

Instrumentação para Física de partículas

Alberto Reis

I - Modelo Padrão das partículas elementares

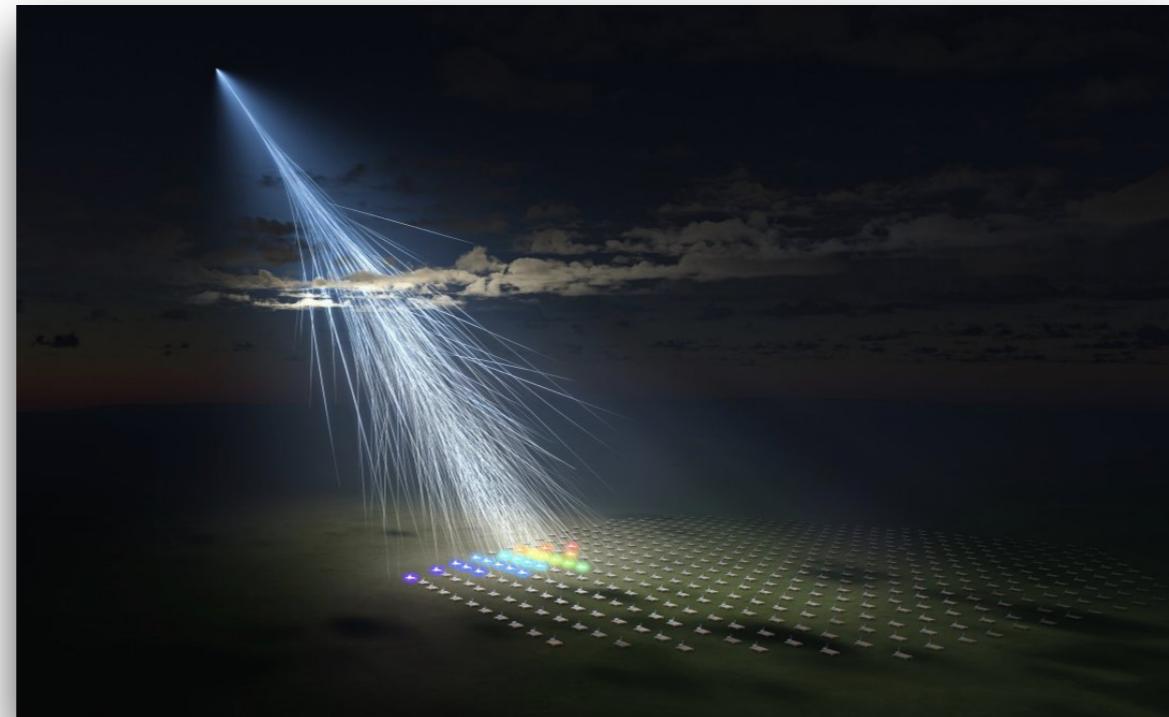
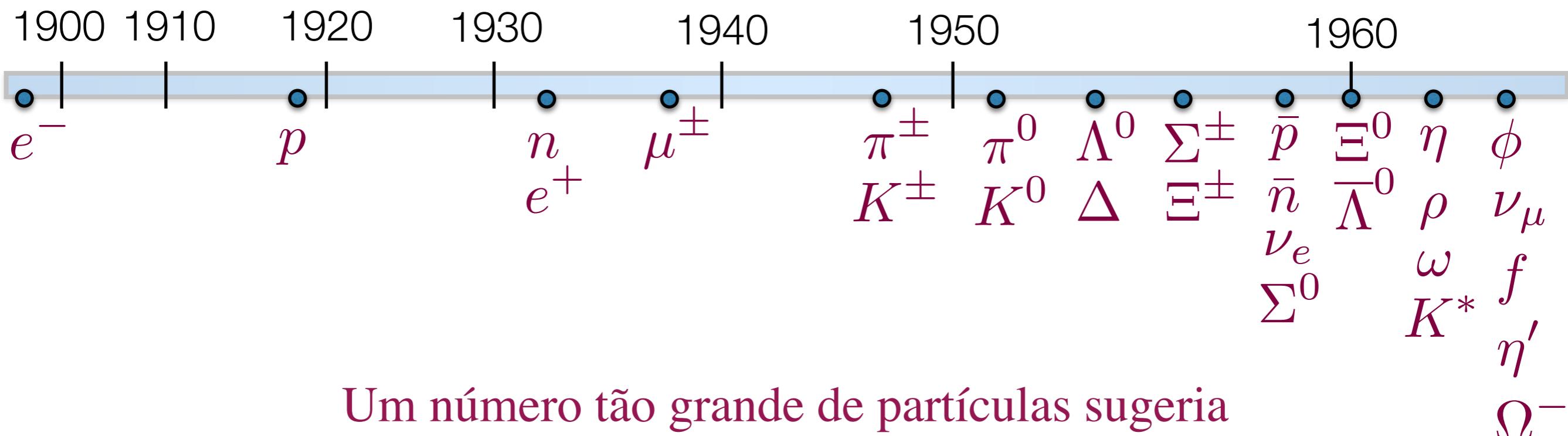


Imagen: Tyuunosuke Tajkeshige



Hádrons

Em meados dos anos 1960, mais de cem partículas “elementares”: os *hádrons*, classificados em mésons e bárions.

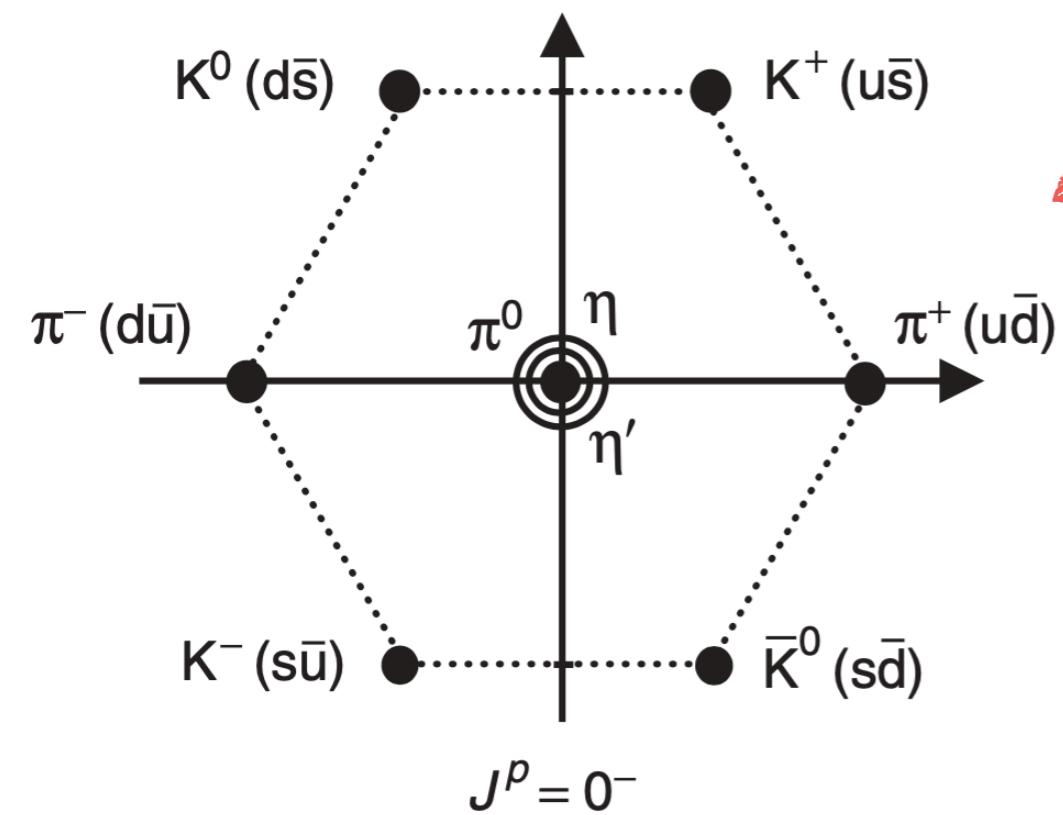
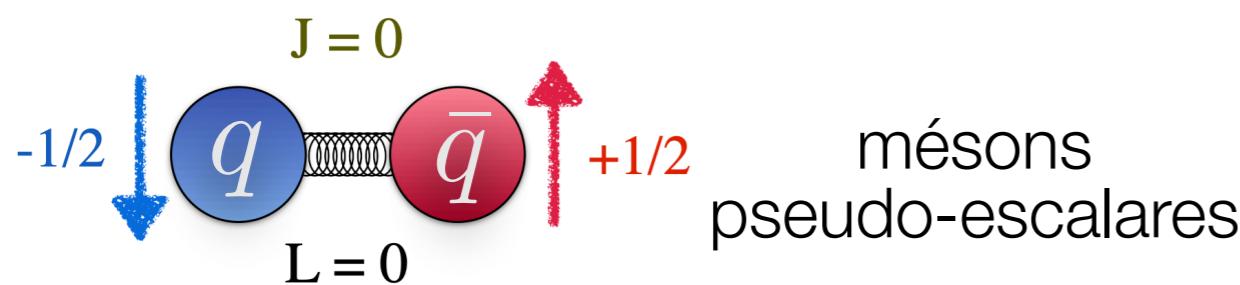
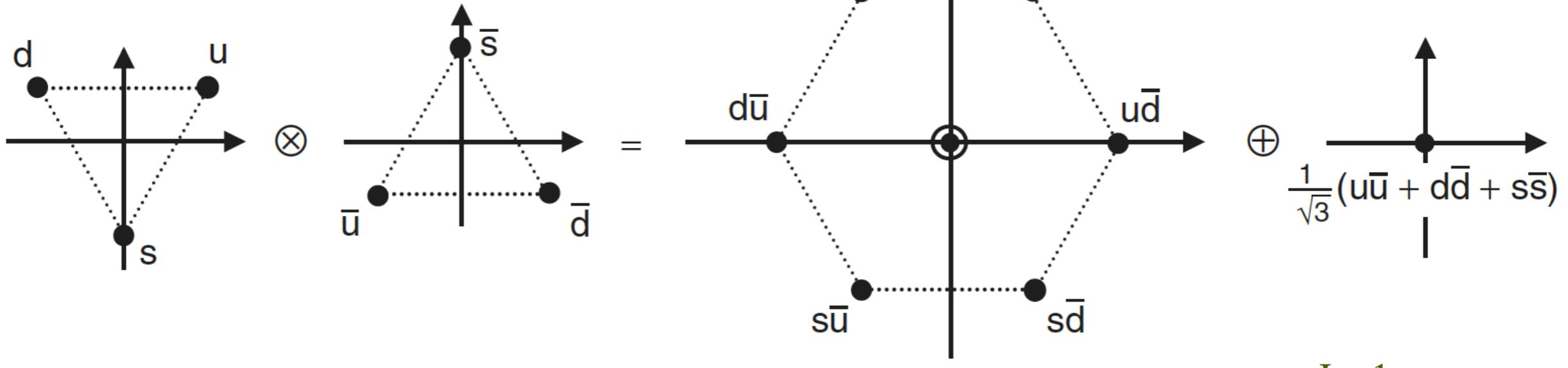


Um número tão grande de partículas sugeria a existência de estruturas mais fundamentais.

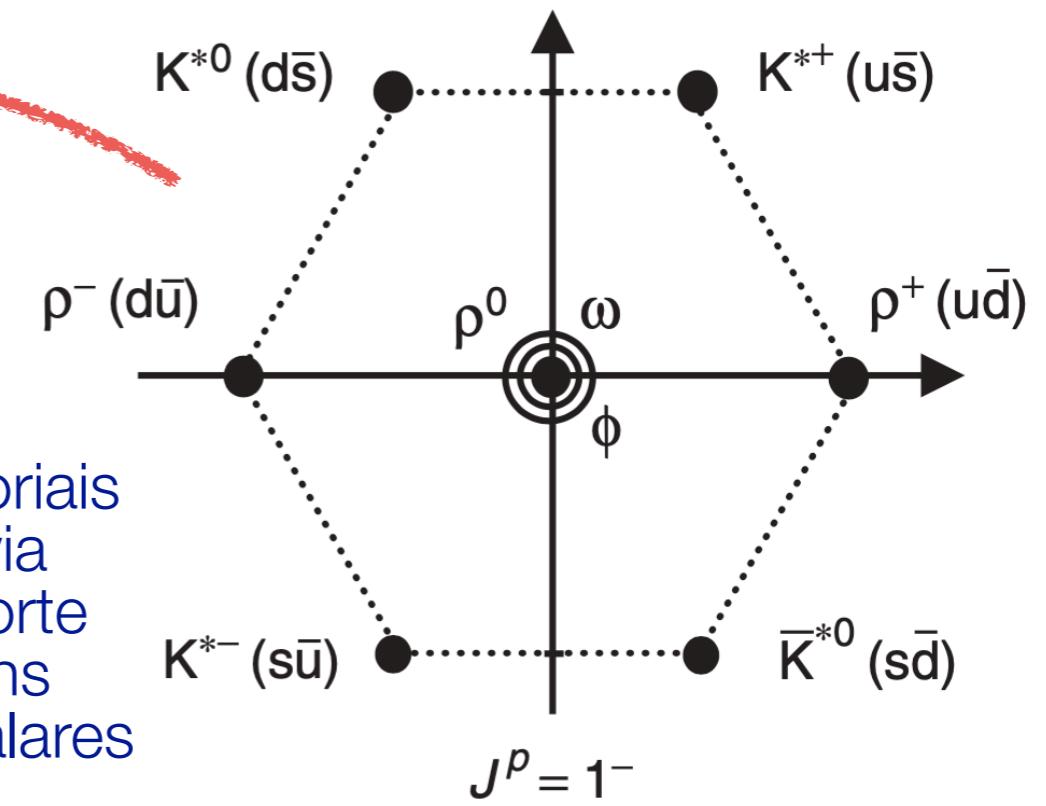
1964: Murray Gell-Mann e George Zweig propuseram um esquema para classificação dos hádrons baseado na ideia de *quarks*, estranhos férmions (partículas com *spin* semi inteiro) com carga fracionária.

Mésons e bárions: *partículas compostas por quarks e antiquarks*

mésons no modelo a quarks



mésons
pseudo-escalares



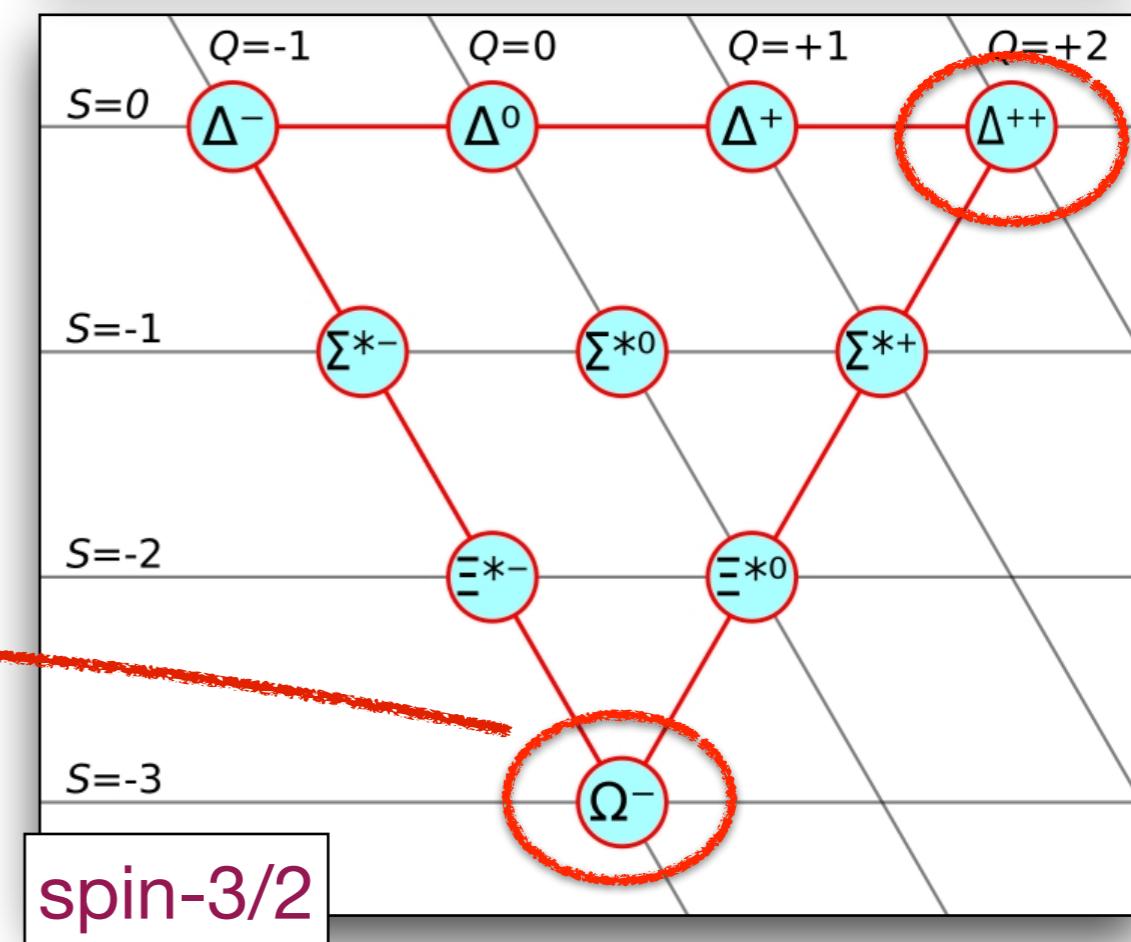
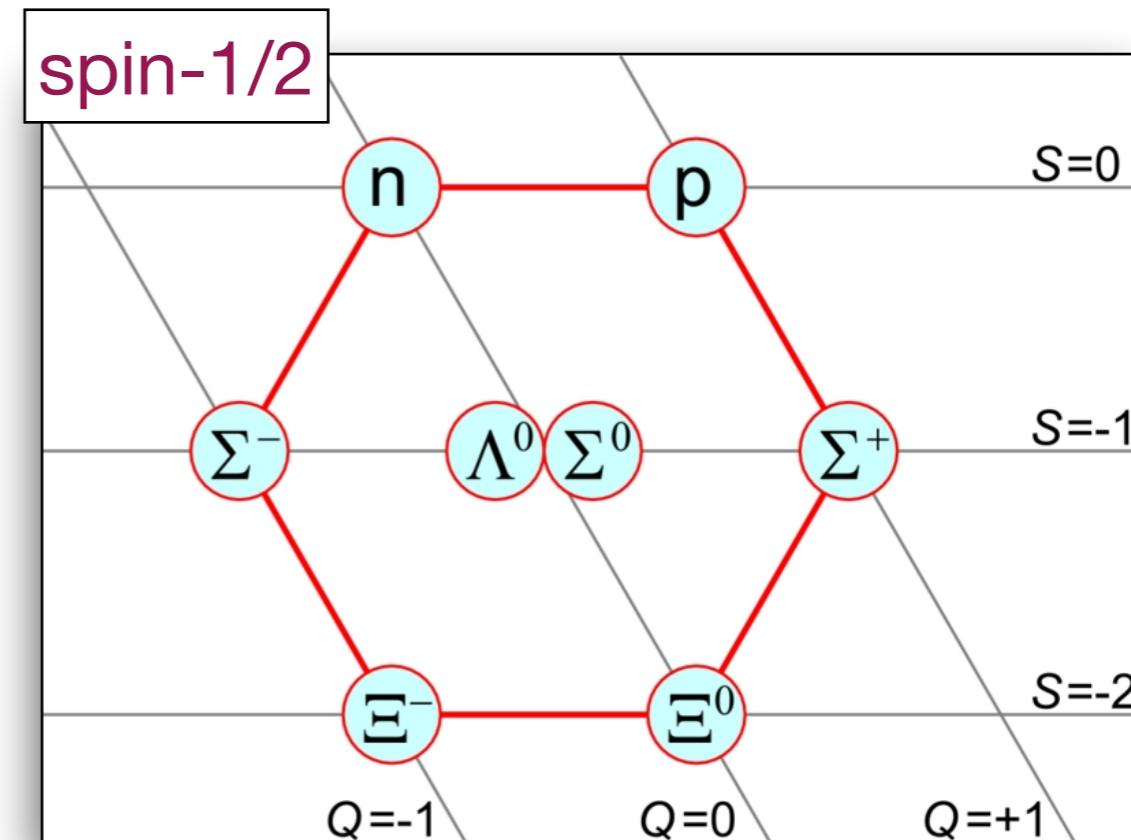
mésons
vetoriais
decaem via
interação forte
em mésons
pseudo-escalares

Bárions: estados ligados de três quarks.

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

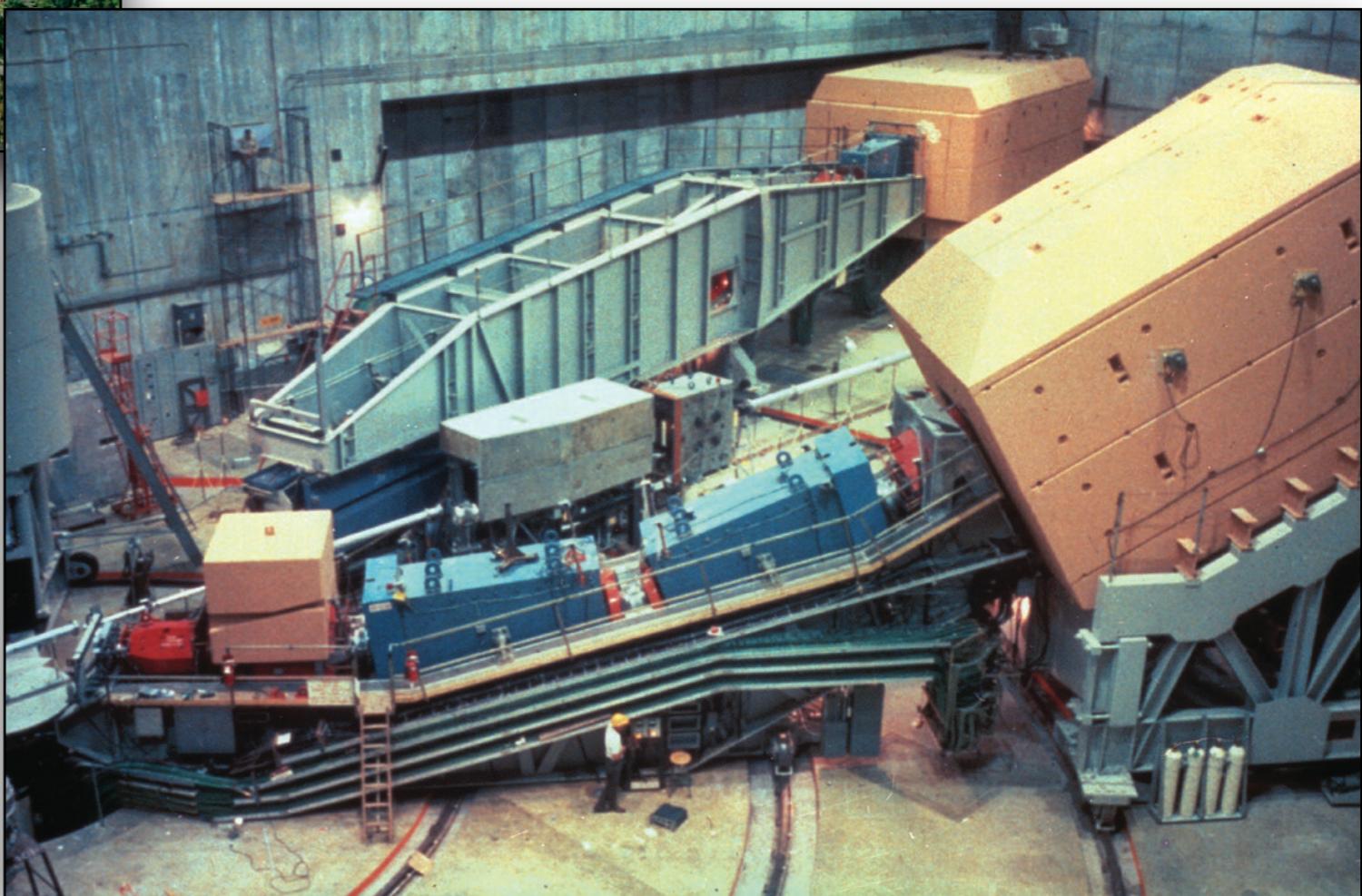
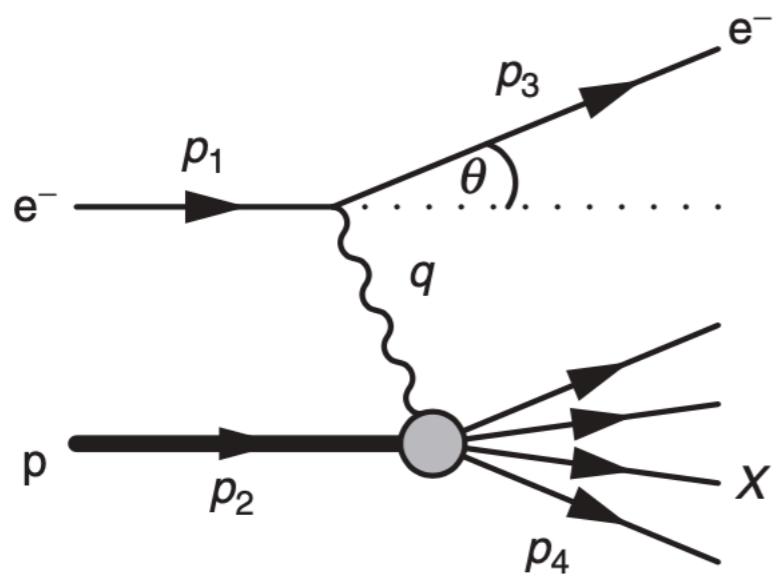
M. Han e Y. Nambu postularam a existência de uma *nova carga, a “cor”*, *a fonte da força forte*. Cada quark poderia ter três cores distintas.

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

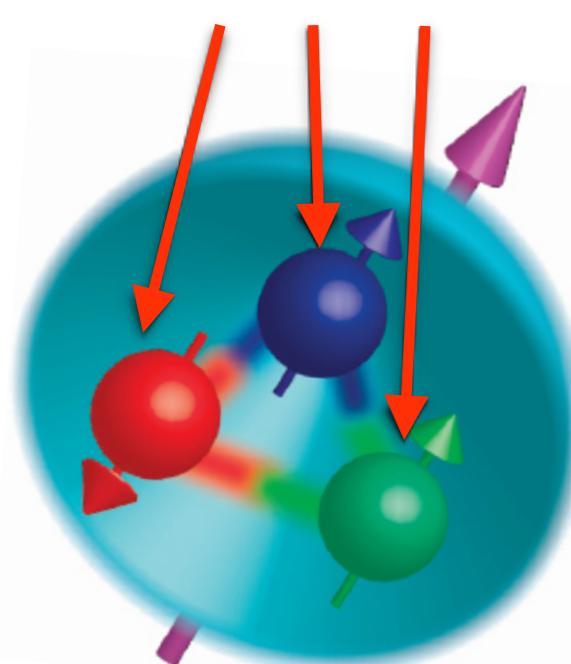
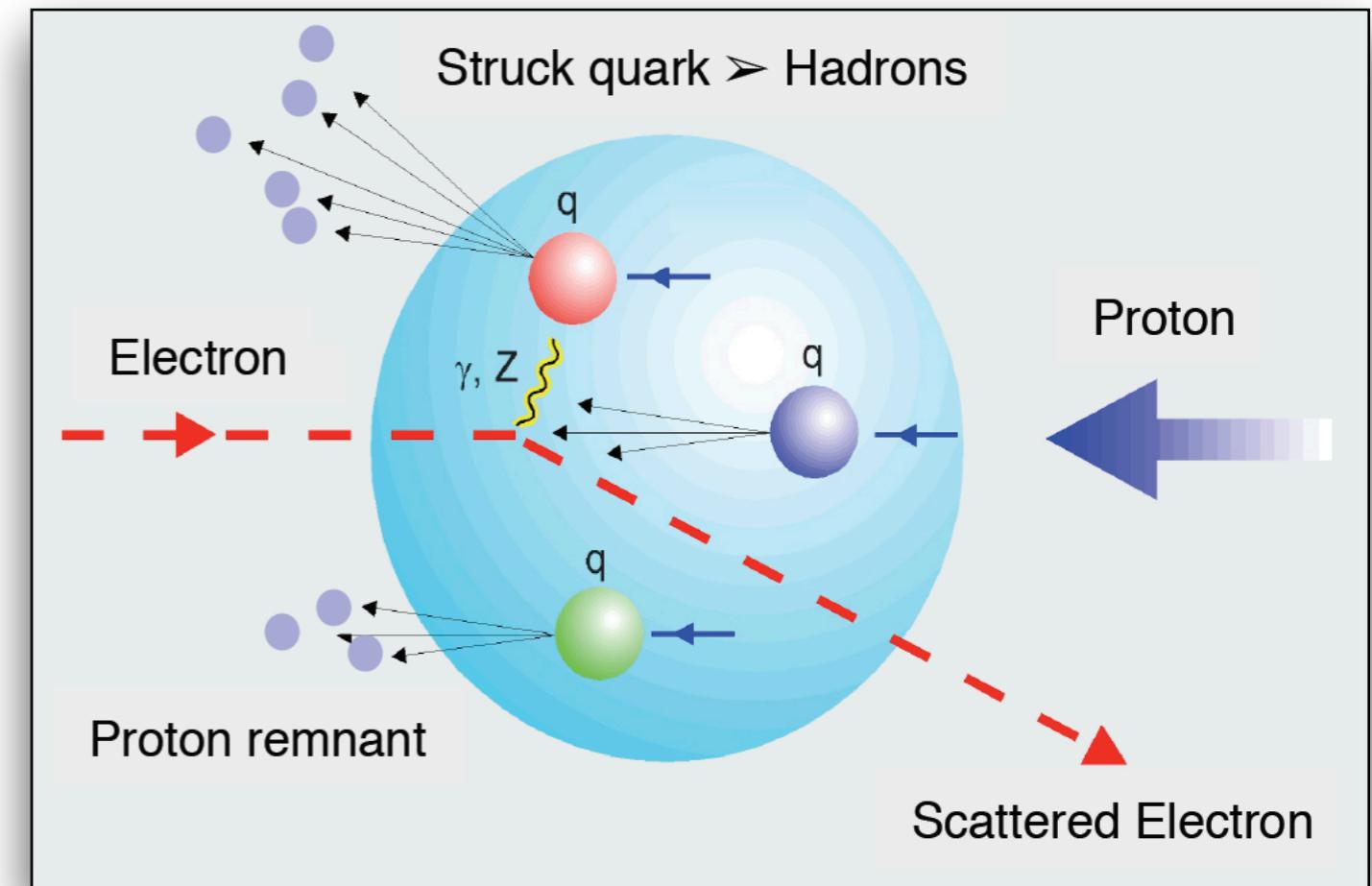


Em 1968, no SLAC (EUA), surgiram as primeiras evidências diretas da existência dos quarks.

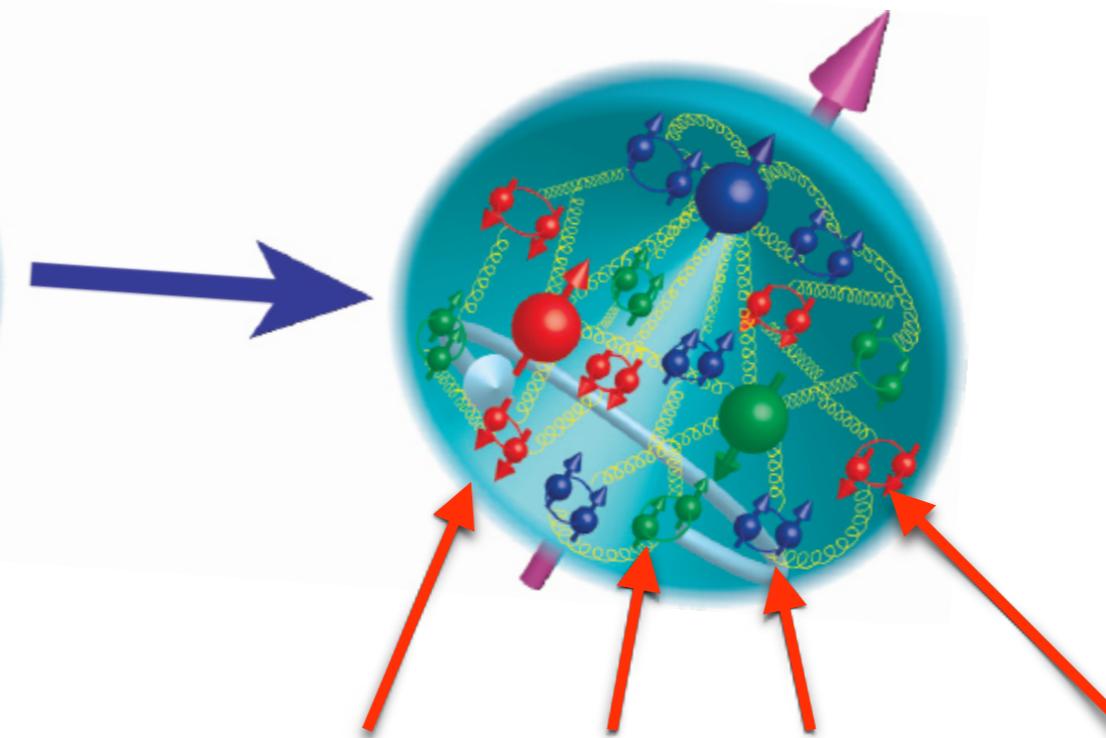
Uma versão moderna do experimento de Rutherford: elétrons incidindo sobre prótons em vez de α em ouro.



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

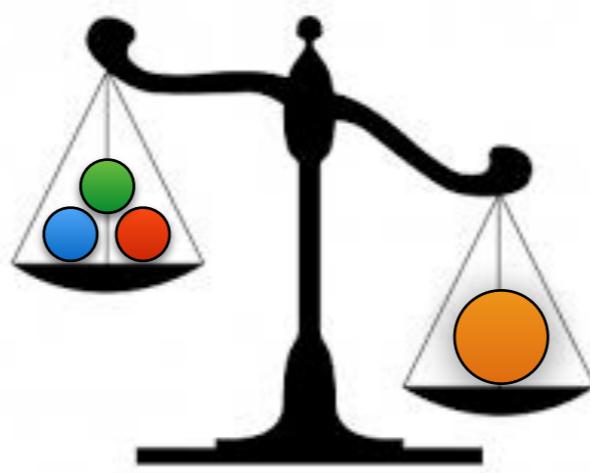


pares quark-antiquark criados do vácuo e aniquilados continuamente



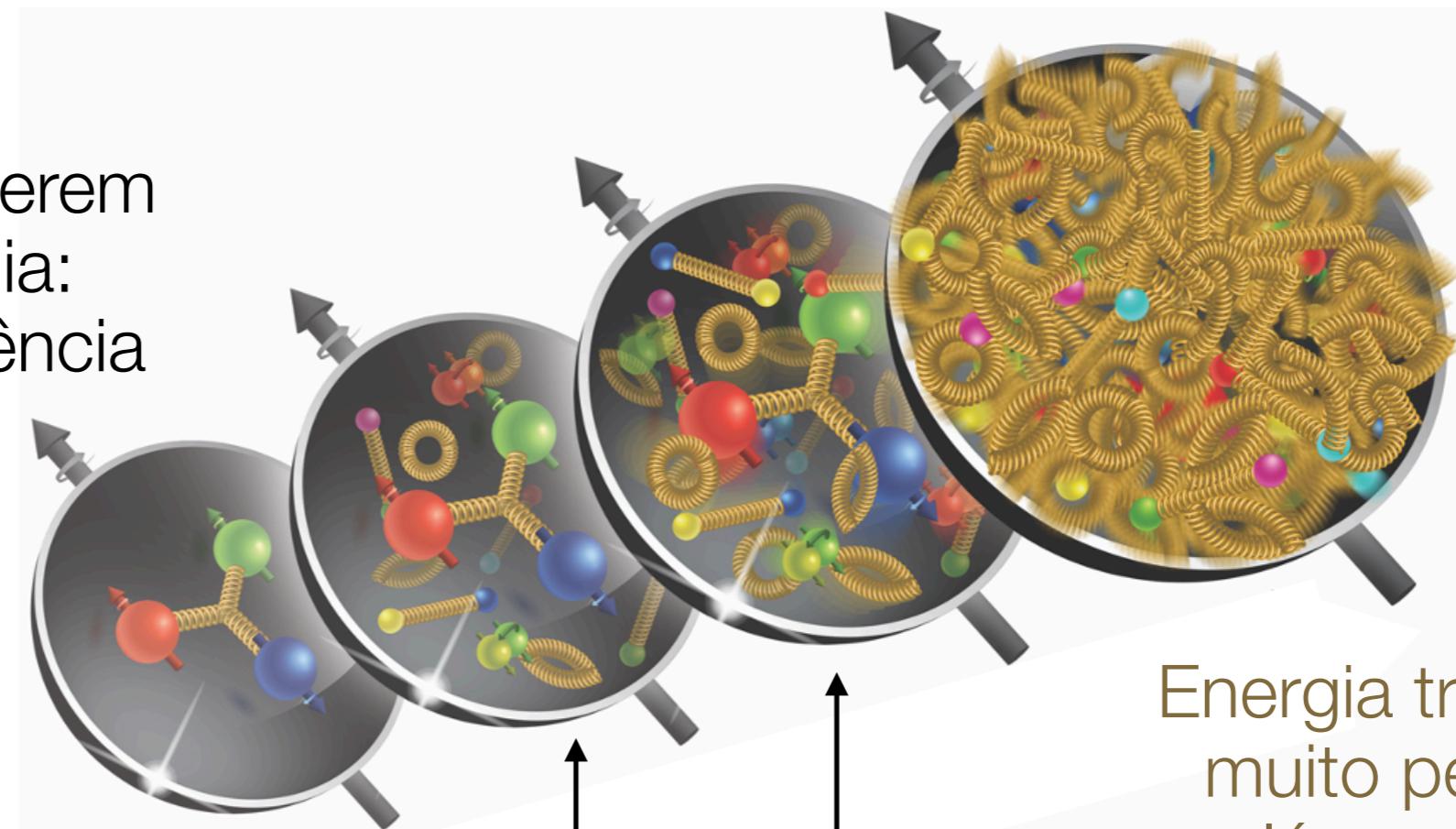
A estrutura interna do
próton, como a de
outros hâdrons, é
bastante complexa.

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



A massa do próton e dos outros hadrons 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...

O Modelo Padrão: a nova tabela periódica

férmions			bósons	
I	II	III		
massa carga spin	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ u up	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ c charm	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ t top	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$ 0 0 1 g glúon
quarks	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom	$\approx 0 \text{ GeV}/c^2$ 0 0 1 γ fóton
léptons	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ e elétron	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ μ múon	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ τ tau	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$ 0 1 Z bóson Z
	$<2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_e neutrino do elétron	$<0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ neutrino do múon	$<18.2 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ neutrino do tau	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$ ± 1 1 W bóson W

As interações fundamentais:

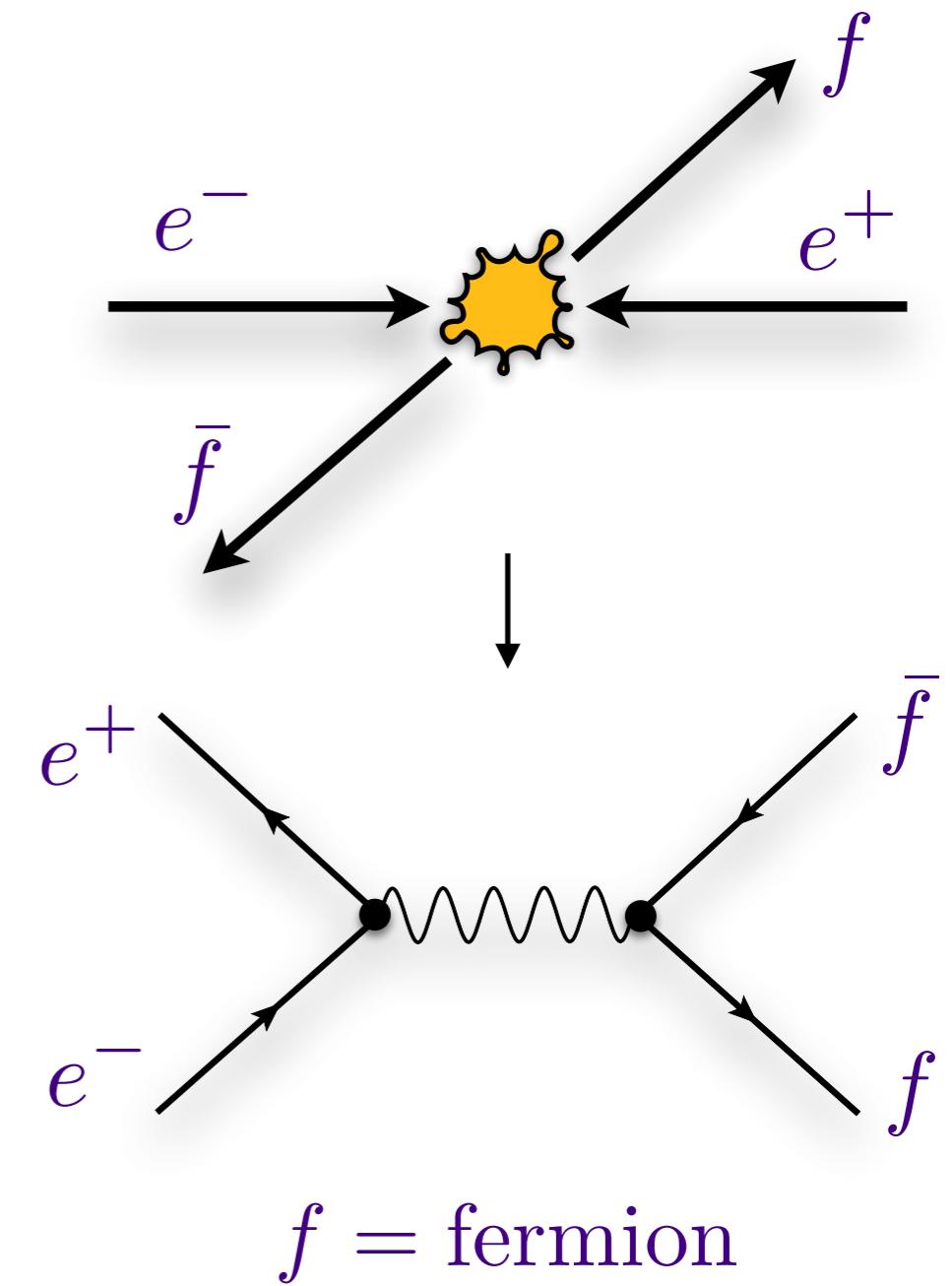
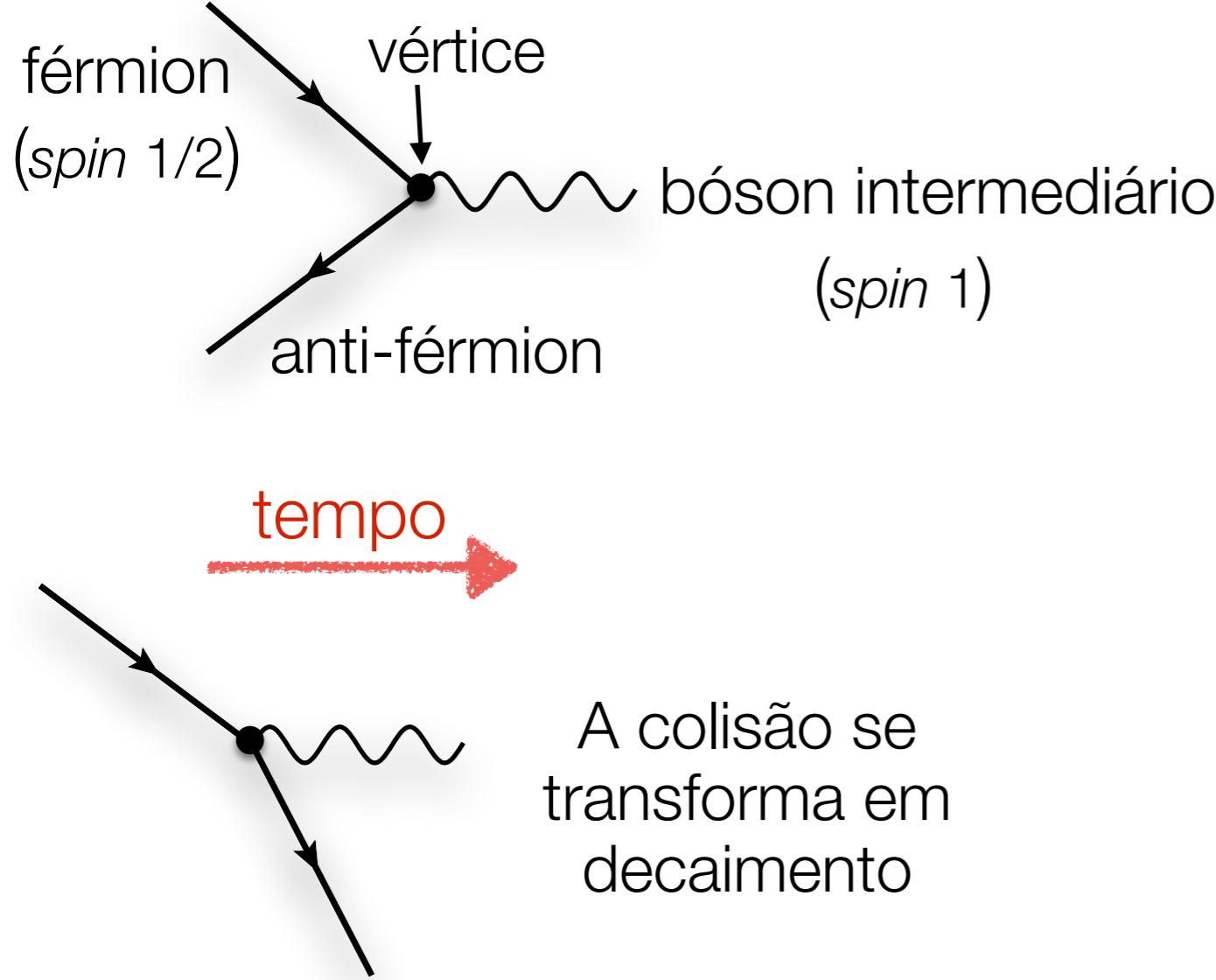
- ❖ **FORÇA ELETROMAGNÉTICA**
Somente partículas carregadas
Mantém elétrons ligados
aos núcleos atômicos
- ❖ **FORÇA NUCLEAR FORTE**
Somente os quarks
Mantém prótons e nêutrons
unidos nos núcleos atômicos
- ❖ **FORÇA NUCLEAR FRACA**
Todas as partículas
Responsável pela radiatividade

Toda a matéria observada no Universo é feita de três elementos:
os quarks u, d e o elétron.

Diagramas de Feynman

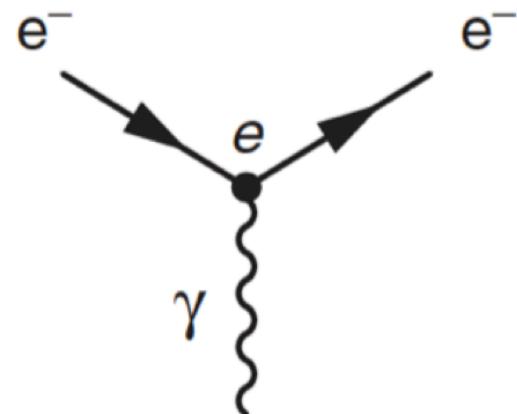
Os diagramas de Feynman representam processos fundamentais envolvendo partículas elementares (espalhamento ou decaimento).

Definem regras para calcular amplitudes de espalhamento e decaimento.



As interações fundamentais

Eletromagnetismo

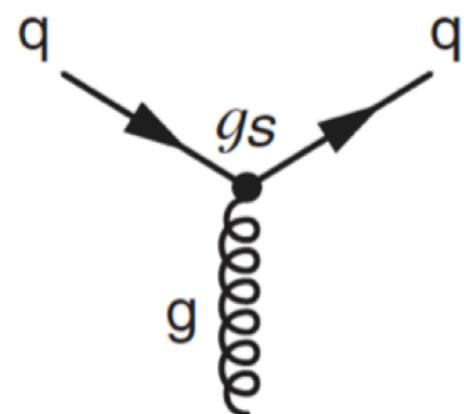


$$\alpha \approx 1/137$$

Todas as partículas carregadas.

Nunca troca sabor

Interação forte

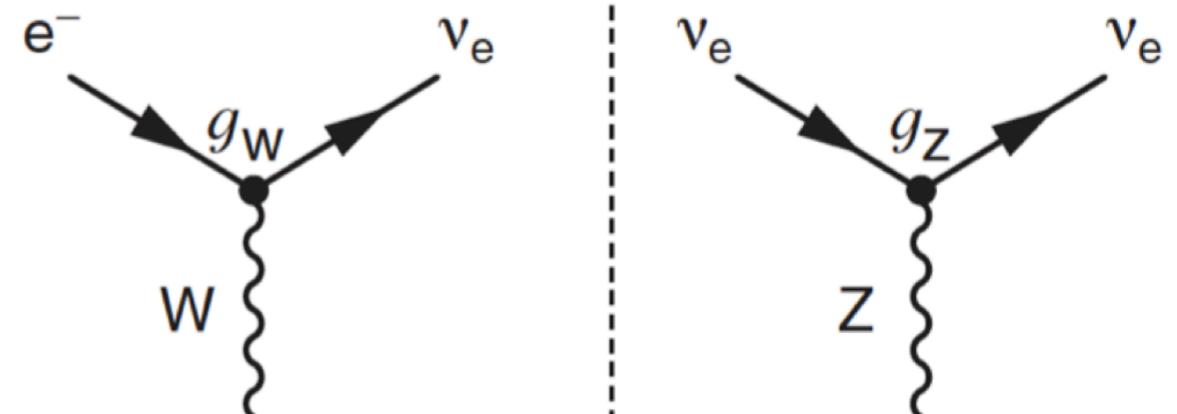


$$\alpha_s \approx 1$$

Apenas os quarks.

Nunca troca sabor

Interação fraca



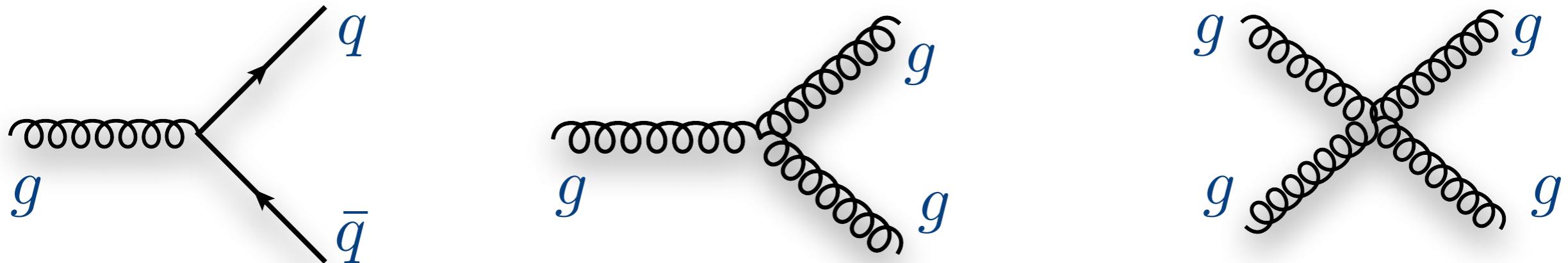
$$\alpha_W \approx 1/30$$

Todos os fermions.

Sempre troca sabor

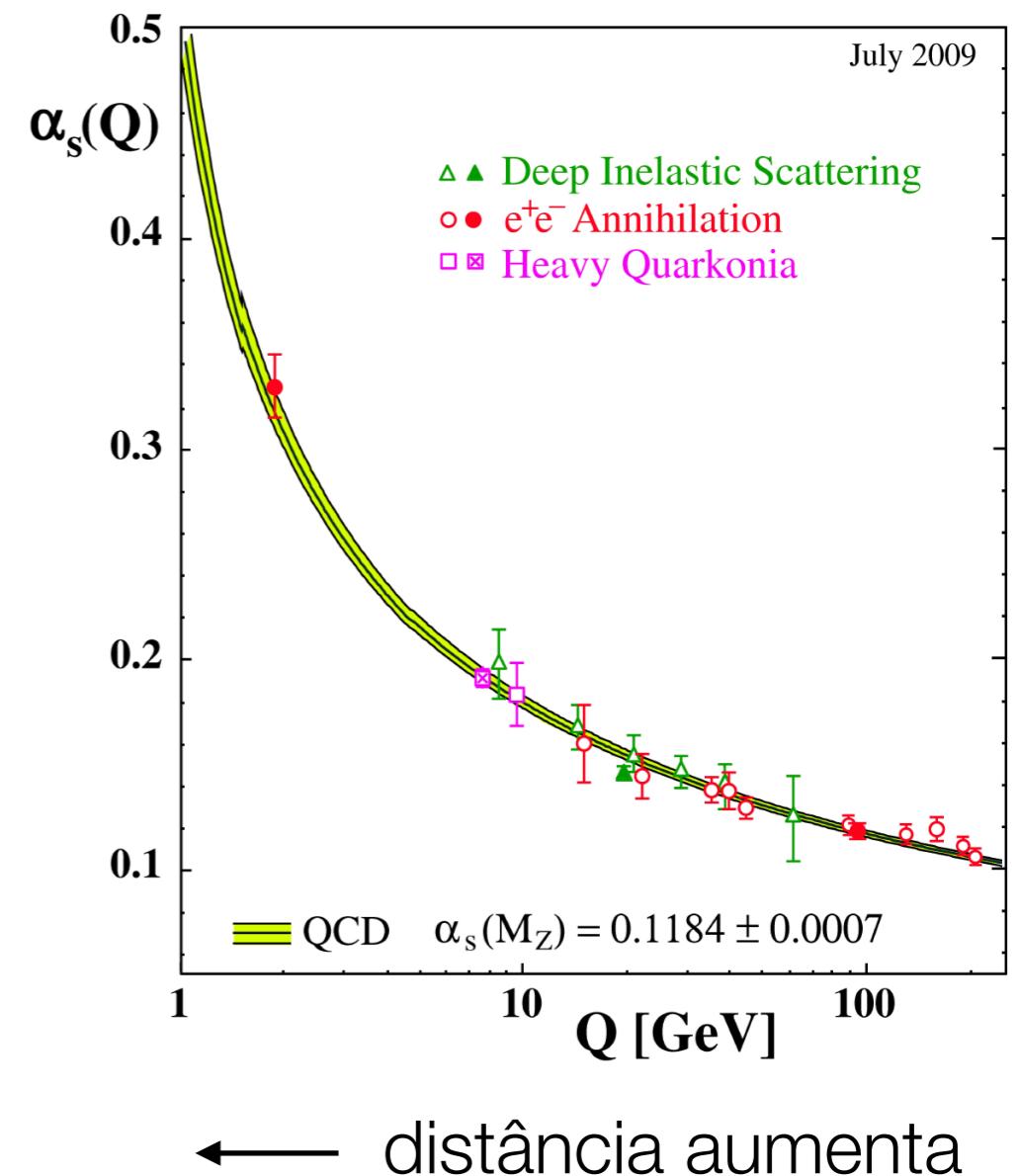
Nunca troca sabor

Interações fundamentais - cromodinâmica quântica (QCD)

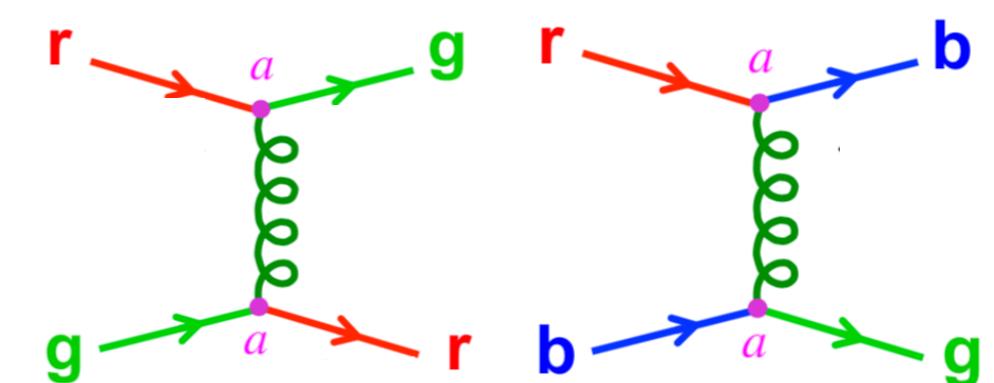
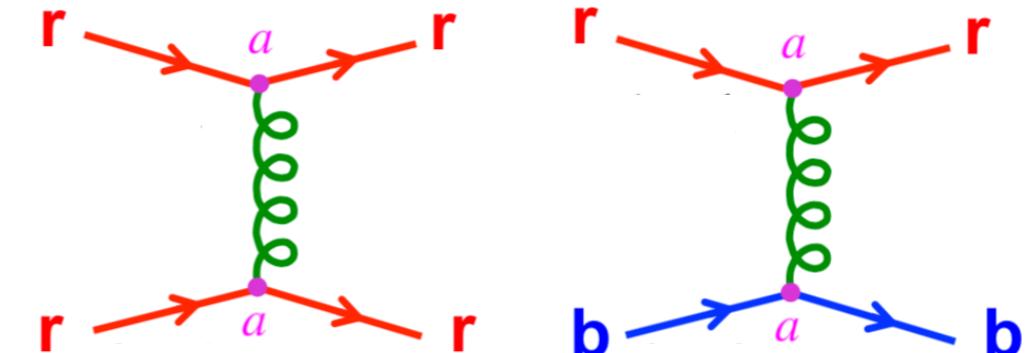
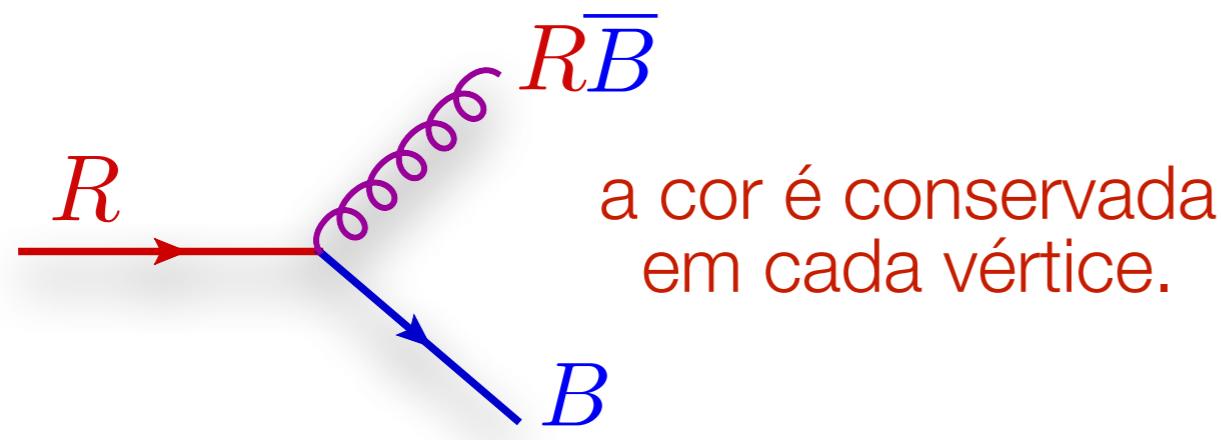


A QCD é bem diferente da QED:

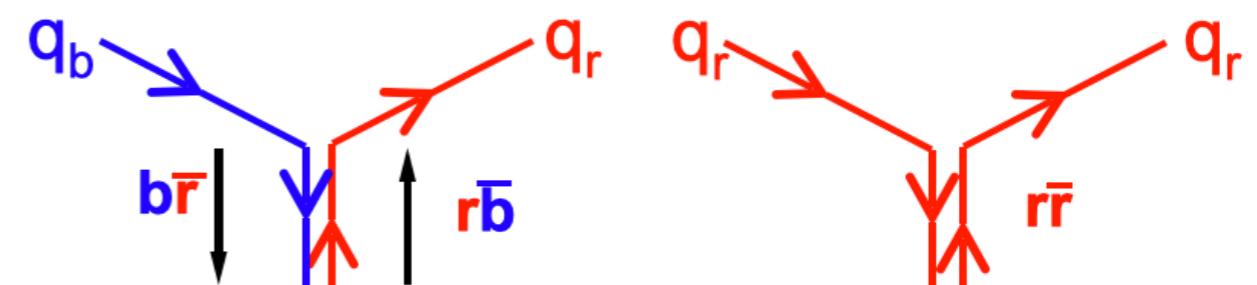
- gluons interagem entre si, podendo formar estados ligados sem quarks (glueballs), partículas "invertebradas";
- liberdade assintótica: acoplamento diminui a pequenas distâncias entre os quarks;
- confinamento: acoplamento aumenta se a distância entre os quarks cresce.



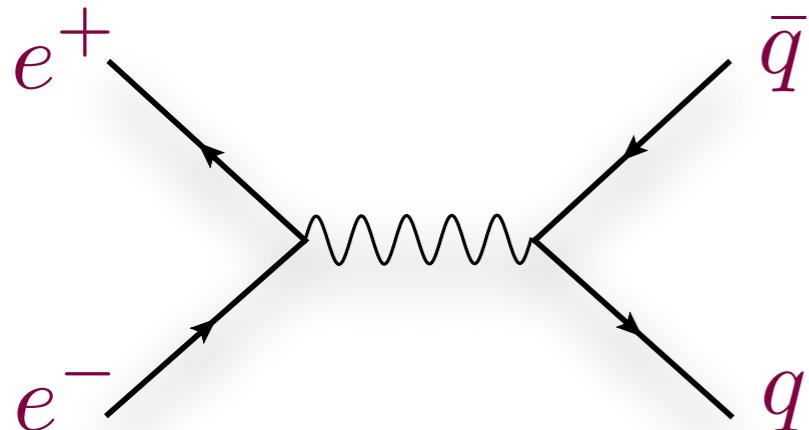
Glúons possuem carga forte: uma "cor" e uma "anticor":



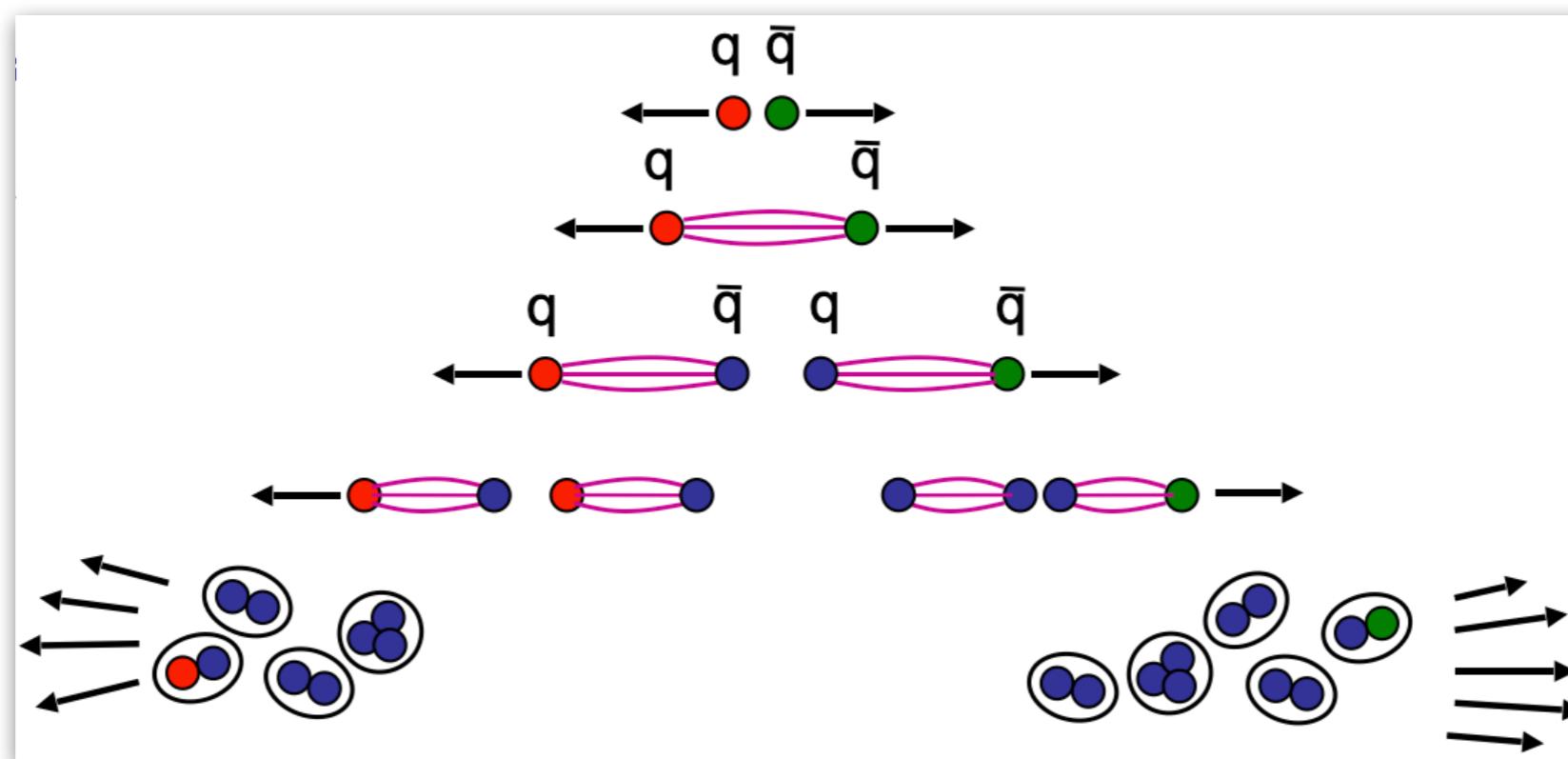
- Cada quark ou antiquark pode estar em três estados de cor.
- Com três tipos de carga de cor (RBG), há oito glúons.
- A intensidade da interação não depende do estado de cor
- Hádrons são neutros, estados sem carga de cor resultante. Apenas partículas sem cor são observadas na natureza.



Aniquilação elétron pósitron produzindo um par quark-antiquark



- Quarks não podem ser observados isoladamente. Ao se afastarem, forma-se um "tubo de cor" entre eles.
- Quando a distância aumenta, o "tubo de cor" se rompe, originando um novo par quark-antiquark.
- Quando não há energia suficiente para novas quebras, formam-se os “jatos” de hadrons observados no laboratório.

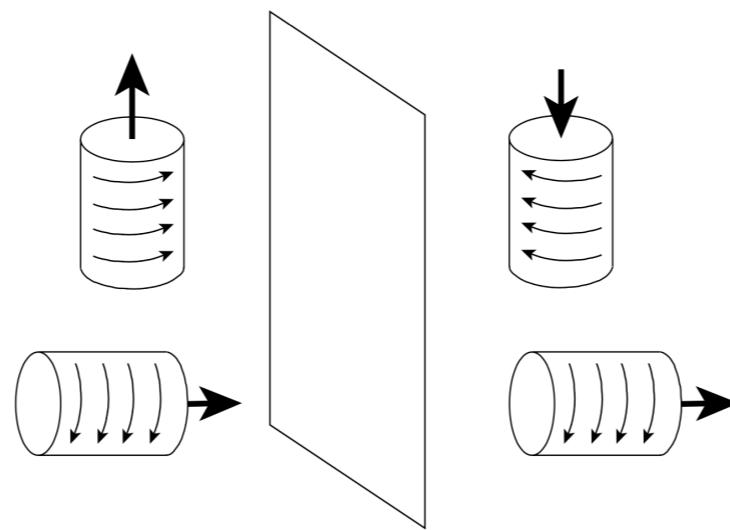


Interações fracas

Transformação paridade:

$$x \rightarrow x_P = -x$$

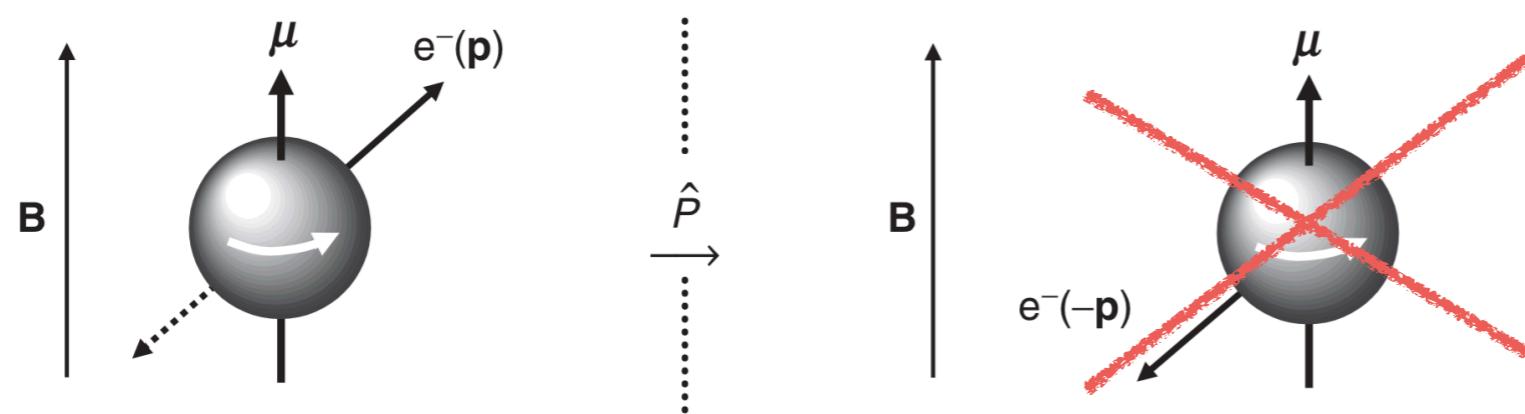
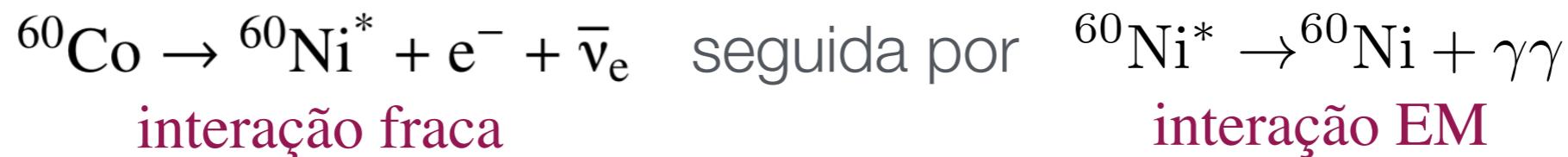
reflexão
mais rotação



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

pseudo(axial)-vetor
 $\mathbf{L} \rightarrow \mathbf{L}_P = +\mathbf{L}$

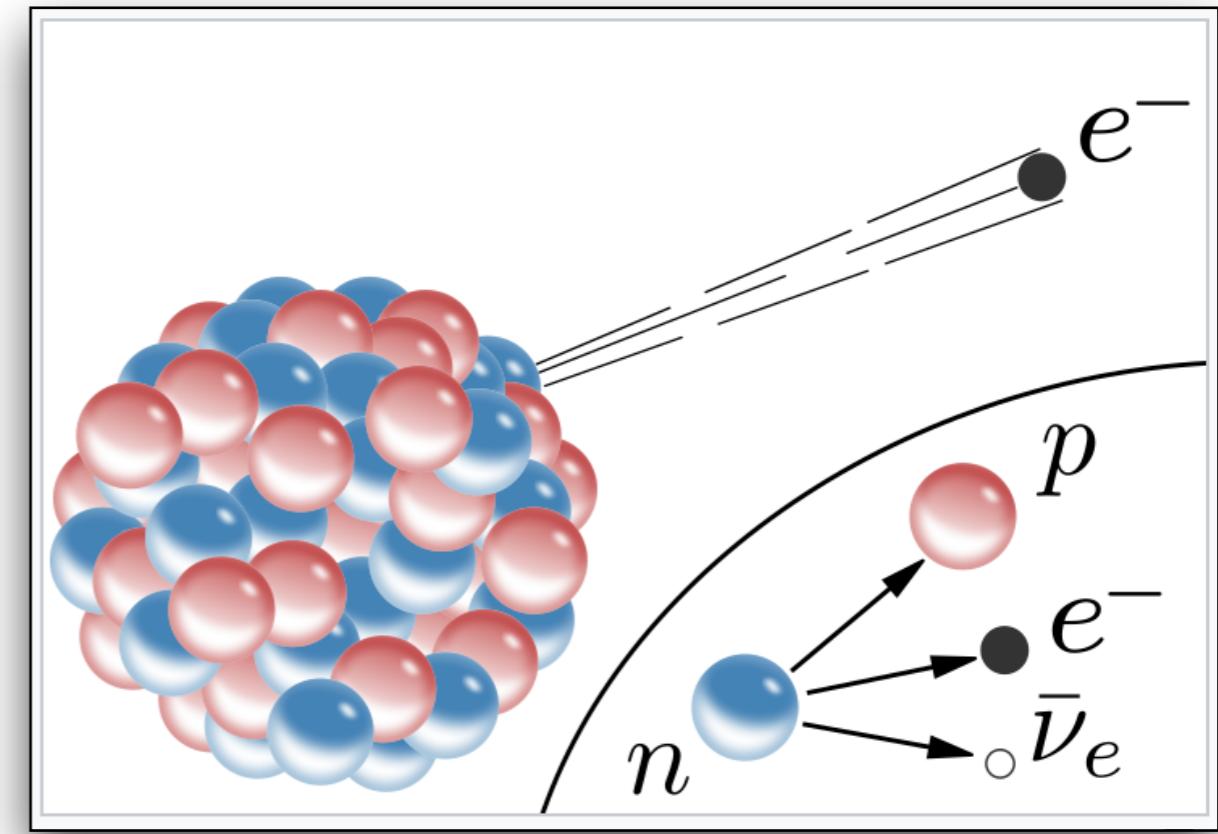
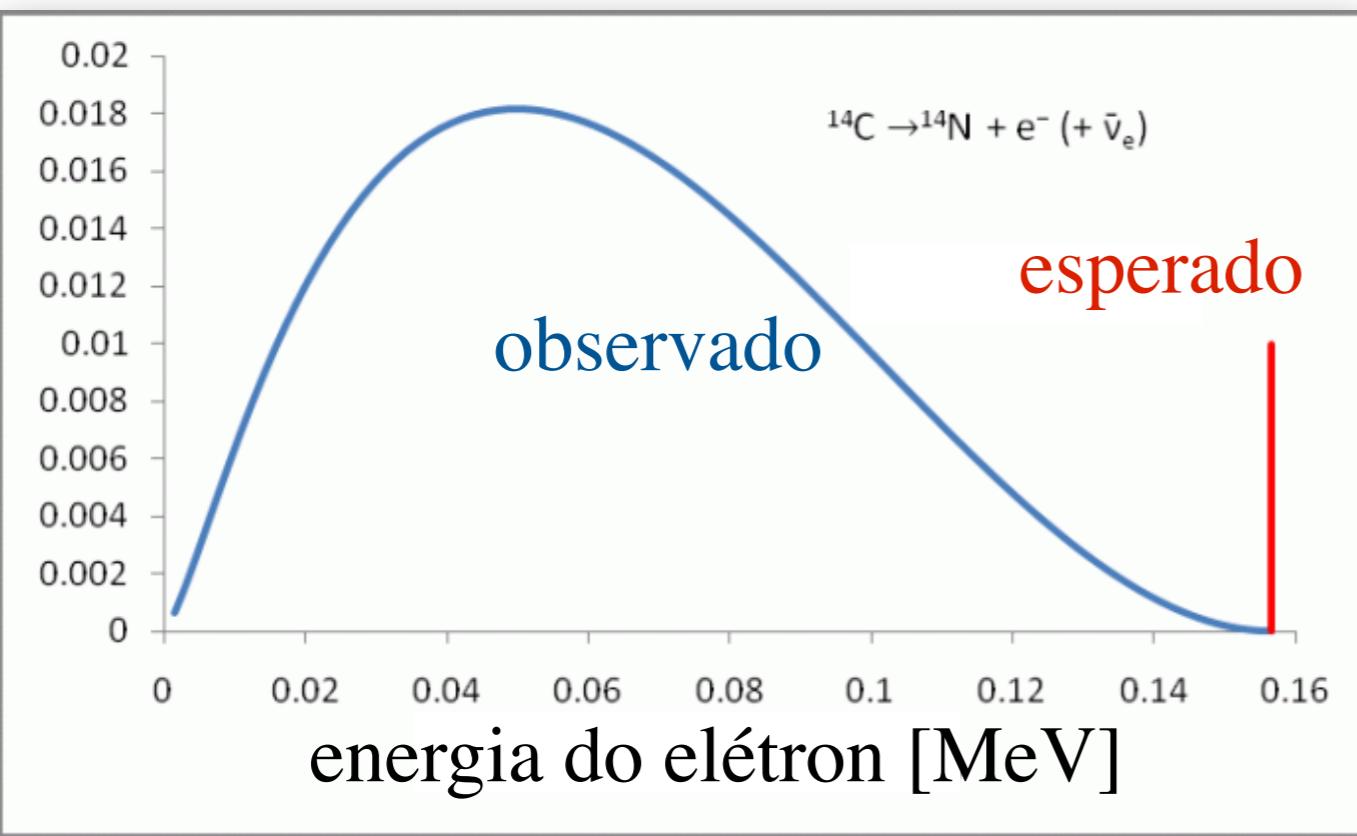
A paridade é uma simetria das interações EM e forte,
mas é violada nas interações fracas



Se a paridade fosse conservada nas interações fracas, os elétrons seriam emitidos em todas as direções

Interações fracas

O decaimento beta: ${}_6C^{14} \rightarrow {}_7N^{14} + e^- + \bar{\nu}_e$

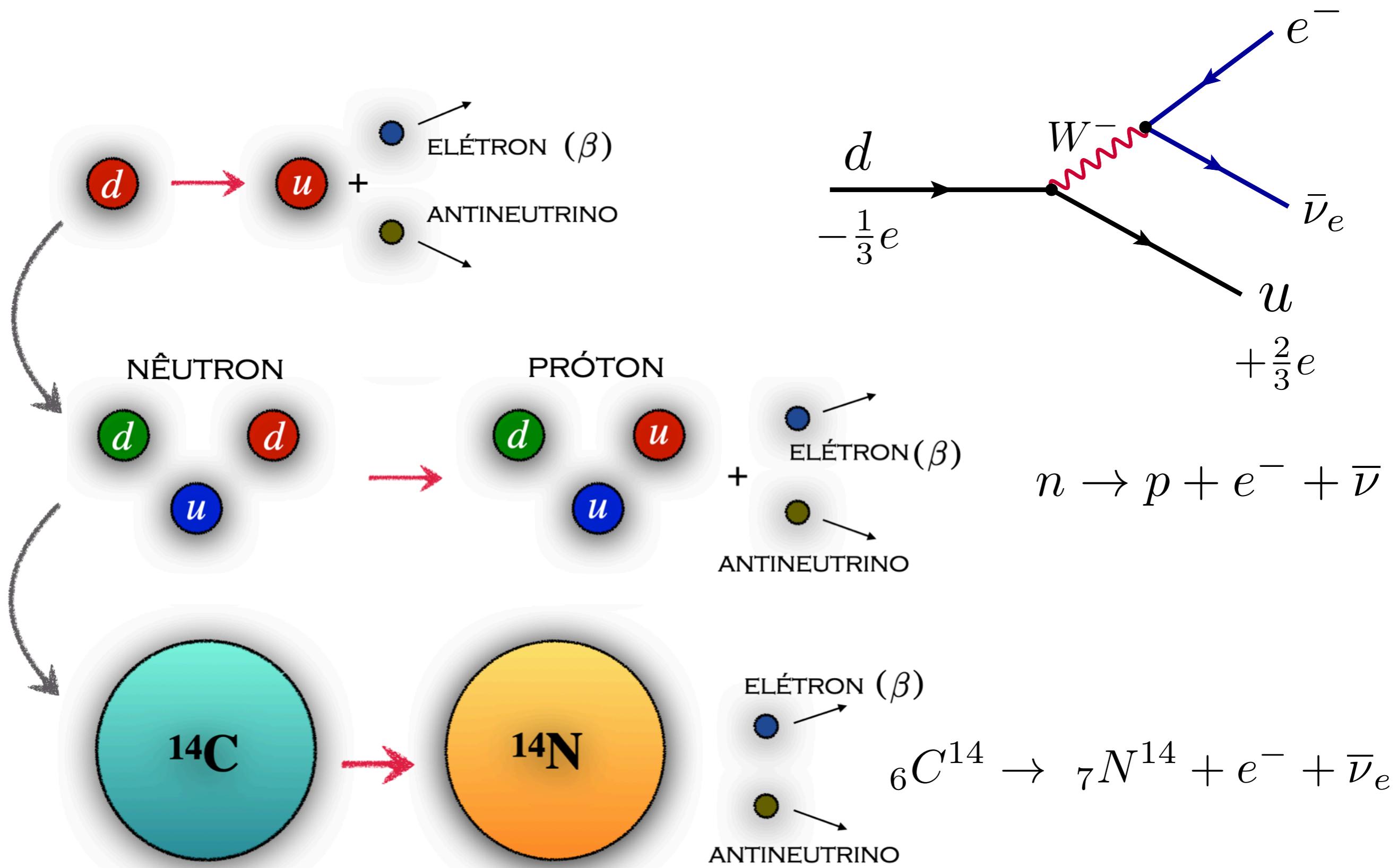


Em 1930, Wolfgang Pauli propôs a existência dos neutrinos

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

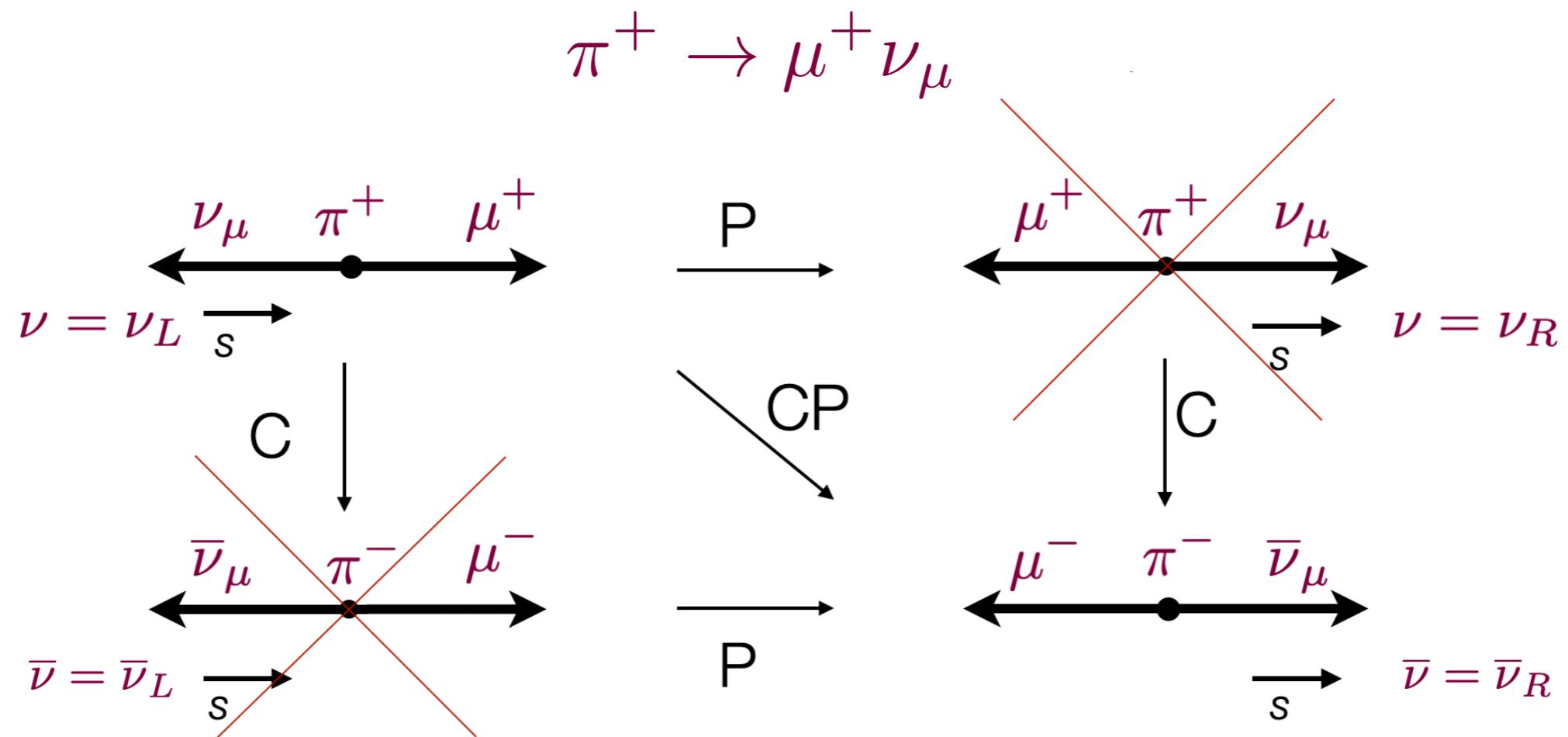
Mas os neutrinos só foram observados 20 anos depois.

As diferentes escalas envolvidas no decaimento beta



Conjugação de carga: transformação que inverte o sinal das cargas
 partícula \leftrightarrow antipartícula

A conjugação de carga é uma simetria das interações EM e forte,
 mas é violada nas interações fracas



As interações fracas são muito diferentes: os bósons Z e W têm massa

Os bósons da interação fraca:

$$W^\pm \rightarrow m = 80.379 \pm 0.012 \text{ GeV}, \quad \Gamma = 2.085 \pm 0.042 \text{ GeV}$$

$$Z^0 \rightarrow m = 91.1876 \pm 0.0021 \text{ GeV}, \quad \Gamma = 2.4952 \pm 0.0023 \text{ GeV}$$

O acoplamento dos bósons Z e W com léptons é o mesmo para todas as gerações (*Lepton Flavour Universality*)

$$\frac{\Gamma(Z^0 \rightarrow e^+ e^-)}{\Gamma_{\text{tot}}} = (3.3632 \pm 0.0042)\%$$

$$\frac{\Gamma(Z^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)}{\Gamma_{\text{tot}}} = (3.3662 \pm 0.0066)\%$$

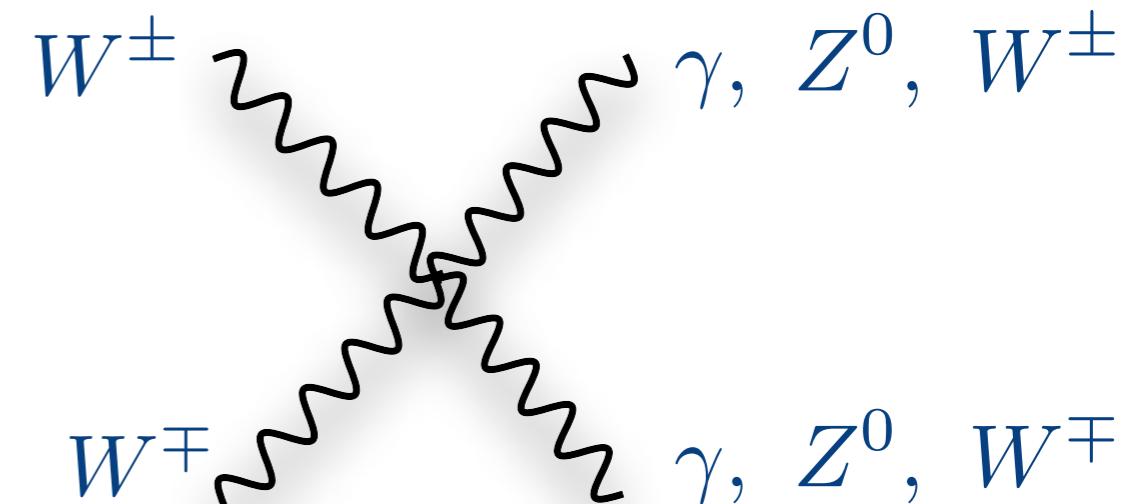
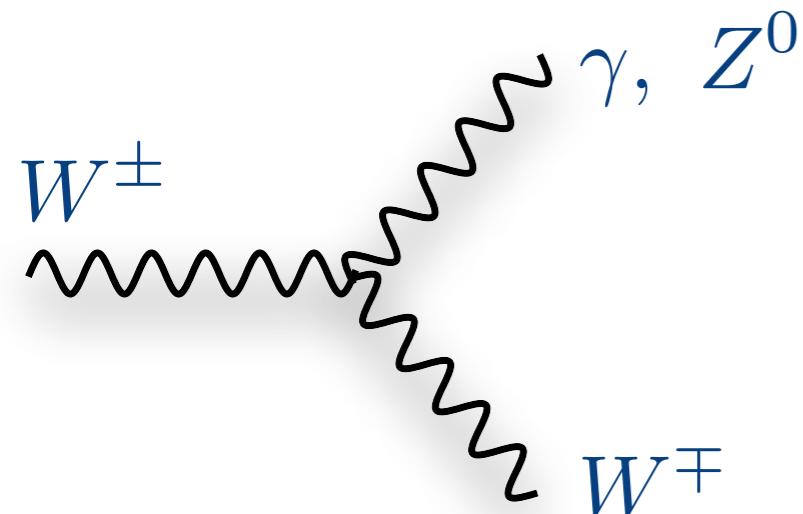
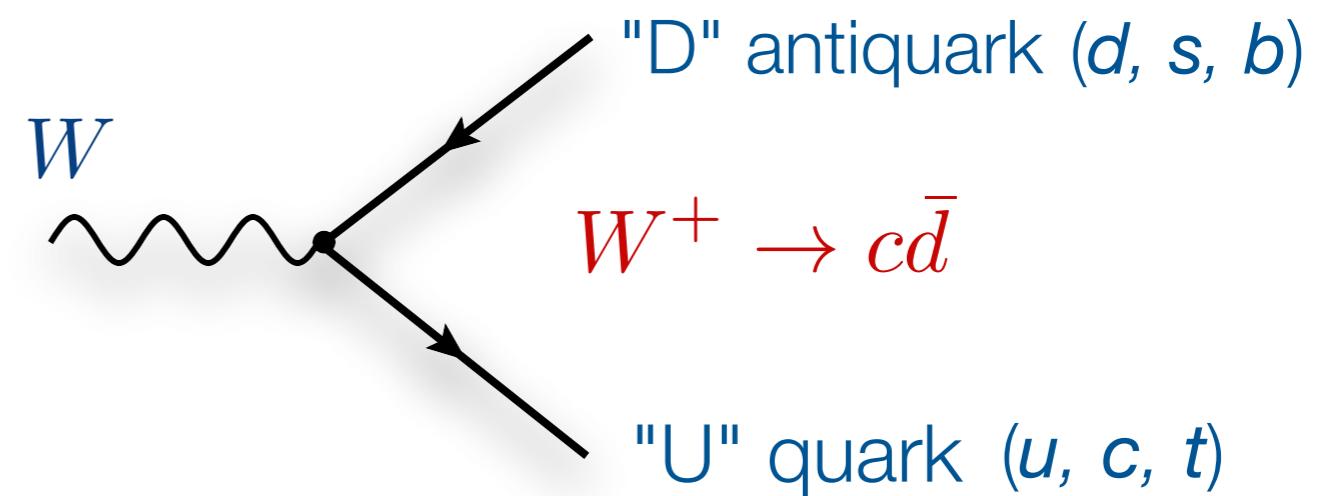
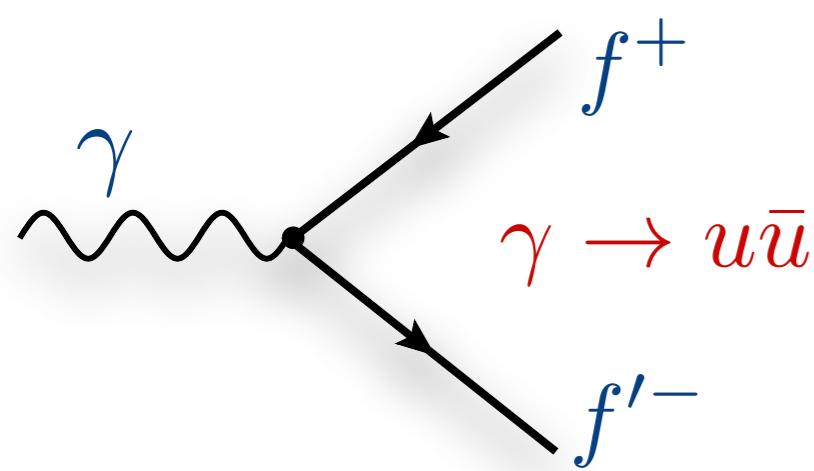
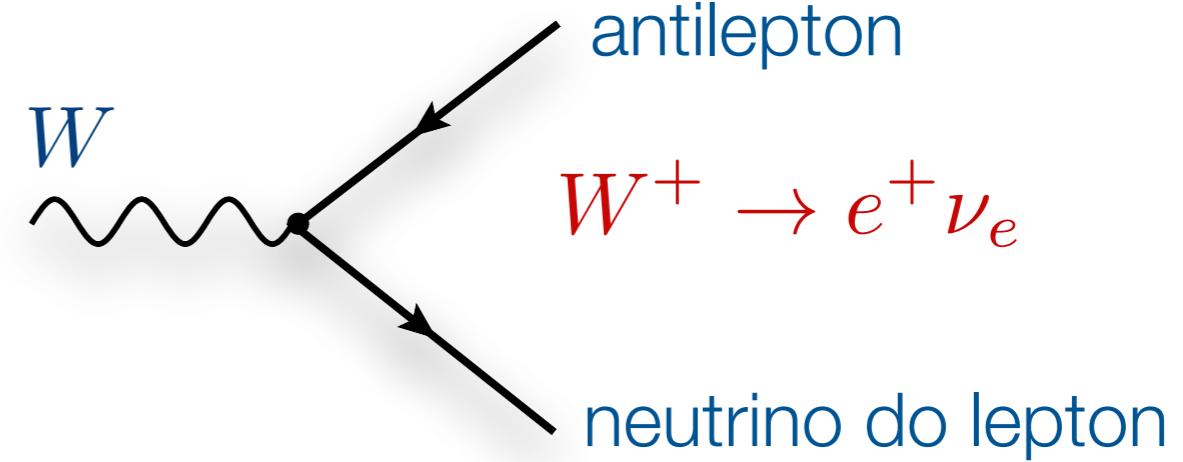
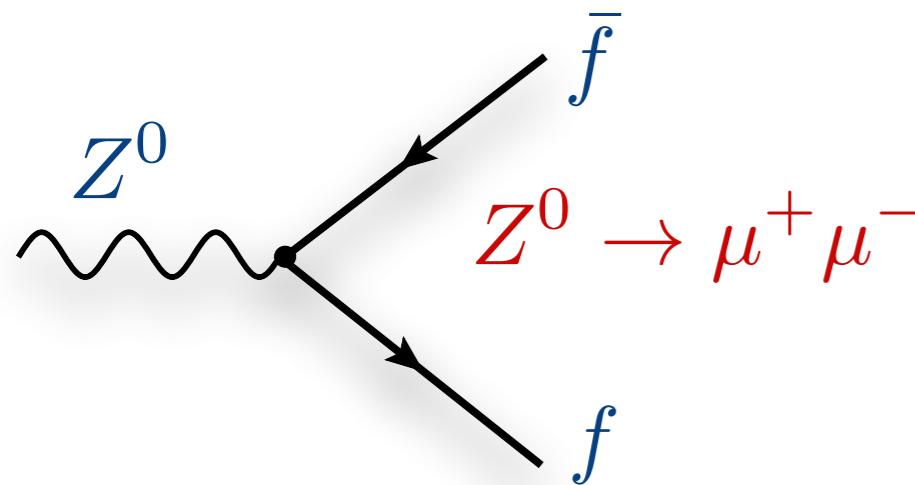
$$\frac{\Gamma(Z^0 \rightarrow \tau^+ \tau^-)}{\Gamma_{\text{tot}}} = (3.3696 \pm 0.0083)\%$$

$$\frac{\Gamma(W^+ \rightarrow e^+ \nu_e)}{\Gamma_{\text{tot}}} = (10.86 \pm 0.09)\%$$

$$\frac{\Gamma(W^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu)}{\Gamma_{\text{tot}}} = (10.63 \pm 0.15)\%$$

$$\frac{\Gamma(W^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau)}{\Gamma_{\text{tot}}} = (11.38 \pm 0.21)\%$$

Os acoplamentos possíveis entre bósons intermediários



LAGRANGIANAS

A função Lagrangiana descreve o fluxo da energia associada aos campos em interação:

$$L = T - V$$

T = energia cinética, V = energia potencial

A Lagrangiana é uma função de coordenadas generalizadas e suas derivadas temporais q_i , \dot{q}_i

Dada a Lagrangiana de um sistema, as equações de movimento ficam determinadas pela equação de Euler-Lagrange

$$\frac{\partial L}{\partial q_i} - \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} = 0$$

Considere uma partícula de massa m movendo-se sob a ação de um potencial V em uma dimensão ($q = x$):

$$T = \frac{1}{2}m\dot{x}^2, \quad \rightarrow \quad L = \frac{1}{2}m\dot{x}^2 - V(x)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} = \frac{d}{dt} m \dot{x} = m \ddot{x}$$


$$\frac{\partial L}{\partial q} = \frac{d}{dx} V(x) = -F$$

$$F = ma$$

As interações entre partículas elementares são descritas pela Teoria Quântica de Campos. A entidade fundamental é a Lagrangiana.

As coordenadas generalizadas de um sistema discreto de partículas q_i são substituídas pelos campos $\phi_i(t, x, y, z)$,

Os campos são funções contínuas do espaço-tempo, e suas derivadas:

$$\partial_\mu \phi_i = \left(\frac{\partial \phi_i}{\partial t}; \frac{\partial \phi_i}{\partial x}, \frac{\partial \phi_i}{\partial y}, \frac{\partial \phi_i}{\partial z} \right)$$

$$L(q_i, \dot{q}_i) \rightarrow \mathcal{L}(\phi_i, \partial_\mu \phi_i)$$

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

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 a forma como partículas e campos interagem*

SIMETRIAS DE CALIBRE (GAUGE)

Invariância de gauge: uma ideia familiar no Eletromagnetismo clássico.

Os campos elétricos e magnéticos em termos do potencial escalar e vetor

Os campos \mathbf{E} e \mathbf{B} permanecem inalterados pelas transformações simultâneas

Na forma covariante

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

$$\phi \rightarrow \phi' = \phi - \frac{\partial \chi}{\partial t}$$

$$\mathbf{A} \rightarrow \mathbf{A}' = \mathbf{A} + \nabla\chi$$

$$\chi = \chi(\mathbf{r}, t)$$

$$A_\mu \rightarrow A'_\mu - \partial_\mu \chi$$

$$A_\mu = (\phi, -\mathbf{A})$$

$$\partial_\mu = (\partial_0, \nabla)$$

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

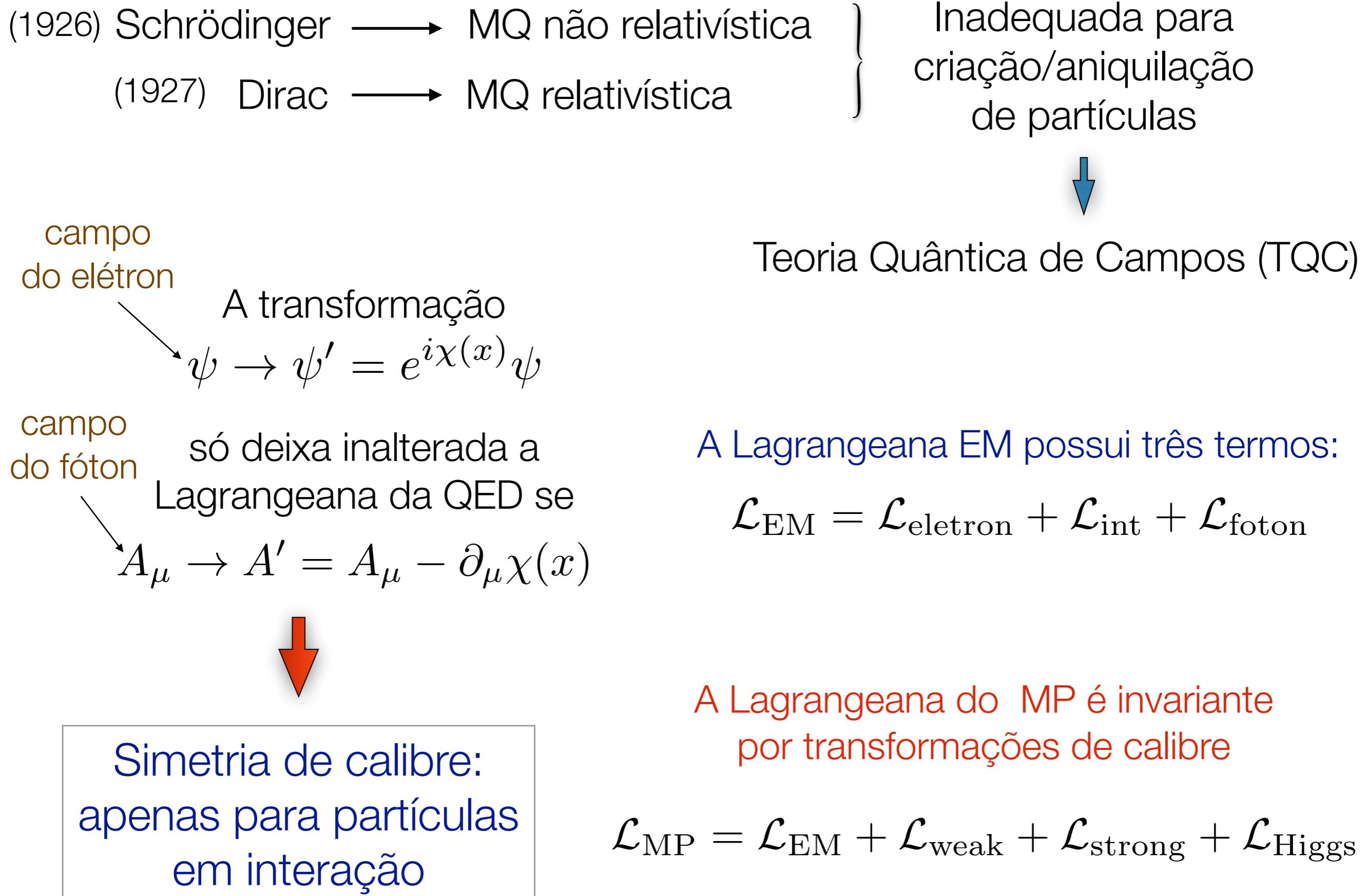
$$L = T - V \xrightarrow{\text{Lagrangeana}} \frac{dL}{dx} - \frac{d}{dt} \left(\frac{dL}{d\dot{x}} \right) = 0 \xrightarrow{\text{eq. Euler-Lagrange}} \text{eq. de movimento da partícula}$$

Na TQC, a Lagrangeana é função dos campos e suas derivadas

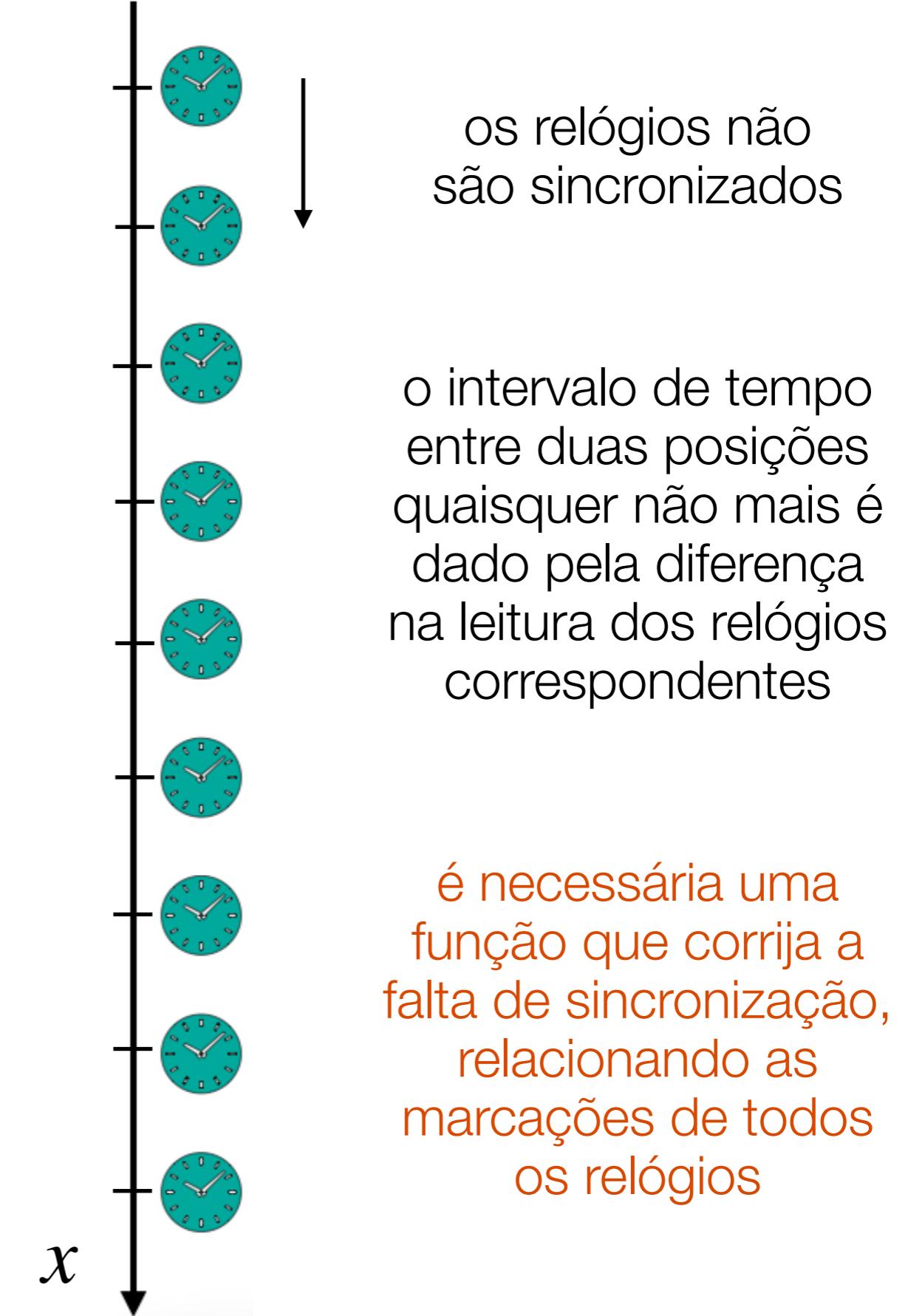
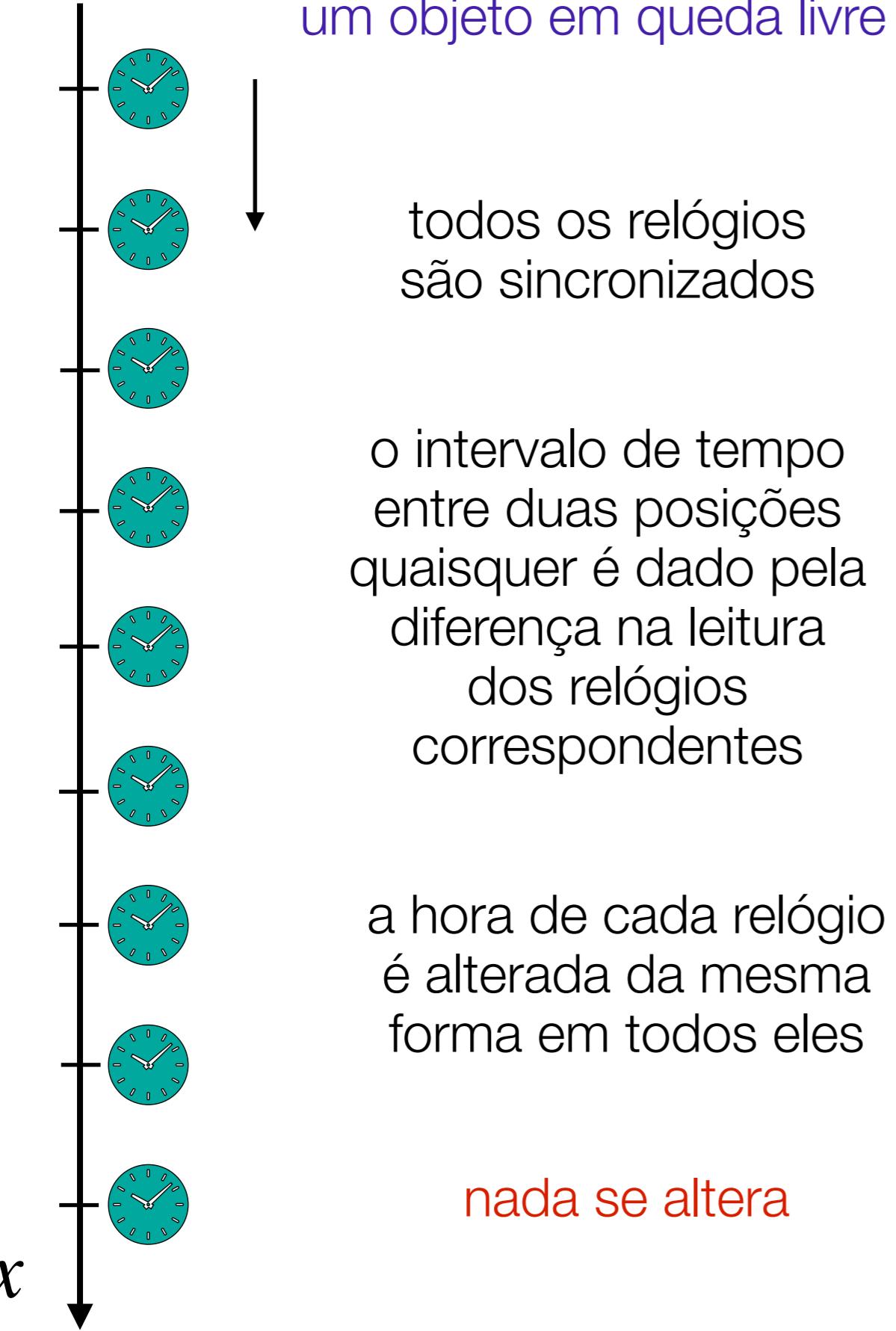
$$L(x_i, \dot{x}_i) \rightarrow \mathcal{L}(\phi, \dot{\phi}) \longrightarrow \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \phi} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\phi}} \right) = 0$$

Simetrias: transformações matemáticas nos campos que deixam a Lagrangeana inalterada

Emmy Noether: simetrias contínuas estão associadas a leis de conservação



um objeto em queda livre



Lagrangiana da QED:

campo do elétron + campo do fóton + interação elétron-fóton



termos "cinéticos" (derivadas dos campos)

potencial (os campos)

Todas as interações entre partículas elementares
são descritas por teorias de gauge.

O *princípio da invariância de gauge* é a
pedra fundamental do Modelo Padrão. Ele determina a forma
da interação entre férmions e bósons intermediários.

Mas a invariância de gauge implica partículas sem massa!

Como explicar a massa do W^{+} e do Z^0 ?

Qual a origem da massa dos fermions ?

A resposta está no *mecanismo de Higgs*.

O mecanismo de Higgs

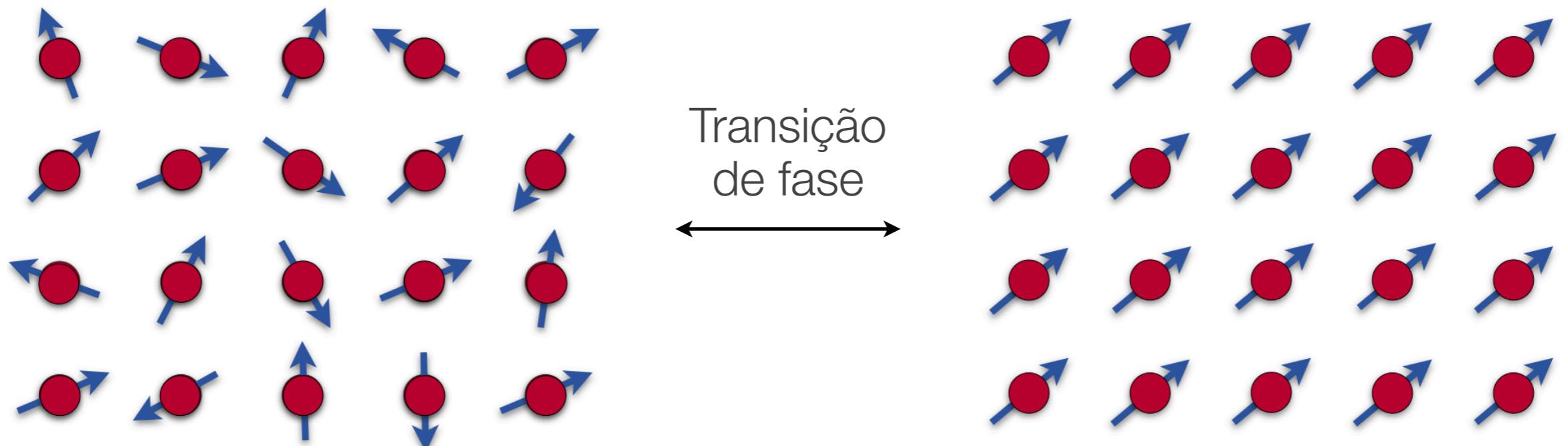
simetria de calibre implica bósons intermediários com massa nula, mas

$$m(W^\pm) \sim 80 \text{ GeV}$$

$$m(Z^0) \sim 91 \text{ GeV}$$

A solução: o mecanismo de Higgs, uma ideia engenhosa e complexa.
Está baseado no conceito de *quebra espontânea de simetria*

O ferromagnetismo é um exemplo de quebra espontânea de simetria

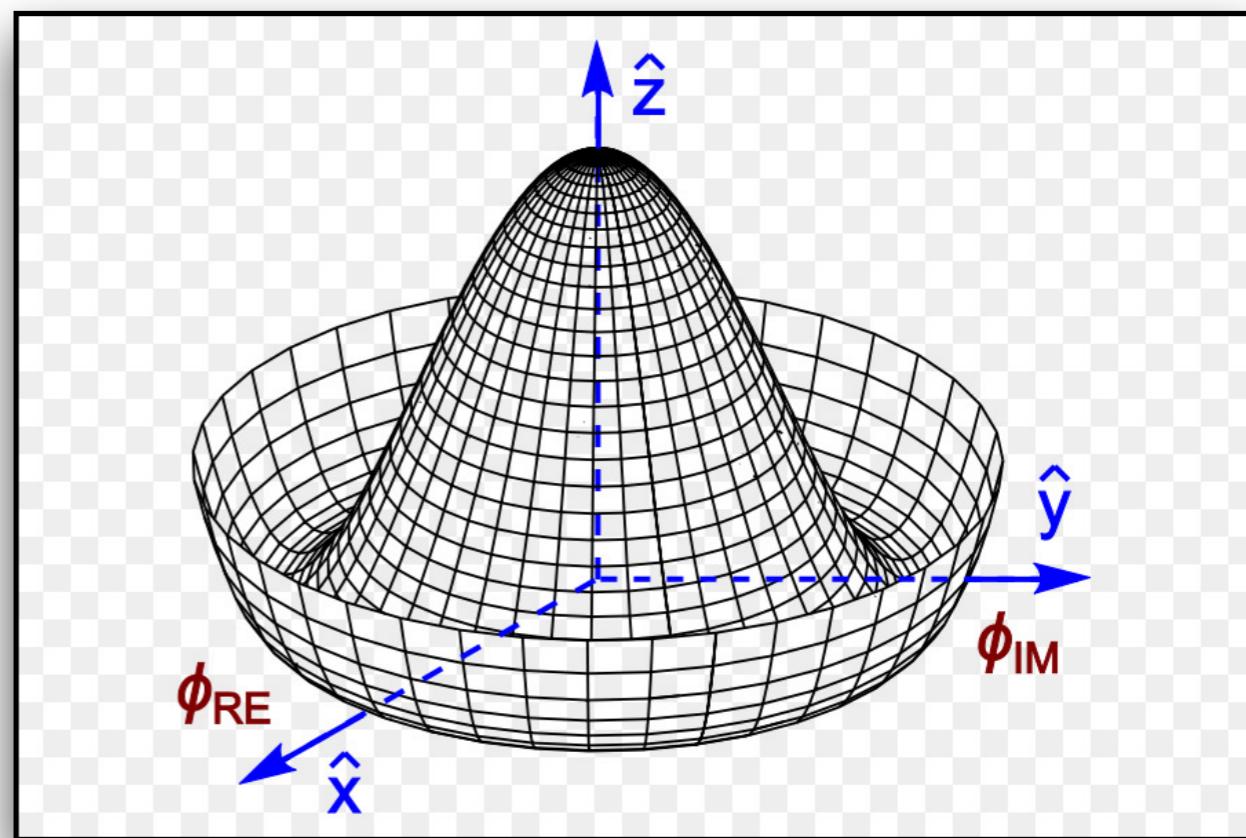


Acima da temperatura de Curie, os *spins* estão desalinhados, formando um sistema completamente desordenado, com simetria esférica.

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.

- 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.



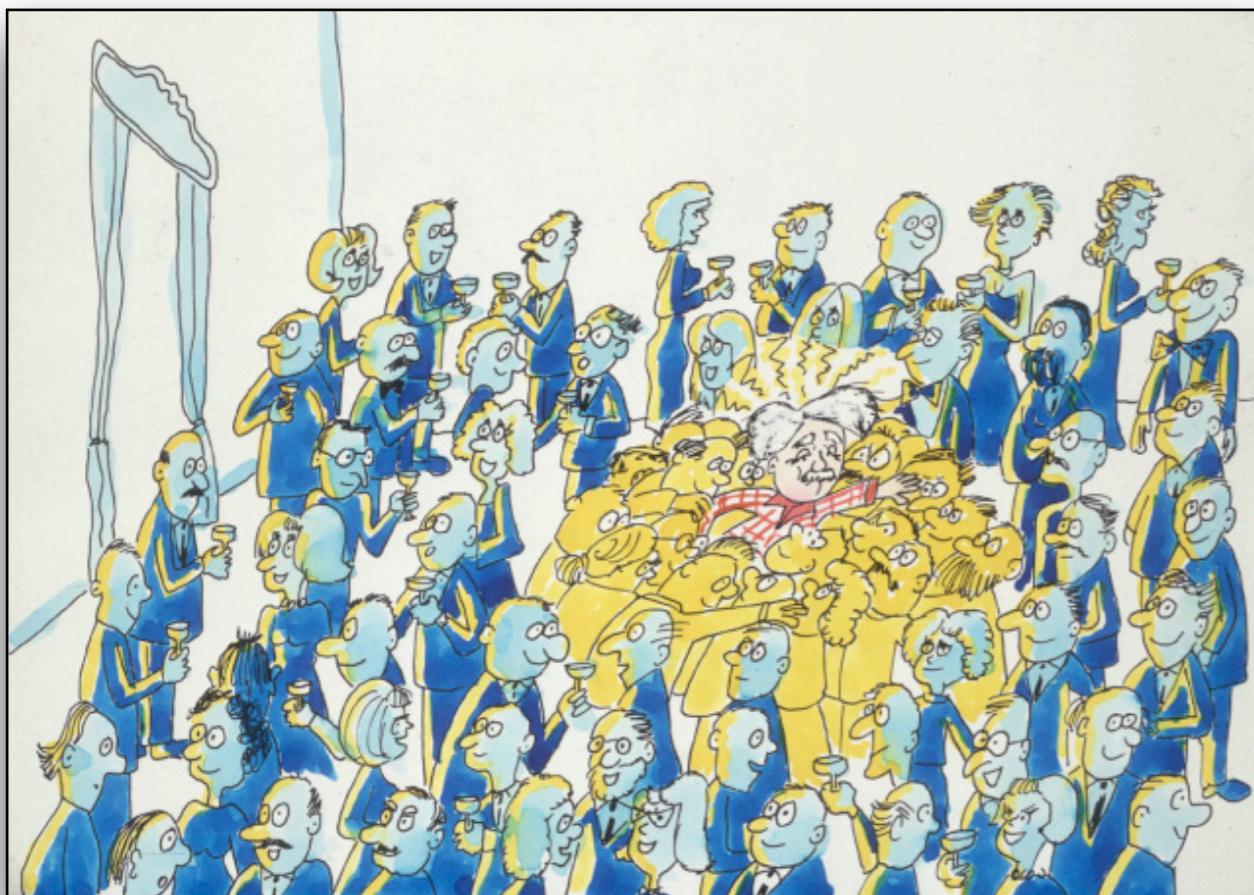
O mecanismo de Higgs



Copyright CERN

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

Ele aparece, causando alvoroço.

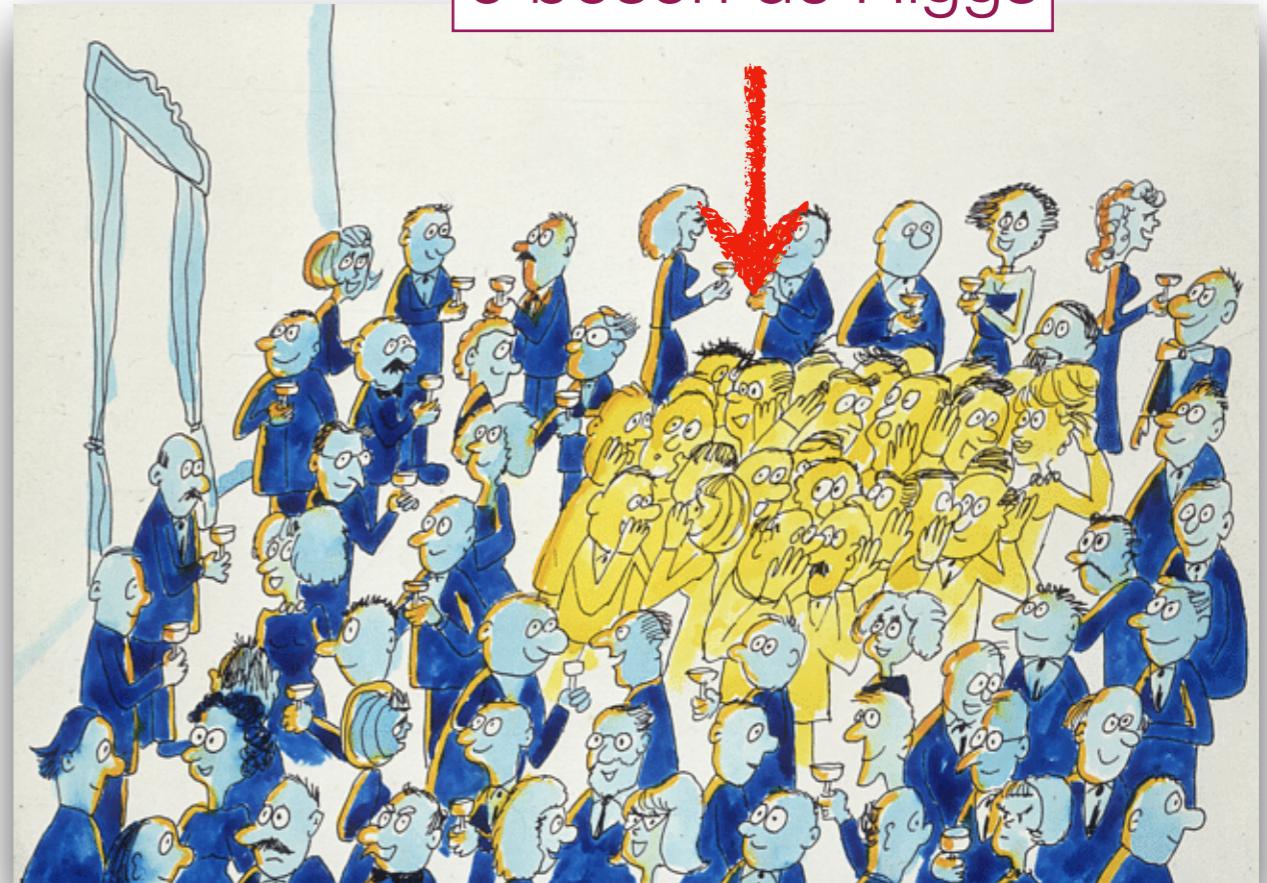


Atravessa a sala sempre cercado por colegas, o que gera uma inércia.

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.

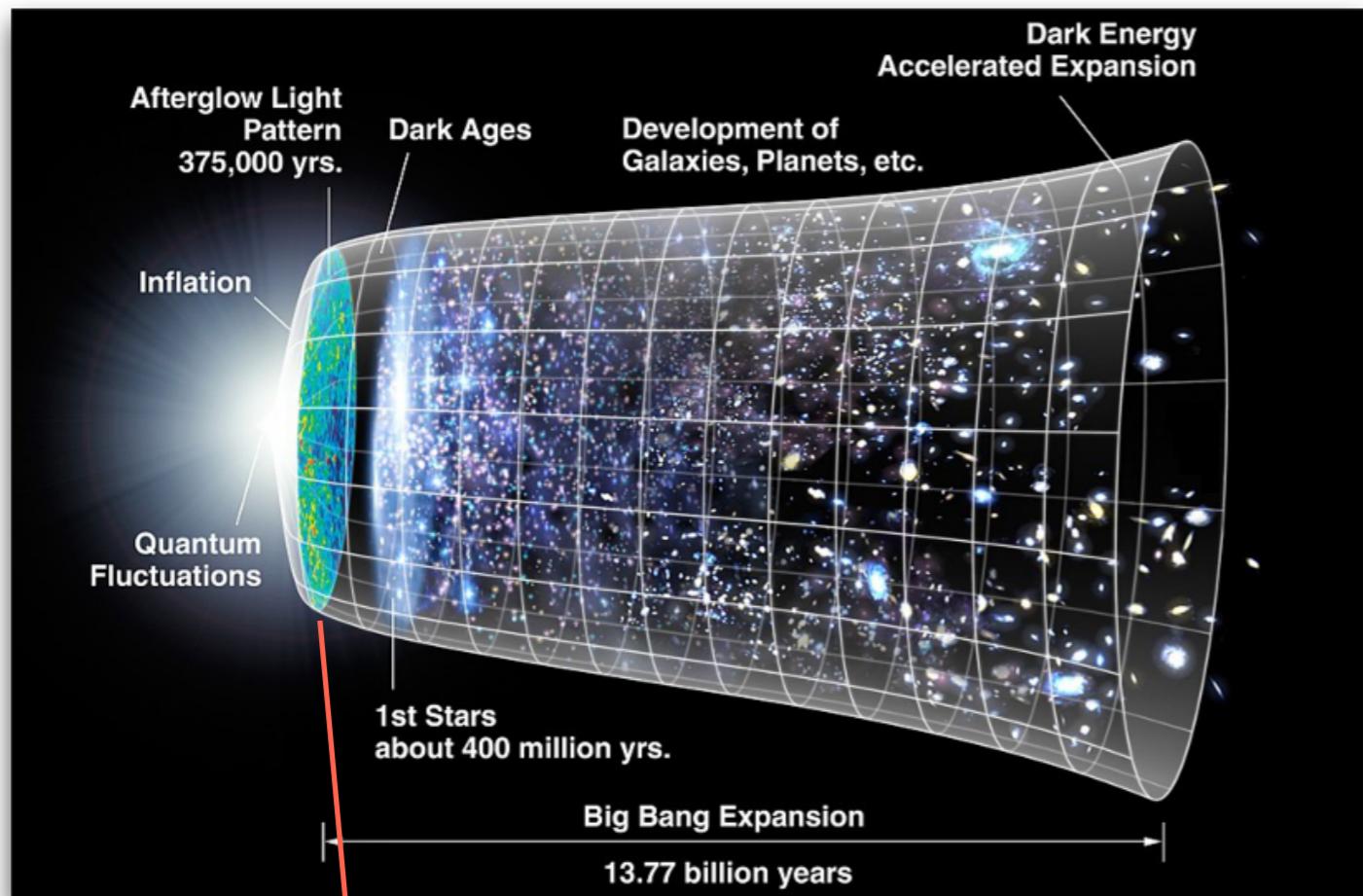


Copyright CERN

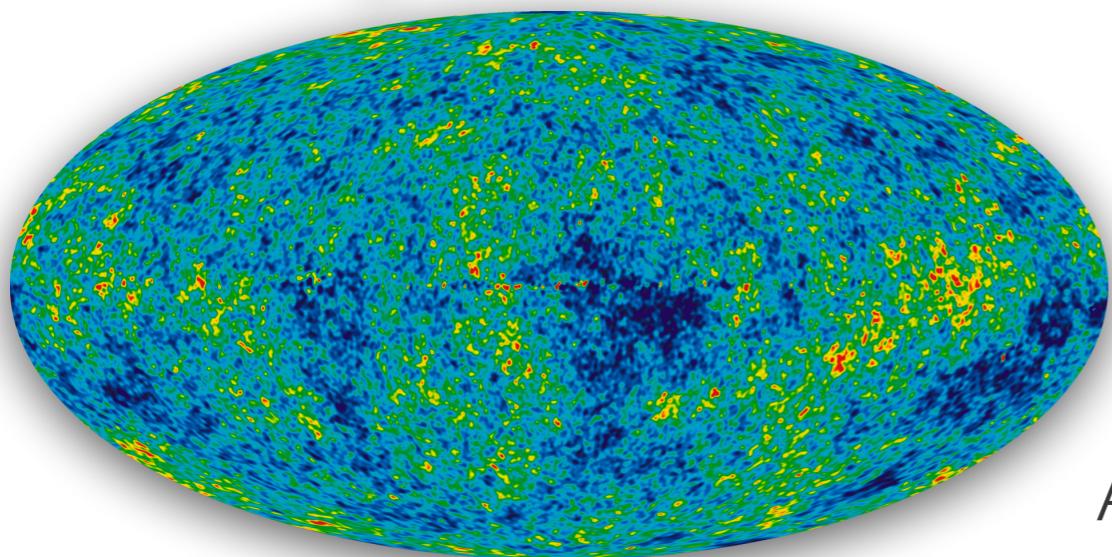
Um rumor se espalha pela sala, causando excitação nos presentes, que se aglutinam em grupos.

O LADO ESCURO DO UNIVERSO

A evolução do Universo: a Cosmologia encontra a Física de Partículas



- O Universo está em expansão.
 - Evoluiu de um estado primordial extremamente quente e denso
 - O Universo primordial era um plasma de fótons e partículas
 - Há 13.4 bilhões de anos, os fótons puderam se propagar livremente



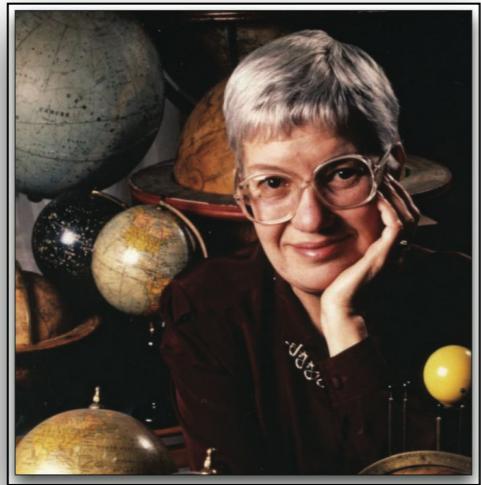
Mapa de temperatura da radiação cósmica de fundo produzido pelo satélite PLANCK

A temperatura média é 2.72548 ± 0.00057 K

A variação na temperatura é de apenas 0.00001K

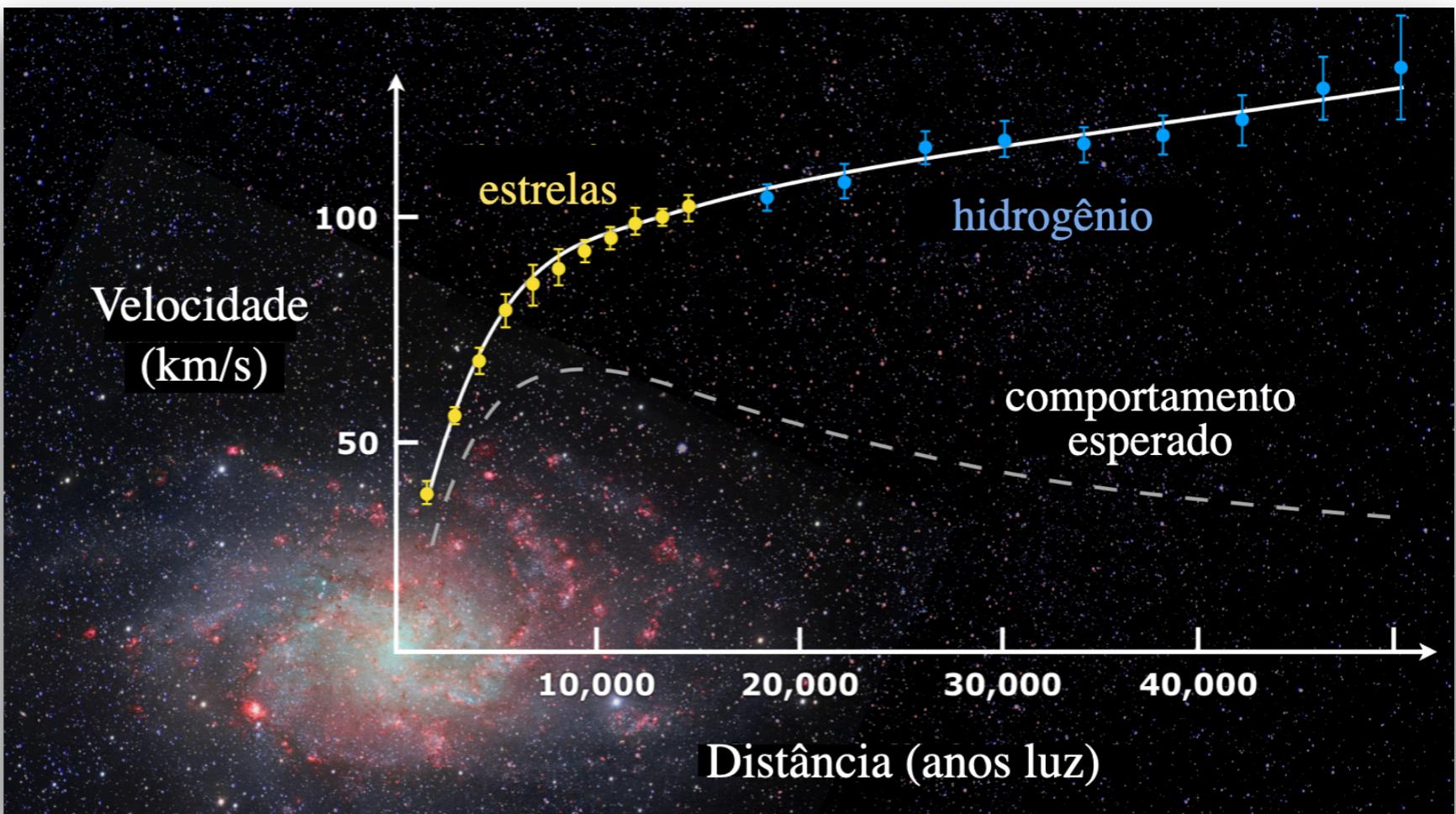
OUTROS ENIGMAS NOS DESAFIAM: O LADO ESCURO DO UNIVERSO

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

Há várias outras evidências modernas que comprovam a existência da matéria escura.

A natureza da matéria escura ainda é um mistério!

Neutrinos seriam os candidatos naturais. Com massa muito pequena, movem-se com velocidades muito próximas da da luz.

Seriam matéria escura "quente"

Mas a matéria escura "quente" não explicaria a formação das galáxias.

Há uma lista extensa de candidatos (axions, WIMPs, partículas supersimétricas, etc) que formariam a matéria escura "fria".

A proporção entre matéria escura e luminosa (**5:1**) é estimada com boa precisão combinando várias observações astronômicas.

<https://chrisnorth.github.io/planckapps/Simulator/>

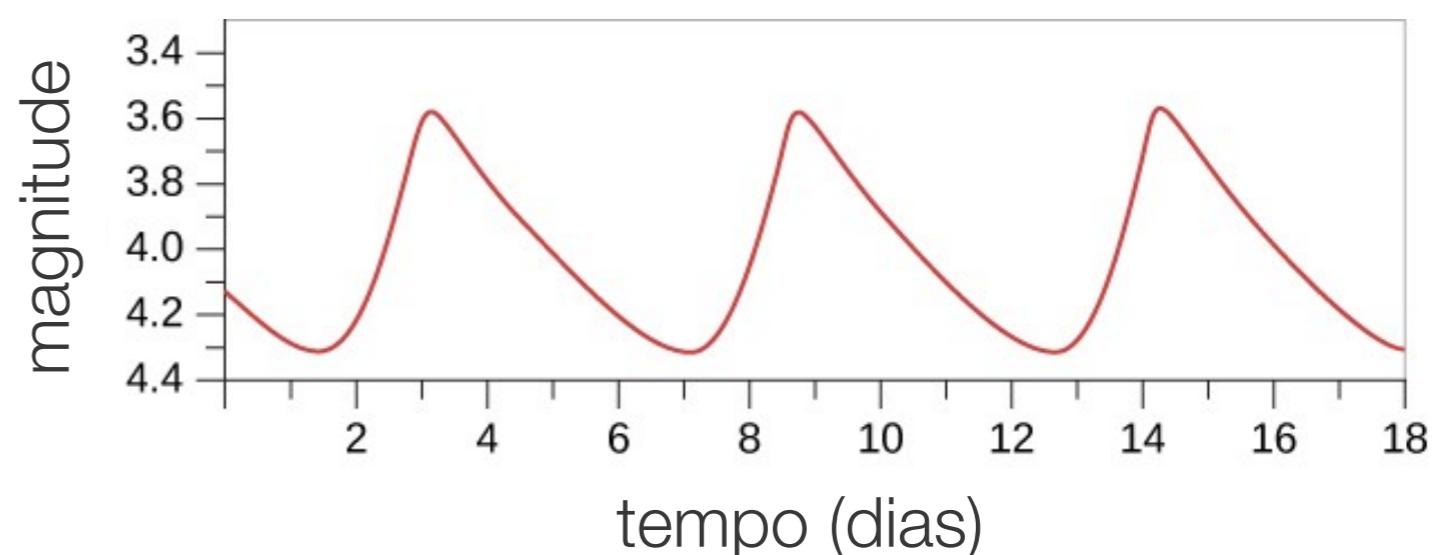
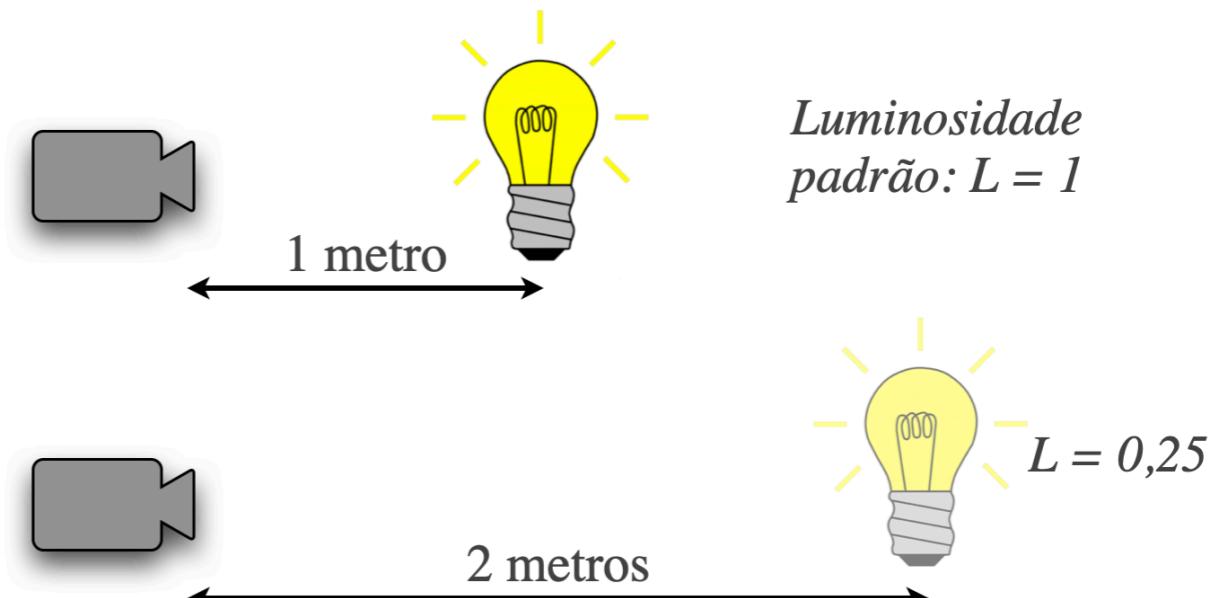
ENERGIA ESCURA

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.

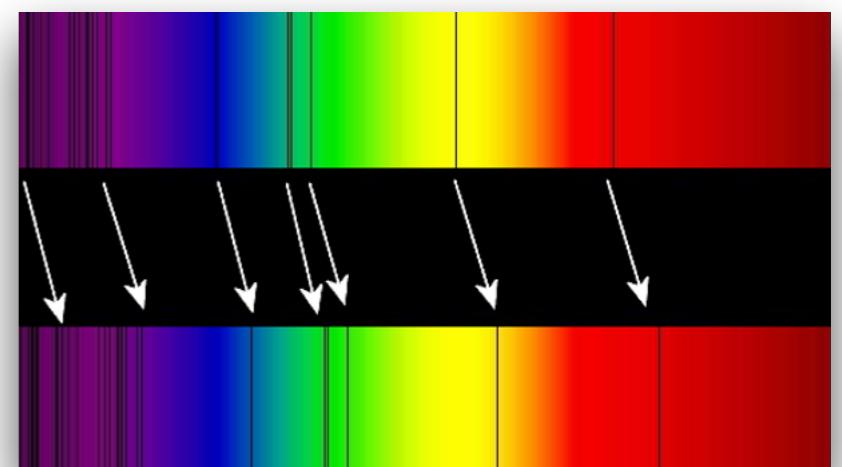
Conhecendo o brilho intrínseco de uma fonte, podemos inferir a sua distância medindo sua luminosidade aparente

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, $v = H d$.

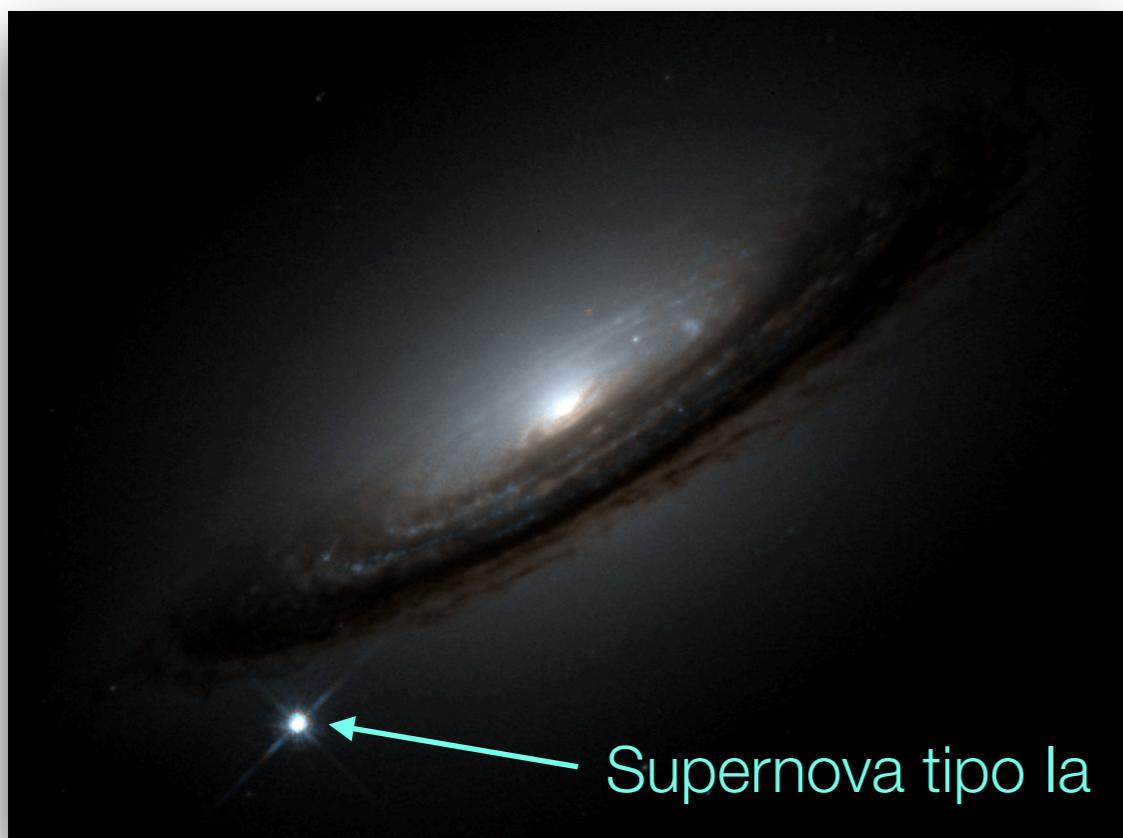
posição das linhas espectrais vistas em laboratório



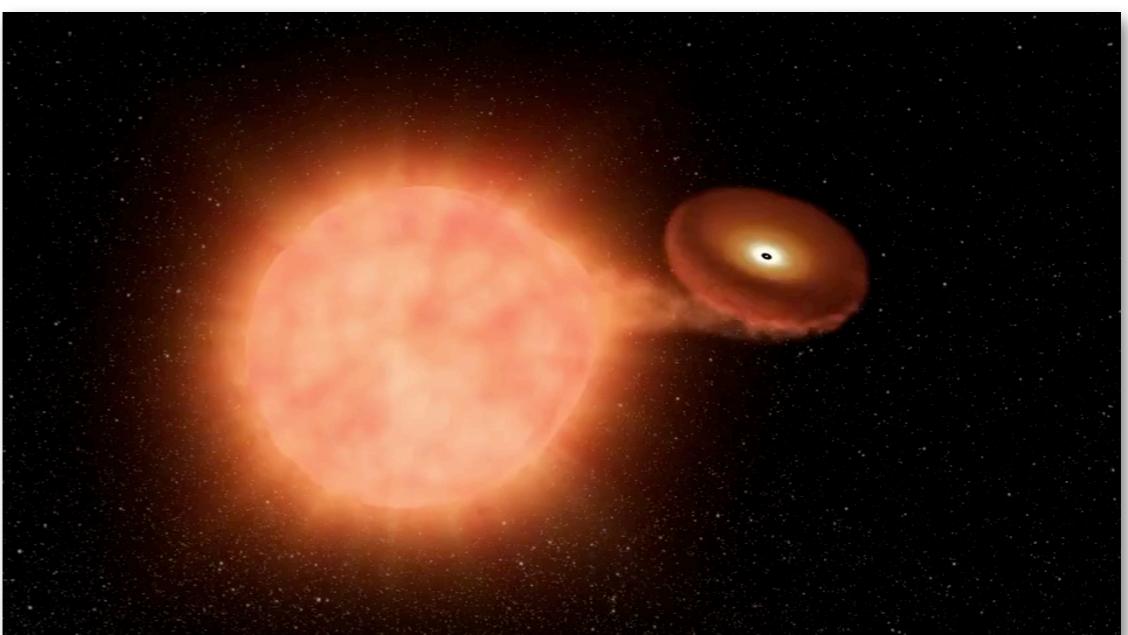
redshift:

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

posição das linhas espectrais na luz de uma galáxia



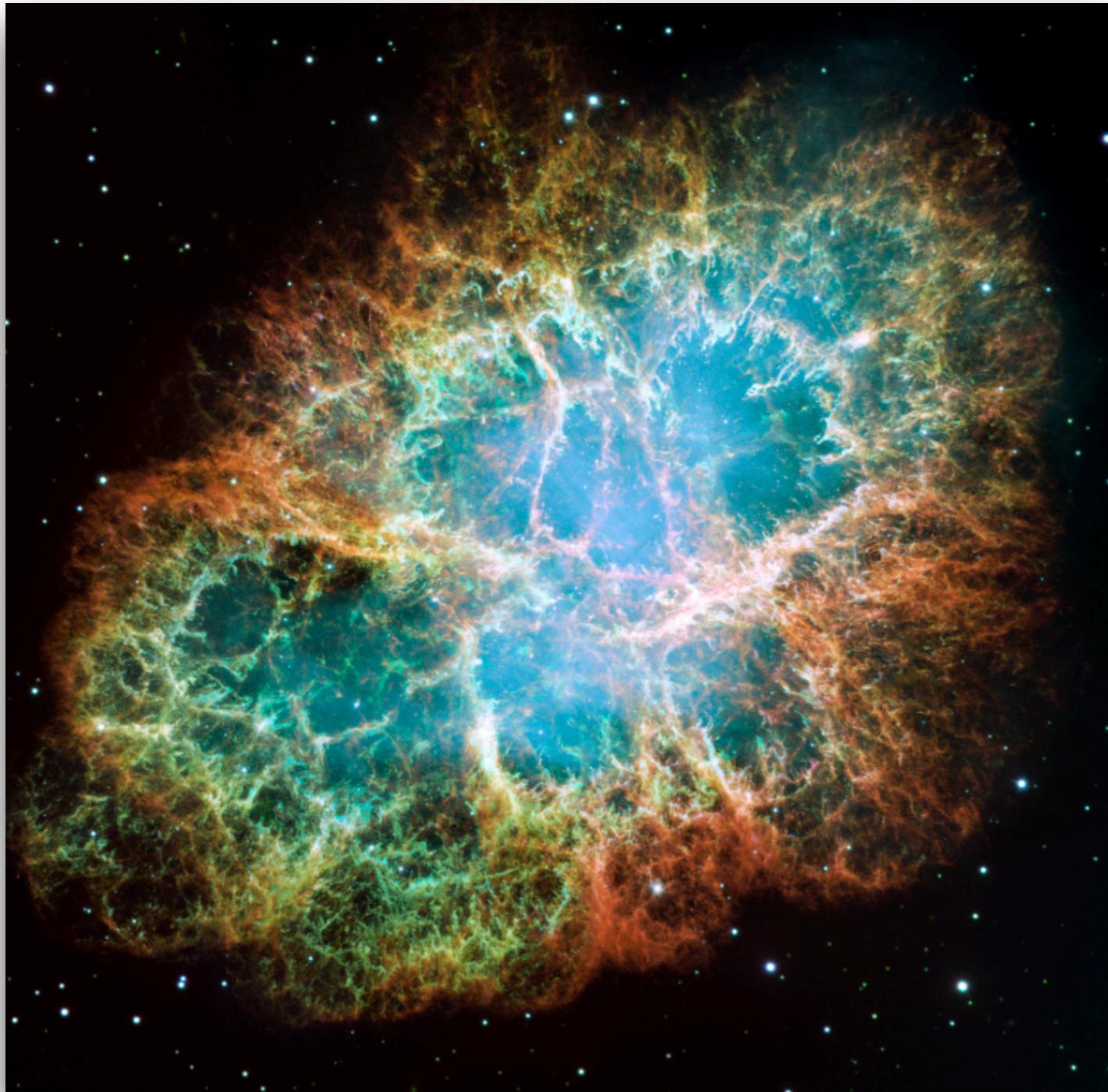
NASA



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

A nebulosa do Carangueijo

uma supernova que explodiu no ano 1045, vista por astrônomos chineses

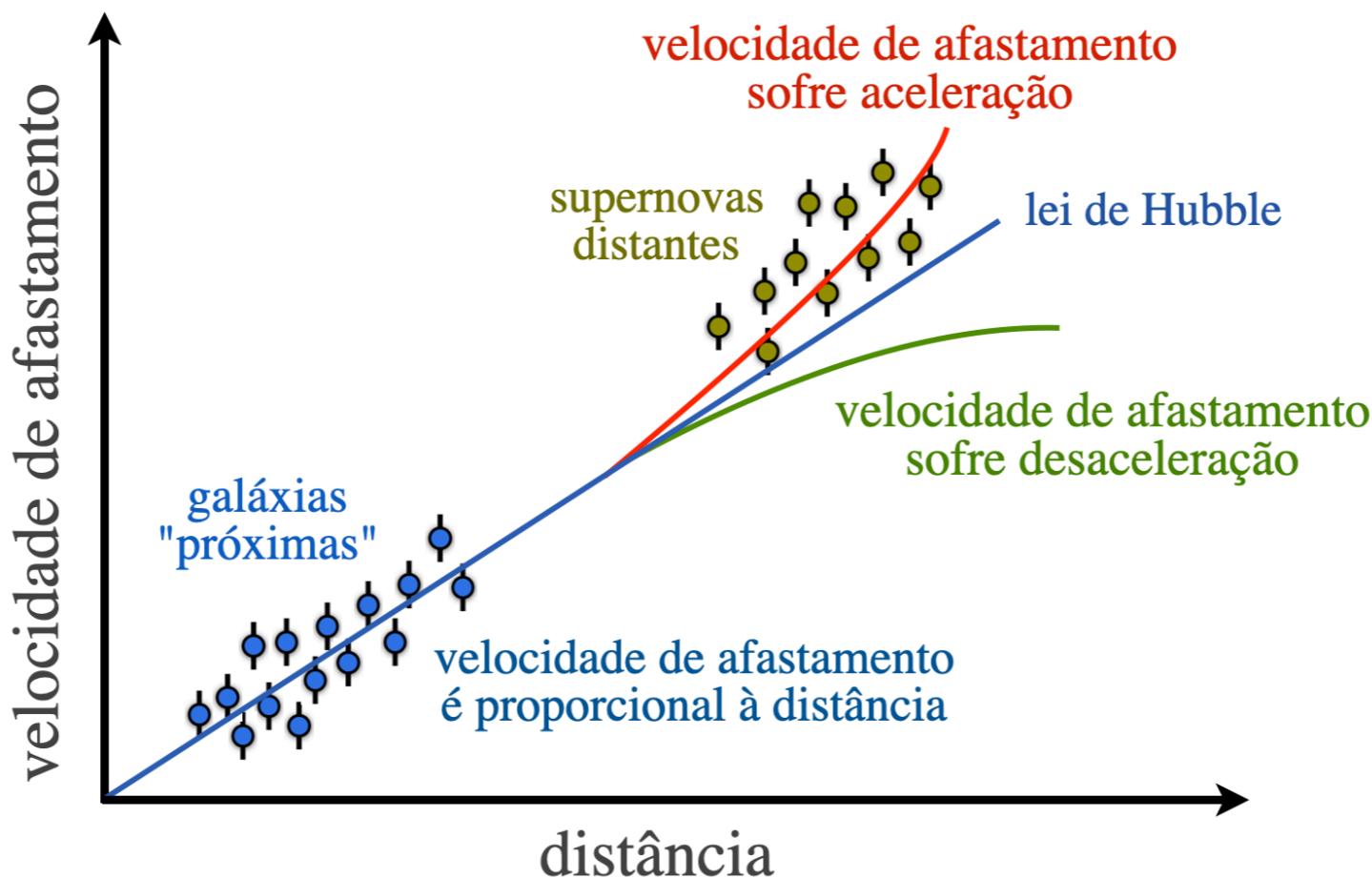


Somos feitos de material reciclado

- os átomos de hidrogênio dos nossos corpos foram criados no “começo” do Universo
- os elementos químicos mais pesados foram formados no interior das estrelas ou na explosão de supernovas
- antes dos nossos corpos, os átomos fizeram parte de outros seres, rochas, cometas, estrelas

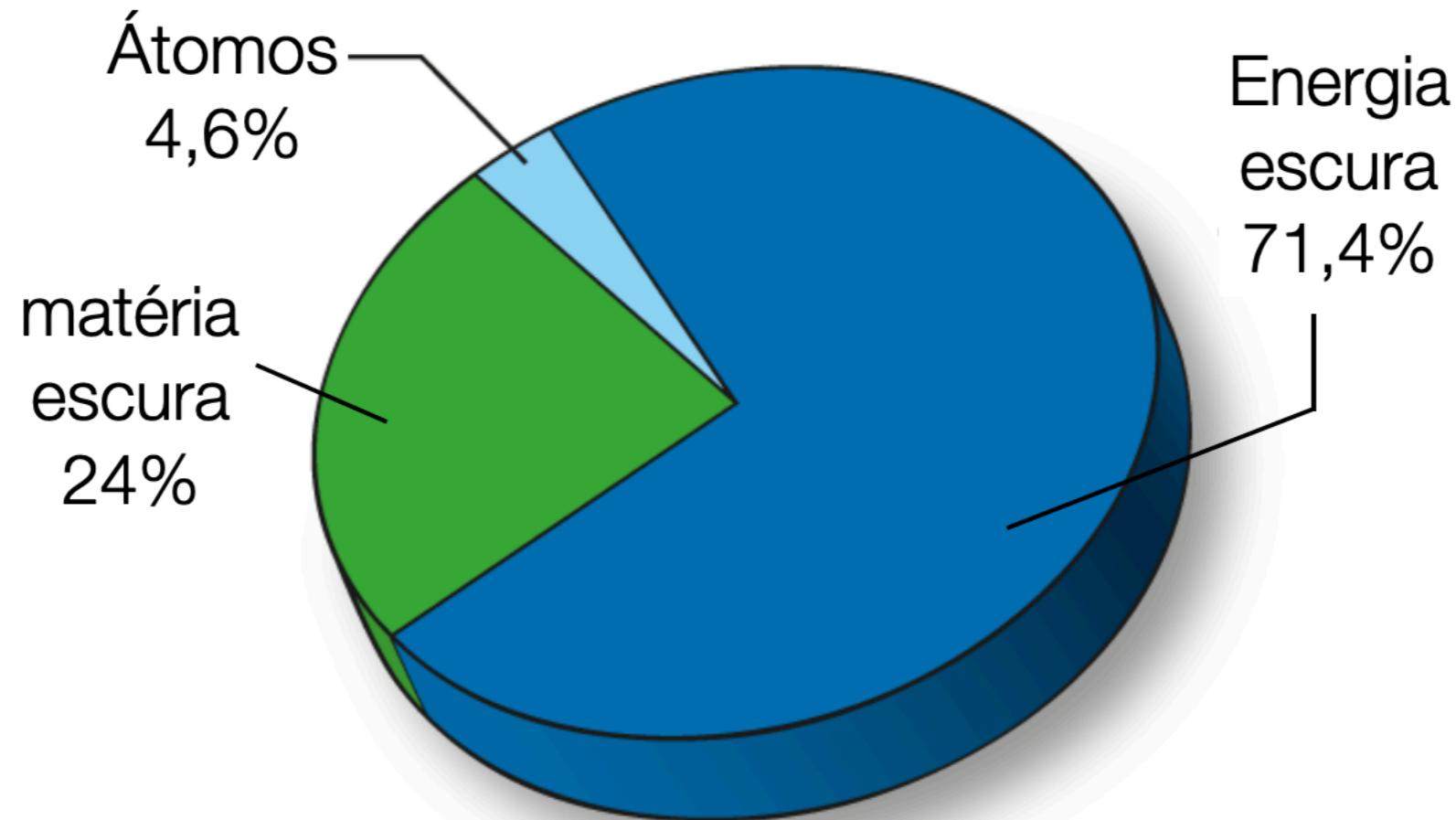
Supernovae 1a muito distantes podem ser observadas porque são muito brilhantes

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.