



# O Modelo Padrão das partículas elementares

Alberto Reis

[alberto.correa.reis.dos.reis@cern.ch](mailto:alberto.correa.reis.dos.reis@cern.ch)





## A conferência Solvay de 1927

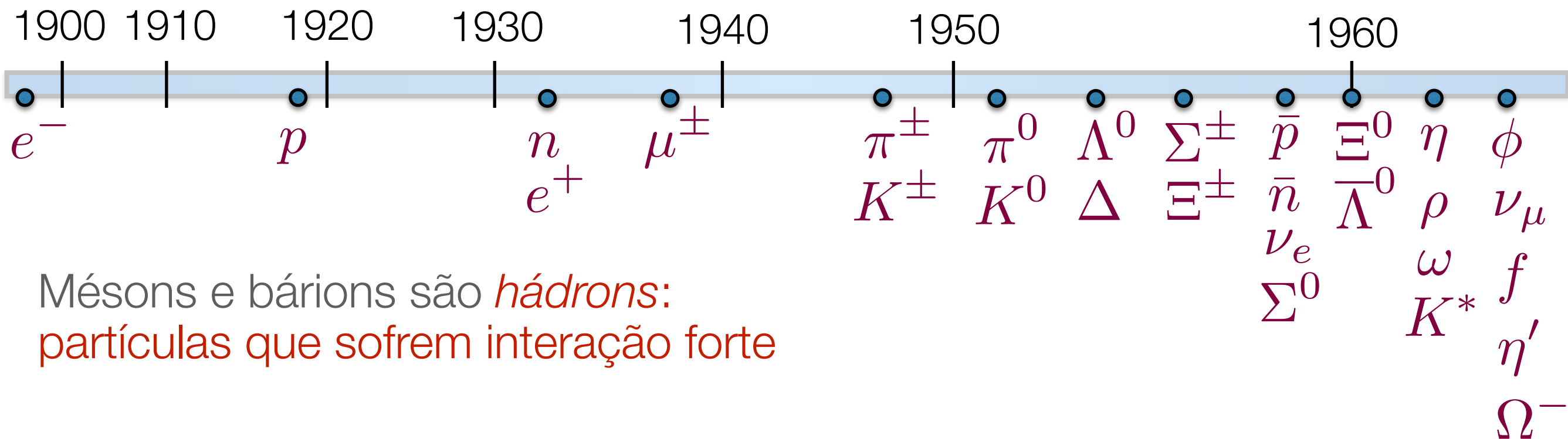


<https://marinamaral.com/portfolio/solvay-conference/>



# O modelo a quarks

Início dos anos 1960: mais de cem partículas "elementares", classificadas em mésons e bárions.



Mésons e bárions são *hádrons*:  
partículas que sofrem interação forte

Um número tão grande de partículas sugeria  
a existência de estruturas mais fundamentais.

1964: Murray Gell-Mann e George Zweig propuseram um esquema para  
classificação dos hádrons baseado na ideia de *quarks*,  
estranhos férmions (partículas com *spin* semi inteiro) com carga fracionária.



Mésons são estados ligados de um quark e um antiquark, agrupados de acordo com alguns números quânticos: *spin, paridade, conjugação de carga e número quântico de "sabor"*.

SU(3): mésons são combinações de três tipos de quarks e antiquarks:

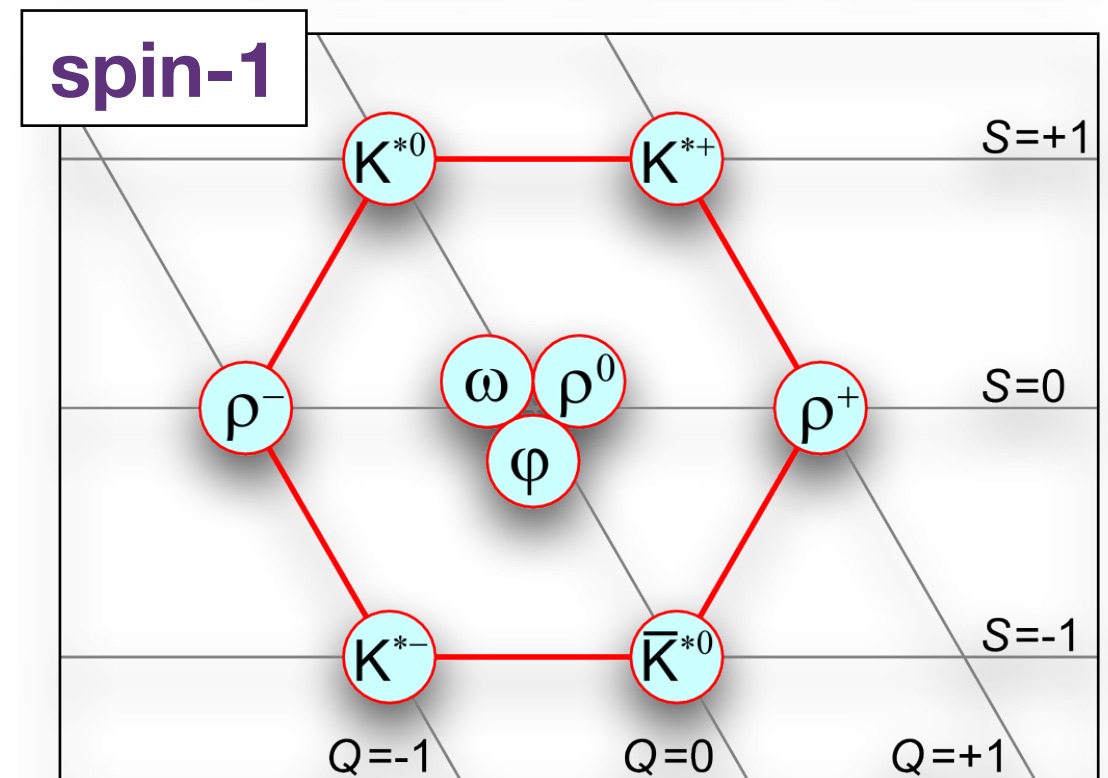
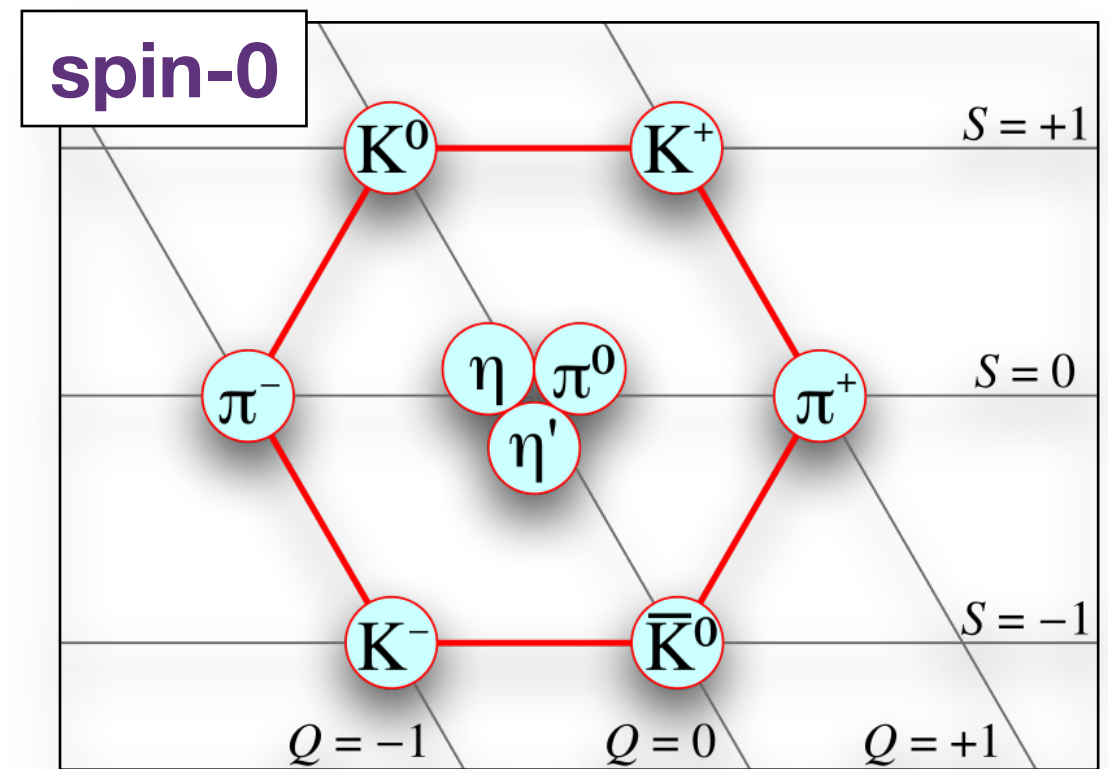
$$u, d, s \quad \bar{u}, \bar{d}, \bar{s}$$

Quarks têm spin 1/2 e cargas fracionárias:

$$u \rightarrow +\frac{2}{3}e \quad d, s \rightarrow -\frac{1}{3}e$$

$\pi^\pm, K^\pm, K^0$  → decaem por interação fraca, vida média longa.

$\pi^0, \eta, \eta'$  → decaem por interação EM, vida média curta.



Ressonâncias: decaem por interação forte, vida média inobservável.

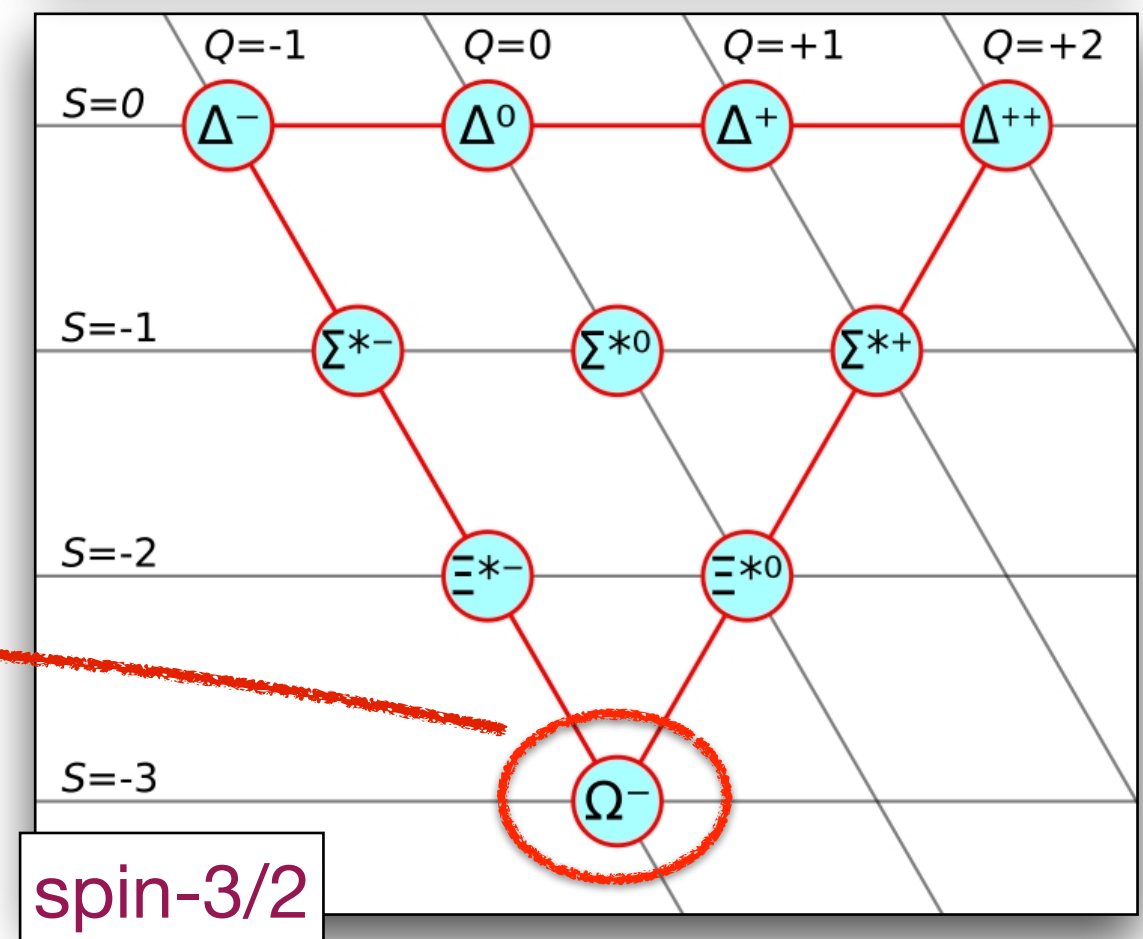
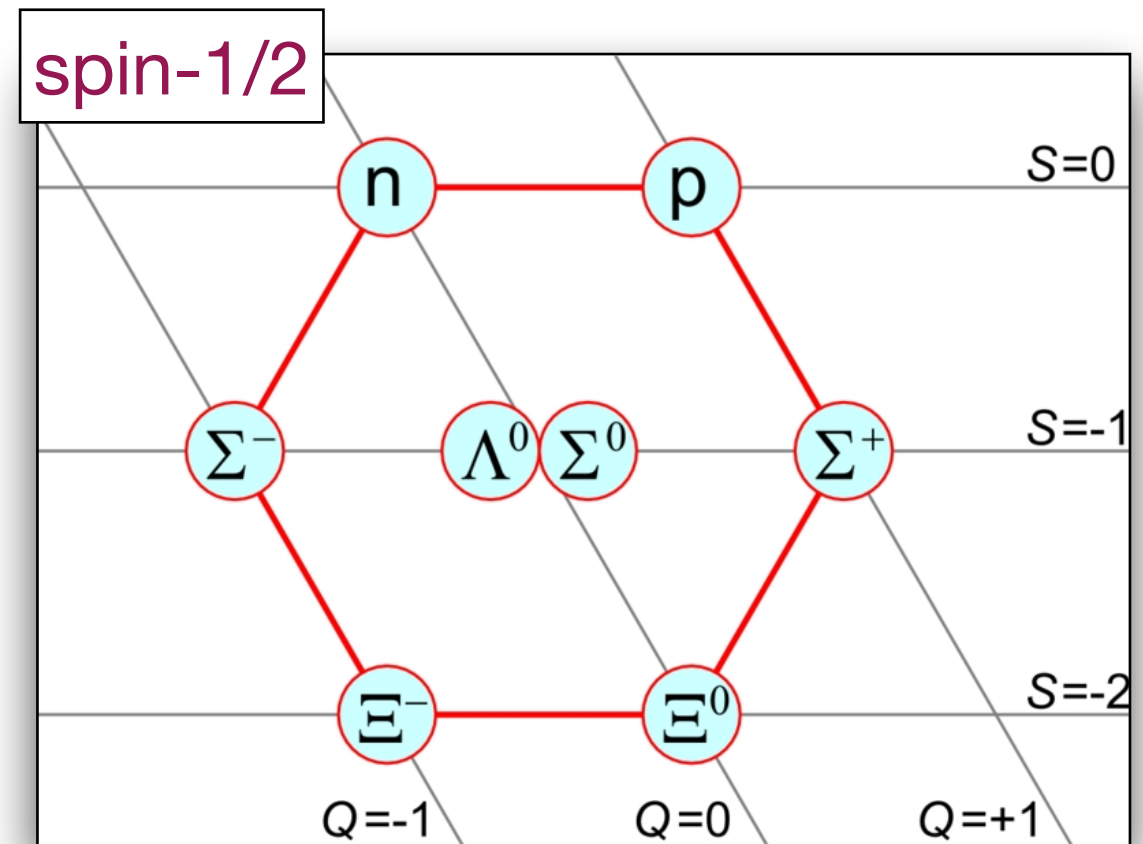


## Bárions: estados ligados de três quarks.

Um problema: o bárion  $\Delta^{++}$ , de spin  $3/2$  ( $u\uparrow u\uparrow u\uparrow$ ), violaria o princípio de exclusão de Pauli.

M. Han e Y. Nambu postularam a existência de uma *carga de "cor"* como a fonte da força forte. Cada quark poderia ter três cores distintas.

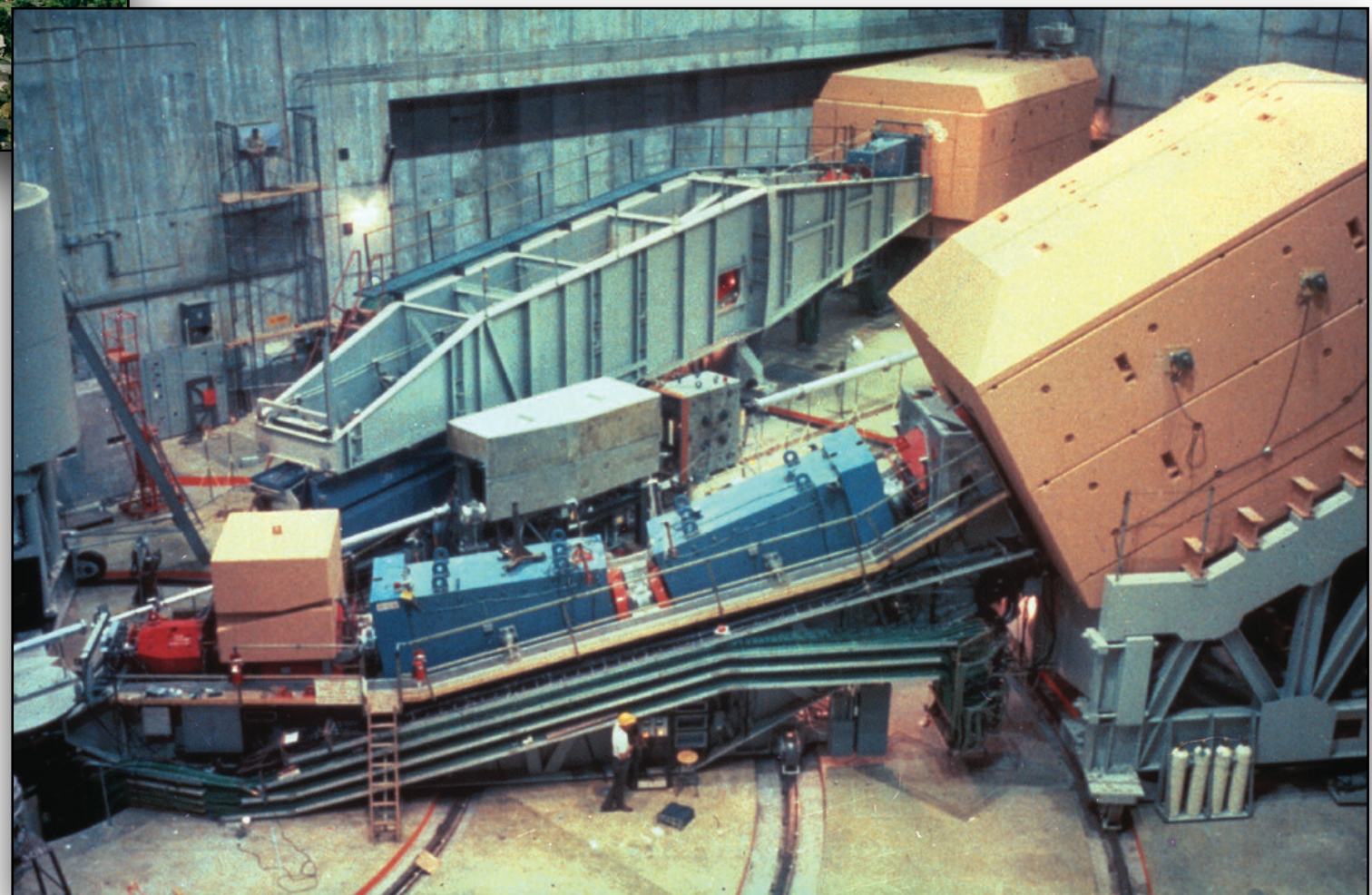
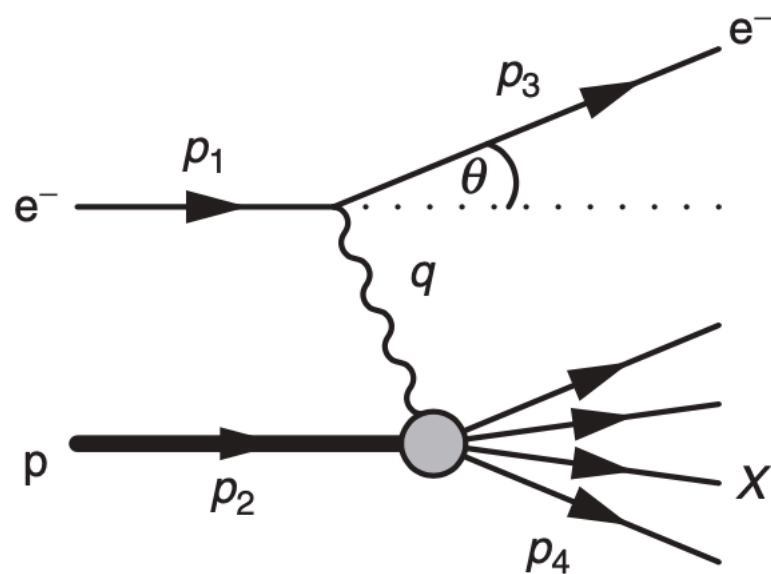
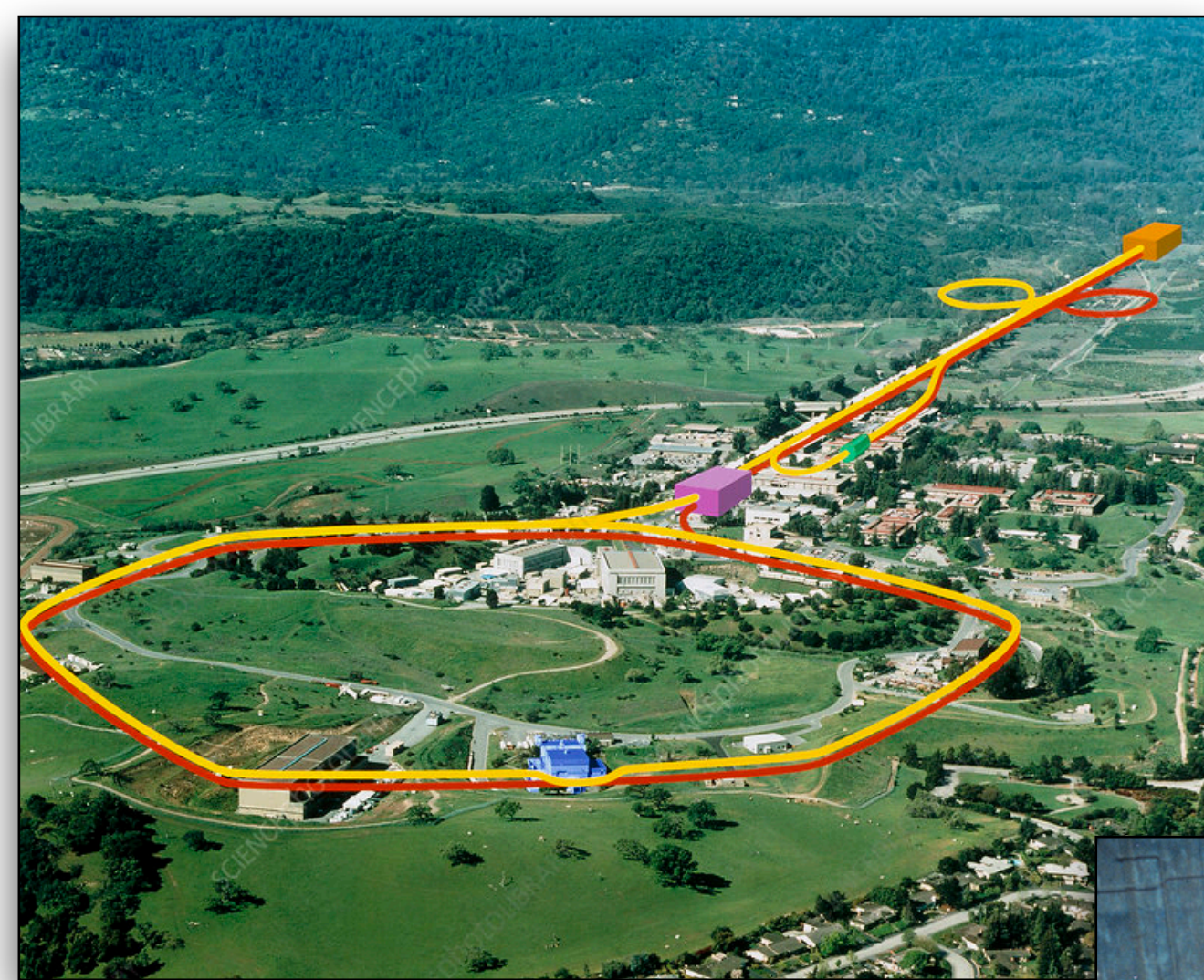
Um triunfo: o bárion  $\Omega^-$  foi previsto um ano antes de ser observado.





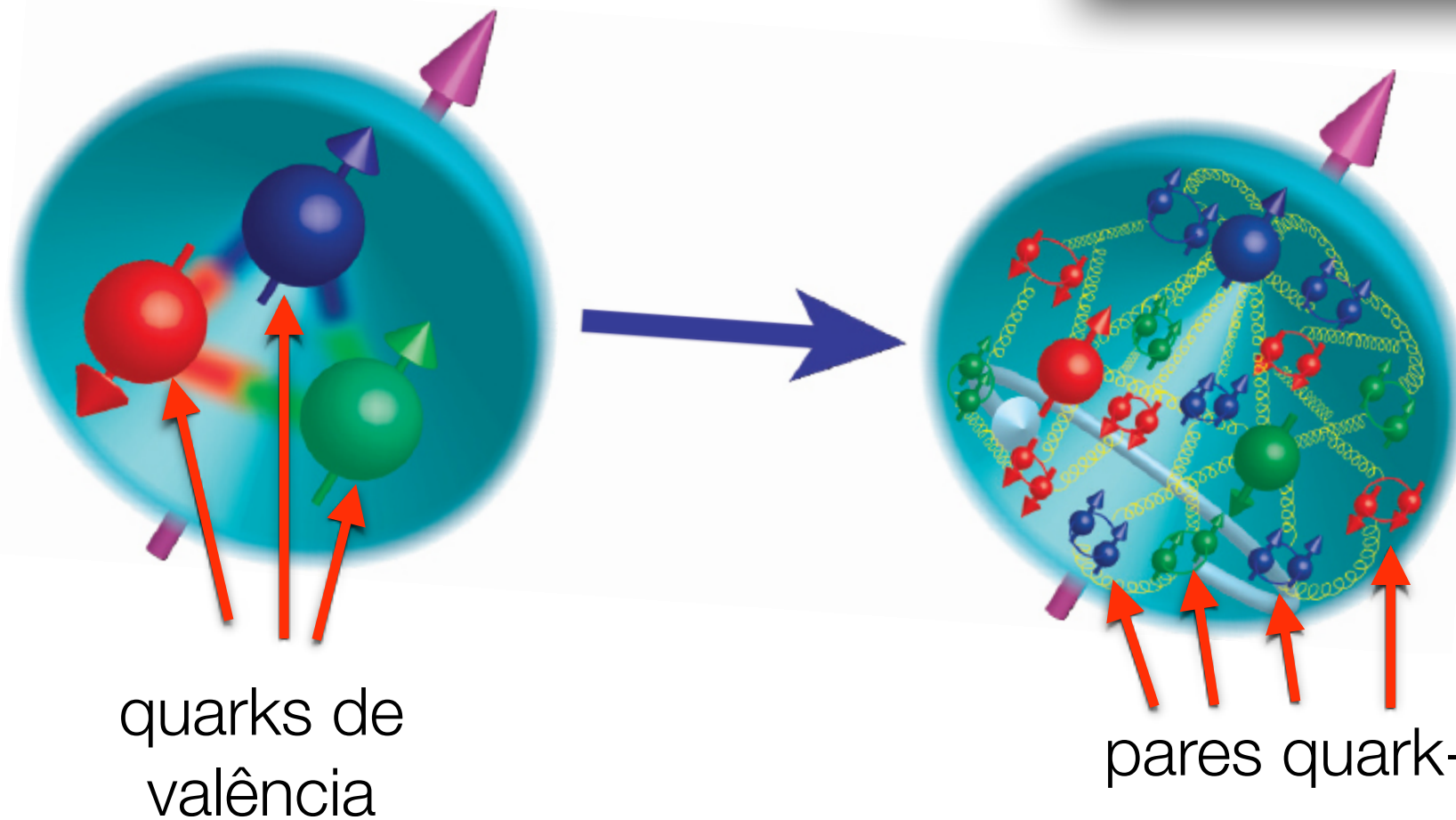
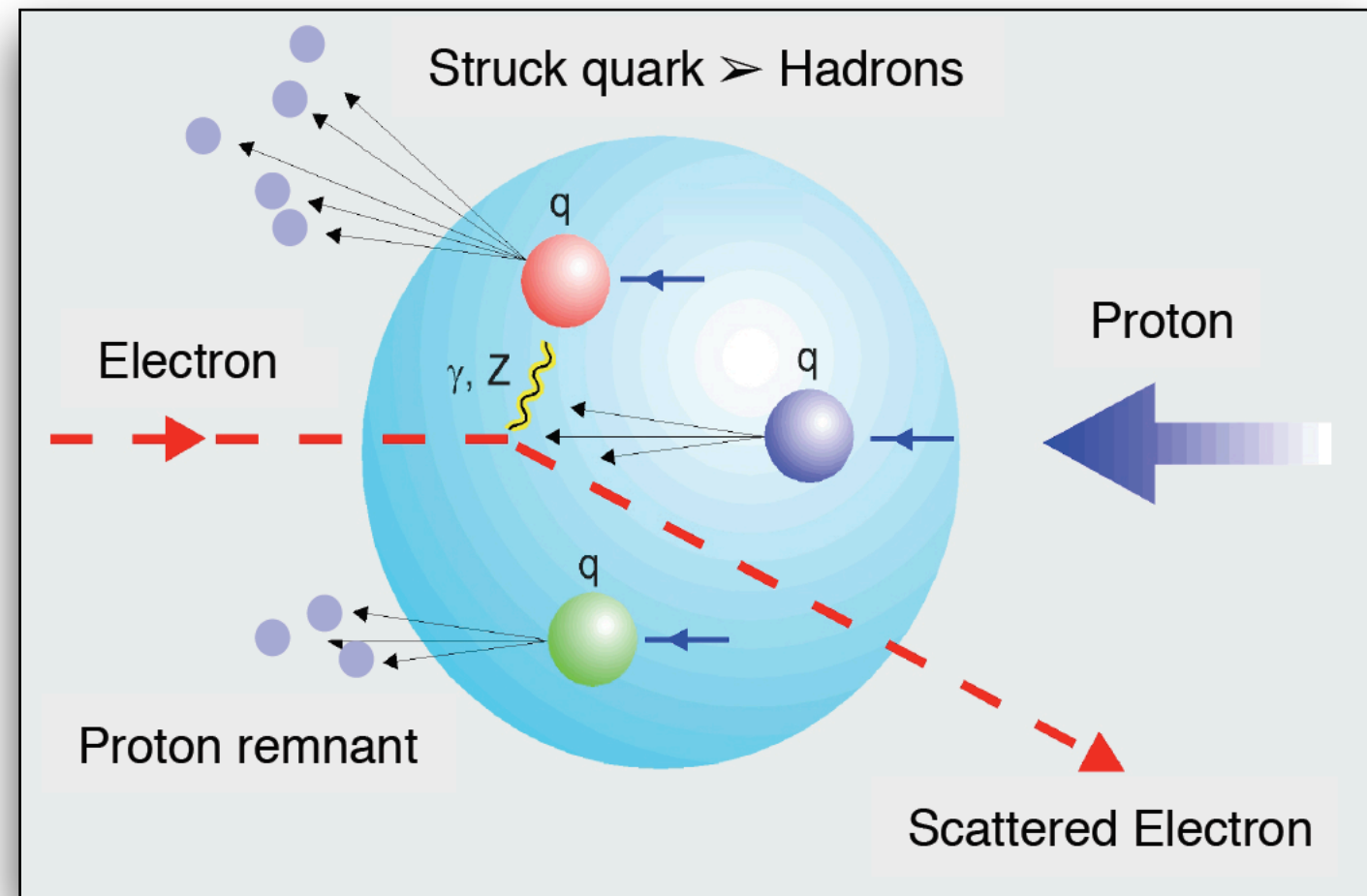
Em 1968, no SLAC (EUA), surgiram as primeiras evidências diretas da existência dos quarks.

Uma versão moderna do experimento de Rutherford: elétrons incidindo sobre prótons em vez de  $\alpha$  em ouro.





Elétrons com alta energia:  
pontas de prova com  
resolução para revelar a  
estrutura interna do próton.



A estrutura interna do  
próton, como a de  
outros hádrons, é  
bastante complexa.

# Standard Model of Elementary Particles

three generations of matter (fermions)      interactions / force carriers (bosons)

	I	II	III		
mass	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>g</b> gluon	<b>H</b> higgs
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>γ</b> photon	
	<b>e</b> electron	<b>μ</b> muon	<b>τ</b> tau	<b>Z</b> Z boson	
	<b>ν<sub>e</sub></b> electron neutrino	<b>ν<sub>μ</sub></b> muon neutrino	<b>ν<sub>τ</sub></b> tau neutrino	<b>W</b> W boson	

QUARKS

LEPTONS

GAUGE BOSONS  
VECTOR BOSONS

SCALAR BOSONS

quarks tipo "up"  
carga =  $+2/3 e$

quarks tipo "down"  
carga =  $-1/3 e$

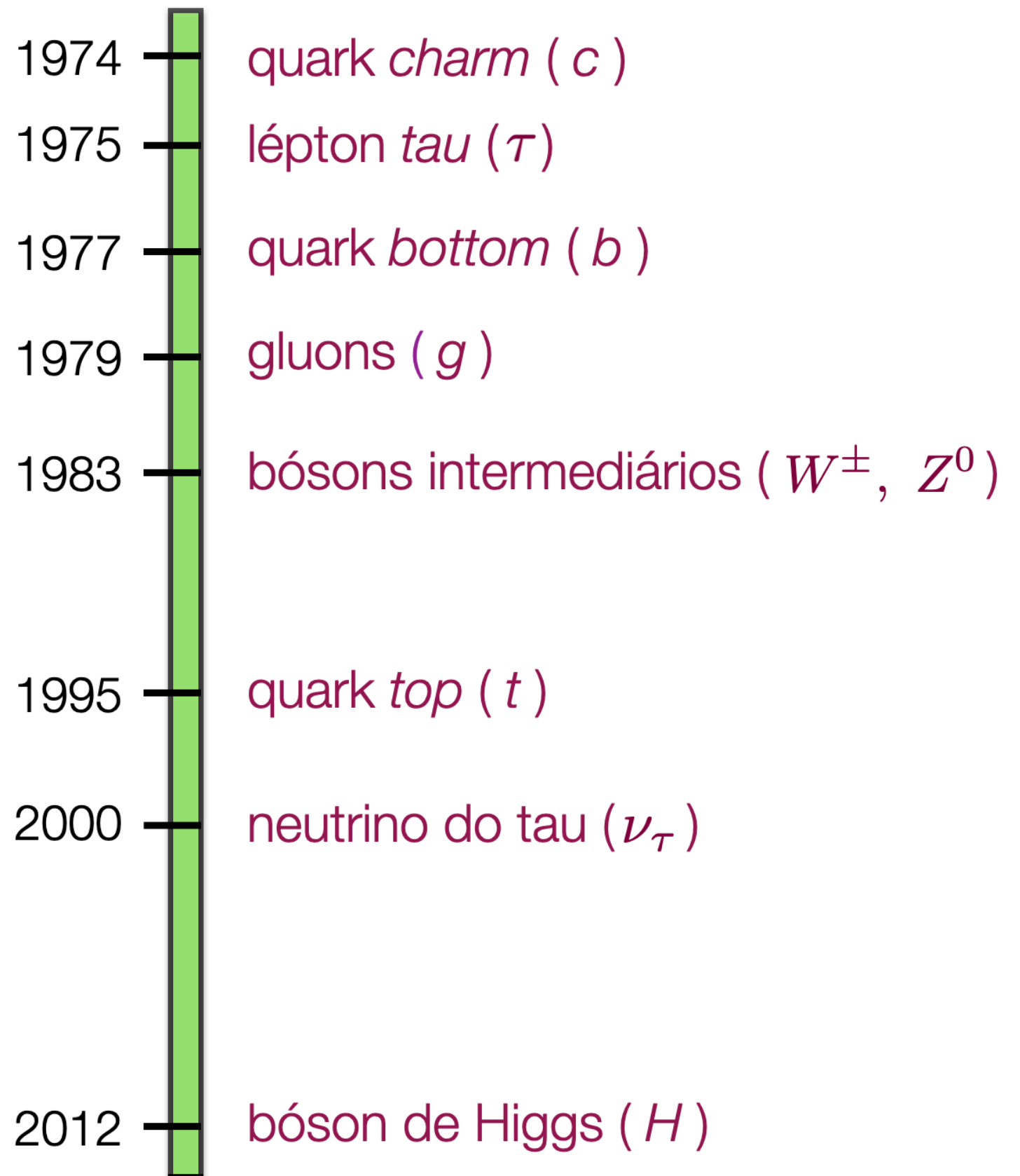
léptons carregados

neutrinos



## Linha do tempo:

Todas as partículas do MP foram encontradas.



# Simetrias: o princípio organizador

*Am Anfang war die Symmetrie* (No começo era a simetria), W. Heisenberg

No eletromagnetismo clássico, os campos elétricos e magnéticos podem ser definidos em termos do potencial escalar e vetor

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}, \quad \mathbf{E} = -\nabla\phi - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}$$

Os potenciais podem ser redefinidos *sem alterar as eqs. de Maxwell*

**transformação de calibre:**  $\mathbf{A} \rightarrow \mathbf{A} + \nabla\Lambda(\mathbf{x}, t), \quad \phi \rightarrow \phi - \frac{\partial\Lambda}{\partial t}$

No eletromagnetismo clássico, as eqs. de Maxwell descrevem **cargas e campos em interação**. A invariância por transformações de calibre é um "acidente" matemático

No Modelo Padrão (MP), exigir a invariância por transformações de calibre **determina como partículas e campos interagem**



O MP é uma teoria quântica de campos que descreve a interação de partículas elementares e é baseada na Lagrangeana

$$L = T - V \xrightarrow{\text{Lagrangeana}} \frac{dL}{dx} - \frac{d}{dt} \left( \frac{dL}{d\dot{x}} \right) = 0 \xrightarrow{\text{eq. Euler-Lagrange}} \text{eq. de movimento da partícula}$$

A Lagrangeana é função dos campos e suas derivadas

$$L(x_i, \dot{x}_i) \rightarrow \mathcal{L}(\phi, \dot{\phi}) \xrightarrow{\text{eq. Euler-Lagrange}} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \phi} - \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\phi}} \right) = 0$$

Simetrias: transformações matemáticas nos campos que deixam a Lagrangeana inalterada

Emmy Noether: simetrias contínuas estão associadas a leis de conservação

Schrödinger (1926) → MQ não relativística

Dirac (1927) → MQ relativística

Inadequada para criação/aniquilação de partículas



Teoria Quântica de Campos (TQC)

Se a transformação

$$\phi'(x, t) \rightarrow e^{i\alpha(x, t)} \phi(x, t)$$



Simetria de calibre

deixa inalterada a Lagrangeana

$$\mathcal{L}(\phi', \dot{\phi}') = \mathcal{L}(\phi, \dot{\phi})$$

A Lagrangeana do Modelo Padrão é invariante por transformações de calibre

$$\mathcal{L}_{\text{MP}} = \mathcal{L}_{\text{EM}} + \mathcal{L}_{\text{weak}} + \mathcal{L}_{\text{strong}} + \mathcal{L}_{\text{Higgs}}$$



As três forças conhecidas — eletromagnética, fraca e forte — são descritas por teorias com invariância de calibre

As interações entre partículas elementares ocorrem via a troca de uma partícula intermediária: **fótons**, **glúons** e **bósons vetoriais  $W$  e  $Z$**

A eletrodinâmica quântica, a teoria mais precisa, é usada como modelo

$$\alpha = 0.007\ 297\ 352\ 5628(6)$$

A Lagrangeana EM possui três termos:  $\mathcal{L}_{\text{EM}} = \mathcal{L}_{\text{eletron}} + \mathcal{L}_{\text{int}} + \mathcal{L}_{\text{foton}}$

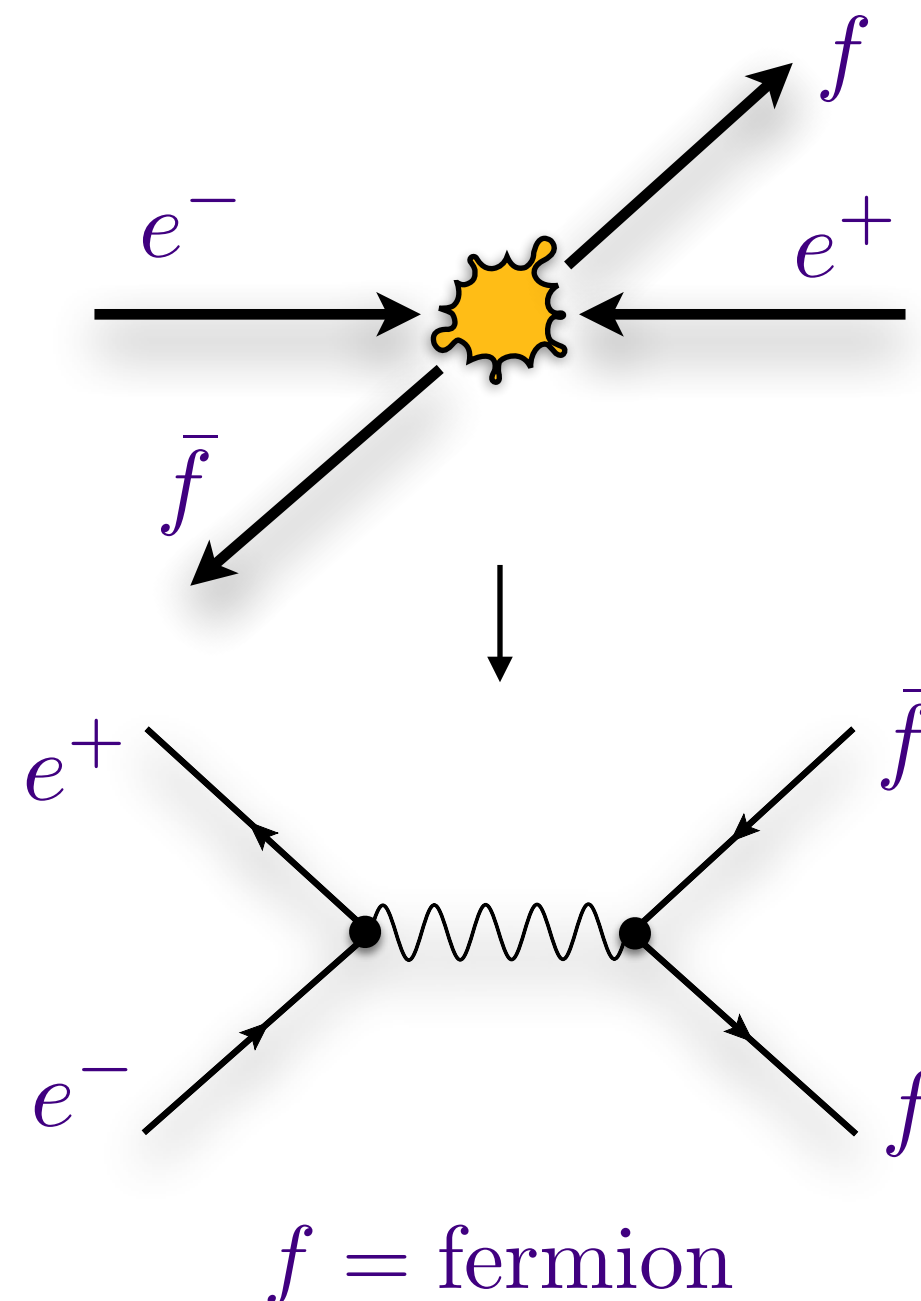
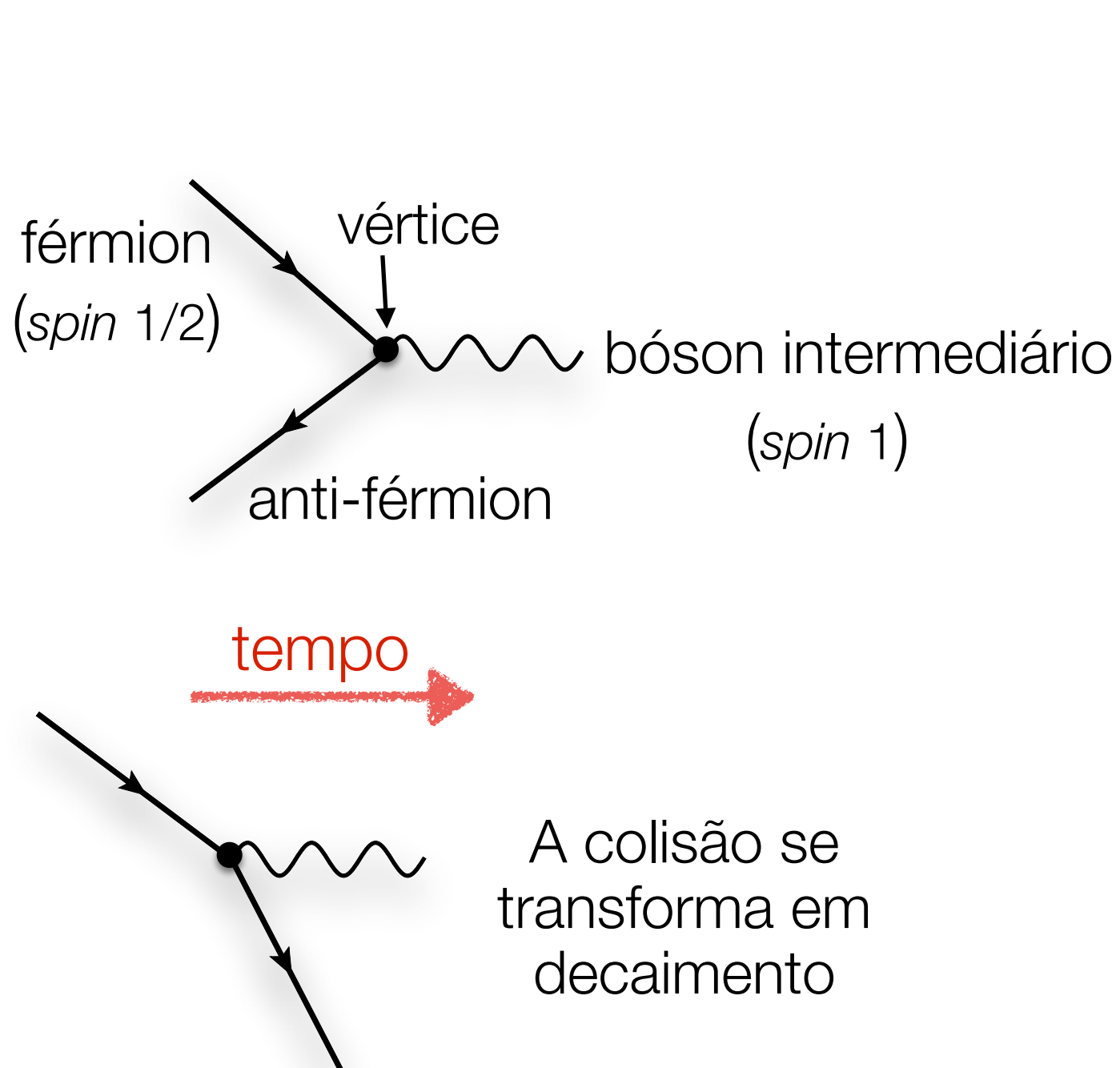
- \* A transformação  $\phi'(x, t) \rightarrow e^{i\alpha(x, t)} \phi(x, t)$  modifica  $\mathcal{L}_{\text{eletron}}$
- \* Uma transformação simultânea no campo do fóton  $\mathcal{L}_{\text{foton}}$  compensa a modificação, **definindo forma de  $\mathcal{L}_{\text{int}}$**

**A invariância por transformação de calibre define a forma da interação EM**  
**Partículas elementares (*spin* 1/2) interagem via troca de bósons (*spin* 1)**

# Diagramas de Feynman

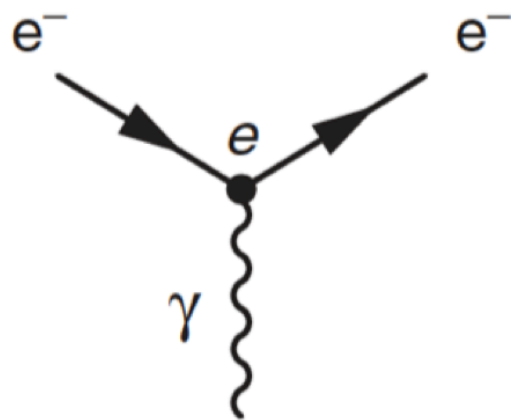
Os diagramas de Feynman representam processos fundamentais envolvendo partículas elementares (espalhamento ou decaimento).

Definem regras para calcular amplitudes de espalhamento e decaimento.



# As interações fundamentais

## Eletromagnetismo

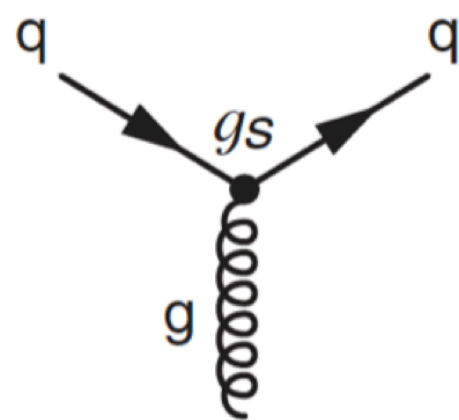


$$\alpha \approx 1/137$$

Todas as partículas carregadas.

Nunca troca sabor

## Interação forte

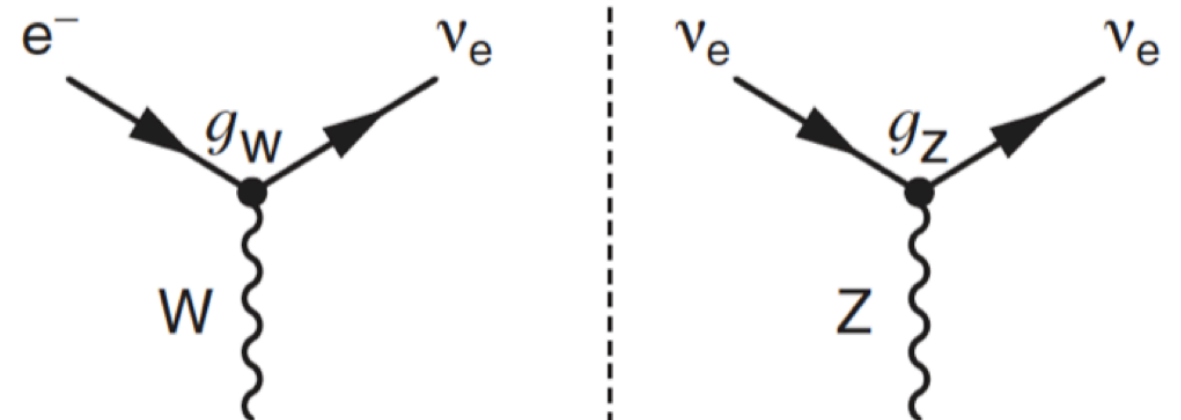


$$\alpha_s \approx 1$$

Apenas os quarks.

Nunca troca sabor

## Interação fraca



$$\alpha_W \approx 1/30$$

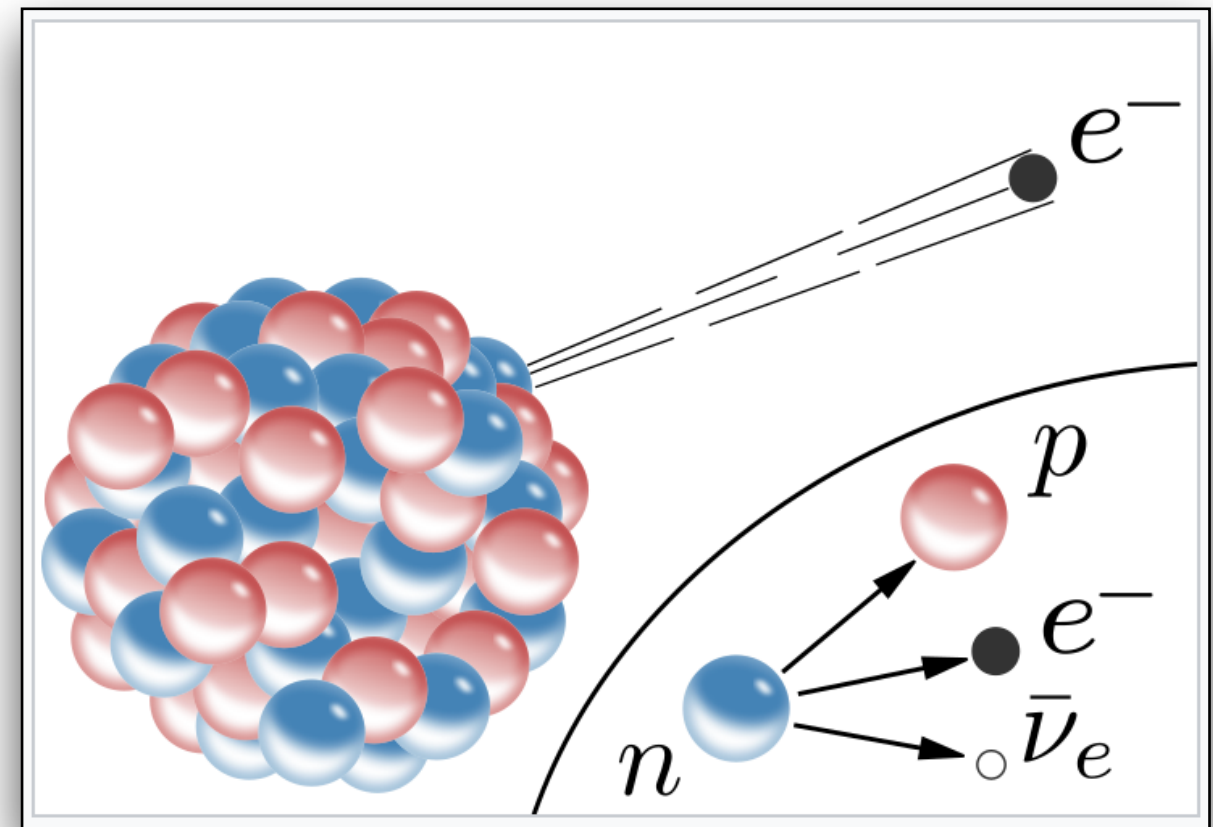
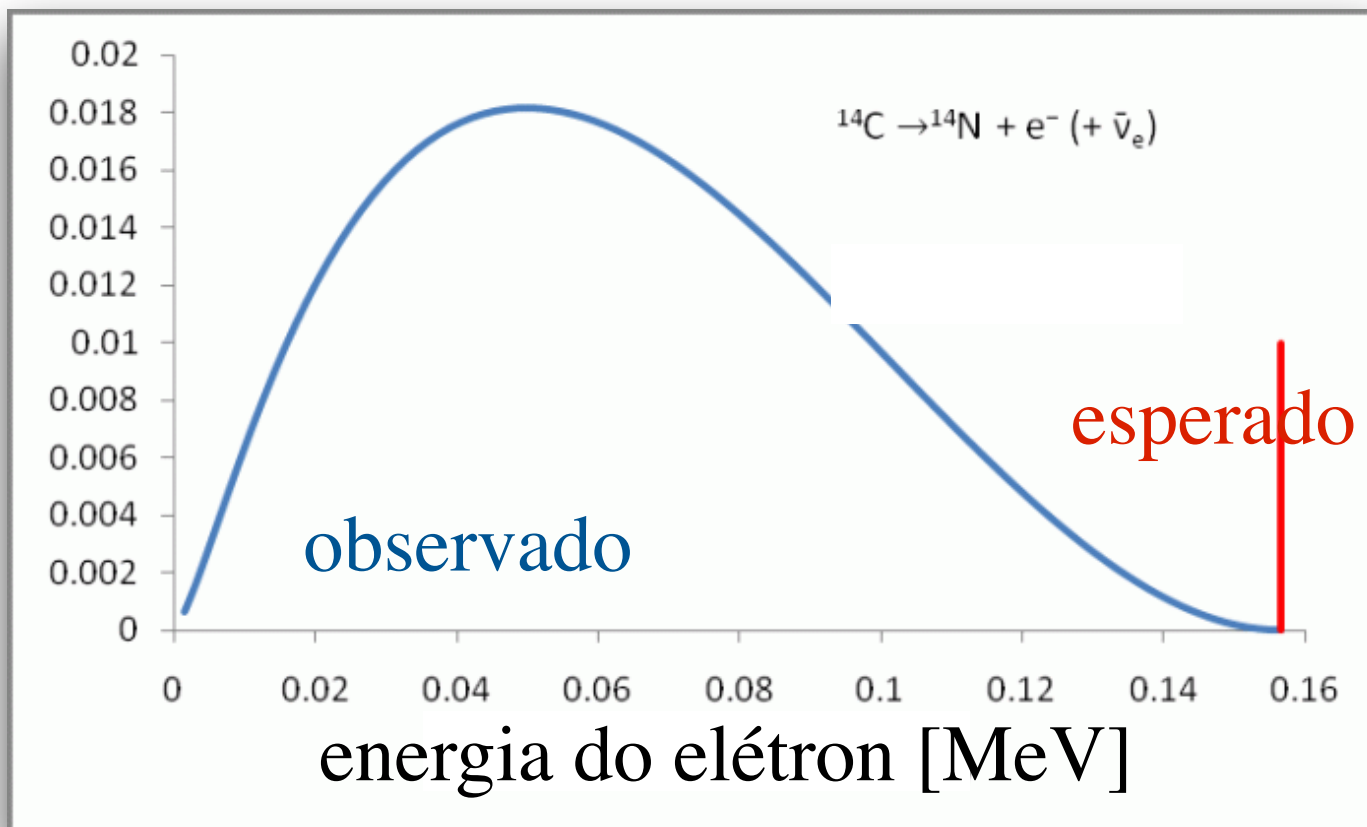
Todos os fermions.

Sempre troca sabor

Nunca troca sabor

# Interações fundamentais - teoria eletrofraca

O decaimento beta:  ${}_6\text{C}^{14} \rightarrow {}_7\text{N}^{14} + e^- + \bar{\nu}_e$



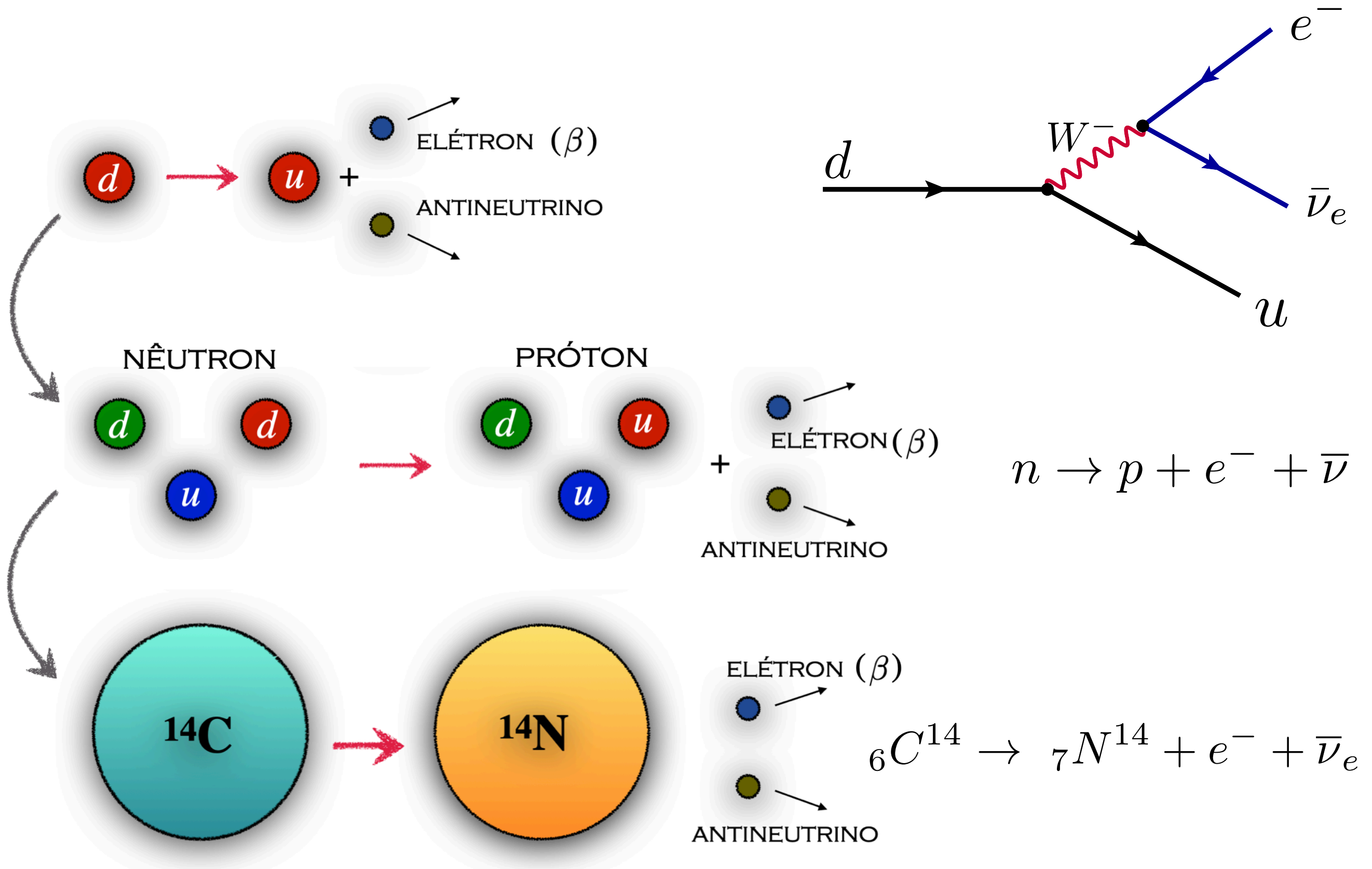
Em 1930, Wolfgang Pauli propôs a existência dos neutrinos

O processo "microscópico" no interior do núcleo:  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$

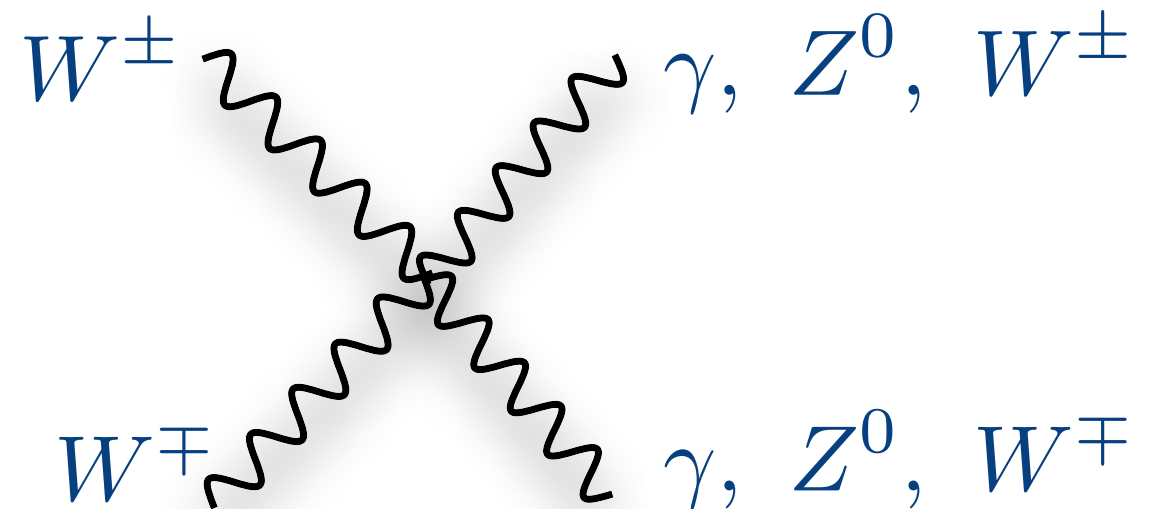
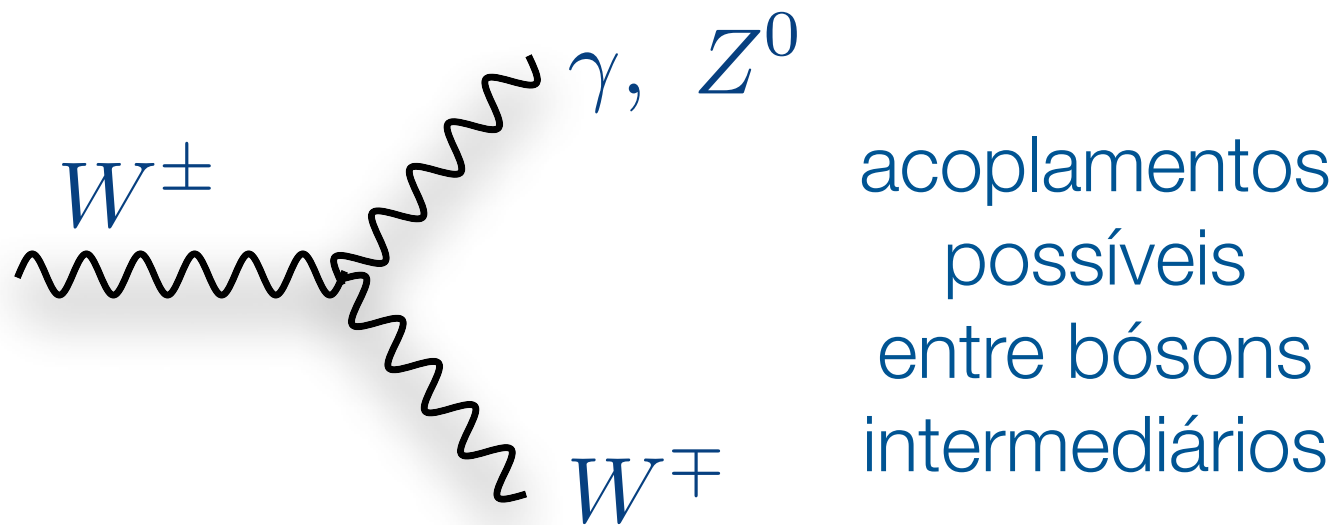
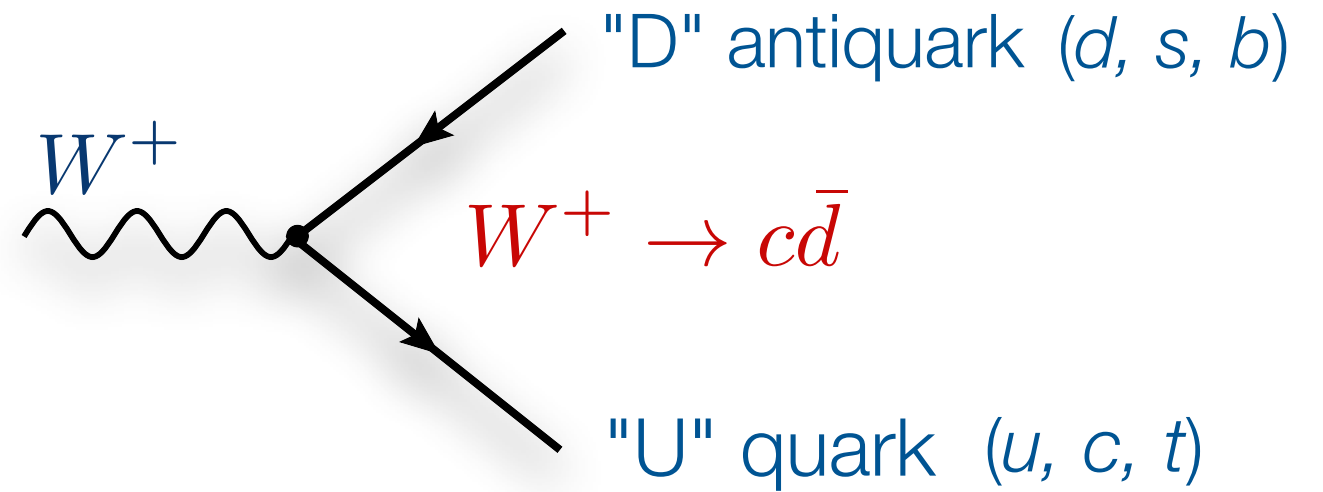
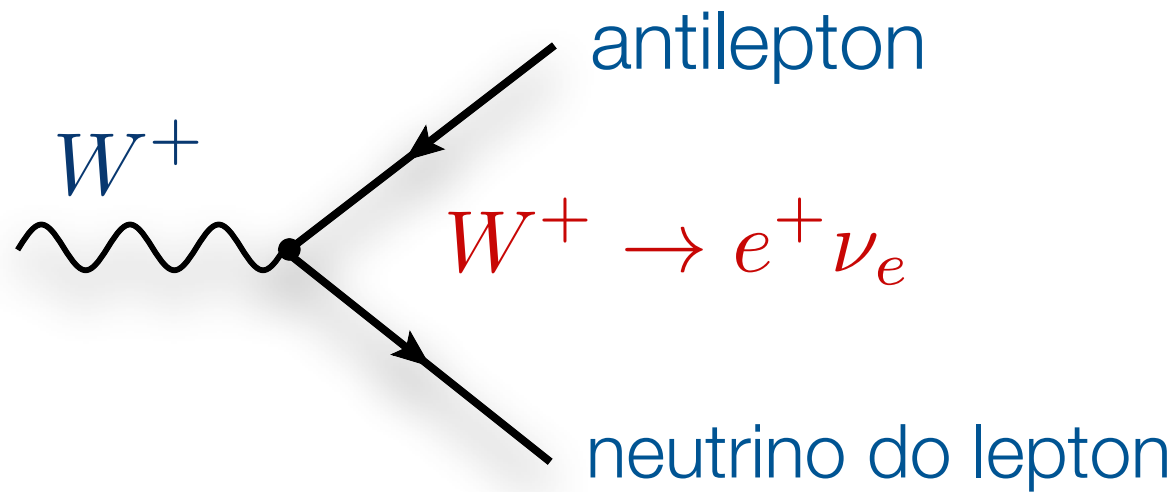
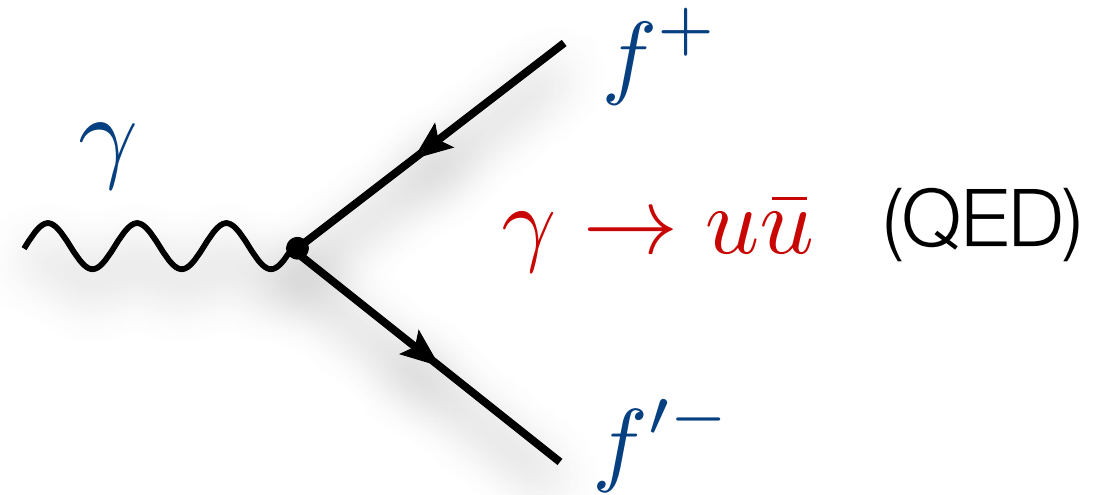
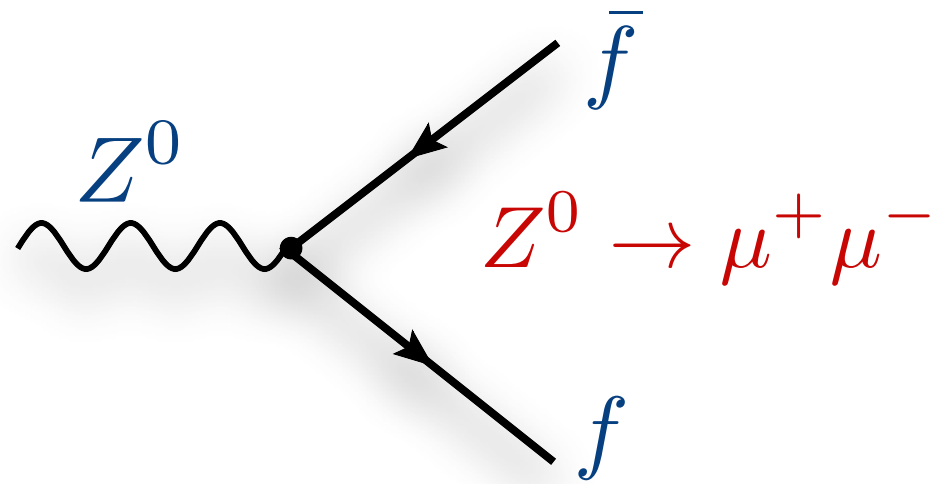
Mas os neutrinos só foram observados 20 anos depois.



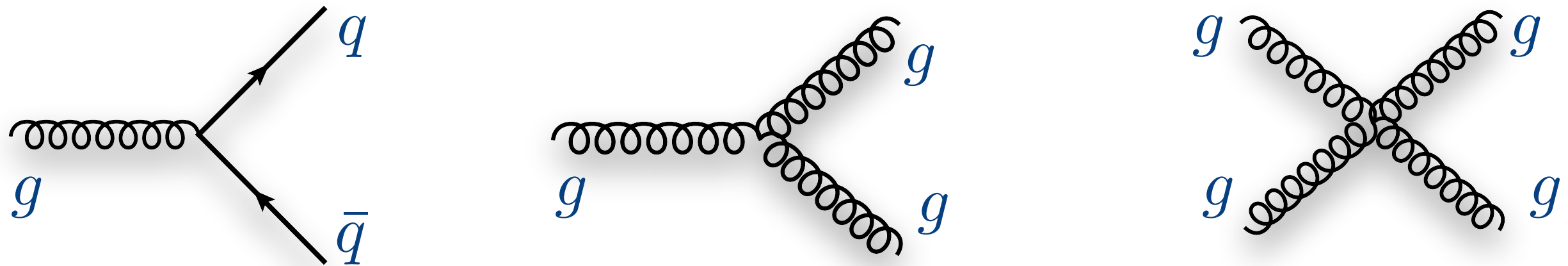
# As diferentes escalas envolvidas no decaimento beta



# Os diferentes acoplamentos possíveis

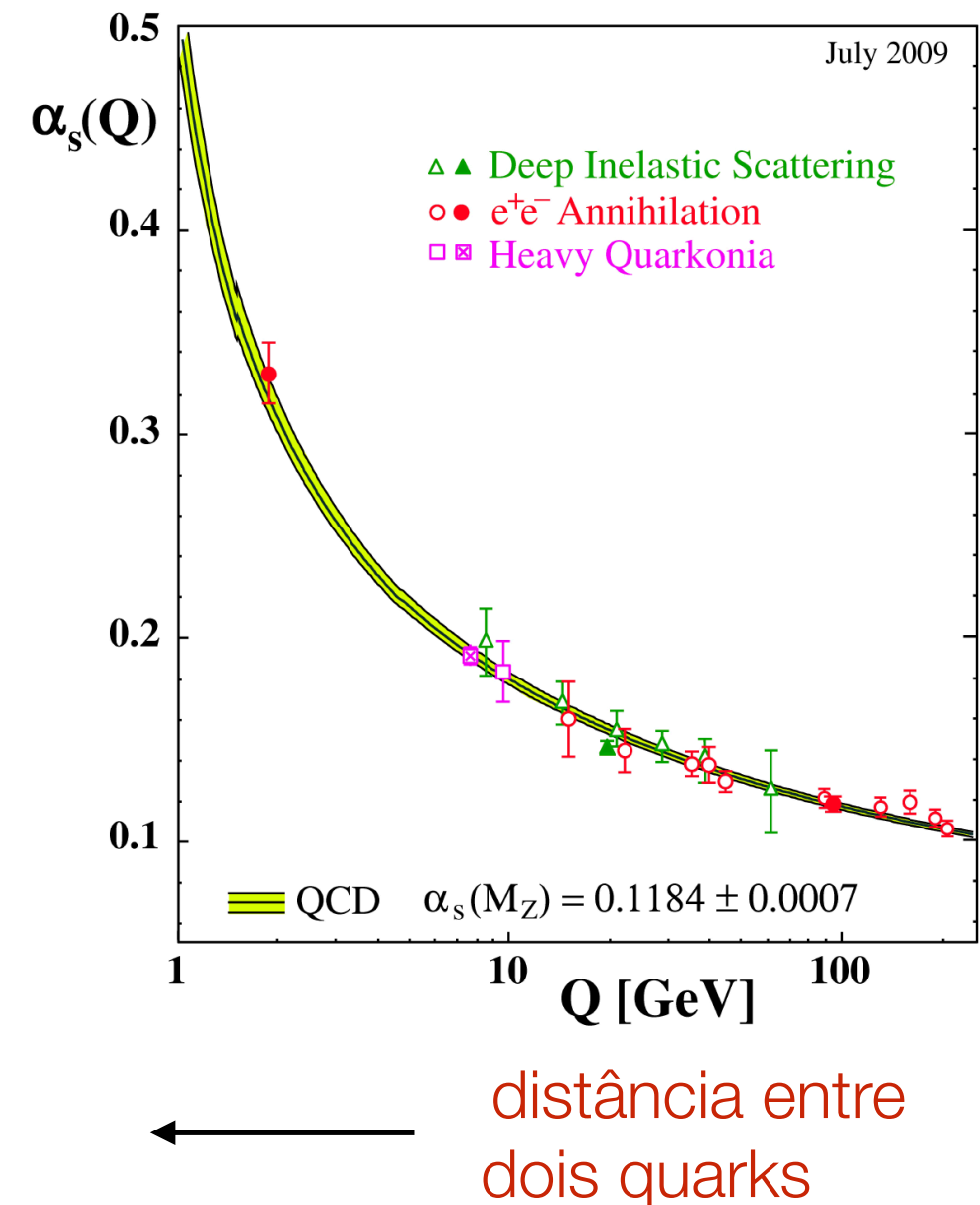


# Interações fundamentais - cromodinâmica quântica (QCD)

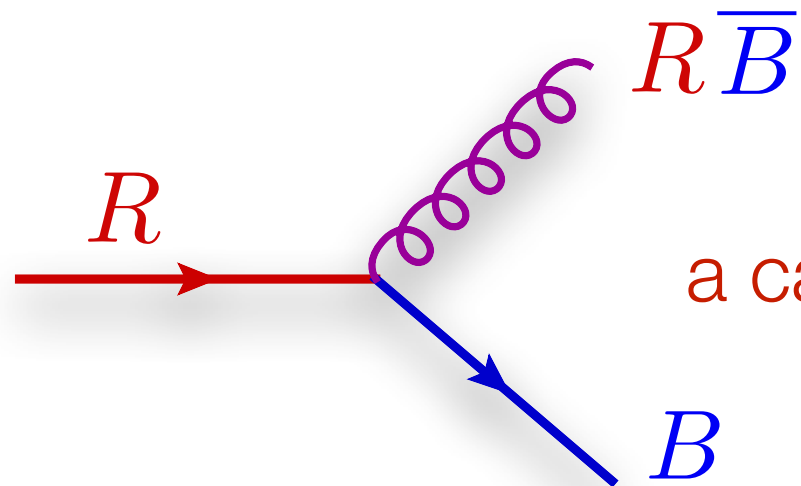


A QCD é bem diferente da QED:

- gluons interagem entre si, podendo formar estados ligados sem quarks (glueballs), partículas "invertibradas";
- liberdade assintótica: acoplamento diminui a pequenas distâncias entre os quarks;
- confinamento: acoplamento aumenta se a distância entre os quarks cresce.

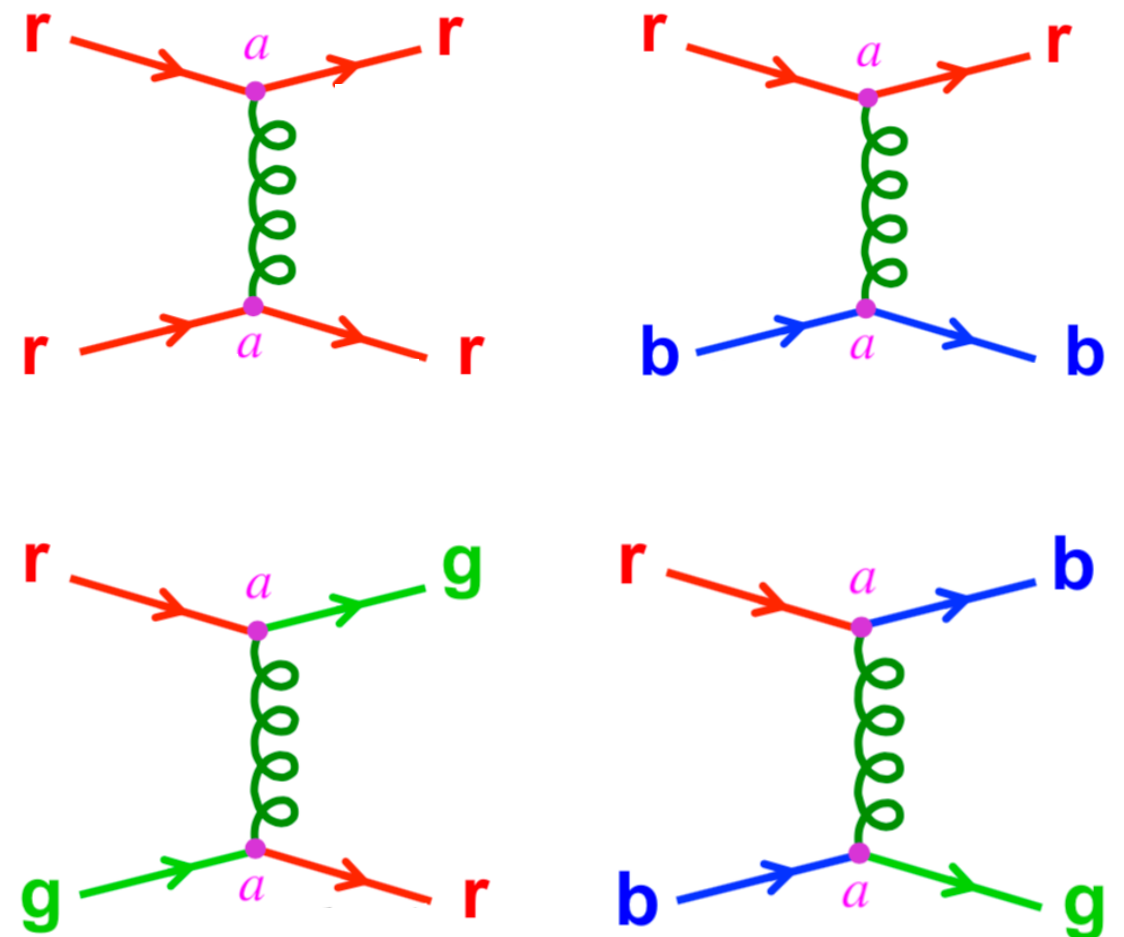


Glúons possuem uma "cor" e uma "anticor":



a carga de cor é conservada em cada vértice.

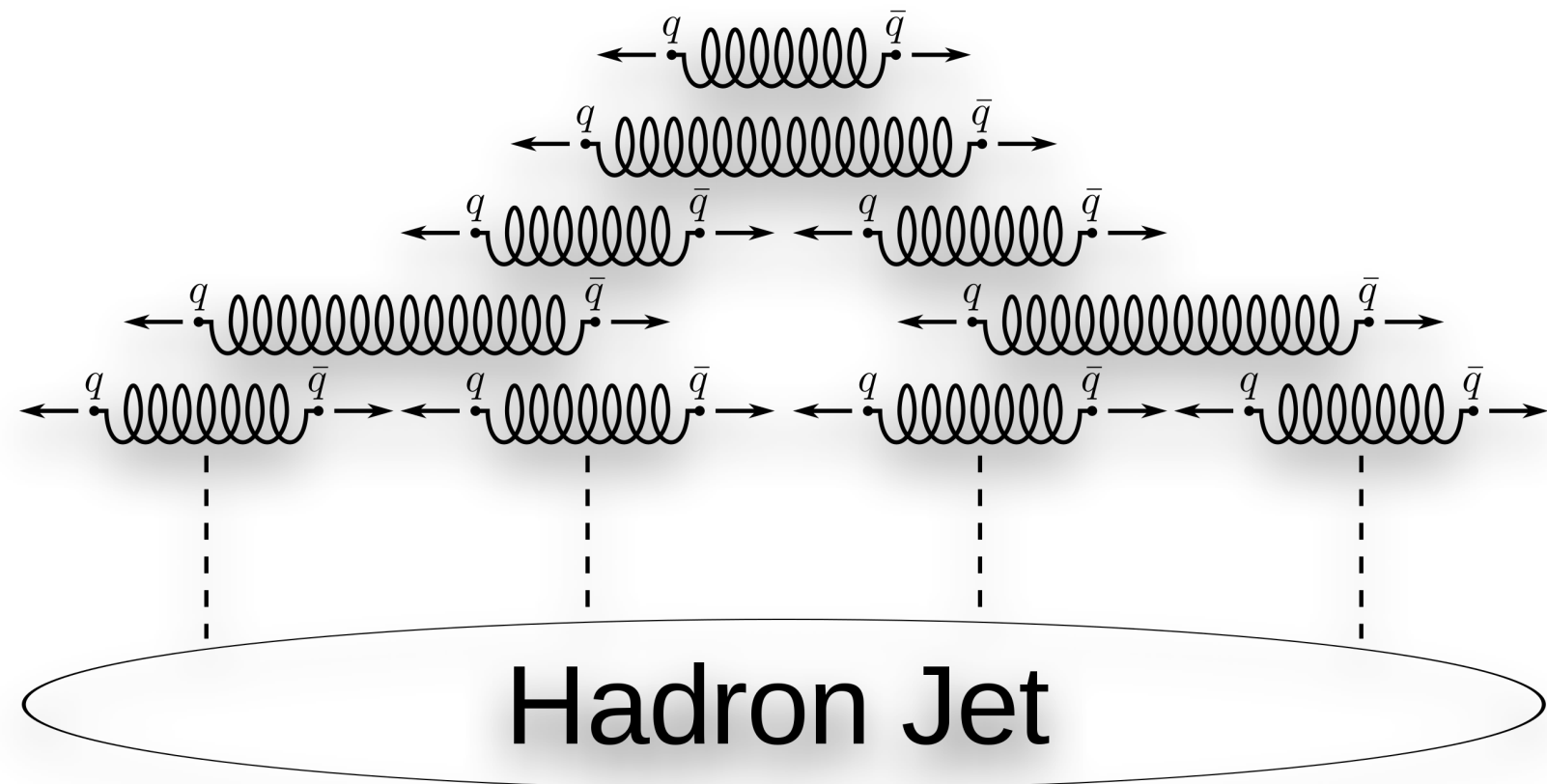
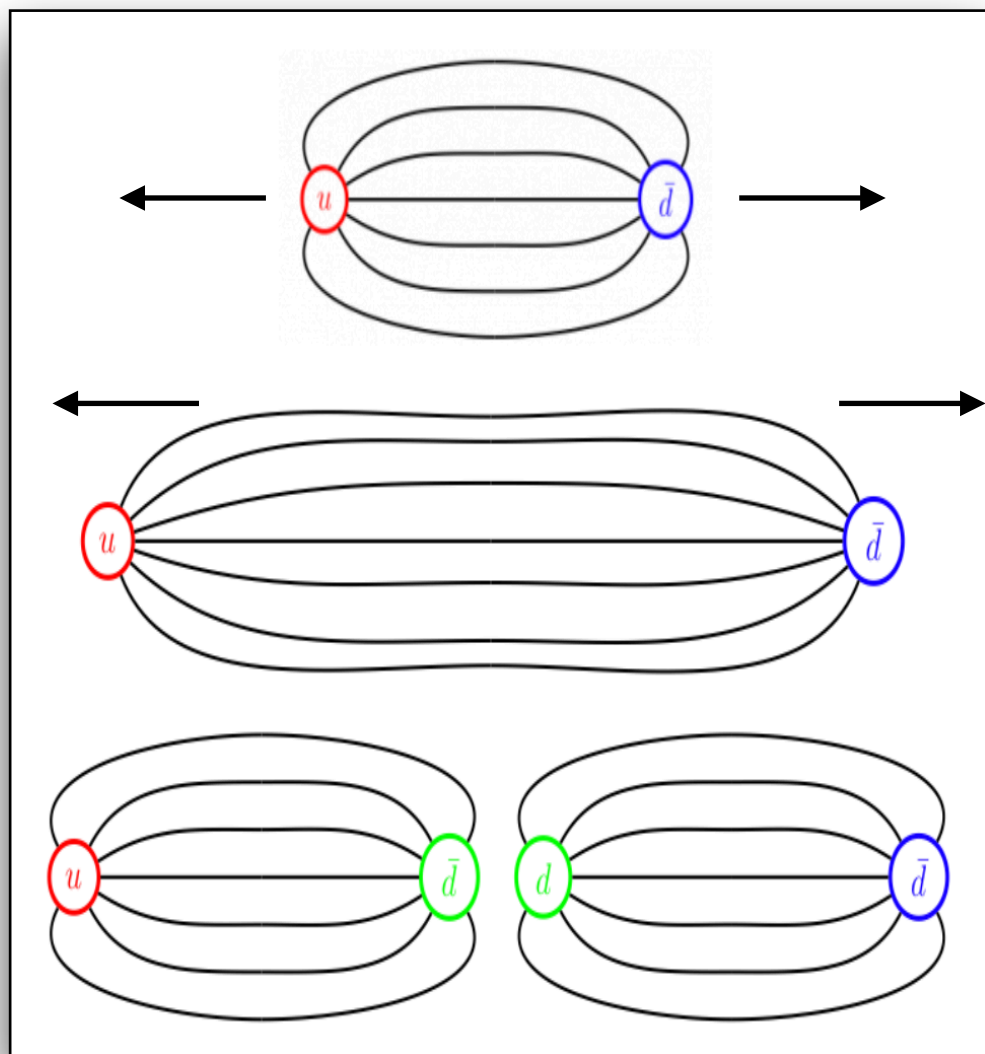
- Cada quark ou antiquark pode ter três estados de cor.
- Com três tipos de carga de cor (RGB), há oito glúons.
- Hádrons são "brancos" (estados sem carga de cor).
- Apenas partículas sem cor são observados na natureza.





Quarks não podem ser observados isoladamente. Ao se afastarem, forma-se um "tubo de cor" entre eles. Quando a distância aumenta, a densidade de energia é imensa. O "tubo de cor" se rompe, originando um novo par quark-antiquark.

"Tubos de cor" se formam entre os novos pares quark-antiquark, até que não haja energia suficiente para novas quebras. Formam-se então "jatos" de hádrons que são observados no laboratório.



# O mecanismo de Higgs

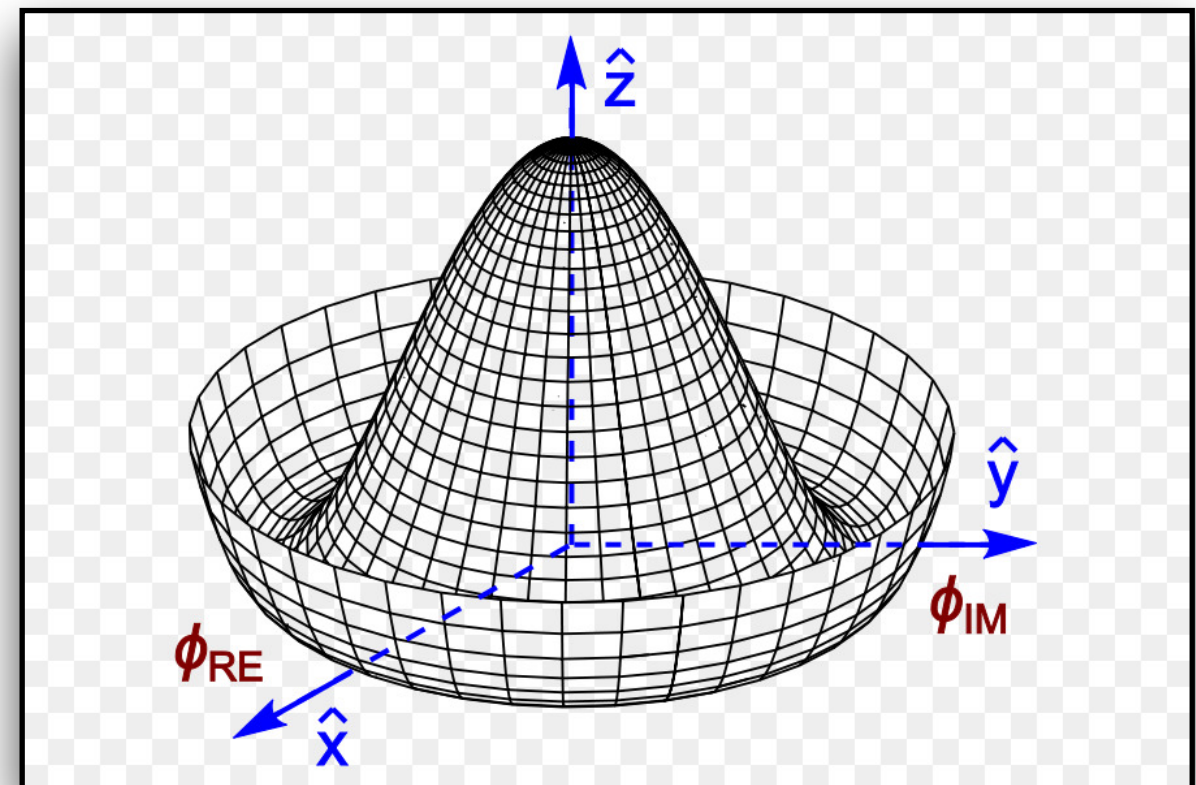
*simetria de calibre implica bósons intermediários com massa nula, mas*

$$m(W^\pm) \sim 80 \text{ GeV} \quad m(Z^0) \sim 91 \text{ GeV}$$

O mecanismo de Higgs é uma ideia engenhosa e complexa.

Está baseado na **quebra espontânea de simetria**

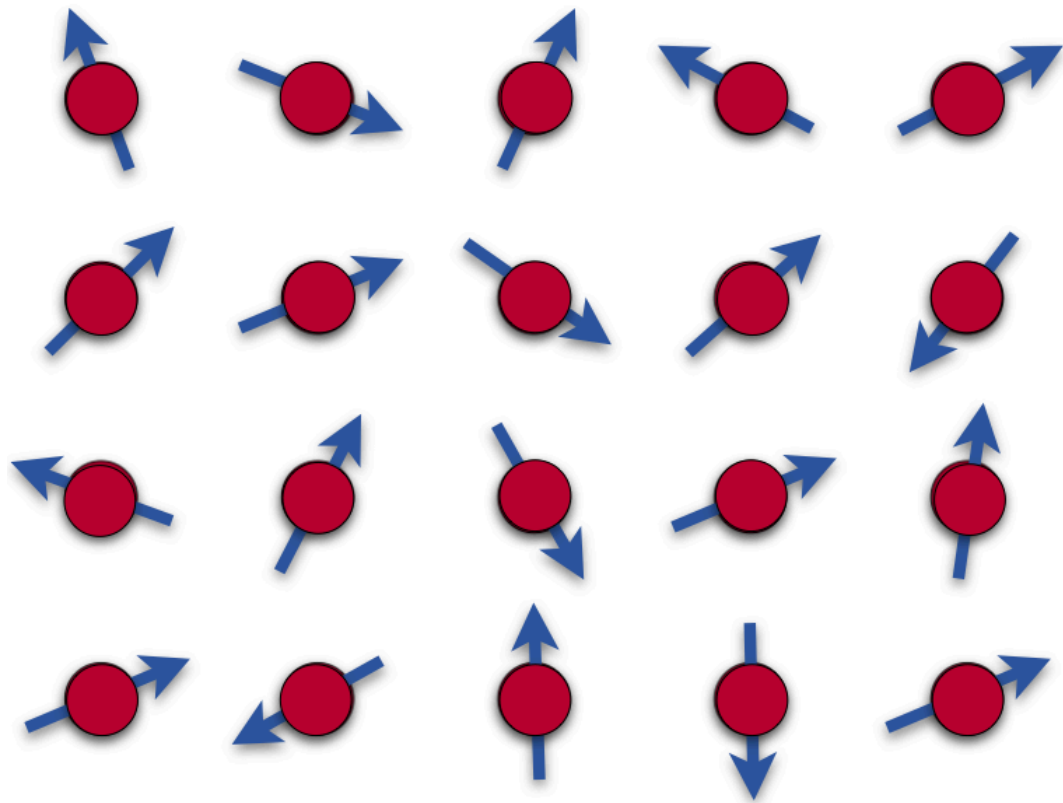
- Todo o Universo está preenchido por um campo especial, o campo de Higgs
- No Universo primordial, nenhuma partícula tinha massa e não havia diferença entre as interações EM e fraca
- Ao expandir, o Universo esfria, há uma transição de fase, e nesse processo os bósons  $W$  e  $Z$  adquirem massa
- Quebra espontânea de simetria: o estado fundamental do campo não possui as mesmas simetrias da Lagrangiana.



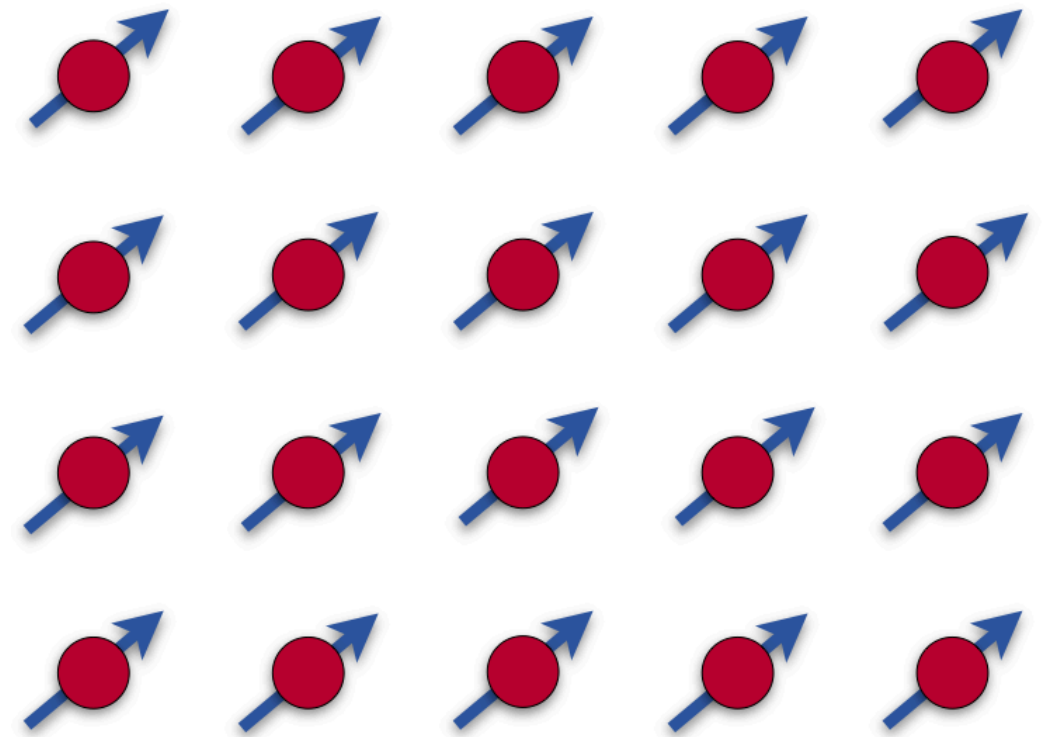


O ferromagnetismo é um exemplo de quebra espontânea de simetria

Transição de fase: spins desalinhados  $\longrightarrow$  alinhados



Acima da temperatura de Curie, os spins estão desalinhados, formando um sistema completamente desordenado, com simetria esférica.



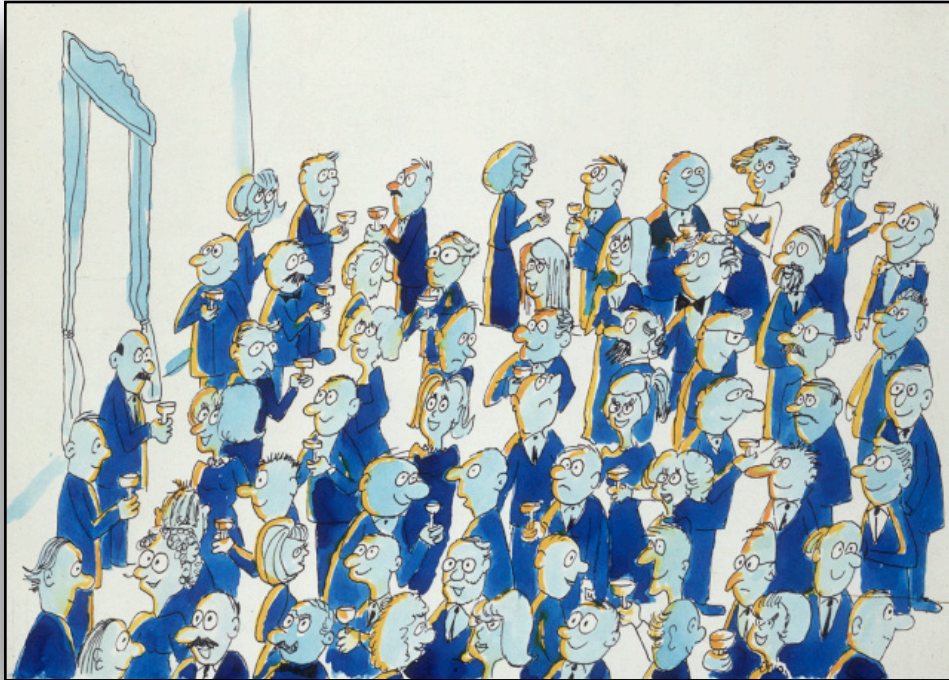
Abaixo da temperatura de Curie, todos os spins se alinharão em uma única direção. Não há como prever qual será essa direção.

A energia do estado fundamental (vácuo) é não nula. Mas há infinitos estados, que diferem entre si pela orientação dos spins.



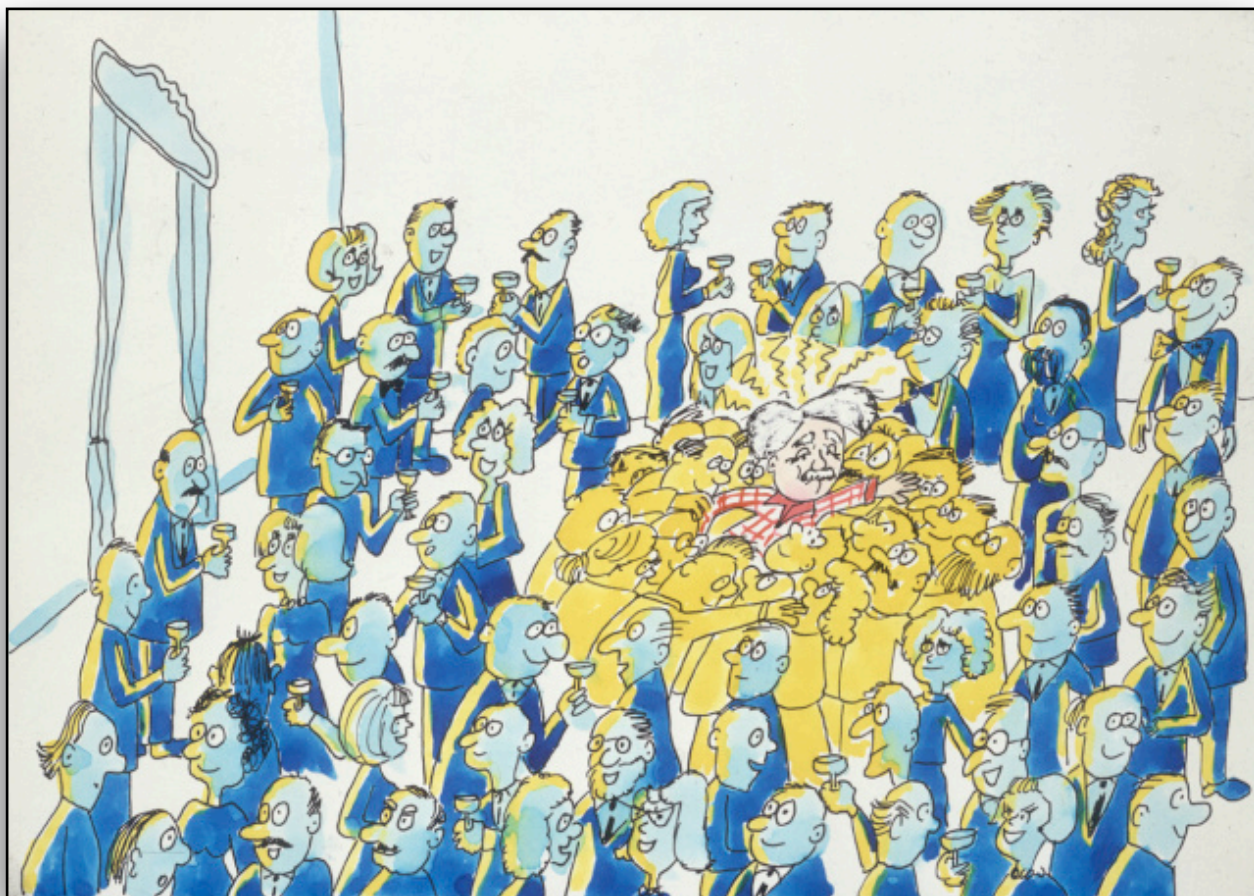
# O mecanismo de Higgs

Em uma sala, cientistas (o campo de Higgs) esperam um convidado muito especial.



CERN

Ele aparece, causando alvoroço.



Atravessa a sala sempre cercado por colegas, o que gera uma inércia.

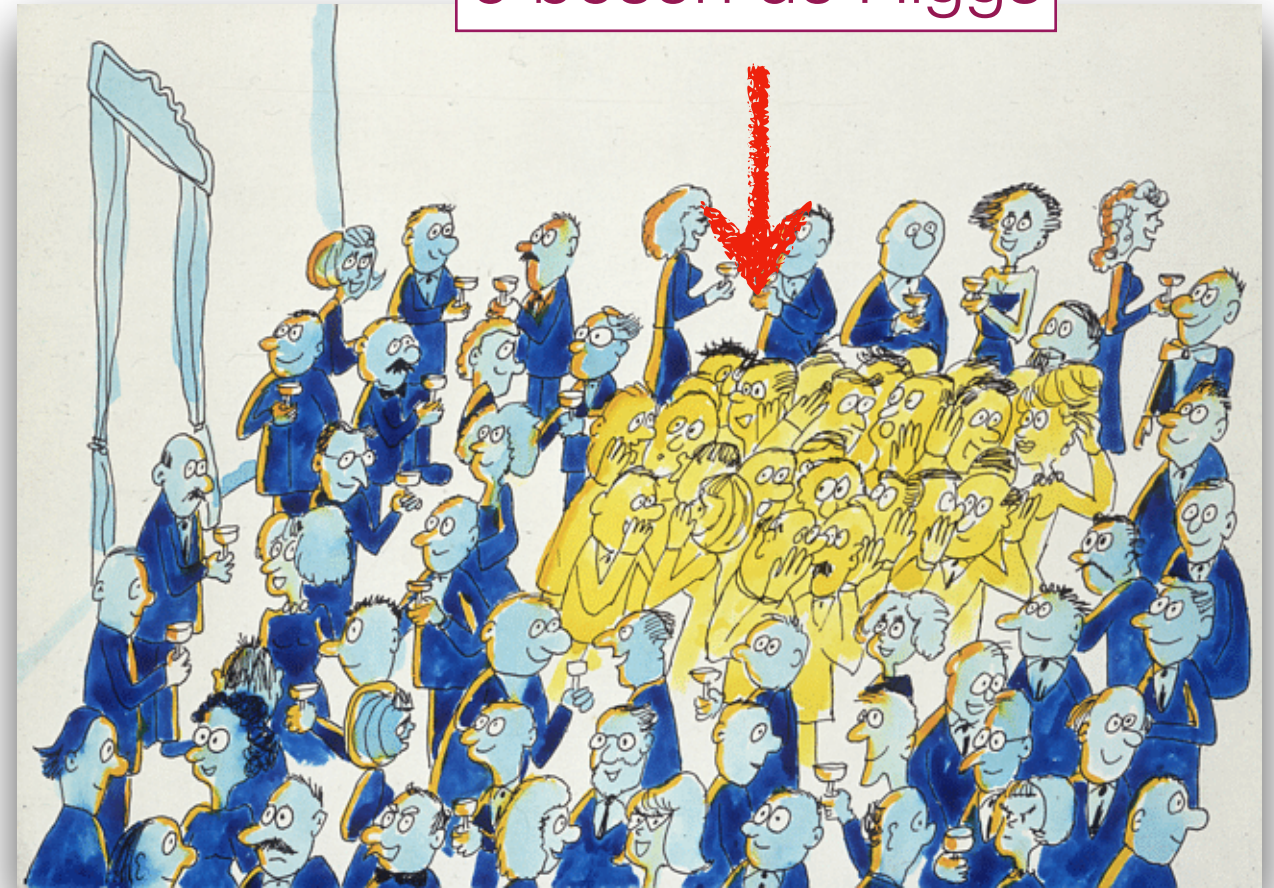
**uma partícula adquire  
massa ao interagir  
com o campo de Higgs.**



Na Teoria Quântica de Campos as partículas correspondem a excitações do campo a ela associado.

A introdução do campo de Higgs implica a existência de uma partícula associada, o bóson de Higgs.

o bóson de Higgs

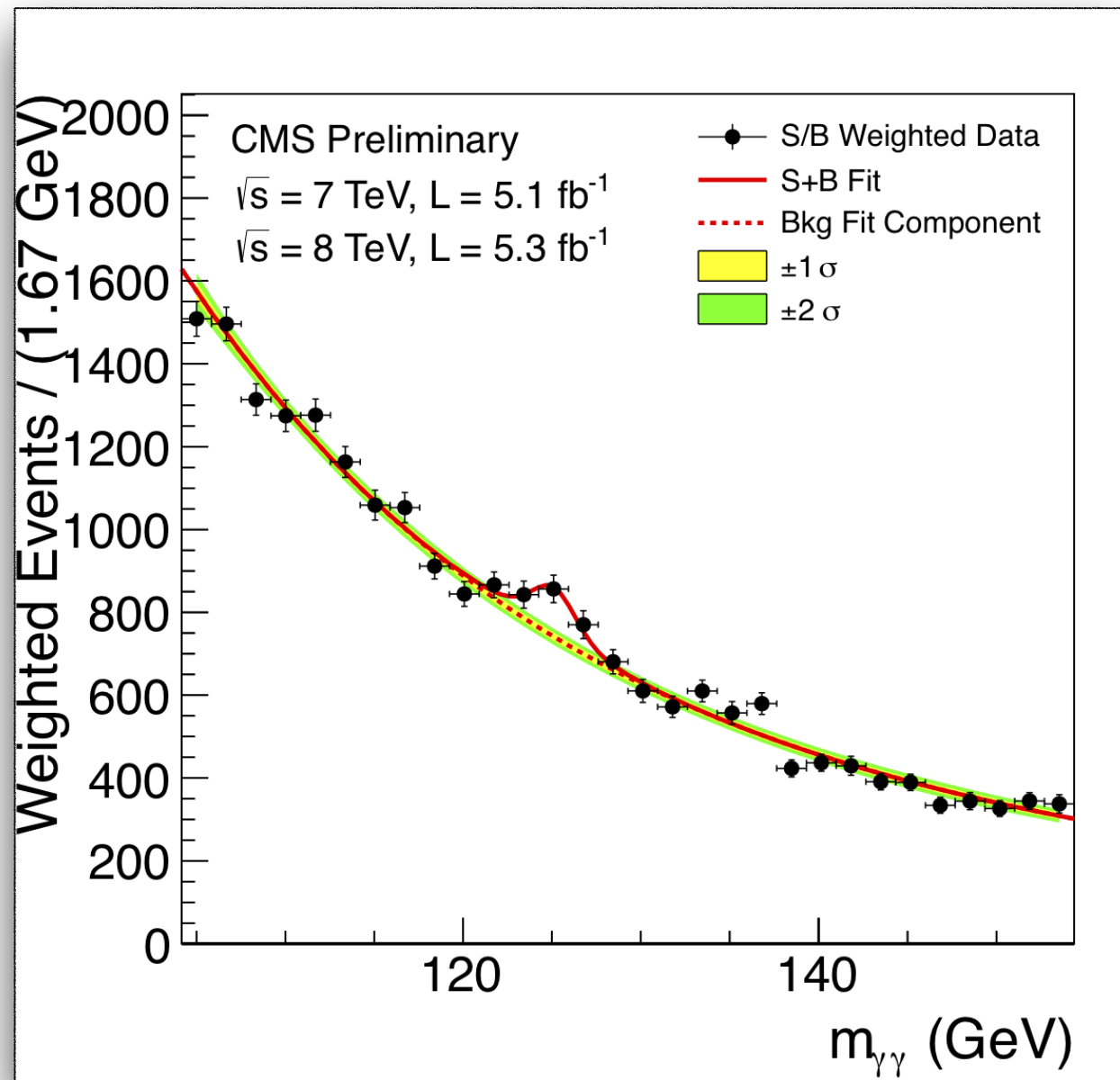


Copyright CERN

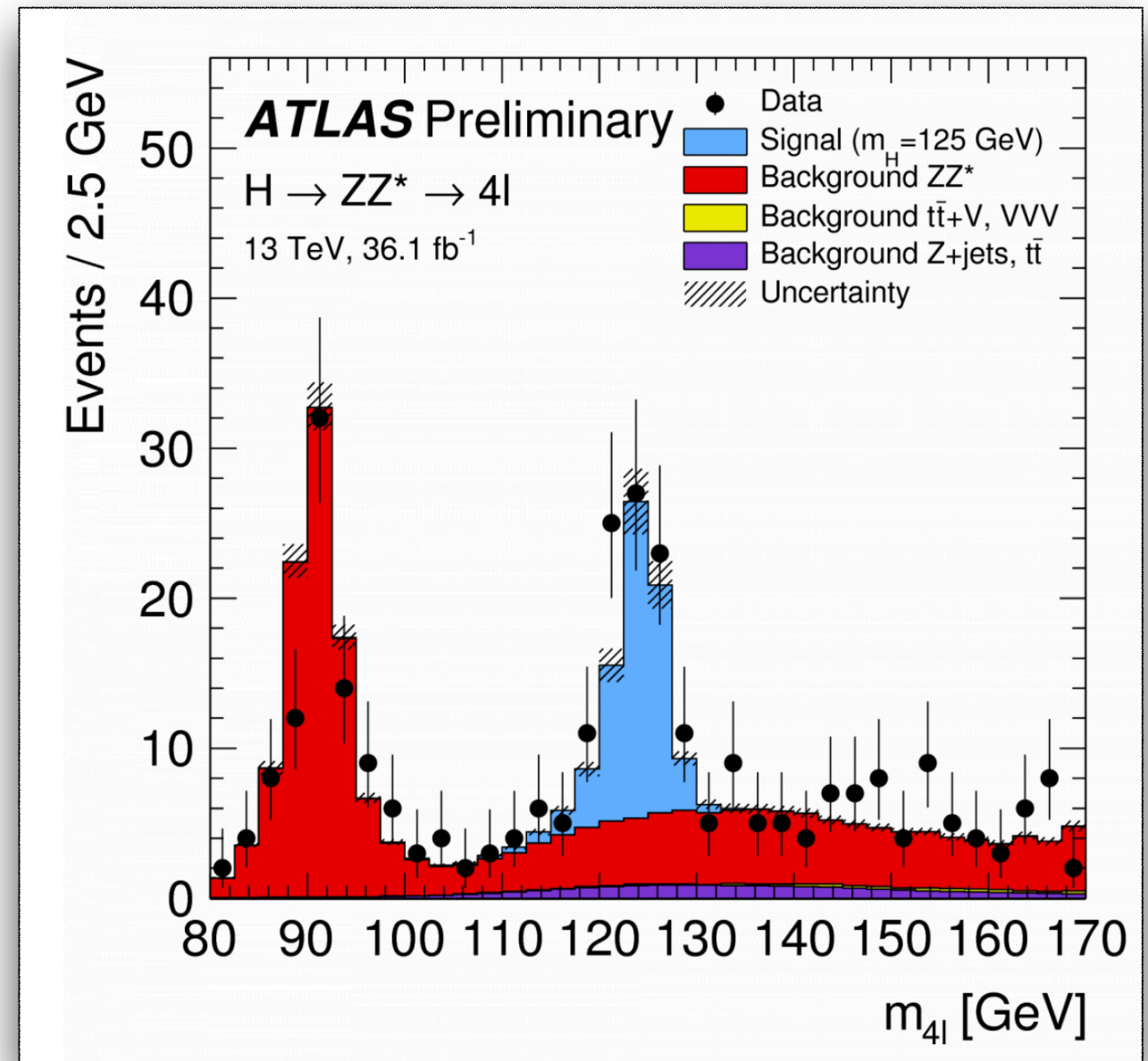
Um rumor se espalha pela sala, causando excitação nos presentes, que se aglutinam em grupos.



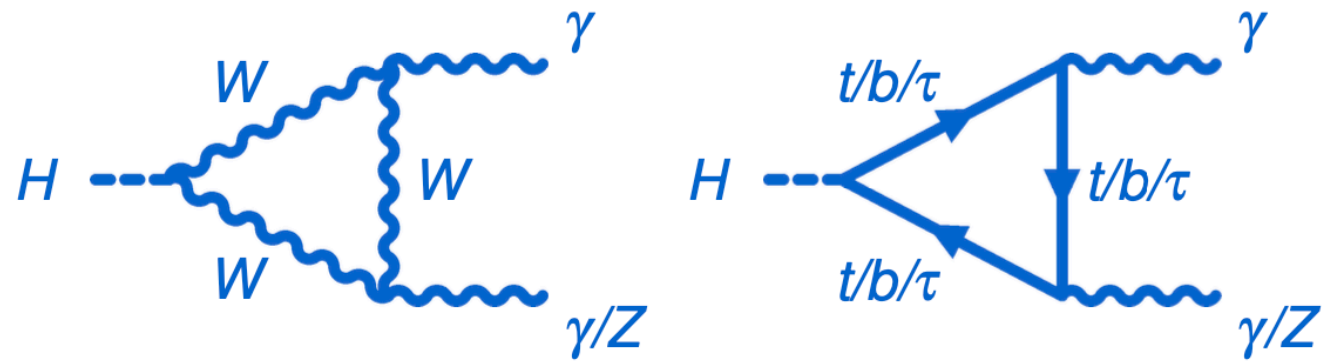
$$H \rightarrow \gamma\gamma$$



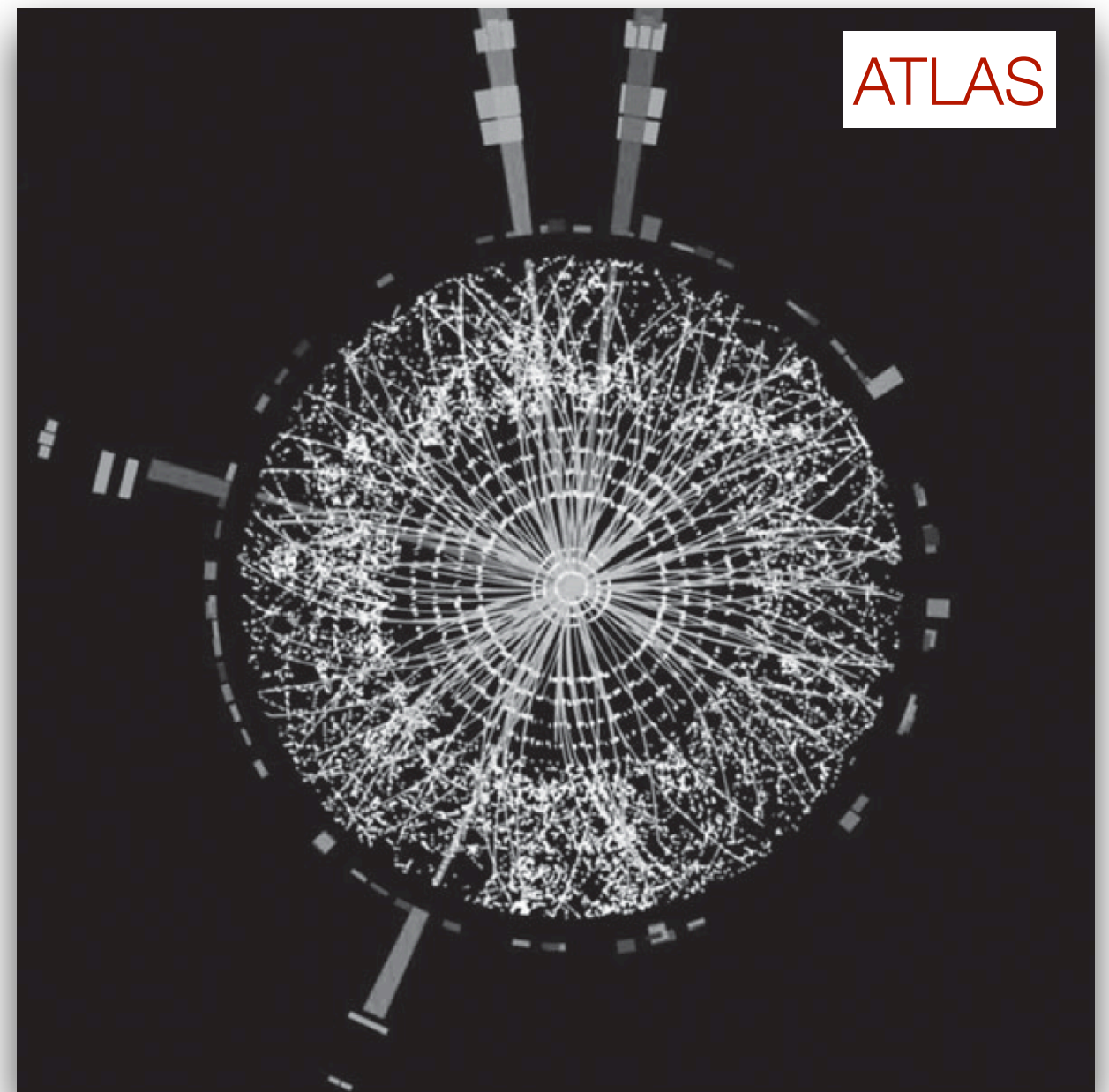
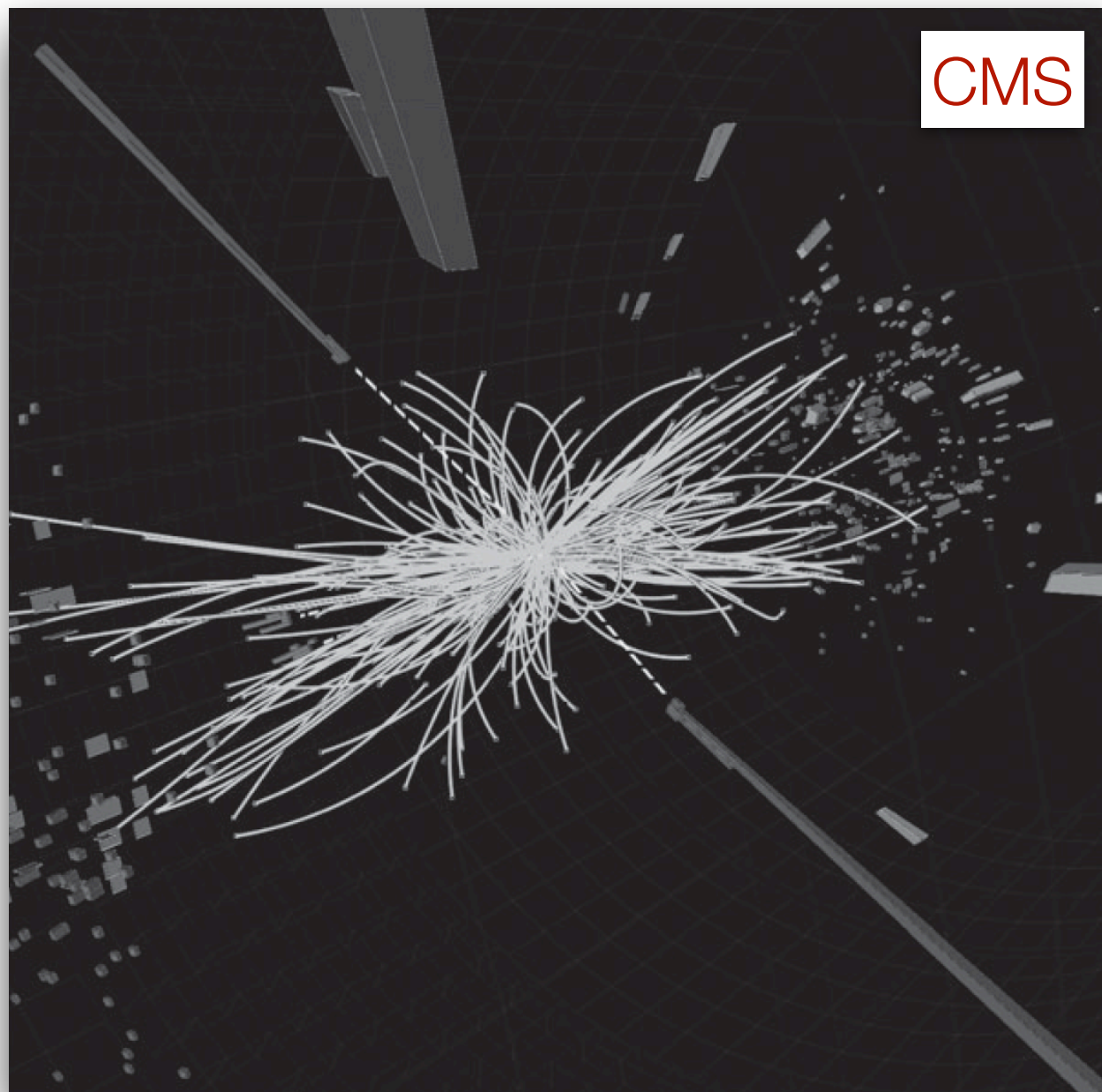
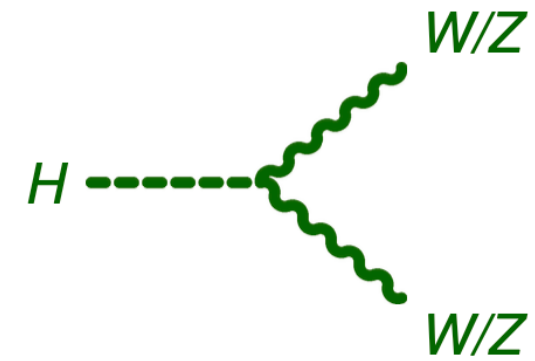
$$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow \ell^+ \ell^- \ell^+ \ell^-$$



$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

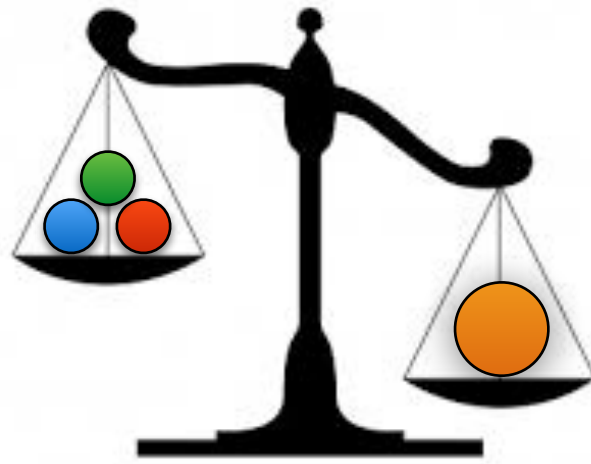


$$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow e^+e^-e^+e^-$$



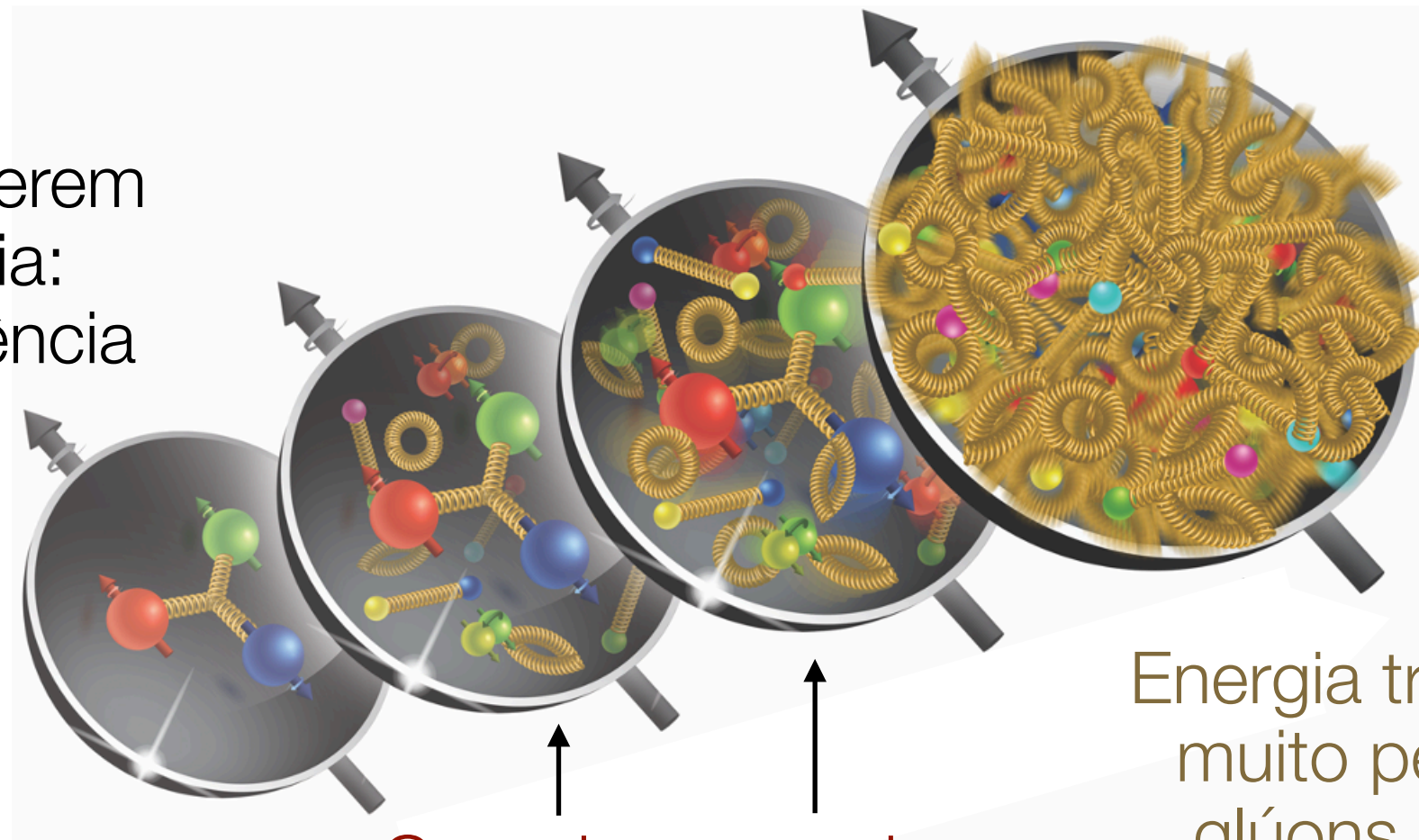


A soma das massas dos quarks corresponde a ~1% da massa do próton



A massa do próton e dos outros hádrons é gerada dinamicamente: interações entre quarks, antiquarks e glúons

Elétrons transferem muita energia: quarks de valência



Quando a energia transferida diminui: pares quark-antiquark

Energia transferida muito pequena: glúons, glúons, glúons...



# Vista aérea do CERN

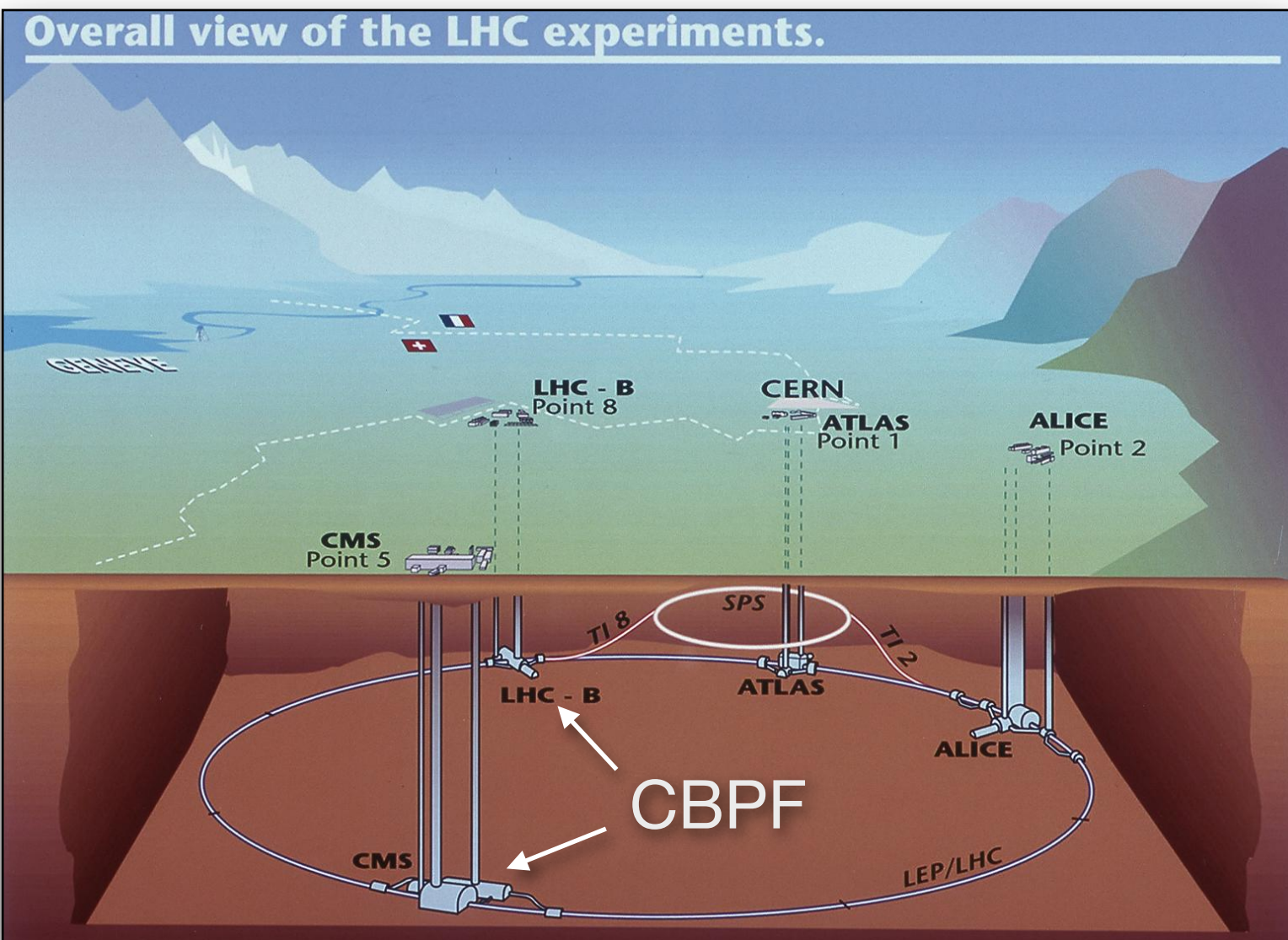
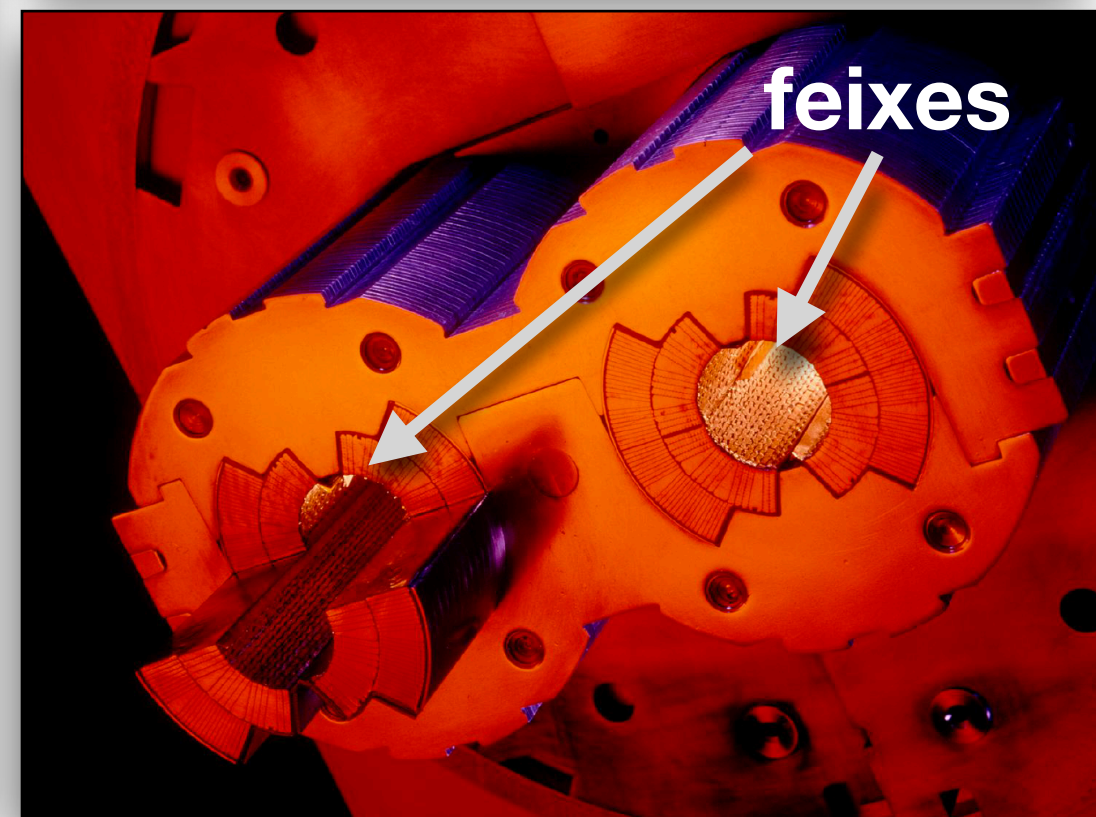


França  
Suíça



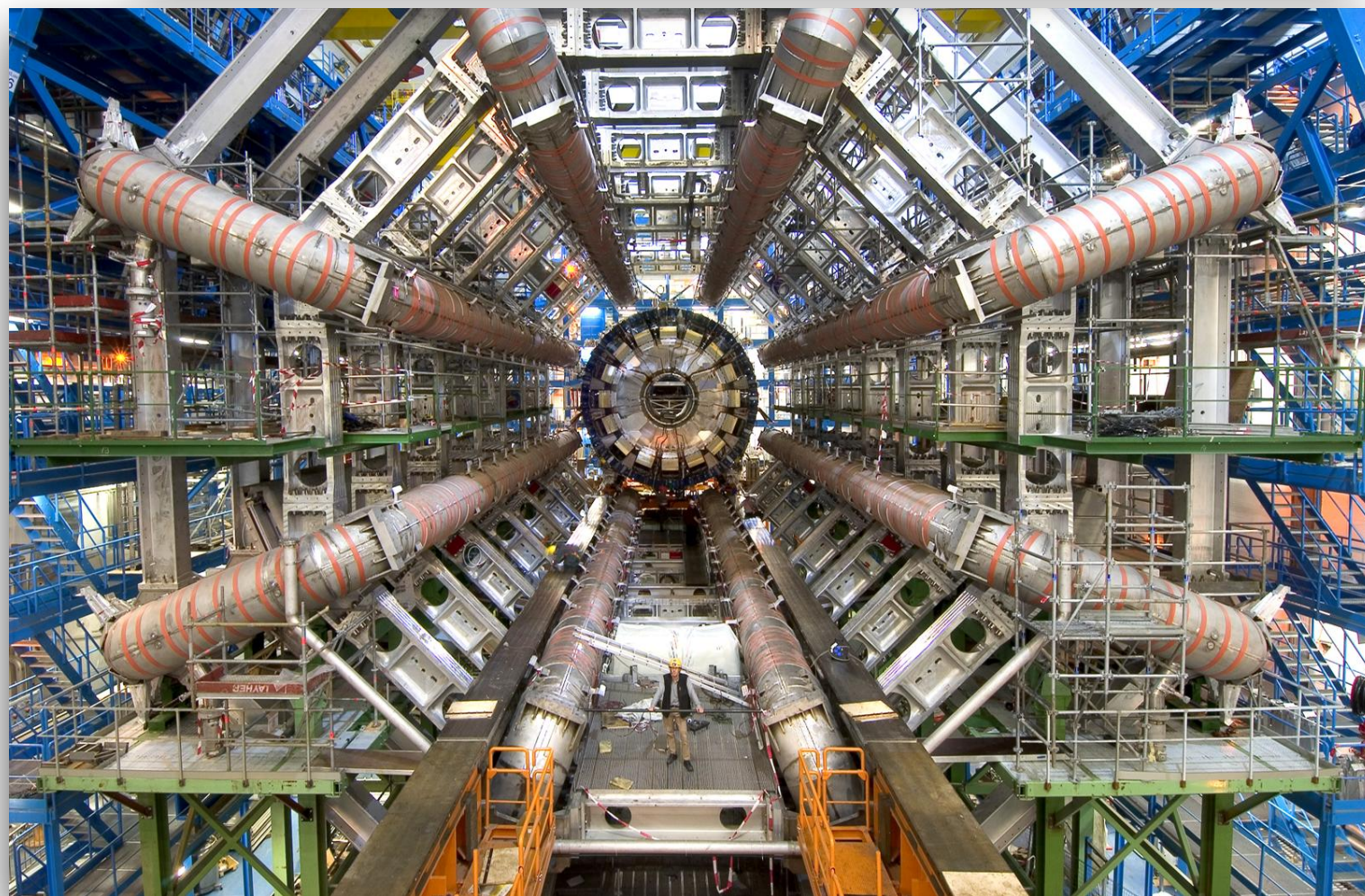
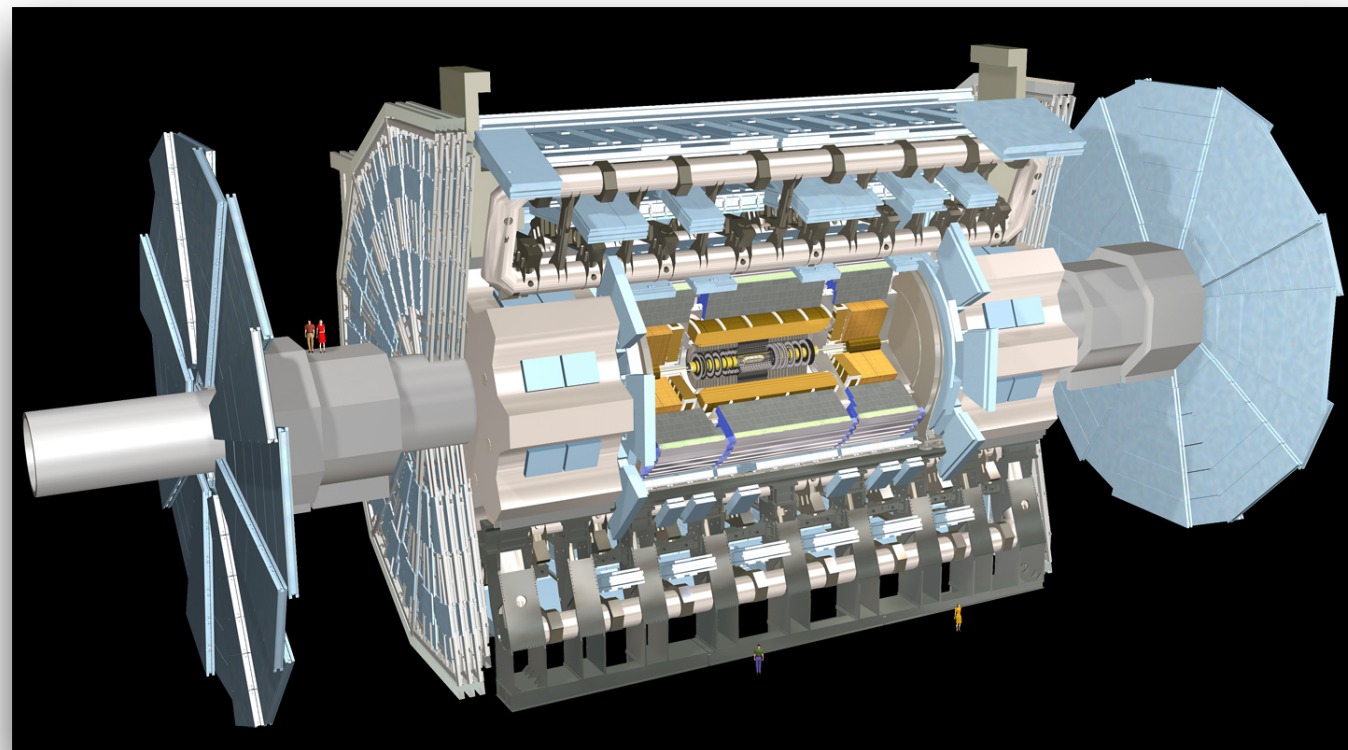
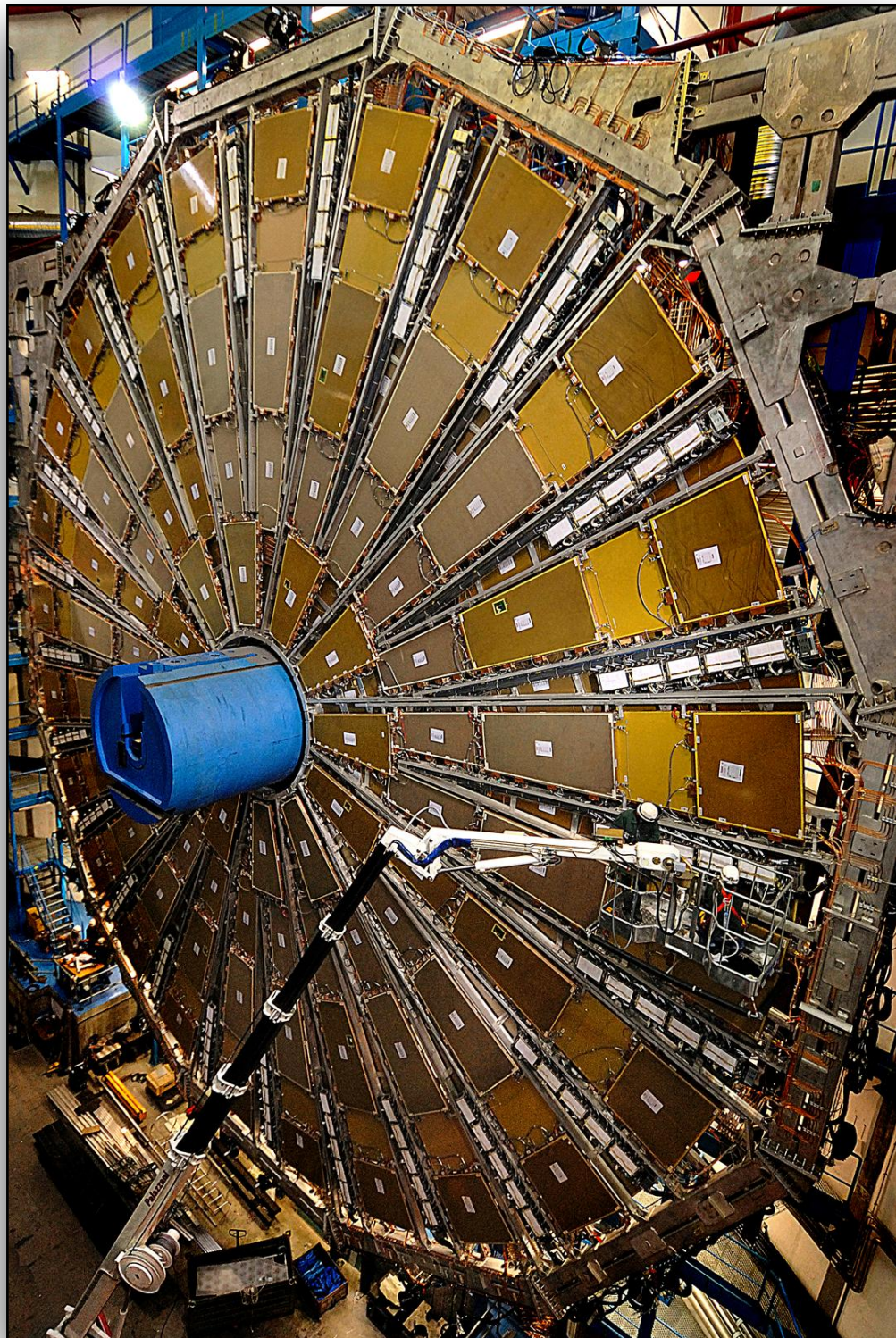
# SABEMOS QUE O MODELO PADRÃO É INCOMPLETO

Os experimentos do CERN buscam descobrir física nova usando estratégias complementares

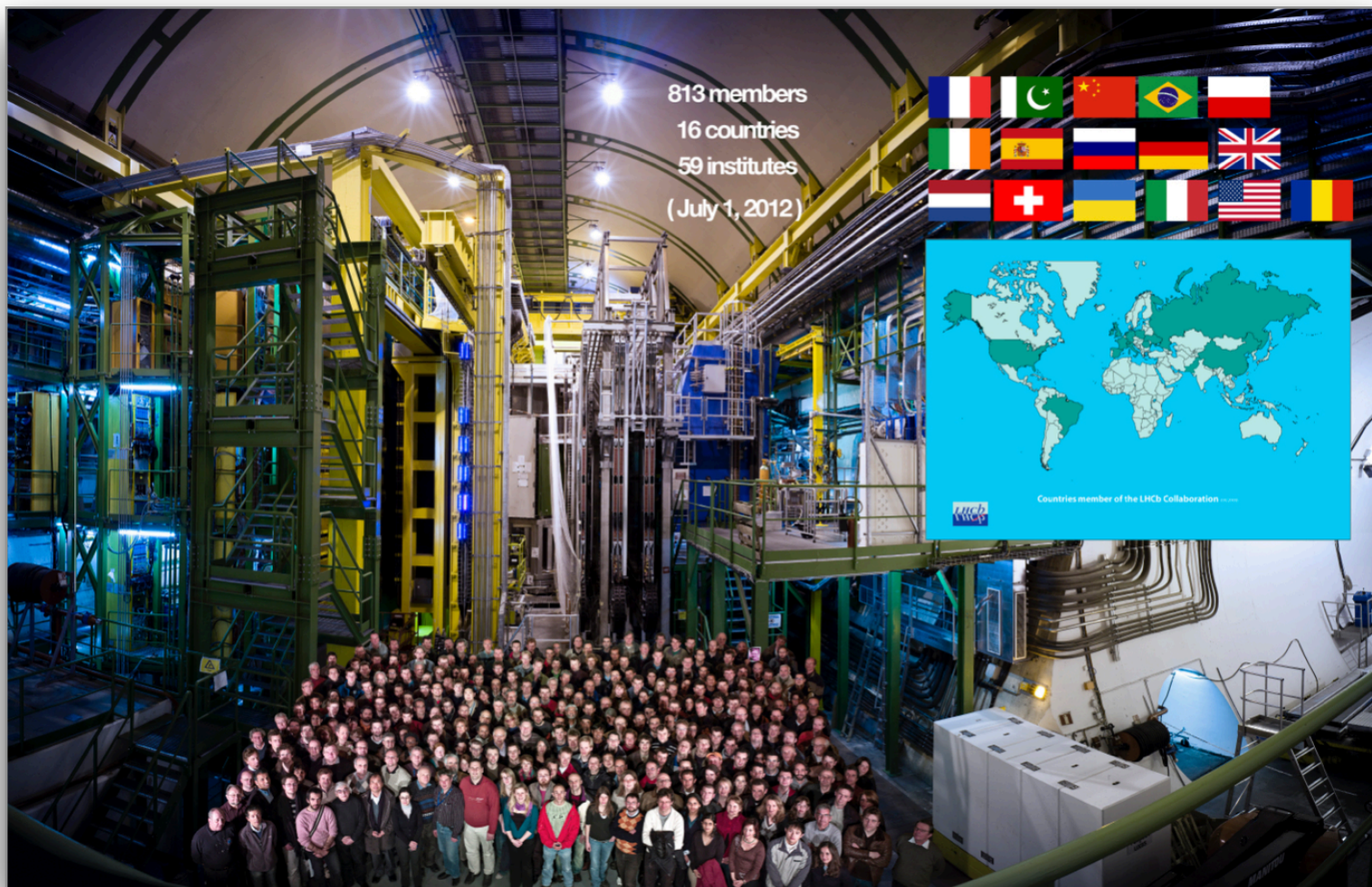




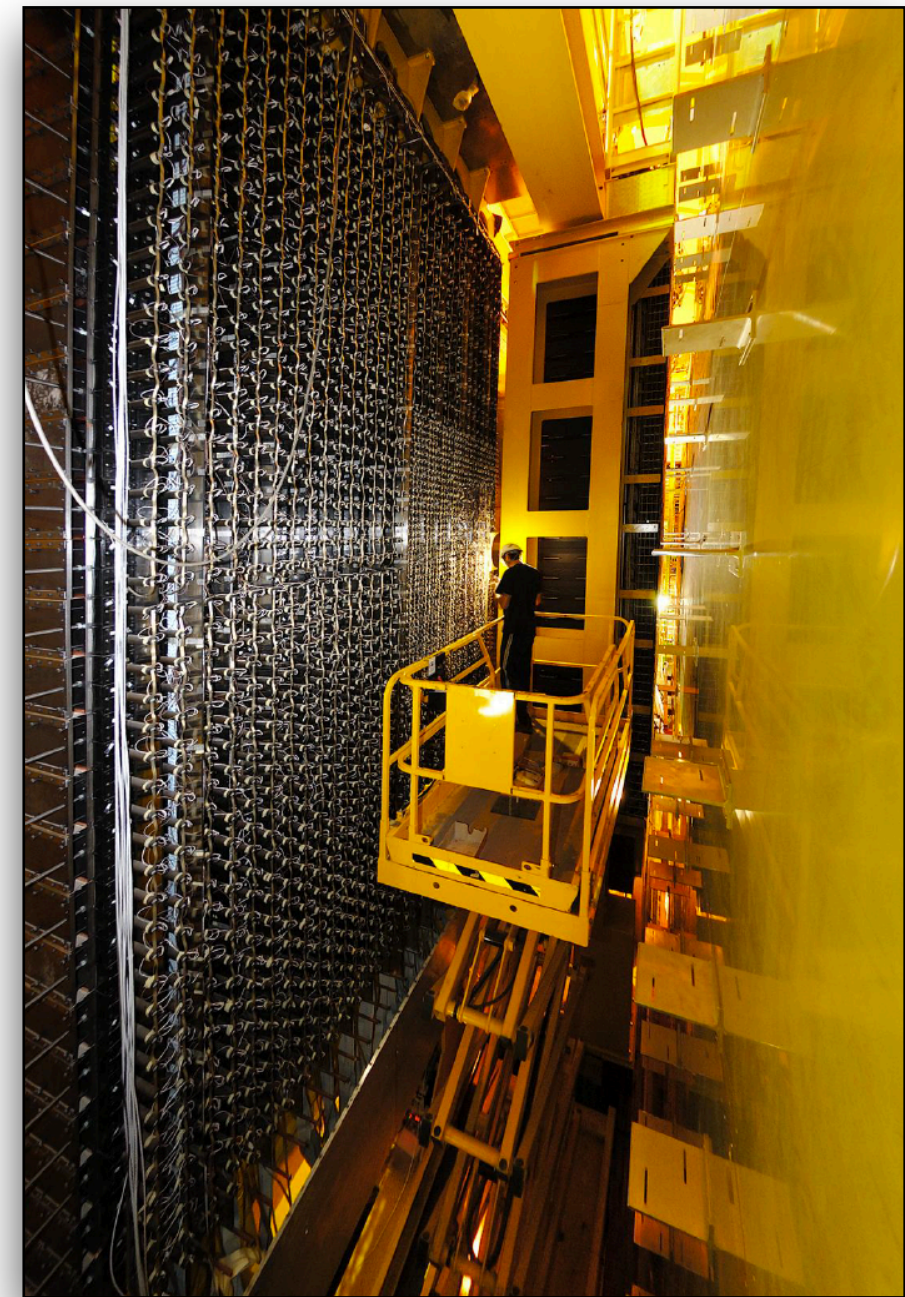
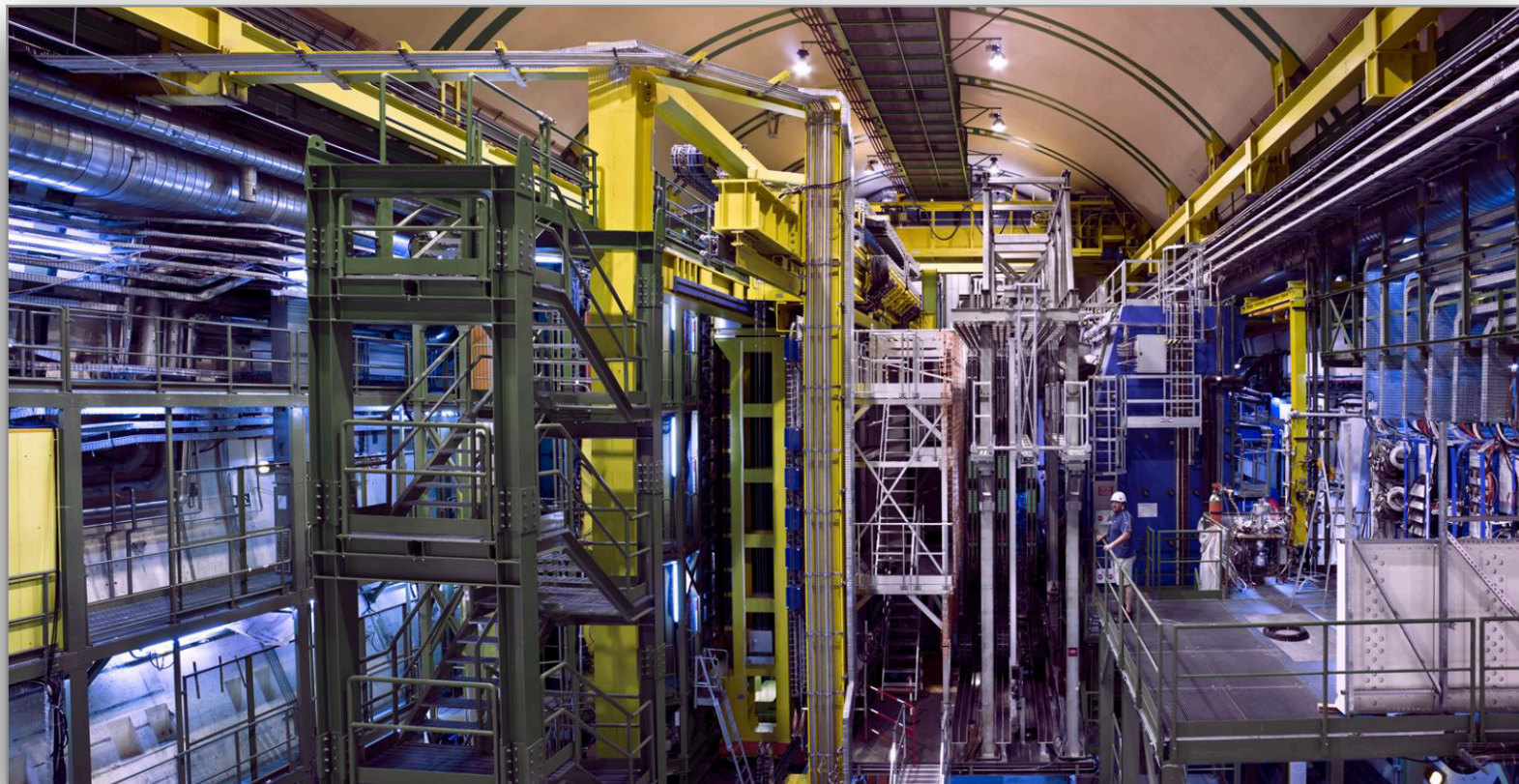
# O detector ATLAS







O experimento LHCb, o menor dos experimentos do CERN, dedicado ao estudo da violação de CP: "apenas" 1000 autores.

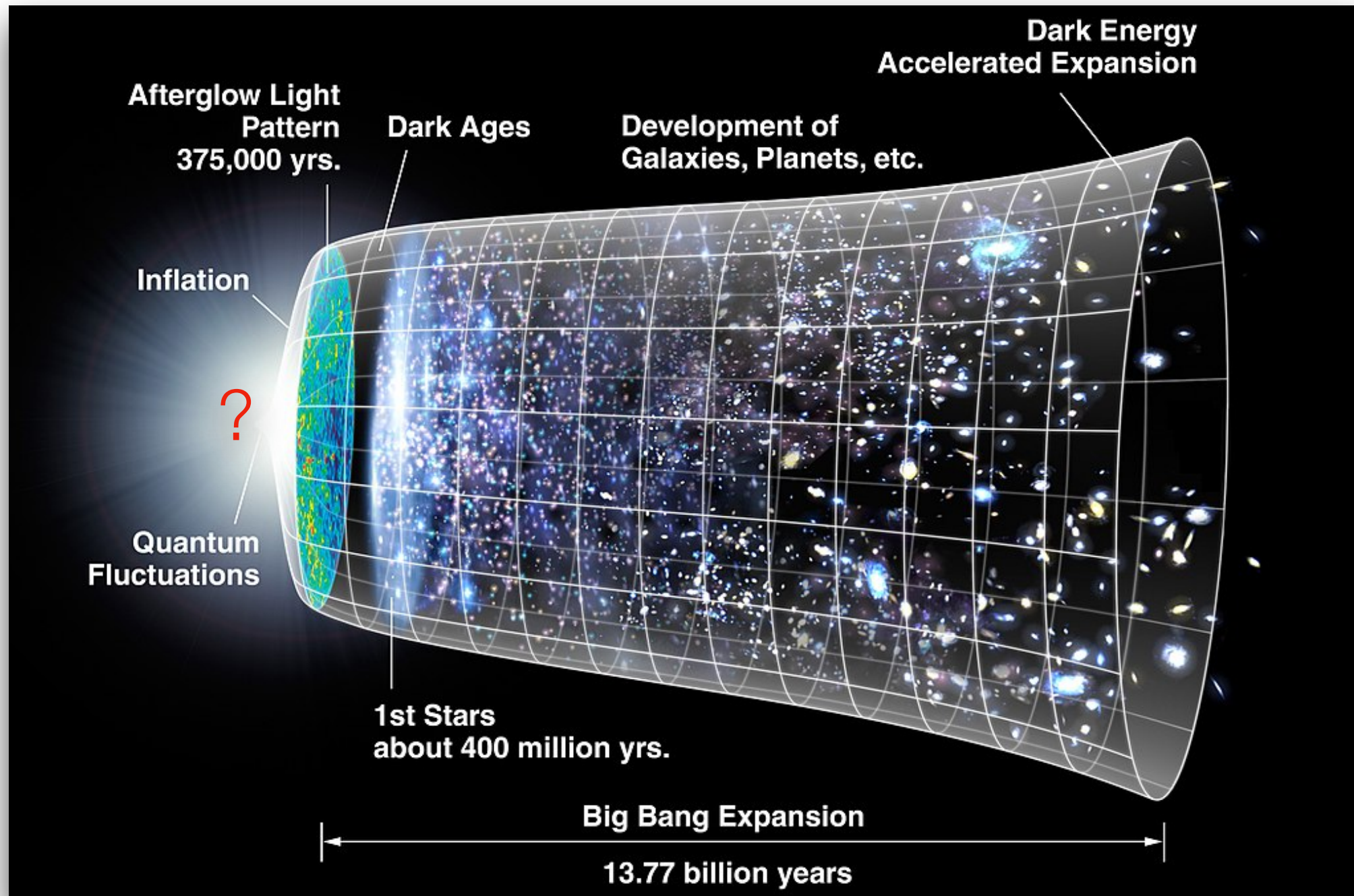




Em 1929, Edwin Hubble fez uma descoberta espetacular:

As galáxias se afastam umas das outras, com velocidade que é proporcional à distância entre elas

O Universo está em expansão!

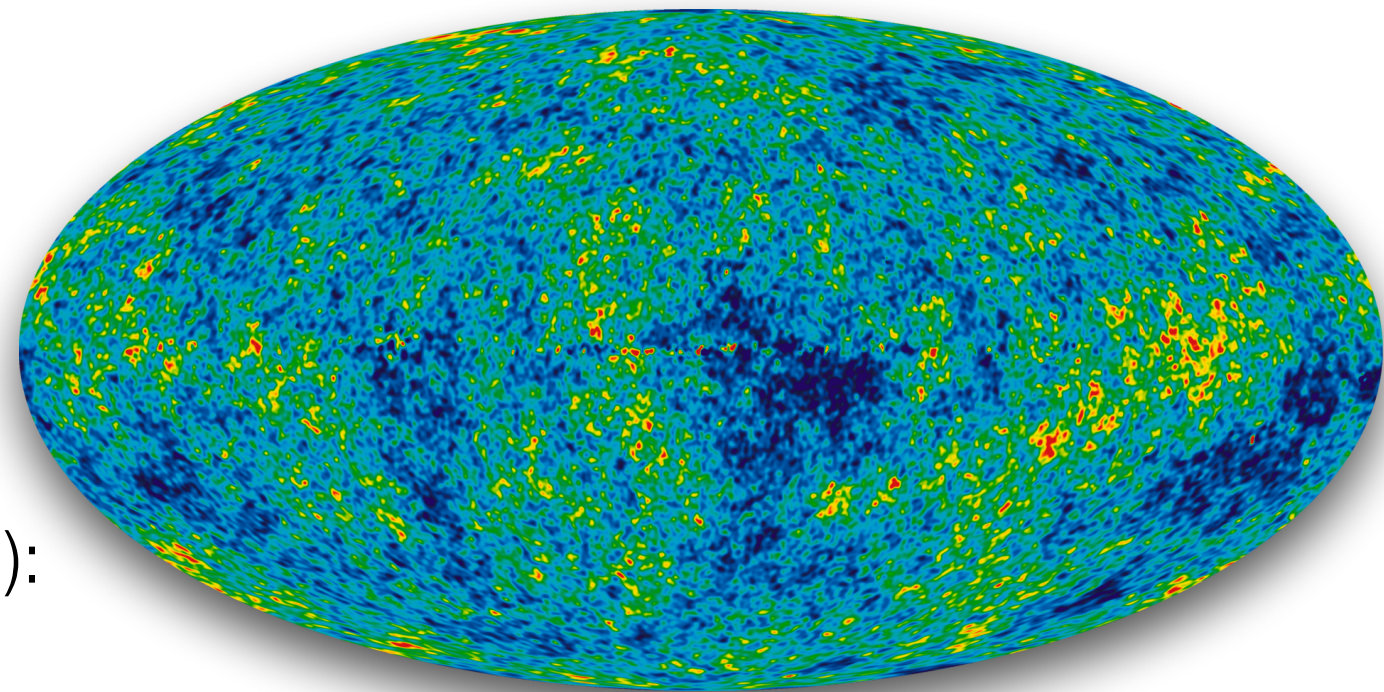


Em 1964, Penzias e Wilson fizeram outra descoberta espetacular: A radiação cósmica de fundo



Modelo Padrão da Cosmologia ( $\Lambda$ CDM):

O Universo evoluiu de um estado primordial ultra quente e denso, há 13.8 bilhões de anos



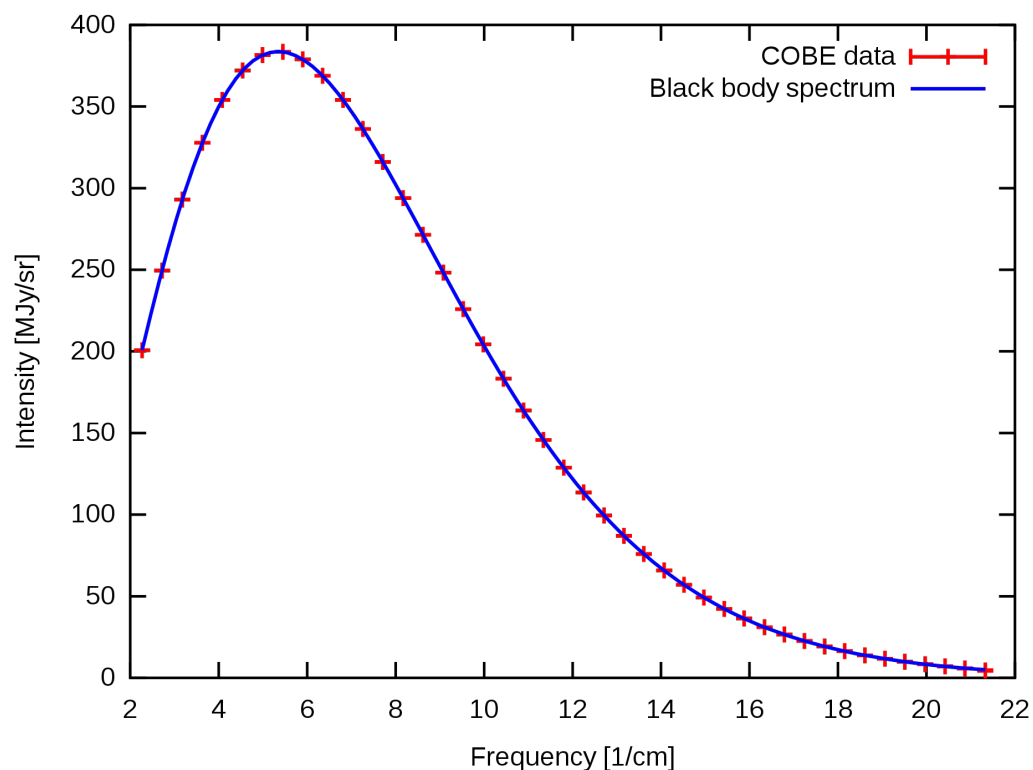
mapa da RCF satélite WMAP

Os fótons puderam se propagar livremente 340 mil anos após o "Big Bang"

A radiação mais antiga que chega aos telescópios (o maior *redshift* possível)

O espectro de frequência da RCF: corpo negro a uma temperatura de 2.73 K. O Universo primordial era um sistema em equilíbrio termodinâmico

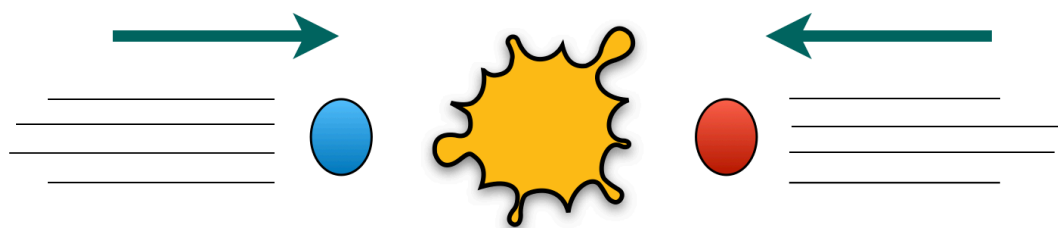
Cosmic microwave background spectrum (from COBE)



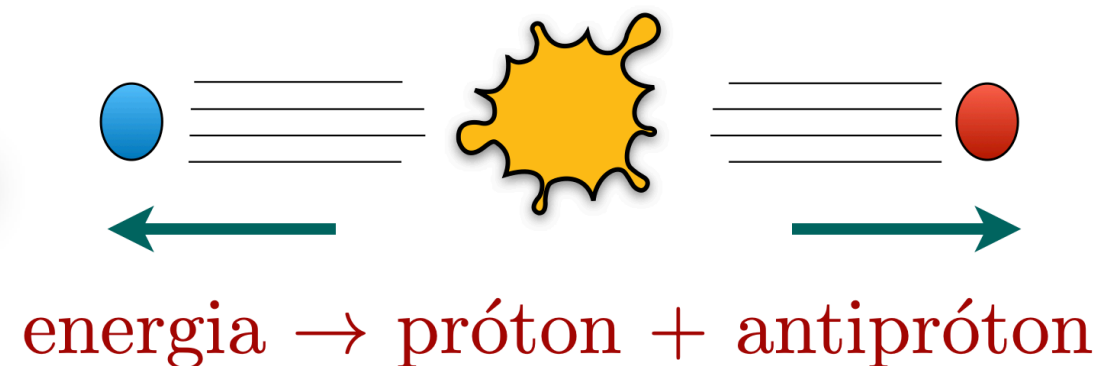


matéria e antimatéria  
são criadas e destruídas aos pares

próton + antipróton → energia



$$E = mc^2$$



Se no Universo primordial houvesse exatamente a mesma quantidade de matéria e antimatéria, hoje só haveria luz.

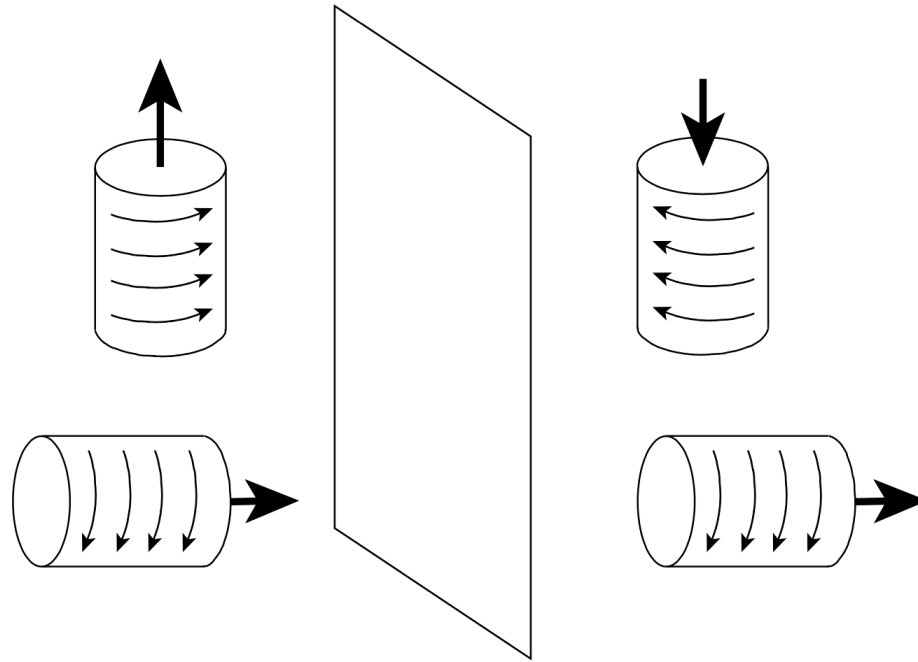
*Nossa existência significa que no início dos tempos havia um excesso de matéria sobre antimatéria*

Matéria e antimatéria devem interagir de forma ligeiramente diferente!

A pergunta óbvia, ainda sem resposta:  
como surgiu o excesso de matéria sobre antimatéria?

Paridade:

$$\mathbf{x} \rightarrow \mathbf{x}_P = -\mathbf{x}$$



vetor polar

$$\mathbf{p} \rightarrow \mathbf{p}_P = -\mathbf{p}$$

pseudo (ou axial) vetor

$$\mathbf{L} \rightarrow \mathbf{L}_P = +\mathbf{L}$$

*Quiralidade: propriedade que distingue um objeto de sua imagem refletida.*

Conjugação de carga: operação que reverte o sinal de todas as cargas de uma partícula

partícula  $\xrightarrow{\mathbf{C}}$  antipartícula

$$e^- \rightarrow e^+,$$

$$\nu \rightarrow \bar{\nu},$$

$$s \rightarrow \bar{s},$$

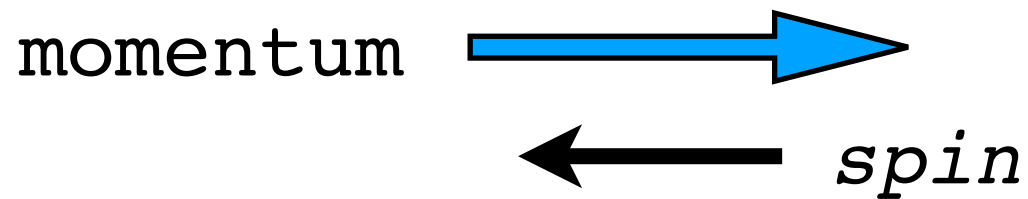
$$c \rightarrow \bar{c},$$

$$b \rightarrow \bar{b}$$

No Modelo Padrão, os neutrinos são partículas de massa nula.

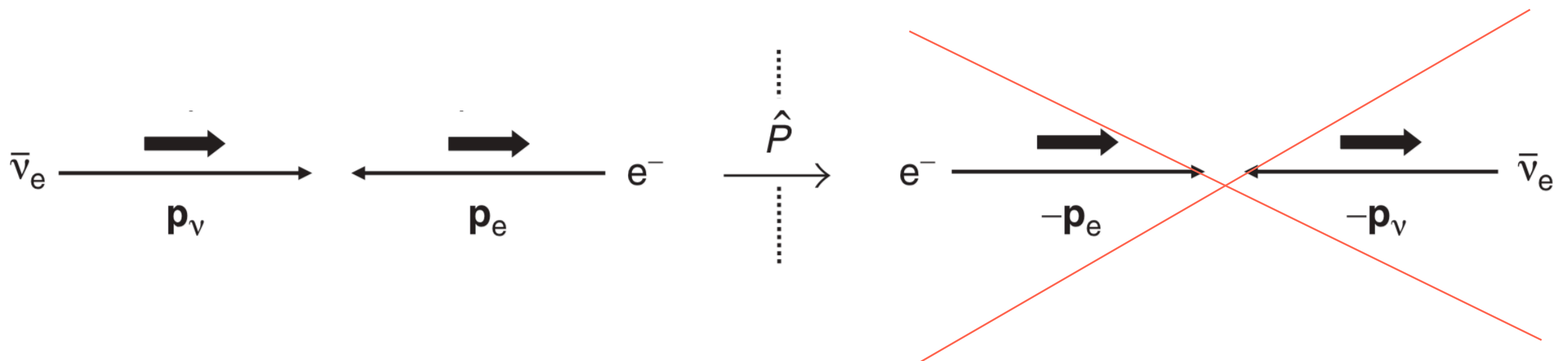
neutrinos: "mão esquerda"

antineutrinos: "mão direita"



No MP, apenas neutrinos de mão esquerda e antineutrinos de mão direita participam das interações fracas.

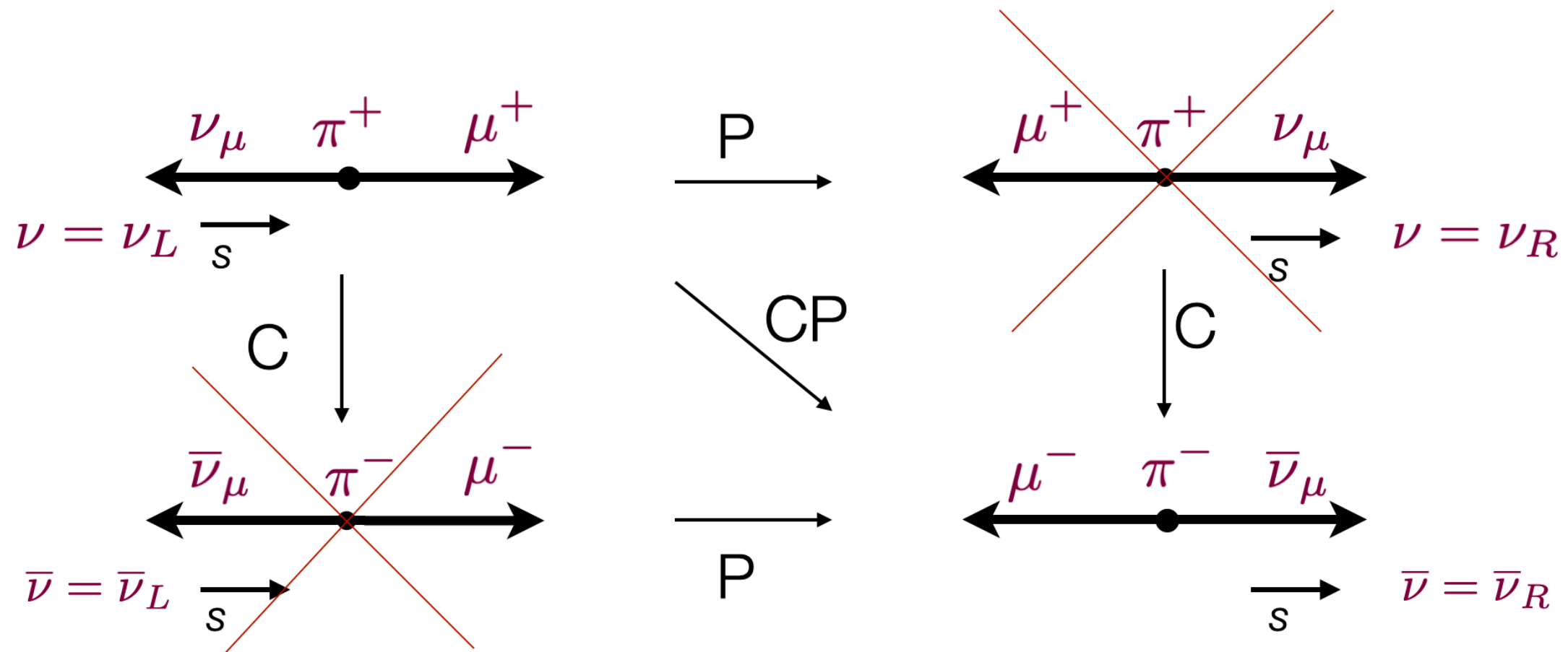
A operação paridade inverte o sentido dos momenta, mas não do spin.



A paridade não é uma simetria das interações fracas!



# Violação de C: $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$



C e P são violadas, mas neste decaimento a combinação CP é conservada.

$$\Gamma(\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_{\mu L}) = \Gamma(\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_{\mu R}) = 0$$

$$\Gamma(\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_{\mu L}) = \Gamma(\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_{\mu R})$$

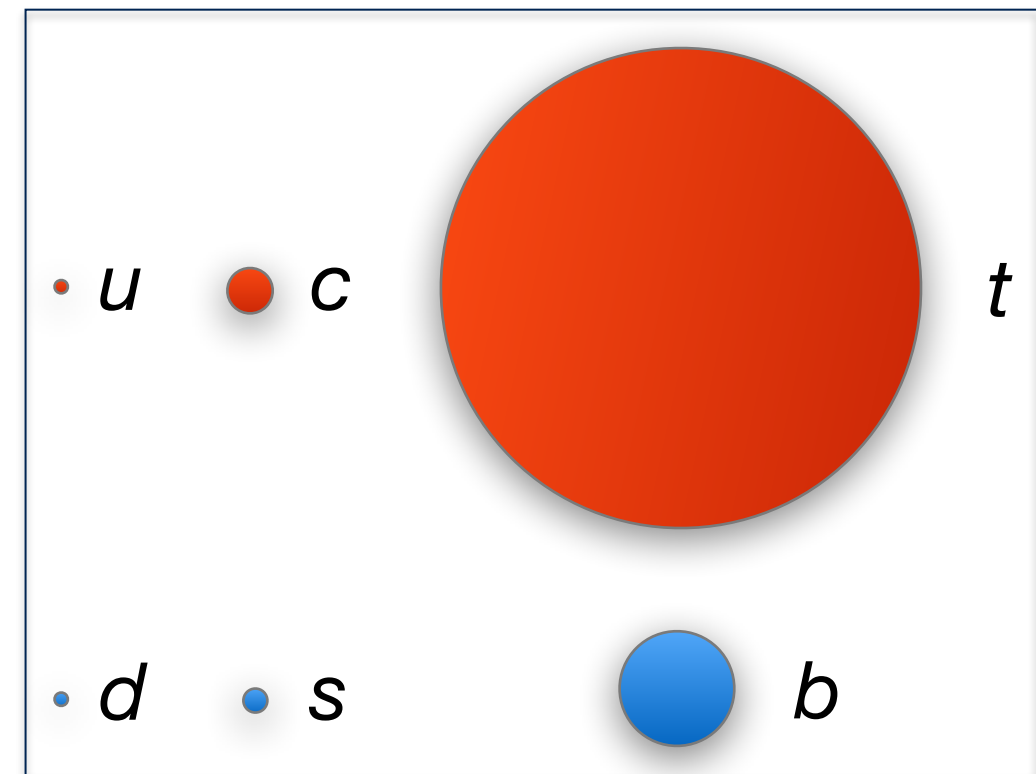
Em outros decaimentos, a simetria CP é violada.

As interações fracas tratam matéria e antimatéria de forma ligeiramente diferente

# A VIOLAÇÃO DE CP NO MP

As massas dos quarks são muito díspares

- Quando interagem, têm sabor bem definido
- Mas se propagam com massa bem definida
- As duas bases se relacionam pela matriz Cabibbo-Kobayashi-Maskawa



$$\begin{array}{l} \text{estados com} \\ \text{massa bem} \\ \text{definida} \end{array} \begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix} \begin{array}{l} \text{estados com} \\ \text{sabor bem} \\ \text{definido} \end{array}$$

matriz CKM (complexa)

4 parâmetros independentes: 3 ângulos (rotação) e 1 fase  $\rightarrow$  *violação de CP*

$$V_{\text{CKM}} \xrightarrow{\text{CP}} V_{\text{CKM}}^* \neq V_{\text{CKM}} \quad \mathcal{L} \xrightarrow{\text{CP}} \mathcal{L}' \neq \mathcal{L}$$

Todas as evidências experimentais indicam que o Universo visível é composto apenas por matéria bariônica.

nucleosíntese primordial:  $\frac{n_B - n_{\bar{B}}}{n_\gamma} \sim 10^{-9} \longrightarrow$  para cada  $10^9$  antibárions,  $10^9 + 1$  bárions, resultando em  $10^9$  fótons e 1 bárion

Como surgiu a prevalência da matéria sobre a antimatéria?

Andrey Sakharov, em 1967, propôs três condições necessárias:

- 1) violação do número bariônico;
- 2) violação de C e CP;
- 3) processos que violam o número bariônico devem ocorrer fora do equilíbrio térmico.

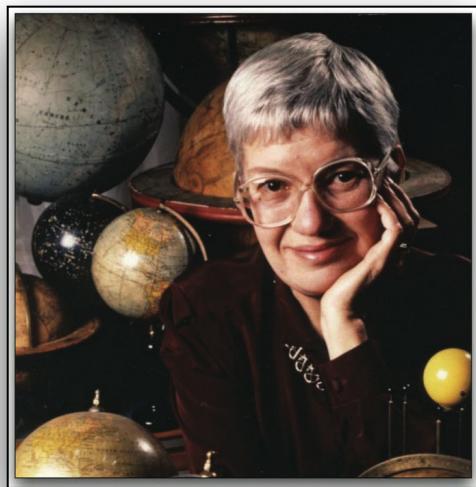
No MP, só há violação de CP nos quarks. Mas é insuficiente, por ordens de grandeza, para reproduzir a assimetria observada no Universo.

Novos mecanismos de violação de CP devem existir, envolvendo novas partículas e revelando simetrias mais fundamentais.



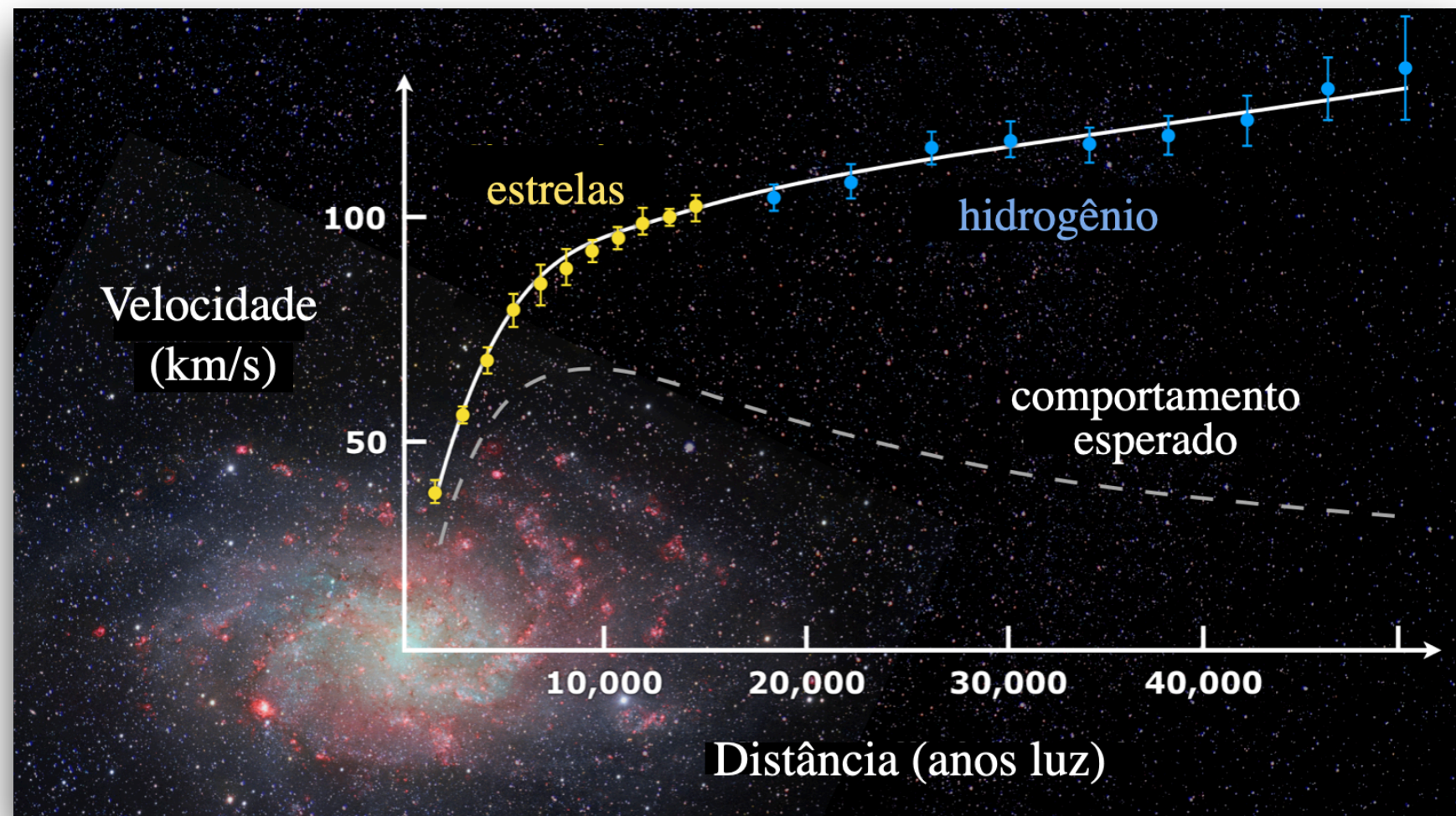
# OUTROS ENIGMAS NOS DESAFIAM: O LADO ESCURO DO UNIVERSO

EM 1846, O PLANETA NETUNO FOI  
DESCOBERTO GRAÇAS AO EFEITO  
DA SUA GRAVIDADE SOBRE A  
ÓRBITA DE URANO.



Vera Rubin, astrônoma  
e ardorosa defensora  
da participação  
feminina na Ciência.

Em 1970, Vera Rubin descobriu  
que no Universo há muito mais  
matéria do que supúnhamos.



A **matéria escura**: invisível aos telescópios pois não interage com a luz,  
ou de qualquer outra forma conhecida. Detectada apenas pela gravidade

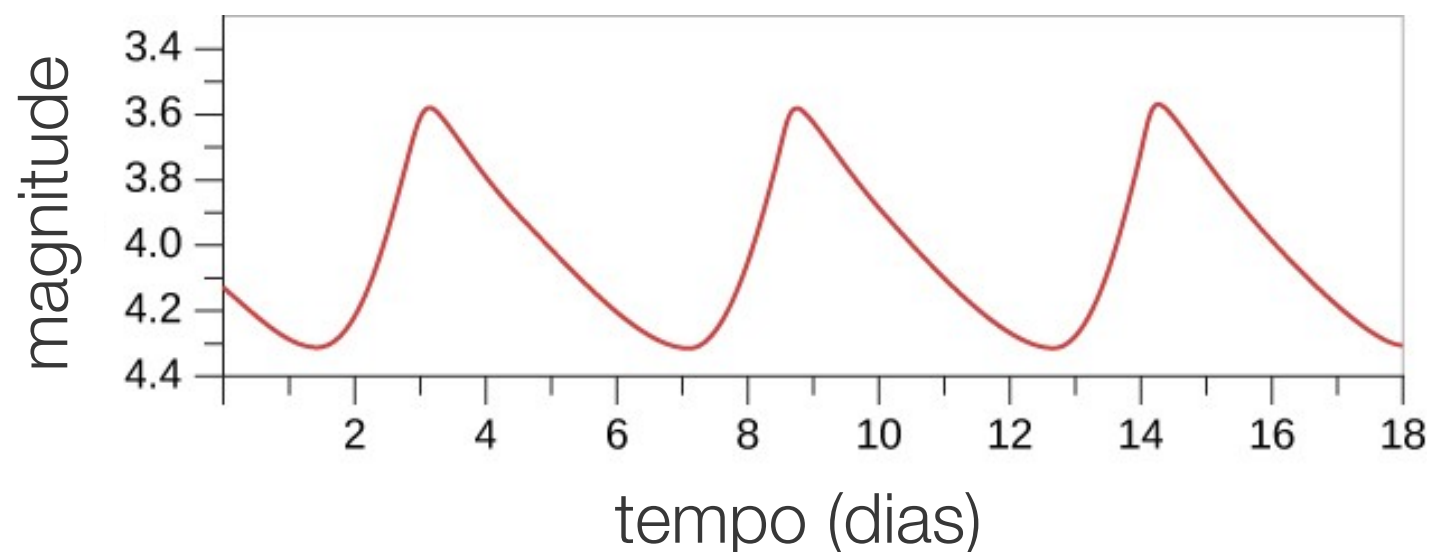
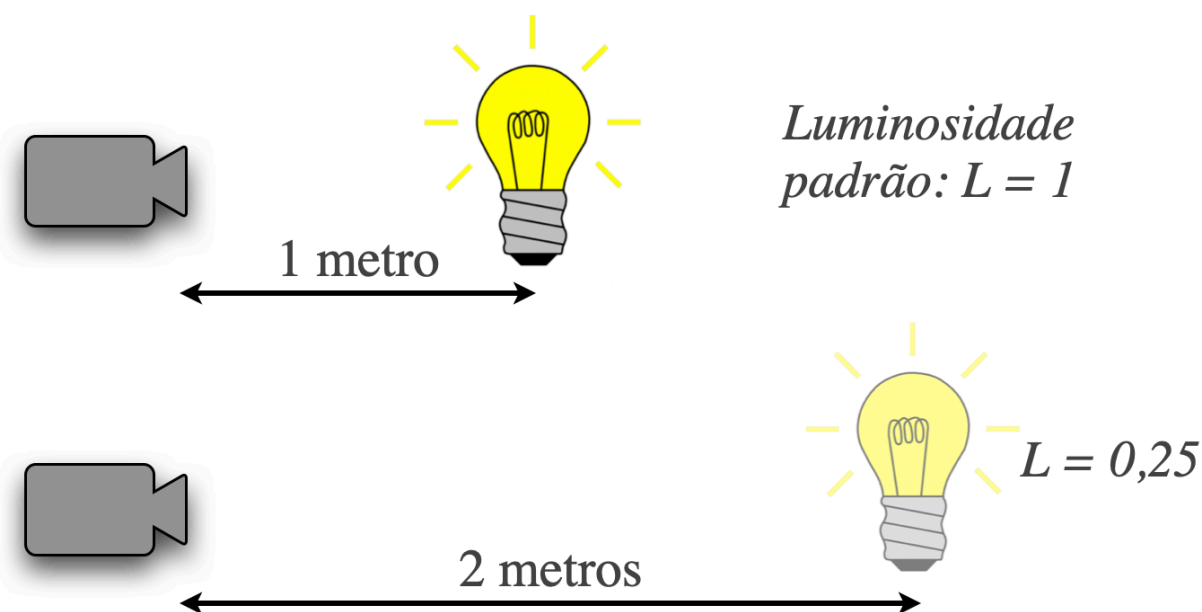
# ENERGIA ESCURA

Há diferentes técnicas para medir distâncias dos objetos celestes.  
O uso de "velas padrão" é uma delas.

A luminosidade diminui com o quadrado da distância. Se a distância da fonte dobra, seu brilho se reduz à quarta parte.

Conhecendo o brilho intrínseco de uma fonte, podemos inferir a sua distância medindo sua luminosidade aparente

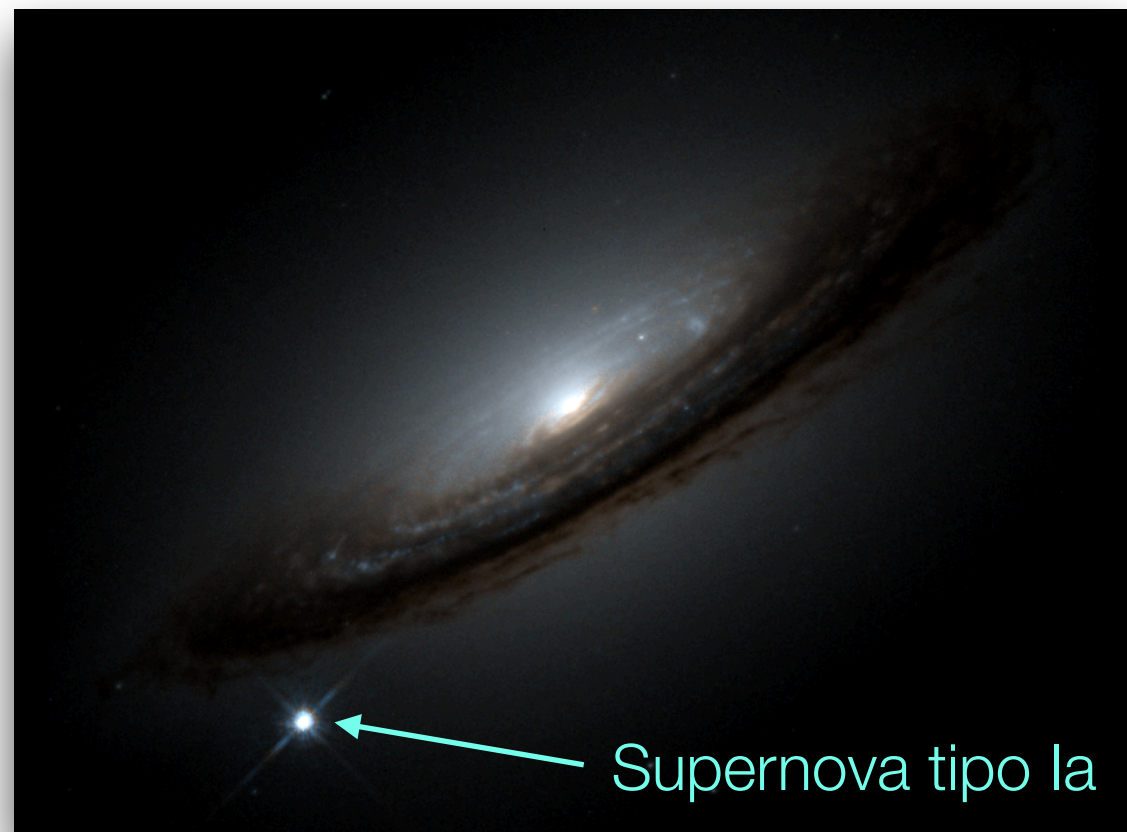
As estrelas *cefeidas* são "velas padrão": estrelas gigantes amarelas que pulsam, e cujo brilho varia regularmente com o tempo.





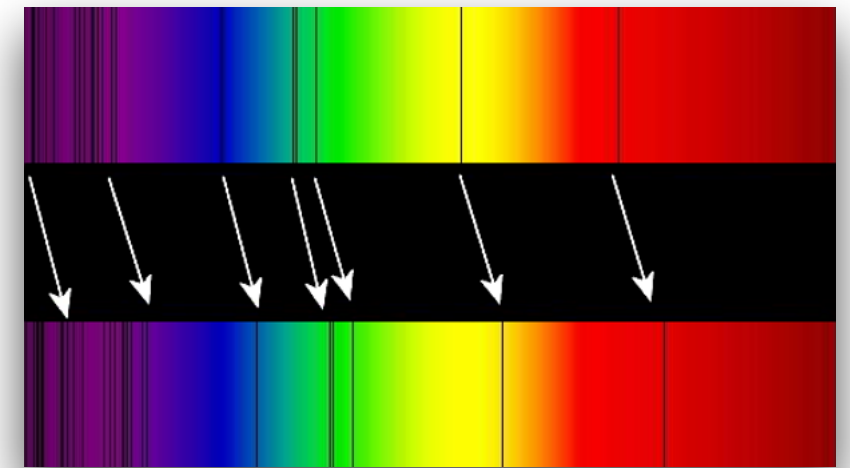
*Redshift* (Hubble, 1929): de galáxias se afastam umas das outras com velocidade proporcional à distância entre elas,  $v = H d$ .

Supernovas tipo 1a também são "velas padrão": brilho intrínseco conhecido.



NASA

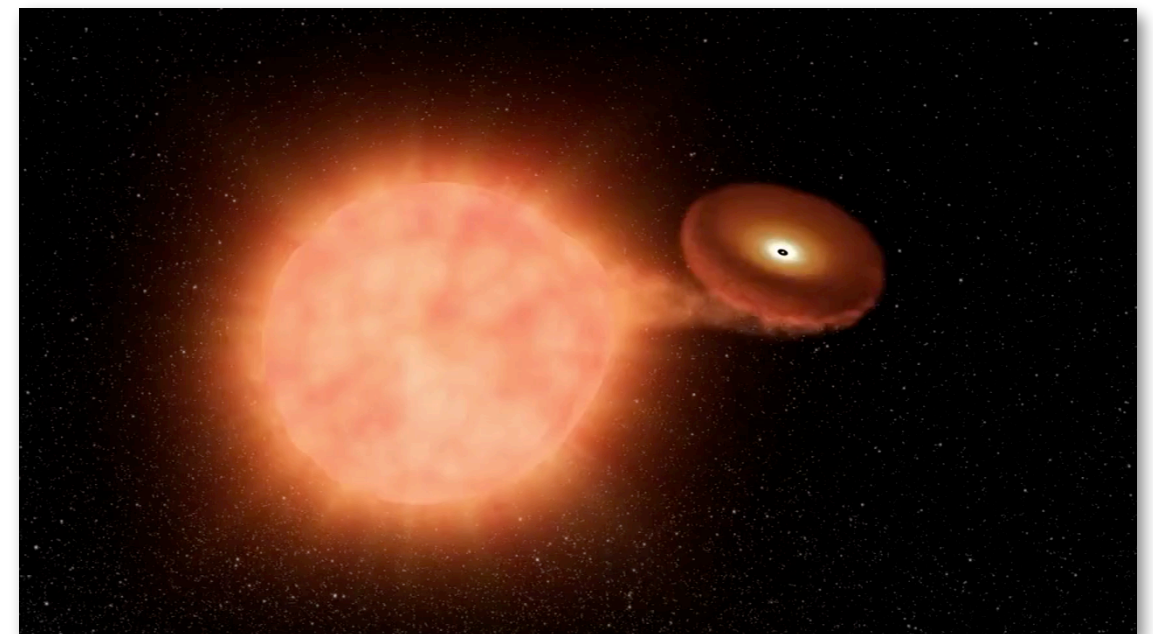
posição das linhas espectrais vistas em laboratório



*redshift:*

posição das linhas espectrais na luz de uma galáxia

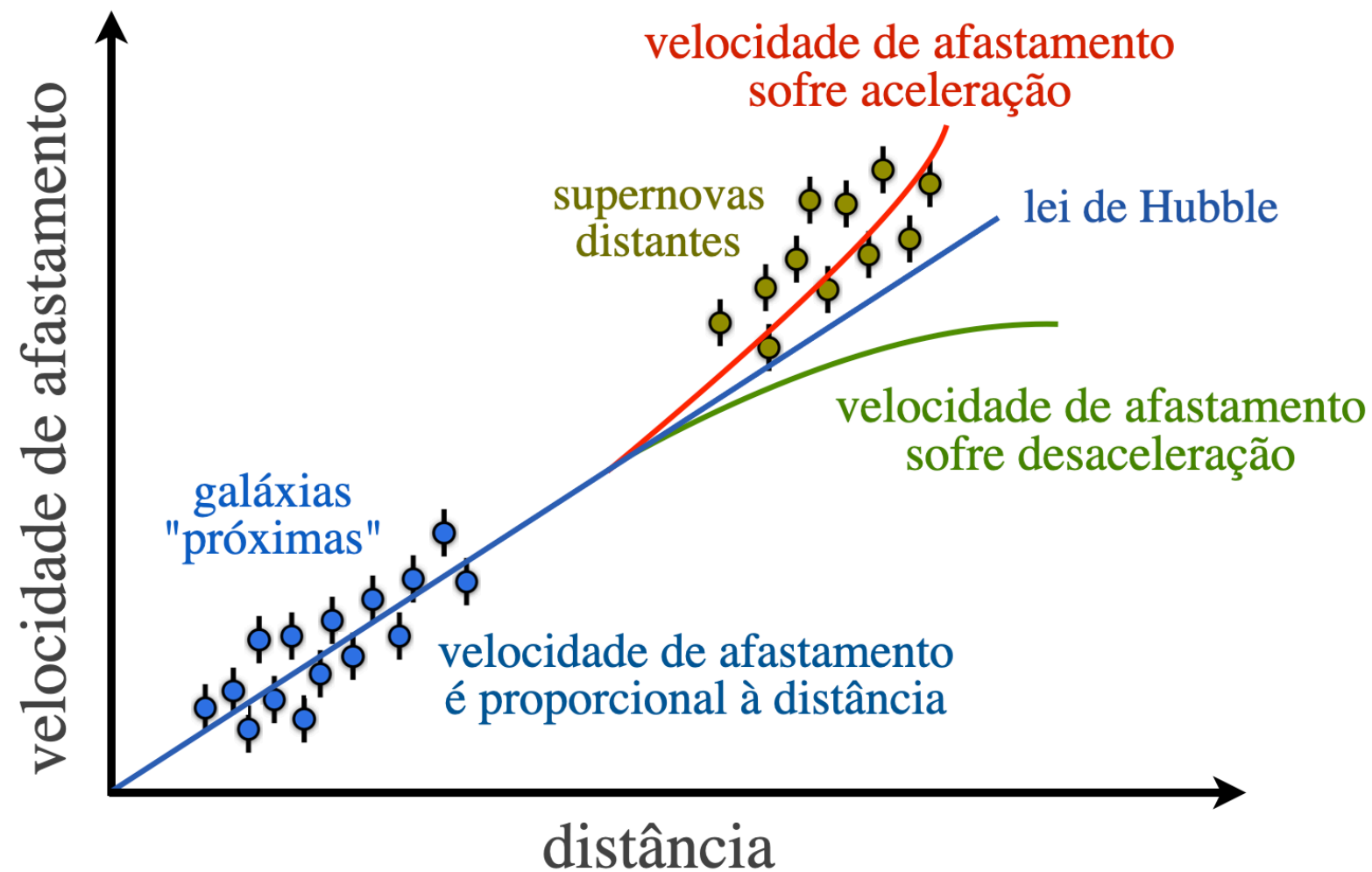
Supernovas tipo 1a: explosão de uma anã branca em sistemas binários.





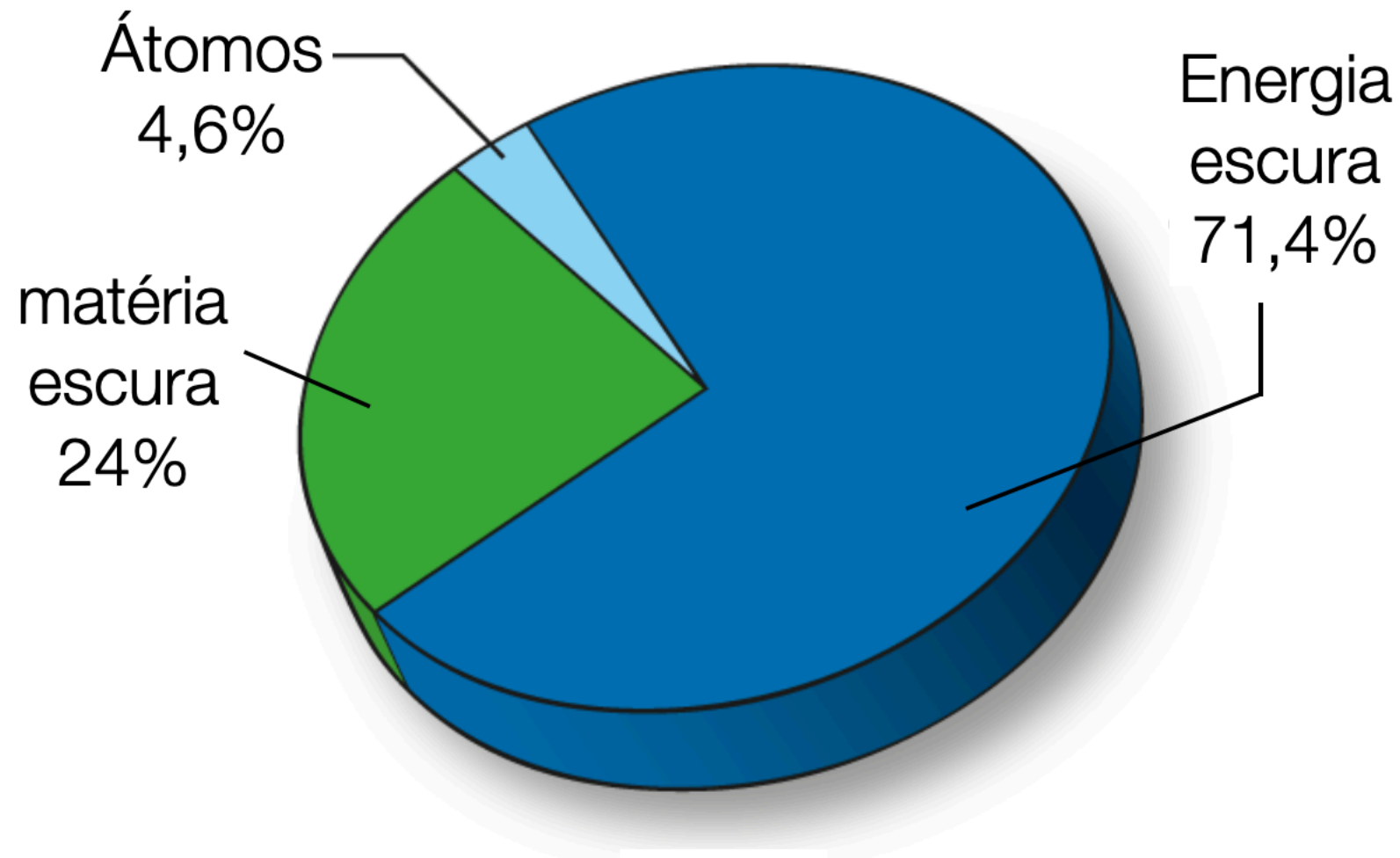
Supernovae 1a são muito brilhantes: podem ser observadas mesmo estando muito distantes

A análise do *redshift* de galáxias distantes, em 1998, demonstrou que o Universo se expande aceleradamente.



A causa dessa expansão acelerada seria a **energia escura**, uma forma hipotética de energia, sobre a qual quase nada sabemos.

NOS ÚLTIMOS 120 ANOS APRENDEMOS MAIS SOBRE A NATUREZA QUE EM TODOS OS MILÊNIOS ANTERIORES.



Mas 95% do conteúdo do Universo ainda é desconhecido!

"A Natureza ama esconder-se." (Heráclito, 480 a.C.)

NÓS, HUMANOS, AMAMOS DECIFRÁ-LA.



# PARTÍCULAS PARA TODOS

Alberto  
Reis



Lançado em  
setembro de 2021

Disponível gratuitamente (PDF) em  
[https://www2.cbpf.br/pt-br/livros/  
particulas-para-todos](https://www2.cbpf.br/pt-br/livros/particulas-para-todos)

ou, no formato kindle, em  
[https://www.amazon.com.br/  
Part%C3%ADculas-para-todos-Alberto-  
Corr%C3%AAa-ebook/dp/B09FRHBD2S](https://www.amazon.com.br/Part%C3%ADculas-para-todos-Alberto-Corr%C3%AAa-ebook/dp/B09FRHBD2S)