seen to vary smoothly with mass exhibiting no resonant structure??"

Dimuon spectra

- $\sigma_M/M \sim 25\%$ at $3 \text{ GeV}/c^2$
- 4% of in-time data sample
(from 2% at $1.5 \text{ GeV}/c^2$ to 40% at $5 \text{ GeV}/c^2$)
→ small signal-to-noise ratio
→ data sensitive to subtraction procedure

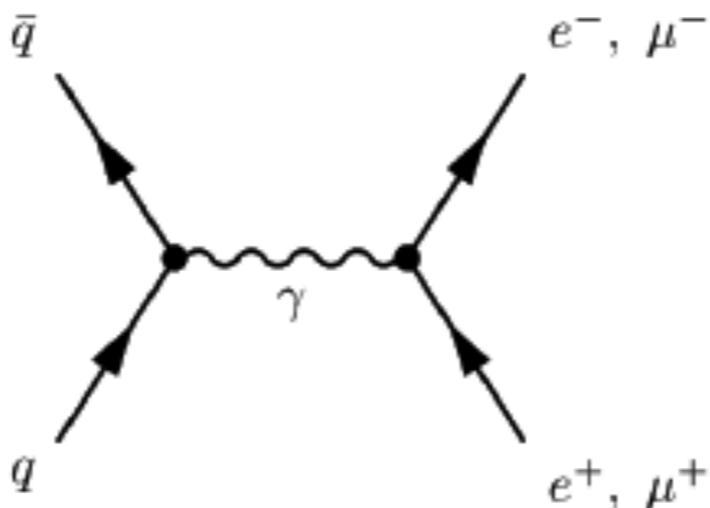
→ A year later S.Ting group completed e+e- pair spectrometer at AGS/BNL

Phys. Rev. D8 (1973) 2016



Descoberta do Charme

Em 1974 o quark *charm* foi descoberto simultaneamente no SLAC e em Brookhaven, por dois grupos independentes, ambos estudando o processo chamado Drell-Yan, que é a produção de pares e^+e^- e $\mu^+\mu^-$ em colisões hádron-hádron. O processo microscópico é a aniquilação de um quark de um dos hadrons e um antiquark do outro hadron,

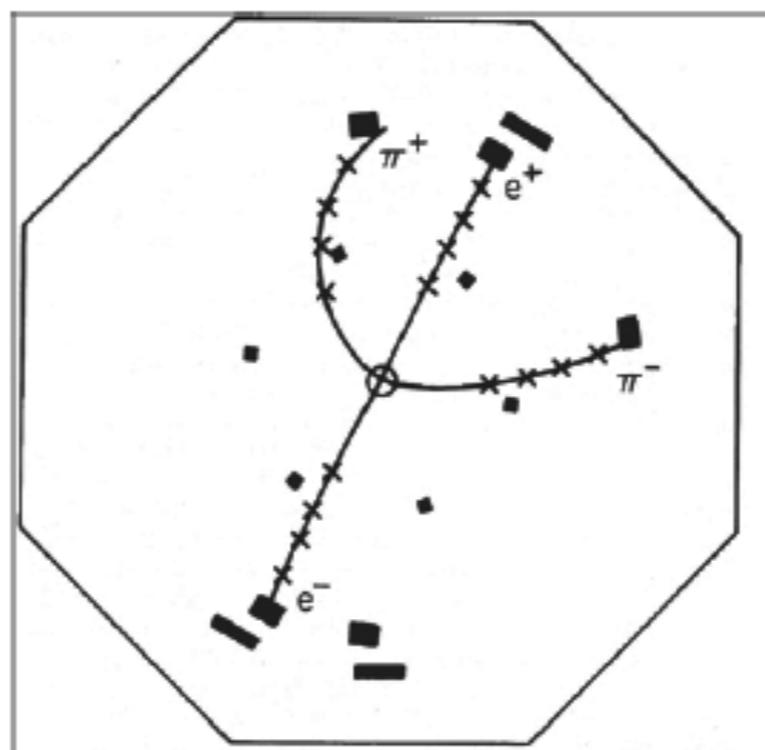


No SLAC havia sido construído um anel de colisão e^+e^- para operar num intervalo de energia entre 2.5 e 7.5 GeV. Um grupo de colaboradores formou o experimento Mark I, dedicado a medir a seção de choque $\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{hadrons})$ variando a energia incidente em pequenos intervalos. No laboratório de Brookhaven um experimento foi montado para estudar a reação $p + p \rightarrow e^+ + e^- + X$

Descoberta do Charme

Rapidamente outros estados $c\bar{c}$ foram encontrados, como o ψ' ou $\psi(3685)$. O *spin* e paridade da família ψ foi determinado, $J^P = 1^-$.

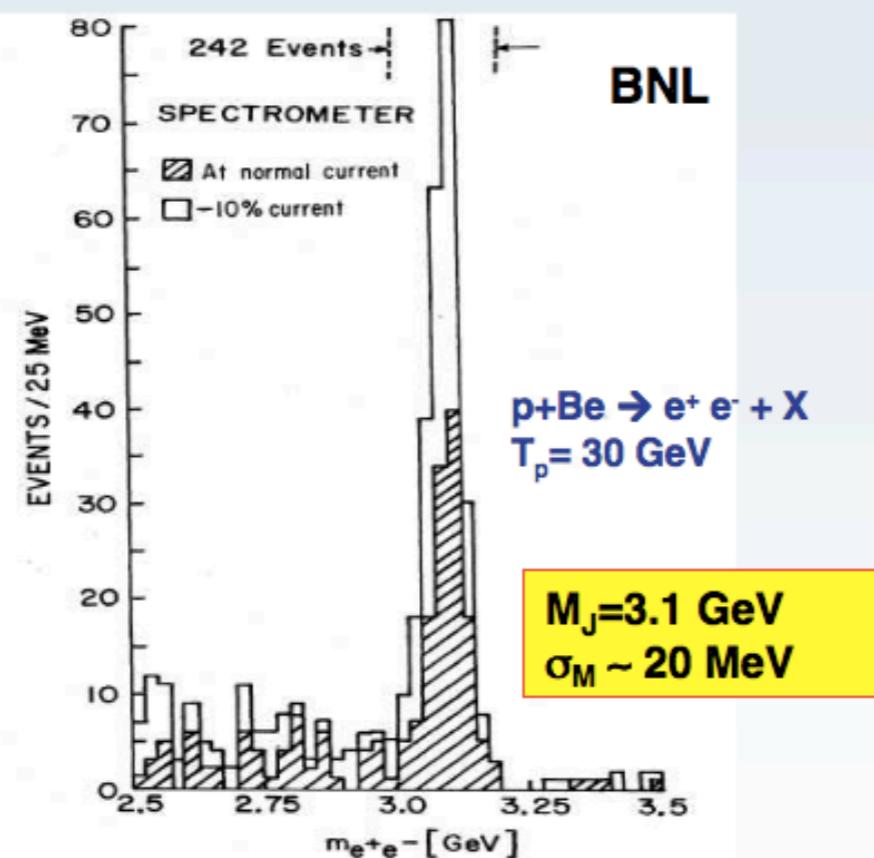
A figura abaixo é bastante famosa. Trata-se do decaimento $\psi' \rightarrow \psi\pi^+\pi^-$, seguido do decaimento $\psi \rightarrow e^+e^-$.



Descoberta do Charme

"November Revolution" - J/ψ discovery

J.J. Aubert et al. PRL 33 (1974) 1404

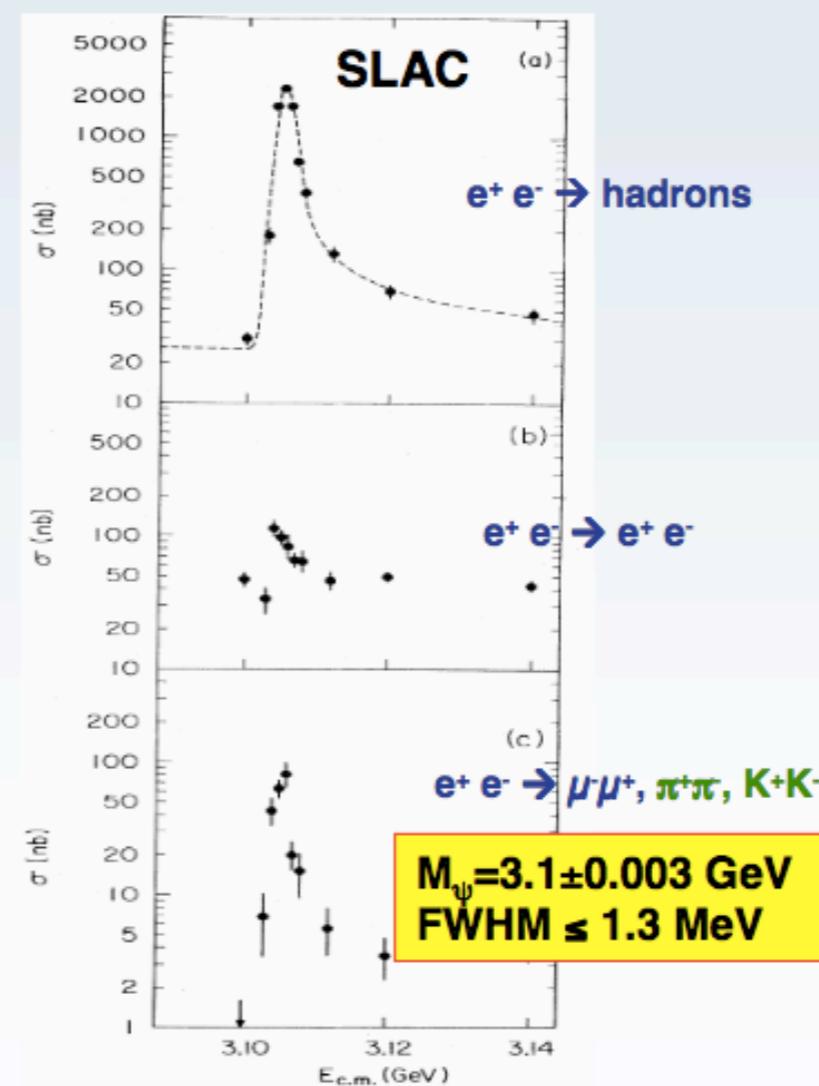


Particle Data Book (2007):

$$M_{J/\psi} = 3096.916 \pm 0.011 \text{ MeV}$$

$$\Gamma_{J/\psi} = 93.4 \pm 2.1 \text{ keV}$$

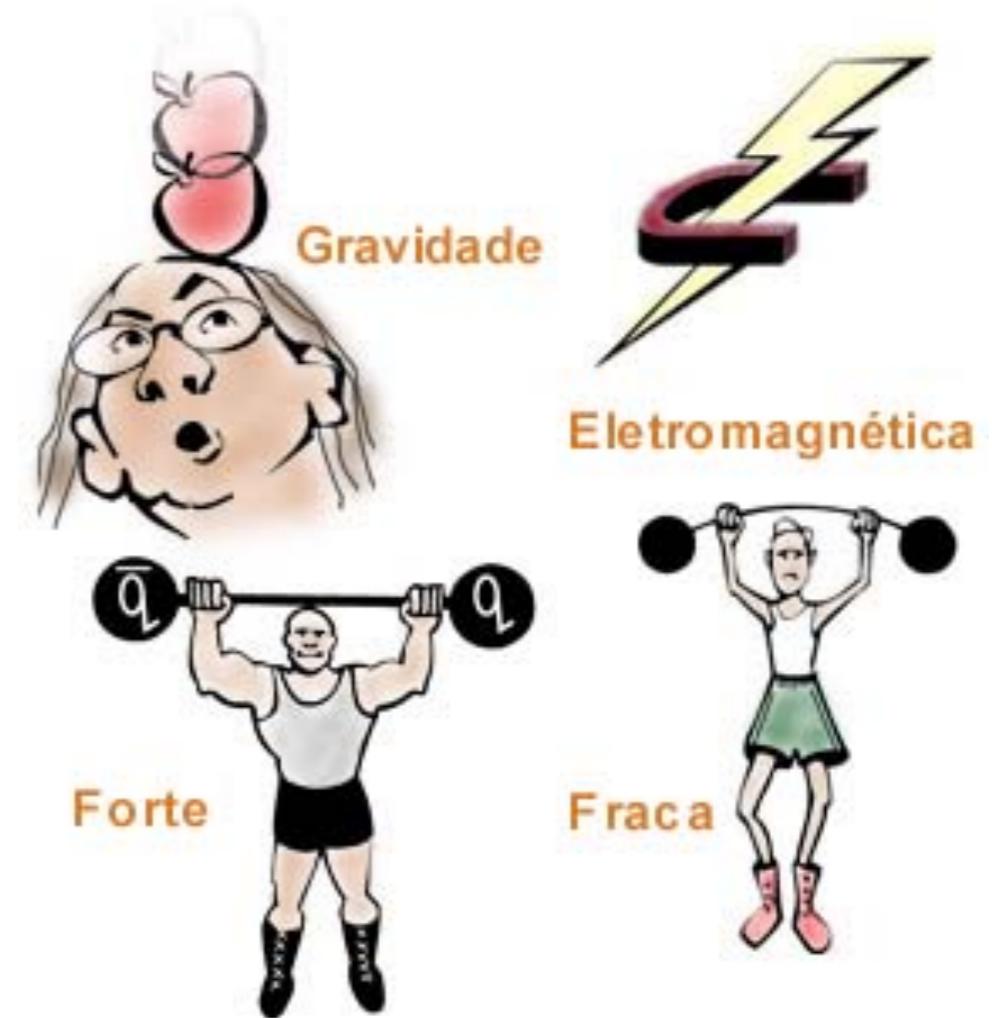
J.J. Augustin et al. PRL 33 (1974) 1406



Interações Fundamentais

Interações Fundamentais

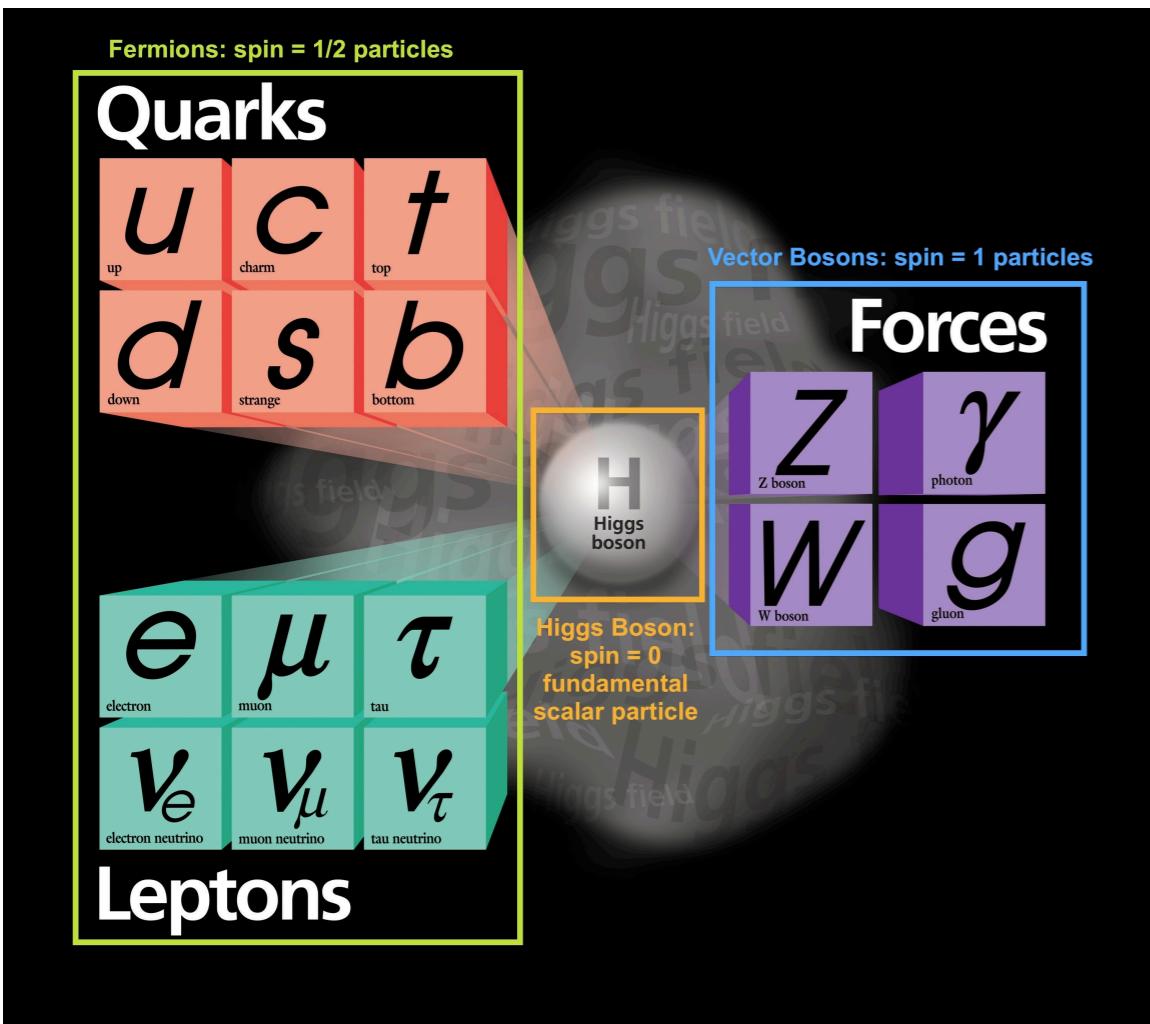
- Existem quatro interações fundamentais na Natureza:
 - nuclear forte;
 - eletromagnética;
 - nuclear fraca;
 - gravitacional.



Interações Fundamentais

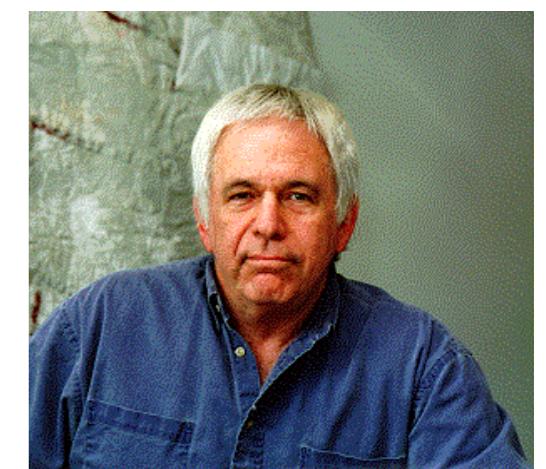
Tipo:	Intensidade:	Alcance (m):	Ocorre em:
Forte	1	10^{-15}	núcleos
Eletromagnética	$\frac{1}{137} \approx 10^{-3}$	infinito	Eletrosfera
Fraca	10^{-6}	10^{-18}	decaimento radioativo
Gravitacional	10^{-39}	infinito	corpos celestes

Modelo Padrão das Partículas Fundamentais

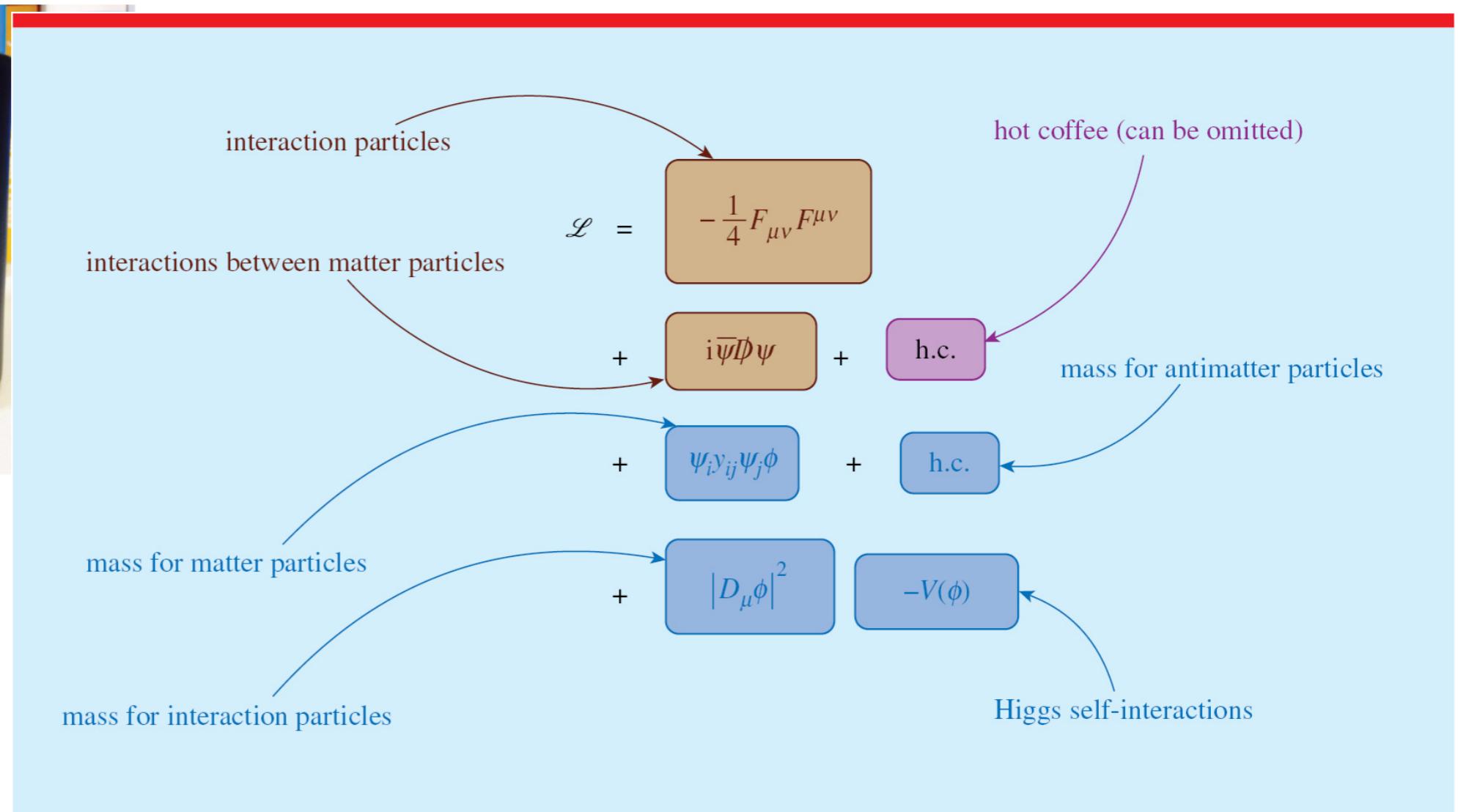
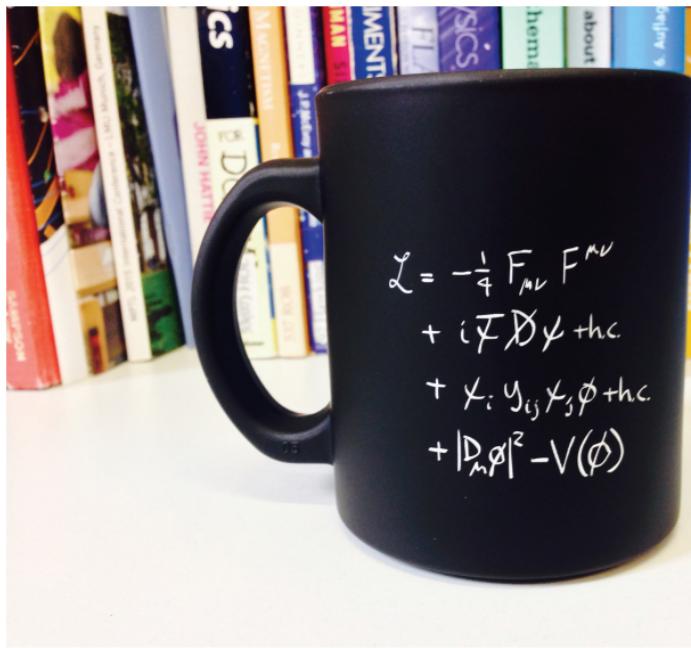


“...o Modelo Padrão é, na história, a mais sofisticada teoria matemática sobre a natureza. Apesar da palavra ‘modelo’ em seu nome, o Modelo Padrão é uma teoria compreensiva que identifica as partículas básicas e especifica como interagem.”

Gordon Kane (Universidade de Michigan)
Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 31, n. 1, 1306
(2009)



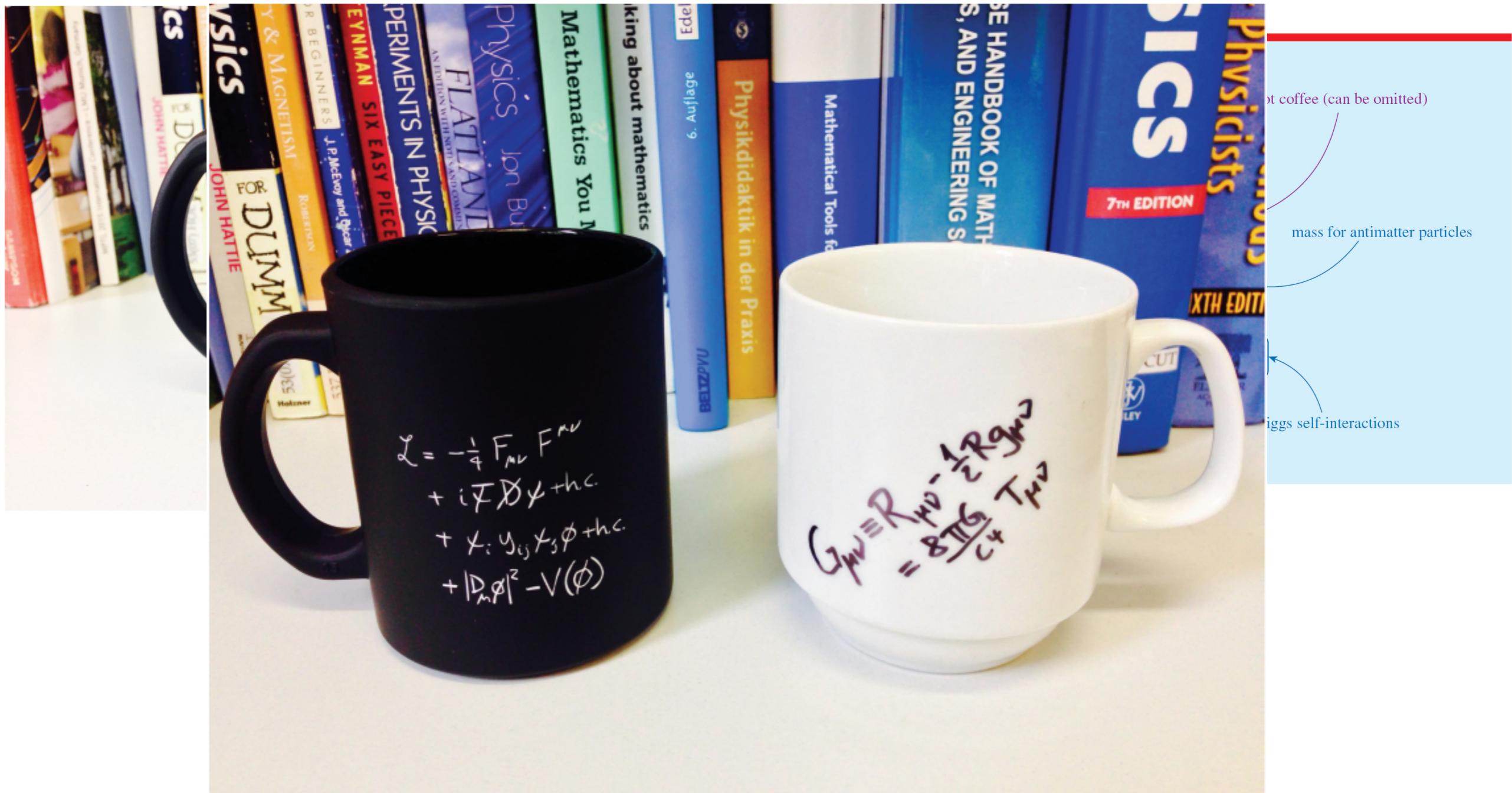
Representação matemática do MP



<https://www.symmetrymagazine.org/article/the-deconstructed-standard-model-equation>

<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6552/aa5b25>

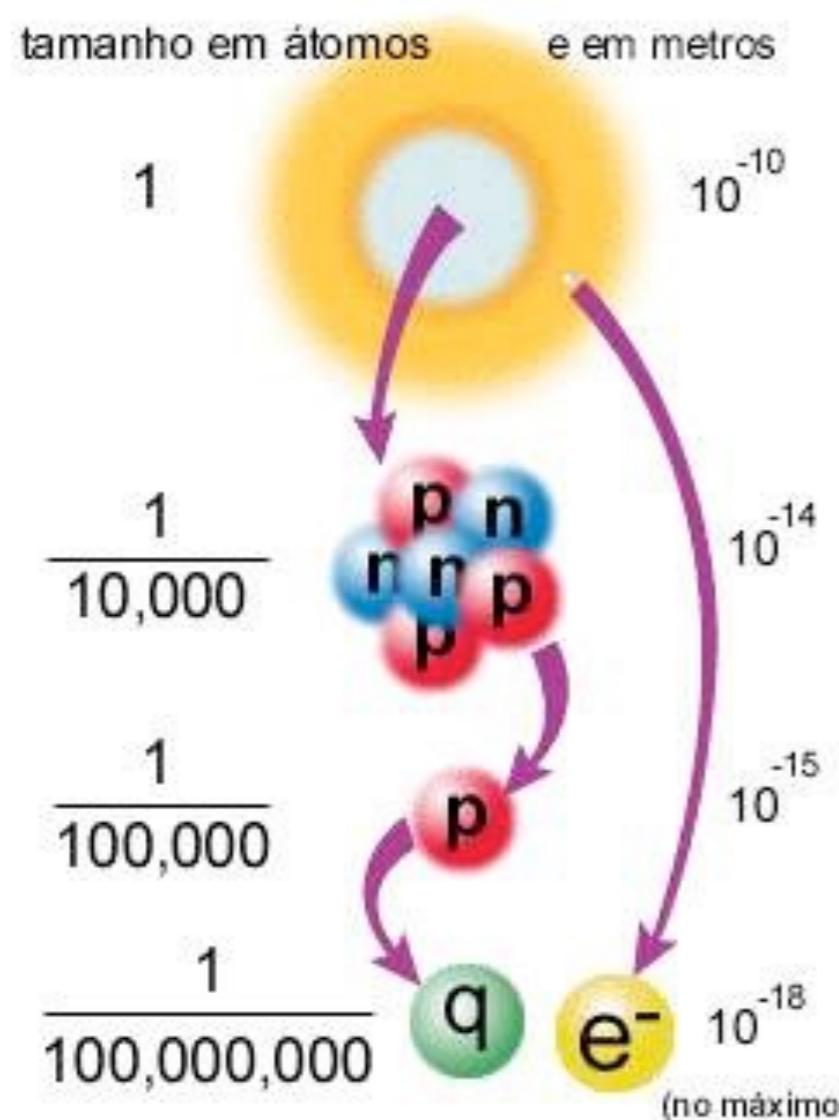
Representação matemática do MP



<https://www.symmetrymagazine.org/article/the-deconstructed-standard-model-equation>

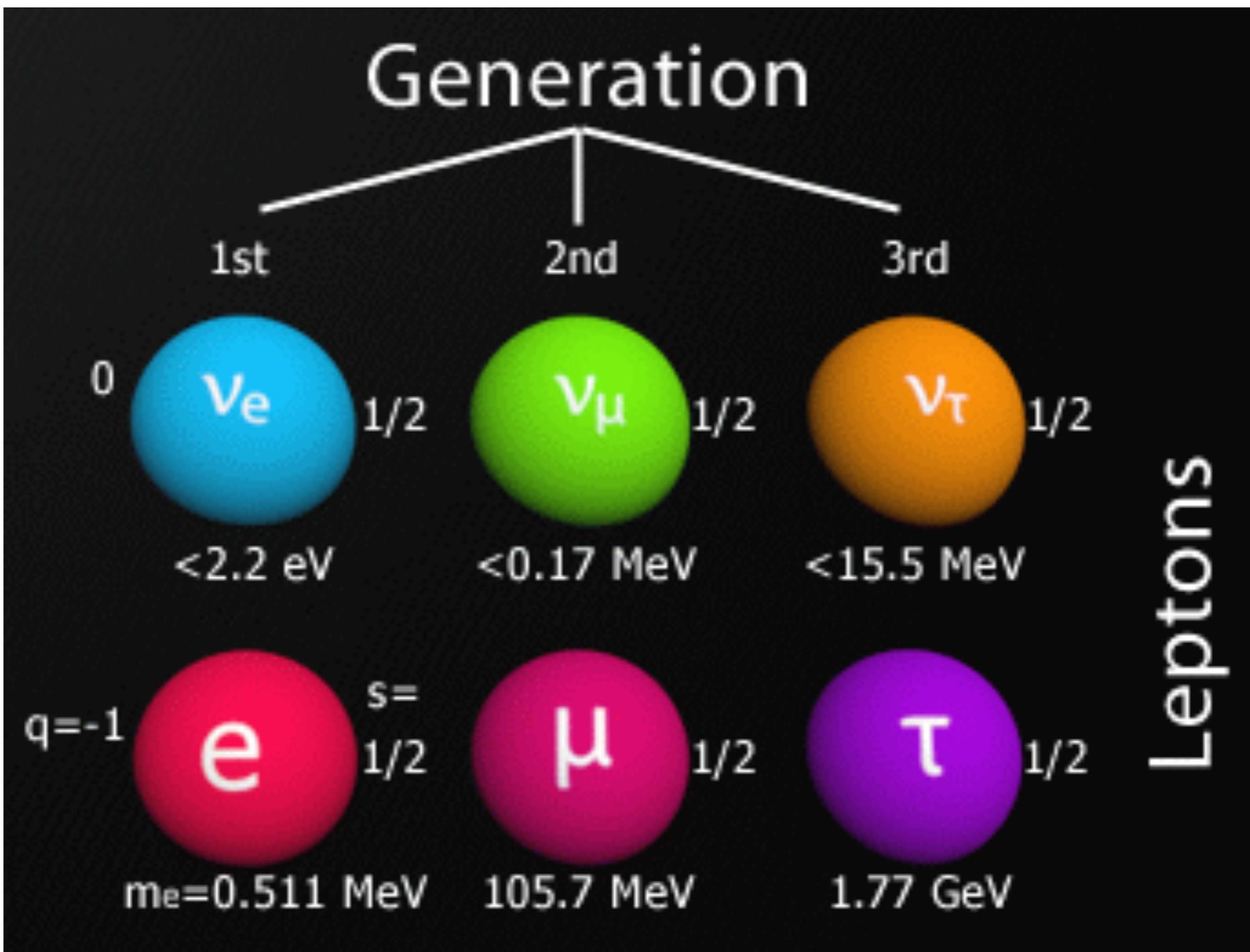
<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6552/aa5b25>

Modelo Padrão das Partículas Fundamentais



Se fossemos desenhar o átomo em escala e fizéssemos os prótons e nêutrons com um centímetro de diâmetro, então os elétrons e quarks deveriam ter **um diâmetro menor do que o de um fio de cabelo** e o diâmetro do átomo inteiro deveria ser maior que o comprimento de **trinta campos de futebol!** 99,999999999999% do volume de um átomo é apenas espaço vazio!

Léptons



Mésons

• Mesons $q\bar{q}$

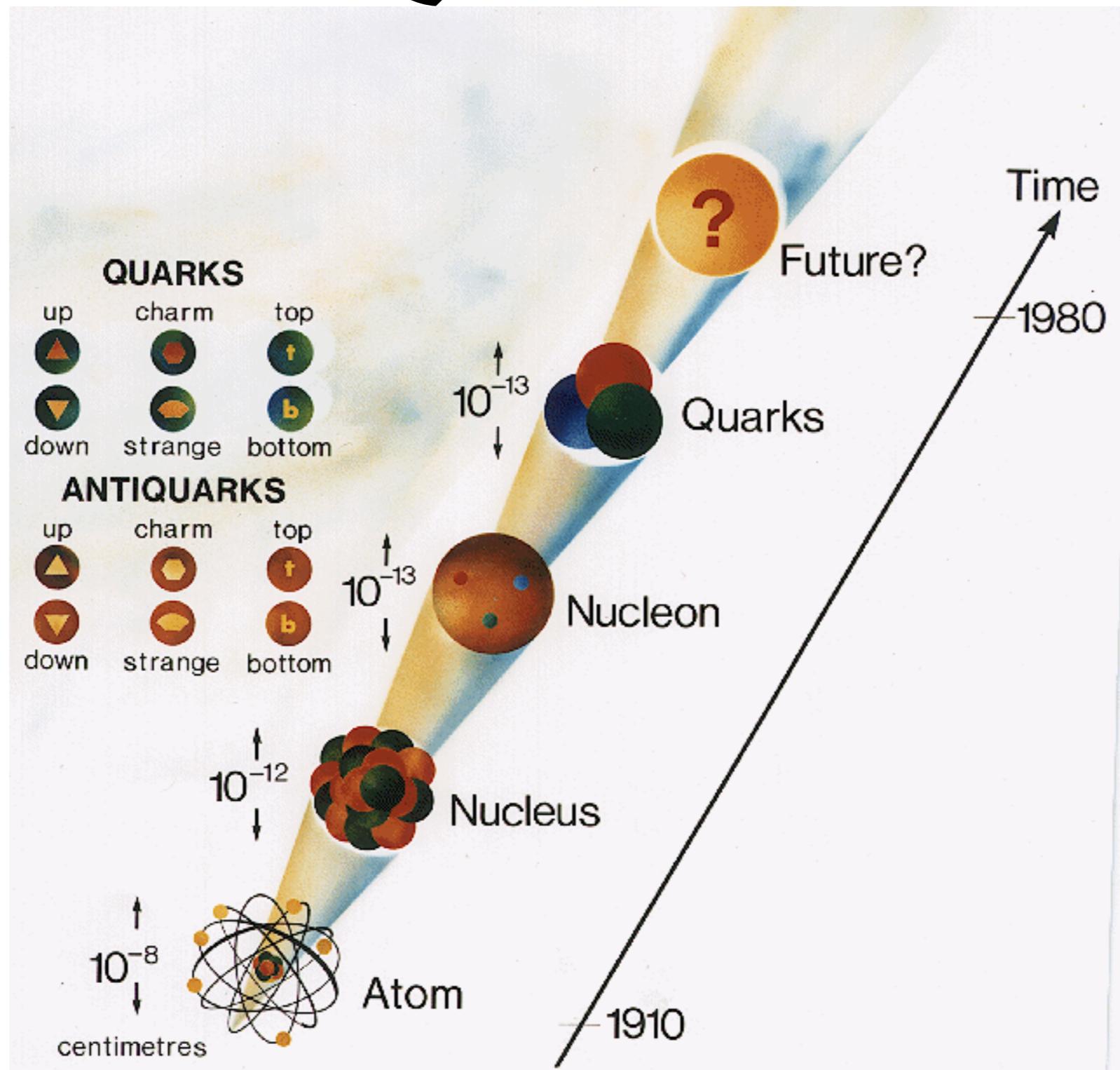
Mesons are bosonic hadrons.
There are about 140 types of mesons.

Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c ²	Spin
π^+	pion	$u\bar{d}$	+1	0.140	0
K^-	kaon	$s\bar{u}$	-1	0.494	0
ρ^+	rho	$u\bar{d}$	+1	0.770	1
B^0	B-zero	$d\bar{b}$	0	5.279	0
η_c	eta-c	$c\bar{c}$	0	2.980	0

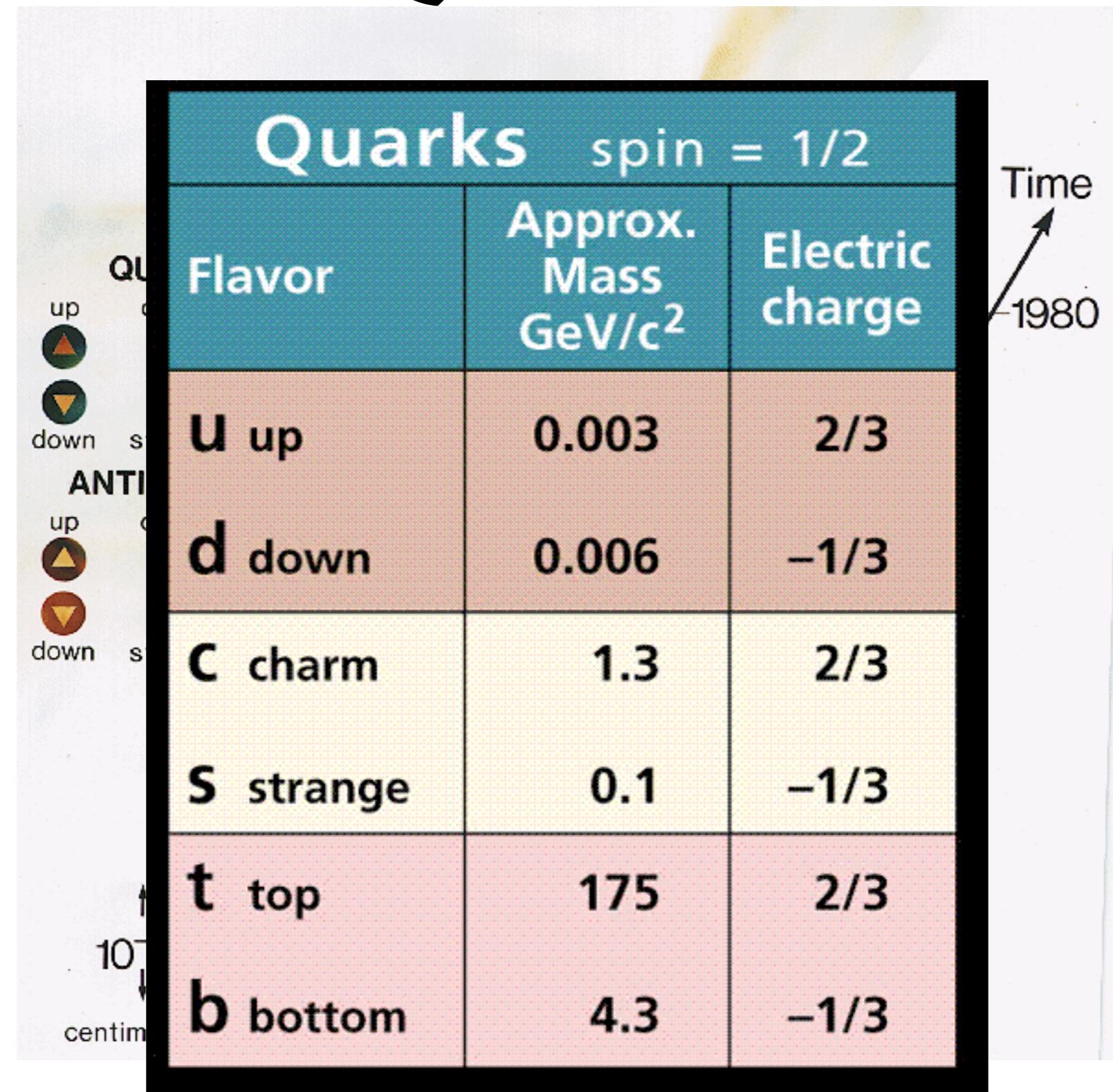
Bárions

Baryons qqq and Antibaryons $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$					
Baryons are fermionic hadrons. There are about 120 types of baryons.					
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c^2	Spin
p	proton	uud	1	0.938	1/2
\bar{p}	anti-proton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	-1	0.938	1/2
n	neutron	udd	0	0.940	1/2
Λ	lambda	uds	0	1.116	1/2
Ω^-	omega	sss	-1	1.672	3/2

Quarks



Quarks



Quarks spin = 1/2		
Flavor	Approx. Mass GeV/c ²	Electric charge
u up	0.003	2/3
d down	0.006	-1/3
c charm	1.3	2/3
s strange	0.1	-1/3
t top	175	2/3
b bottom	4.3	-1/3

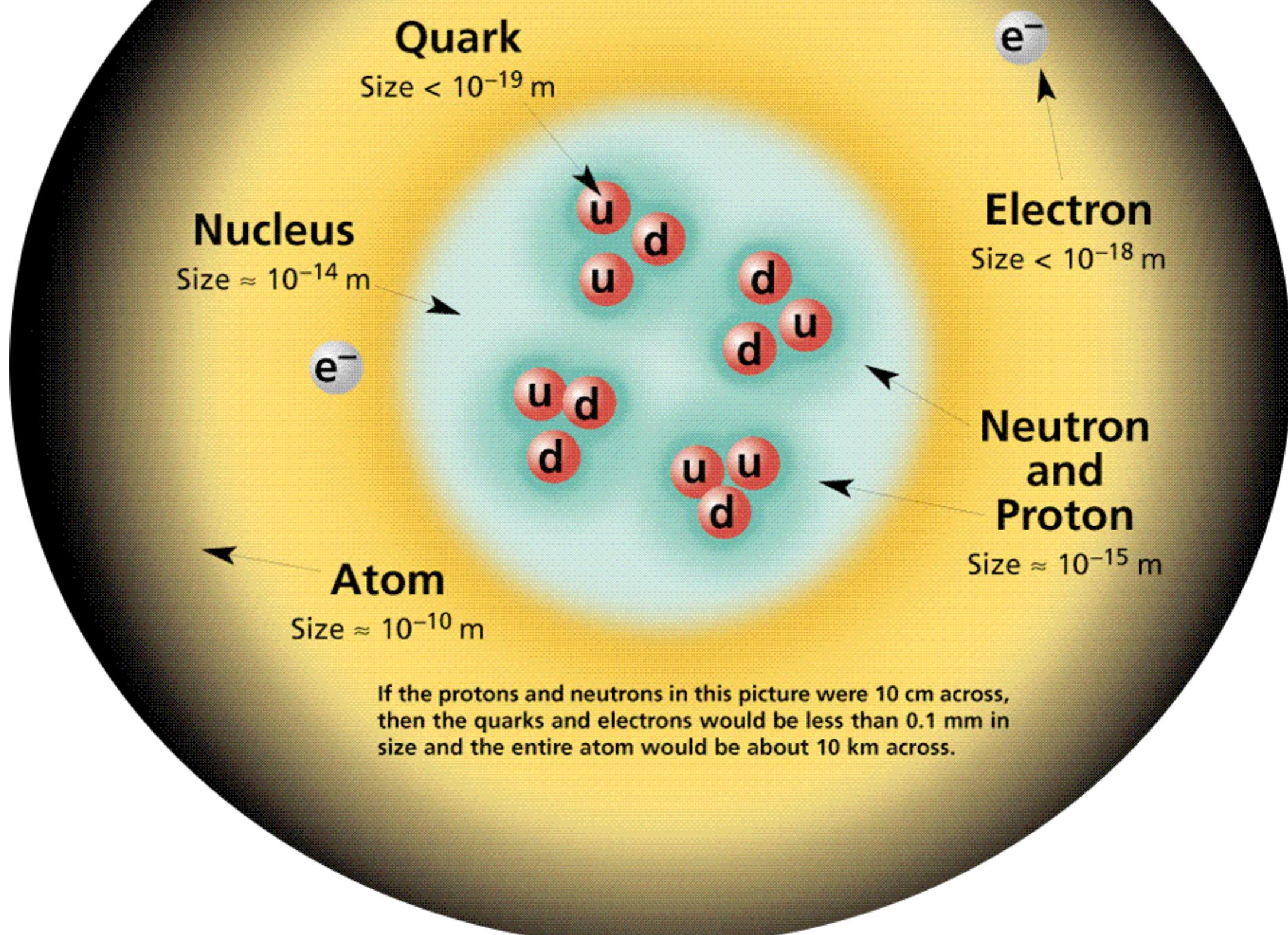
Time
1980

Bósons

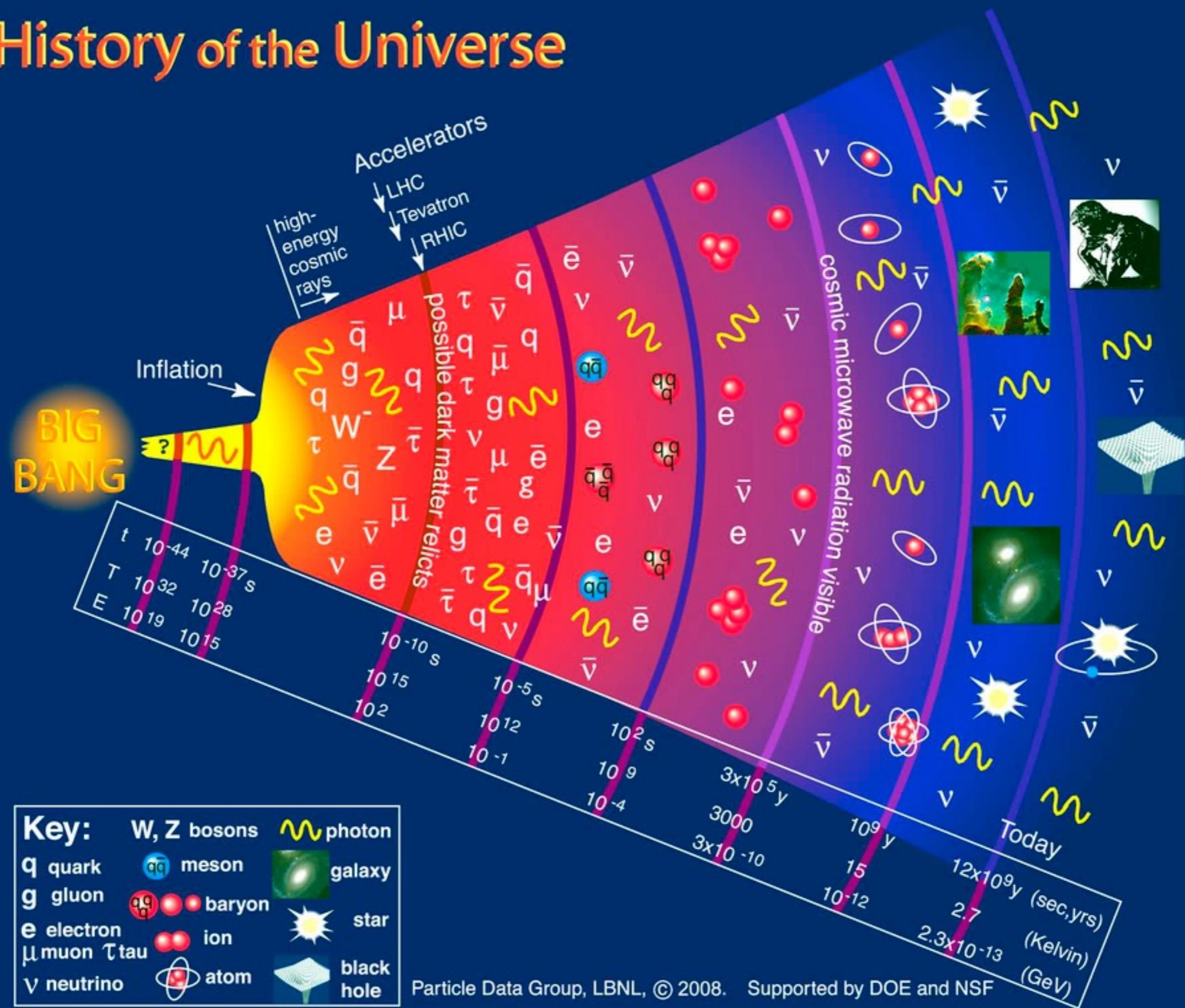
Unified Electroweak spin = 1		
Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
γ photon	0	0
W^-	80.4	-1
W^+	80.4	+1
Z^0	91.187	0

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

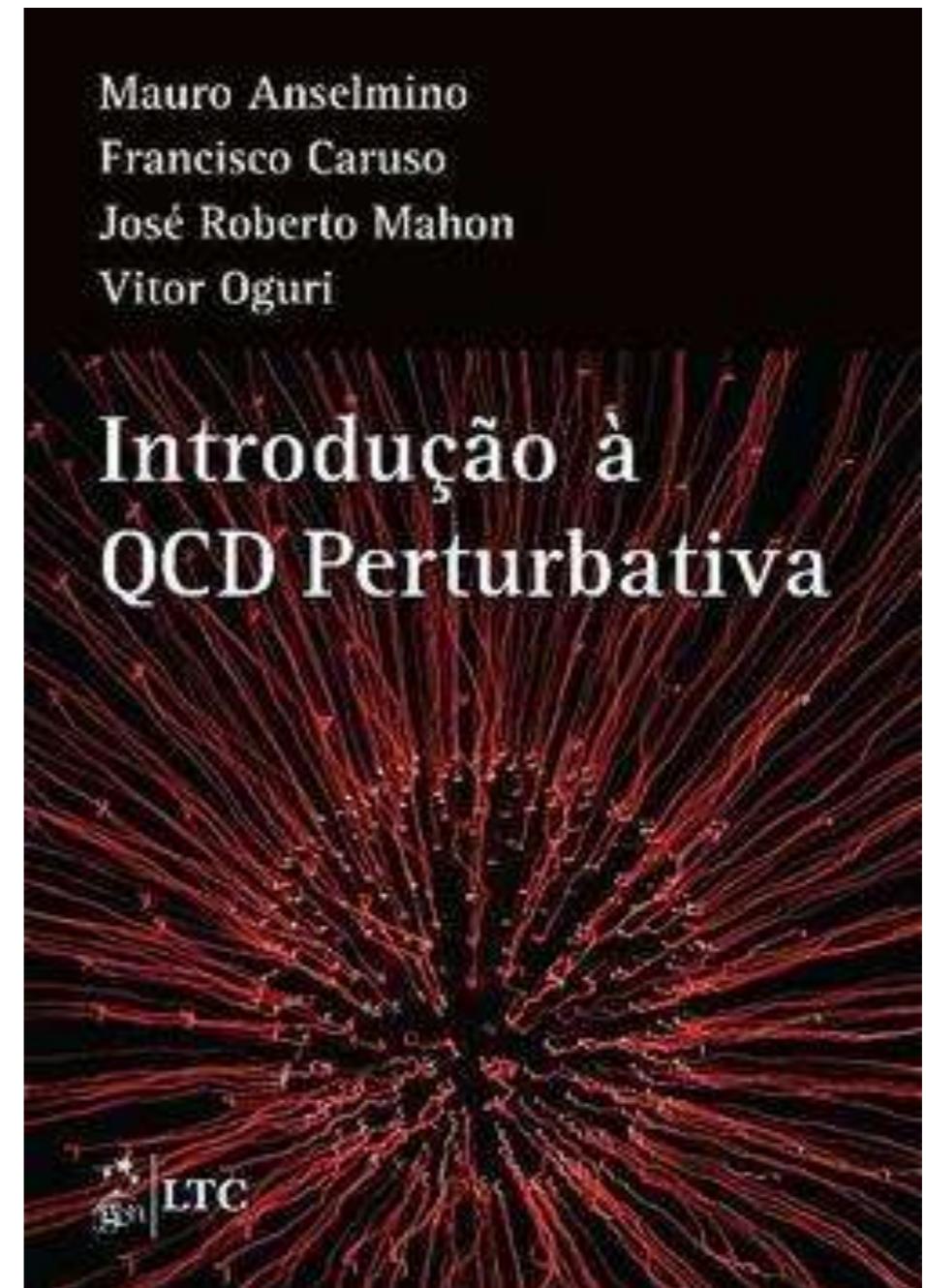
Structure within the Atom



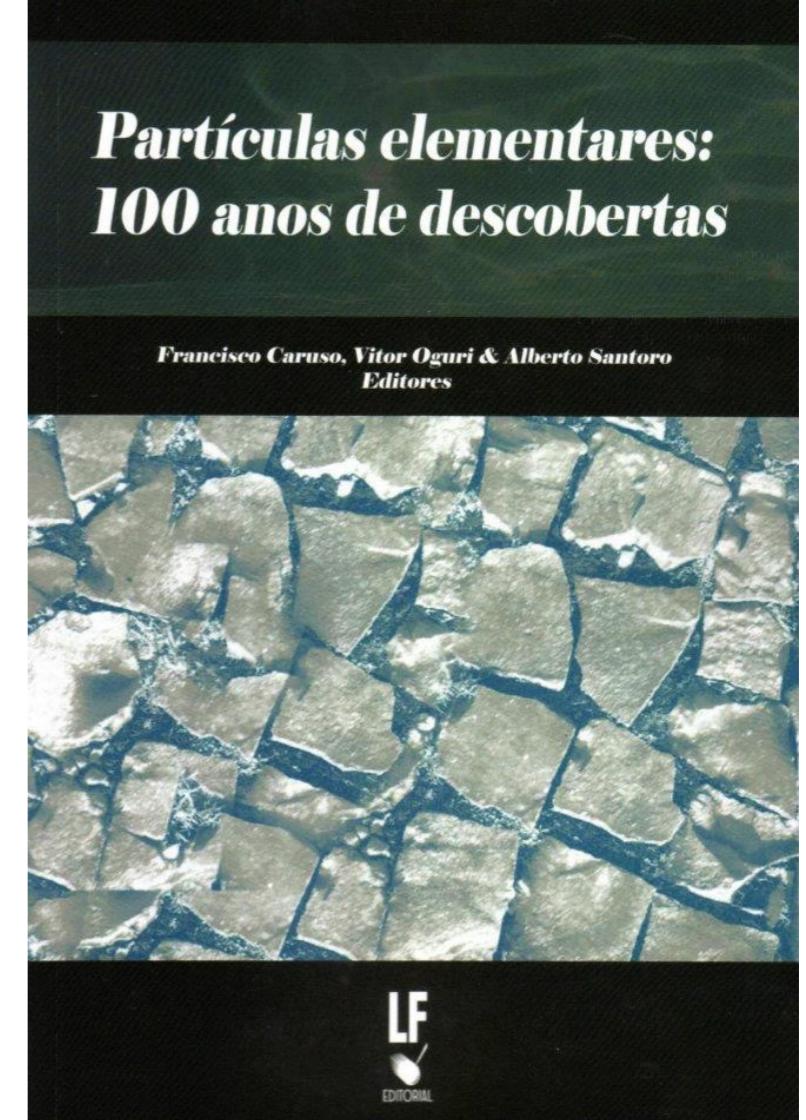
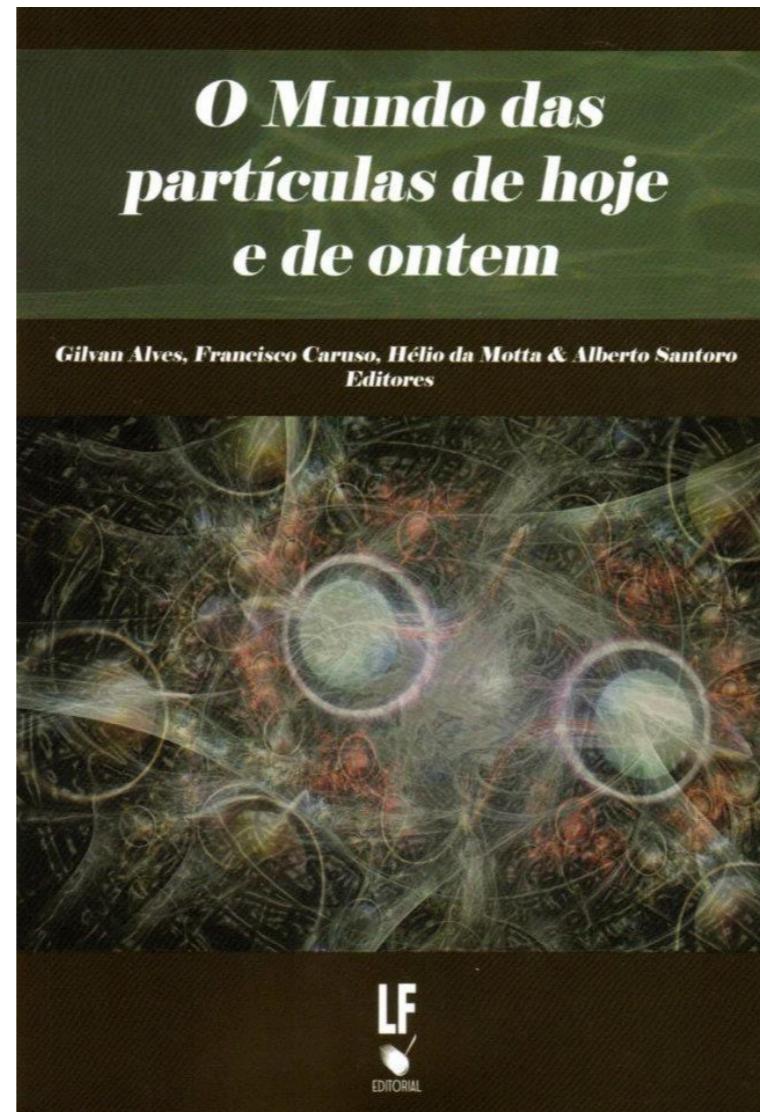
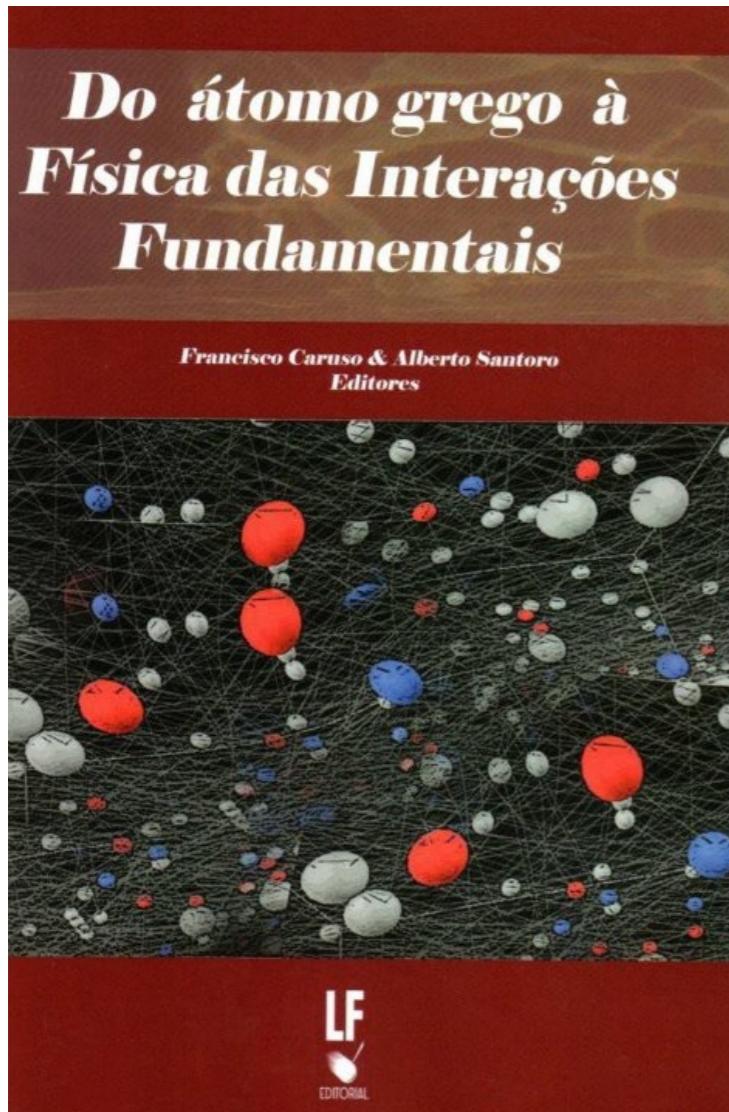
History of the Universe



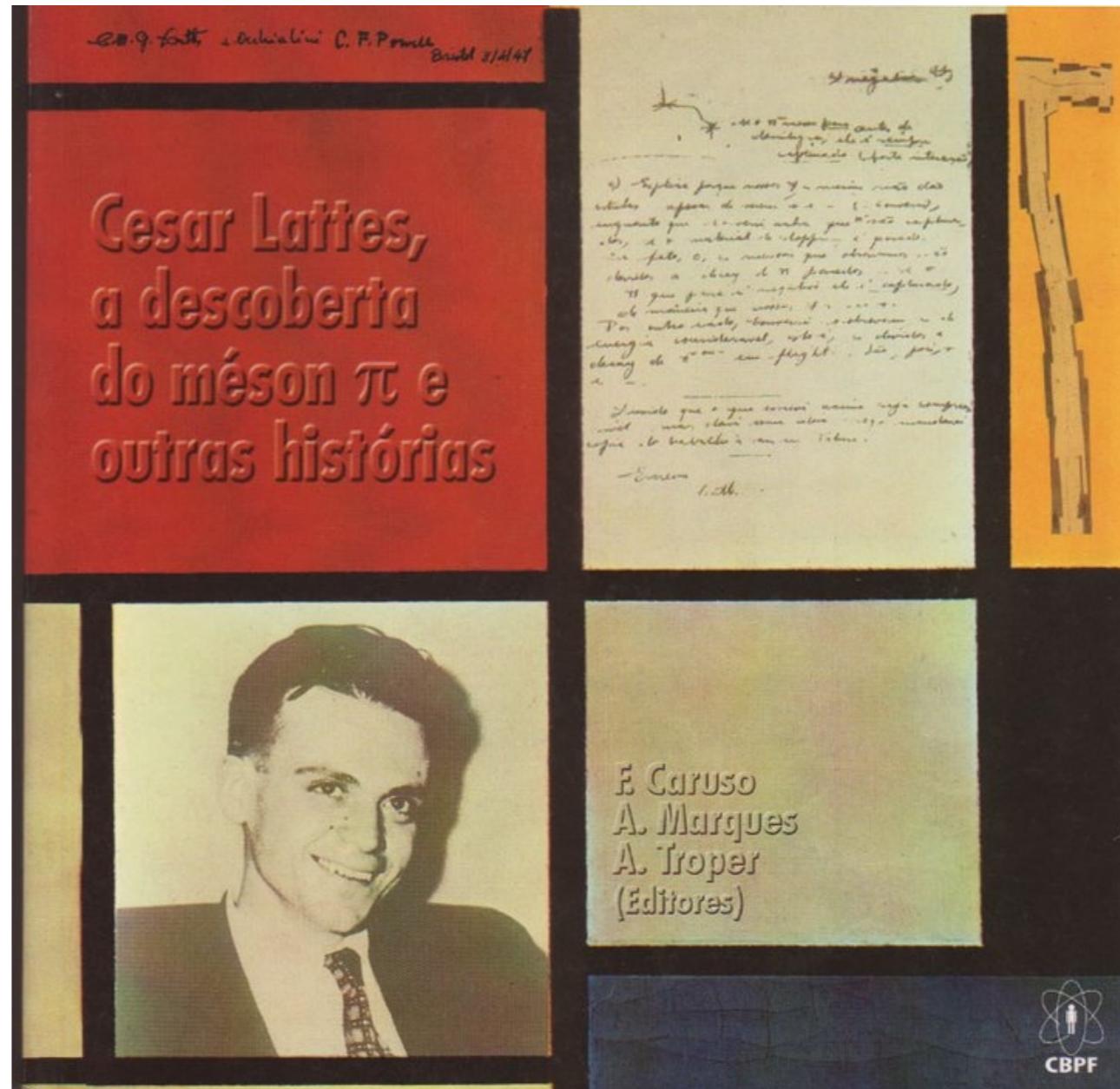
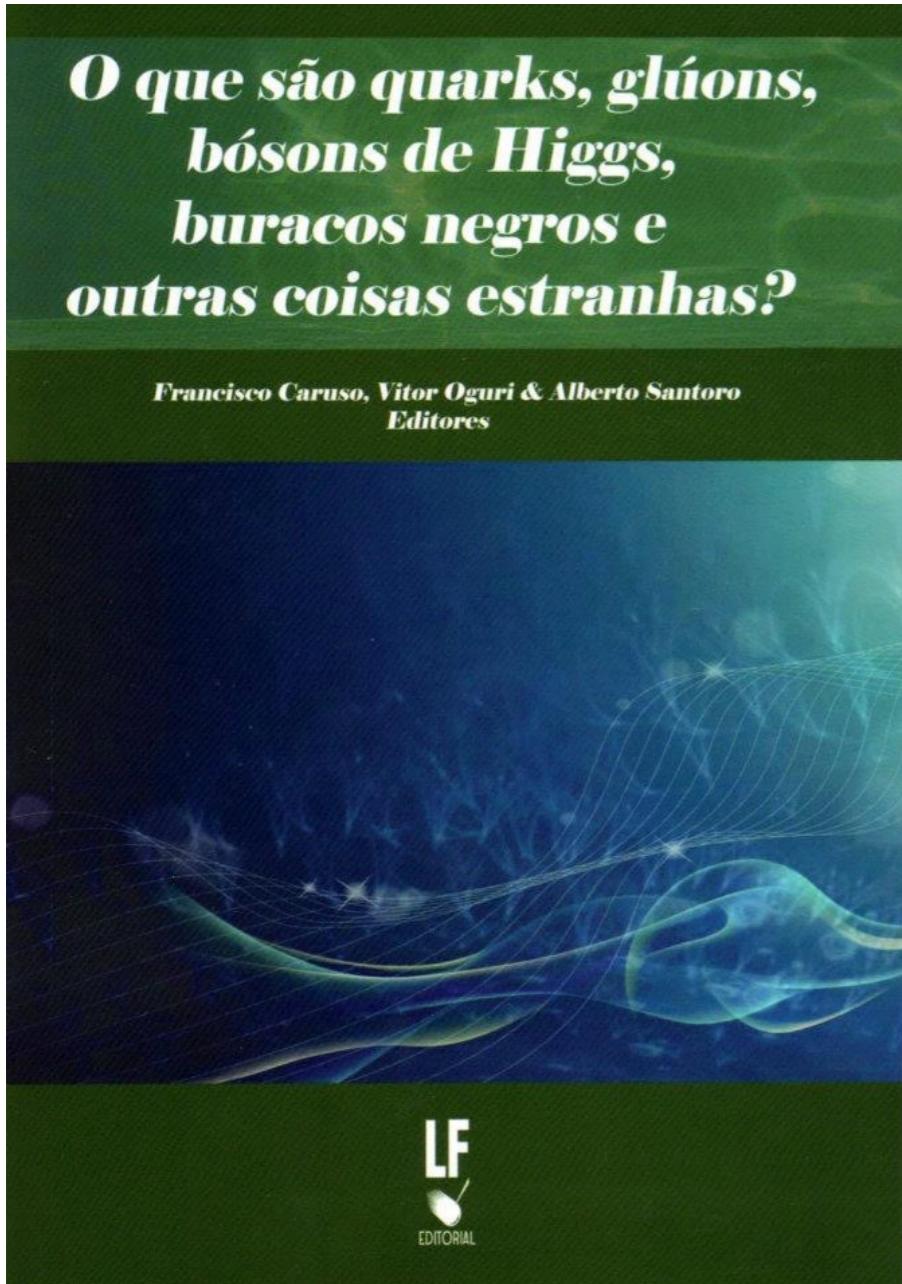
Referências



Referências

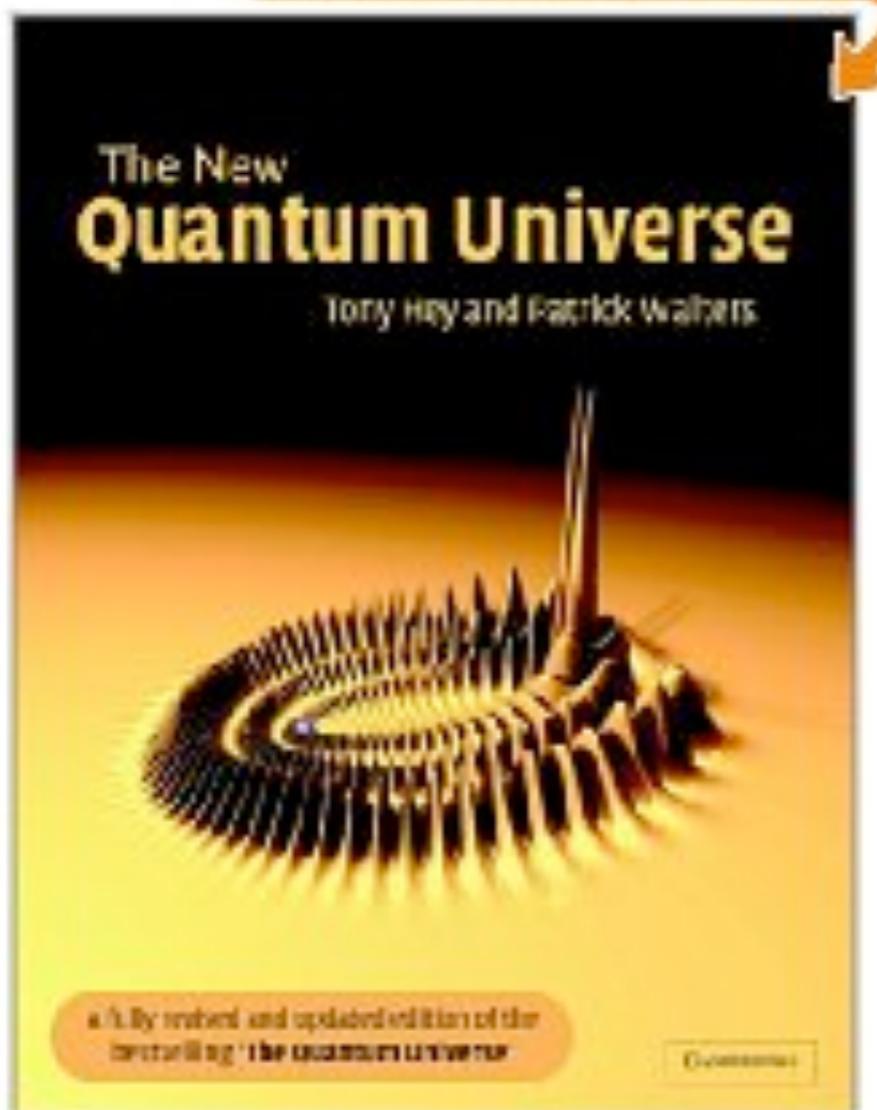


Referências

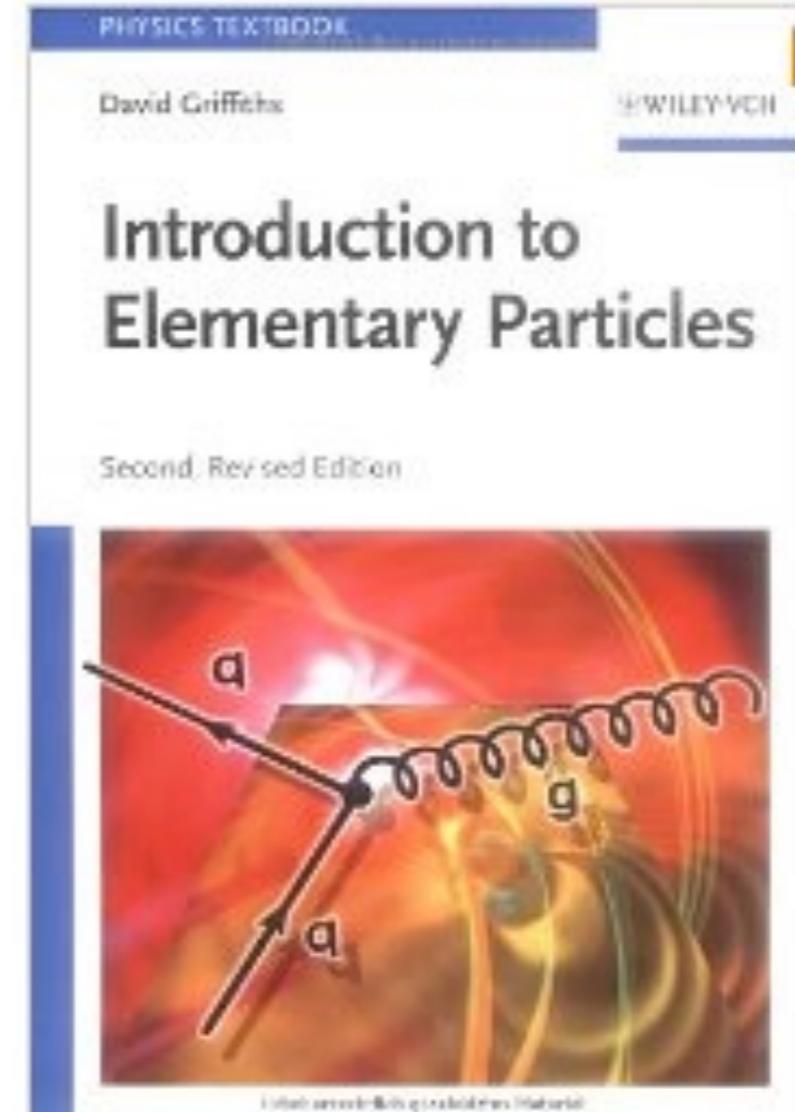


Leitura Complementar

[Click to LOOK INSIDE!](#)



[Click to LOOK INSIDE!](#)



Divulgação

Tirinhas de Física

© Luisa Daou & Francisco Caruso

Autores Tirinhas Apresentações Prêmio

Programas de TV

+ humor na ciência

Artigos em Jornais Comentários Registros *by Erick Hoepfner*

Para ver mais tirinhas de física e de outras áreas, visite o site www.cbpf.br/eduhs

<http://www.cbpf.br/~caruso/tirinhas/index.htm>



Obrigado



sandro.fonseca@cern.ch

Backup Slides

Atomistas Gregos

Unicistas

Tales de Mileto - 625 -546 AC.:

"Todas as coisas do universo são feitas de **água**"

Anaximenes de Mileto - 550 - 480 AC.:

"Todas as coisas do universo são feitas de **ar**"

Heraclito - 540 - 480 AC.:

"Todas as coisas do universo são feitas de **fogo**"

Pluralistas

Empedocles - 493 e 433 AC

"Tudo é feito de quatro elementos fundamentais:

a terra, o ar, o fogo e a água"

Para construir o universo propõe duas forças atuando sobre os elementos: o **amor** e o **ódio** ou a **afinidade** e a **antipatia**

fonte: Curso de Física de Partículas (Alberto Santoro, UERJ, 2004)

Demócrito 460 - 370 AC: aluno de Leucippus

Fundador do Atomismo:

“Todas as coisas seriam feitas de átomos”

Aristoteles - 384 -322 a.c.

"Todos os corpos se compõem de uma mesma substância que tem várias propriedades: o **frio**, o **calor**, a **humidade**, a **esterilidade**".

Exemplos de Combinações Aristotélicas:

a substância **seca e fria** produziria a **terra**

a substância **seca e quente** produziria o **fogo**

a substância **humida e fria** produziria a **água**

a substância **humida e quente** produziria o **ar**.

Pulando alguns séculos,

Físicos por volta de 1935:

"Tudo é feito de Prótons, Electrons, Neutrons e Vacuo"

Poucos decênios depois: Modelo Padrão

"Todas as coisas são feitas de Quarks, Leptons e Vácuo"

Tudo é construído com 4 interações fundamentais:

Gravitacional, Fraca, Eletromagnética e Forte.

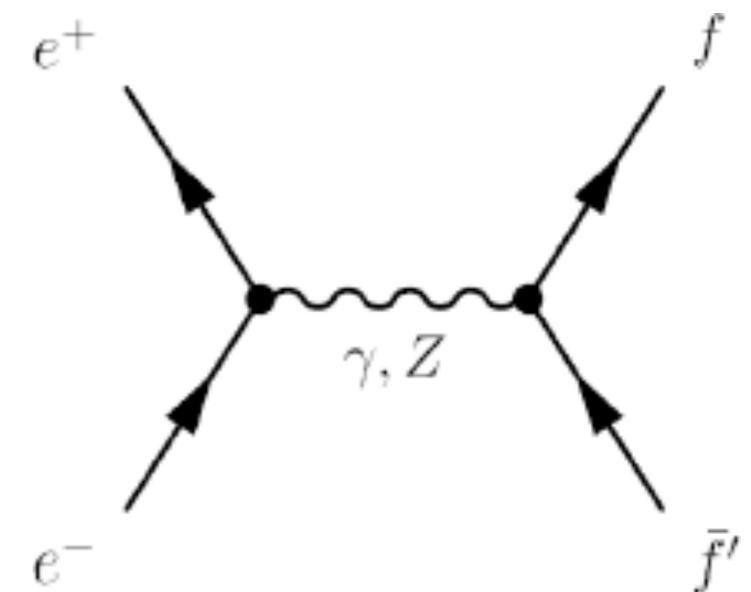
Quem intermedia as interações são bosons : G, W , Z, γ e g

fonte: Curso de Física de Partículas (Alberto Santoro,UERJ, 2004)

Produção de Hádrons em Colisores Elétron-Pósitron

Produção de Hádrons em Colisores Elétron-Pósitron

O diagrama representa o processo de aniquilação elétron-pósitron em um par férmion-antiférmion.



$$\sigma = \frac{\pi}{3} \left(\frac{Q\alpha}{E} \right)^2 \sqrt{\frac{1 - (M/E)^2}{1 - (m/E)^2}} \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{M}{E} \right)^2 \right] \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{m}{E} \right)^2 \right]$$

onde m é a massa do elétron, M a massa do férmion e E a energia de CM da colisão. A produção do par de férmions requer que $E > 2M$.

Produção de Hádrons em Colisores Elétron-Pósitron

Para valores de energia suficientemente distantes do limiar a expressão da se  o de choque torna-se bem simples, independente do tipo do férmion e dependendo da sua carga,

$$\sigma = \frac{\pi}{3} \left(\frac{Q\alpha}{E} \right)^2$$

A produ  o de hádrons    estudaada atrás da razão:

$$R = \frac{\sigma(e^+ + e^- \rightarrow \text{hadrons})}{\sigma(e^+ + e^- \rightarrow \mu^+ + \mu^-)}$$

O numerador da razão R cont  m a contribui  o de todos os tipos de quarks com limiar inferior a E, nos três estados de cor,

$$R(E) = 3 \sum Q_i^2$$

Produção de Hádrons em Colisores Elétron-Pósitron

A baixas energias (abaixo do limiar de produ  o do charme) somente os quarks leves (u,d e s) contribuem para a se  o de choque:

$$R(E) = 3 \left[\left(\frac{2}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 \right] = 2$$

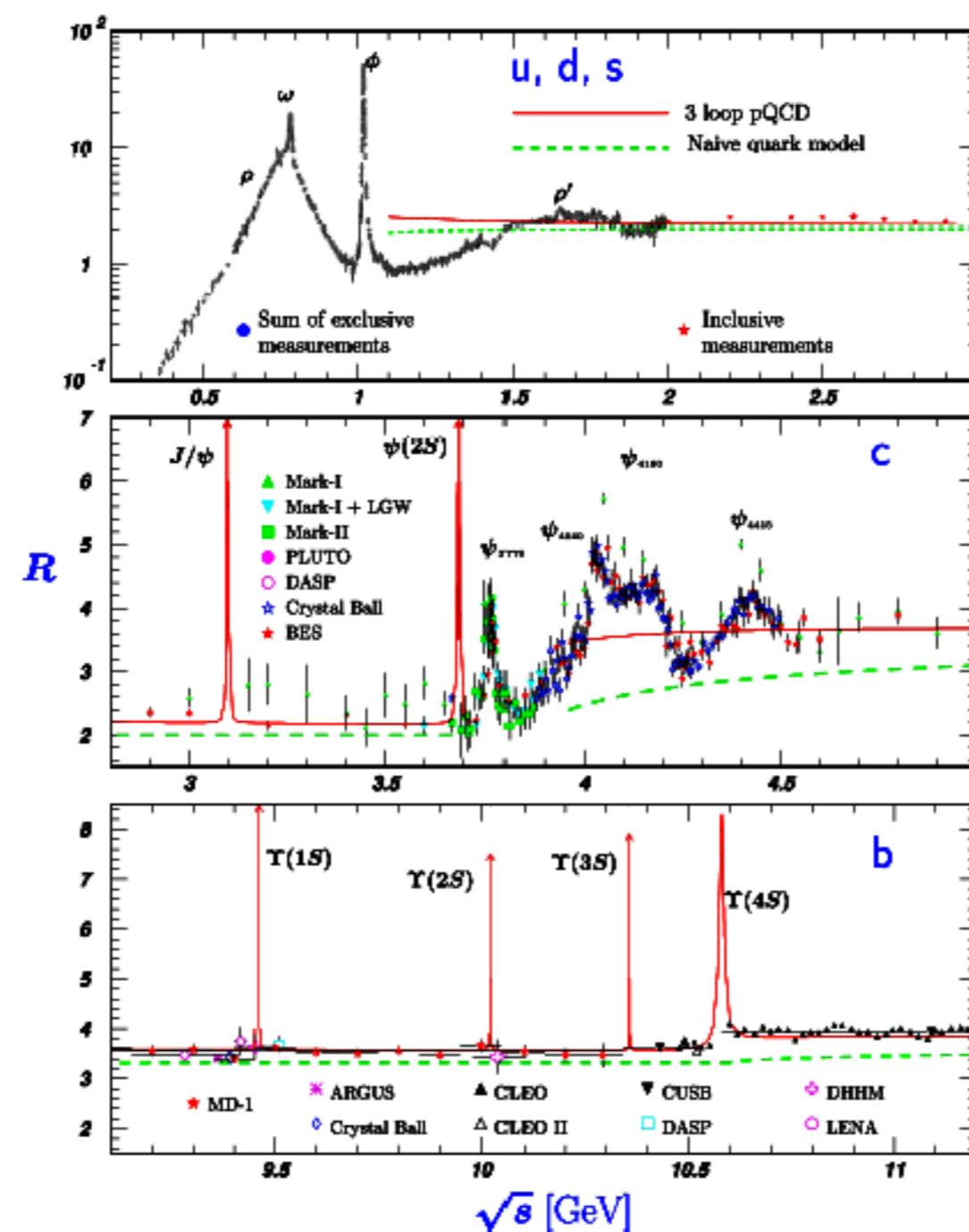
Em energias intermediárias, $2M_{charme} < E < 2M_{bottom}$, temos:

$$R(E) = 3 \left[\left(\frac{2}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 + \left(\frac{2}{3}\right)^2 \right] = 3,33$$

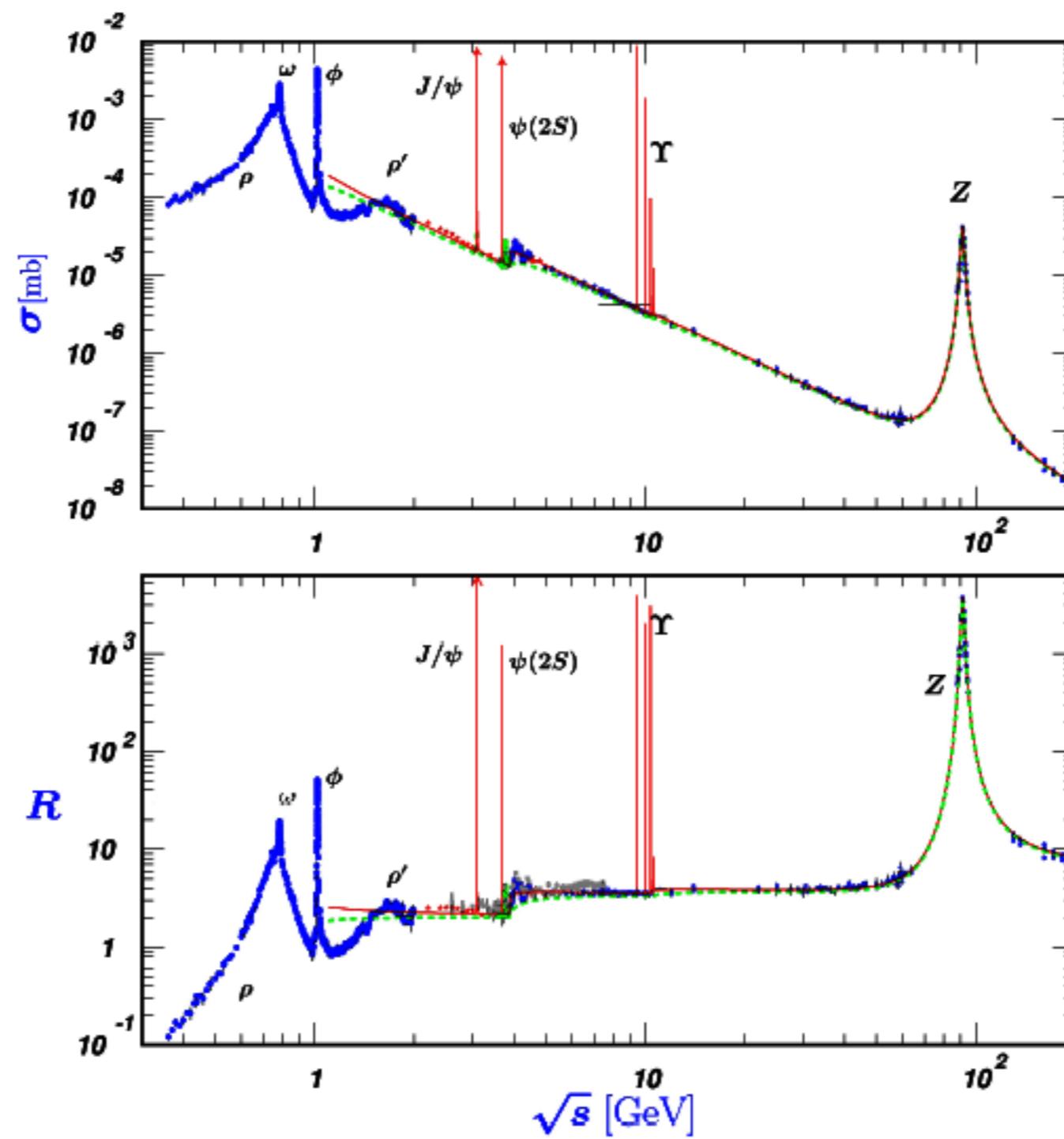
Um leve acr  simo ocorre acima do limiar de produ  o de bottom:

$$R(E) = 3,33 + 3 \left(\frac{1}{3}\right)^2 = 3,67$$

Produção de Hádrons em Colisores Elétron-Pósitron



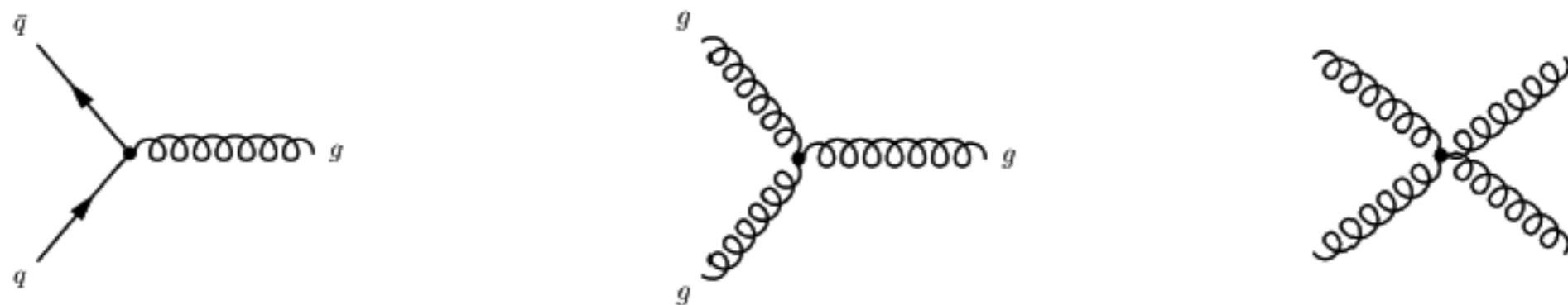
Produção de Hádrons em Colisores Elétron-Pósitron



Definição dos Glúons

Os glúons são os mediadores da interação entre os quarks. Assim como os fótons, são partículas com massa de repouso nula. Há, no entanto, uma diferença crucial: assim como os quarks, os glúons são portadores de carga de cor, o que possibilita o acoplamento direto gg e, consequentemente, a existência de estados ligados de glúons, os *glueballs*, que são hadrons sem quarks de valência.

A existência de acoplamento glúon-glúon torna a QCD uma teoria muito mais complexa que a QED.



Descoberta dos Glúons

A primeira evidência da existência dos glúons foi a observação de eventos com três jatos hadrônicos em colisões e^+e^- da Colaboração TASSO, no laboratório alemão DESY.

