

Introdução à Física de Partículas

João Pires

LIP e Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa



LABORATÓRIO DE INSTRUMENTAÇÃO
E FÍSICA EXPERIMENTAL DE PARTÍCULAS



Ciências
ULisboa

Faculdade
de Ciências
da Universidade
de Lisboa

DEFINIÇÃO

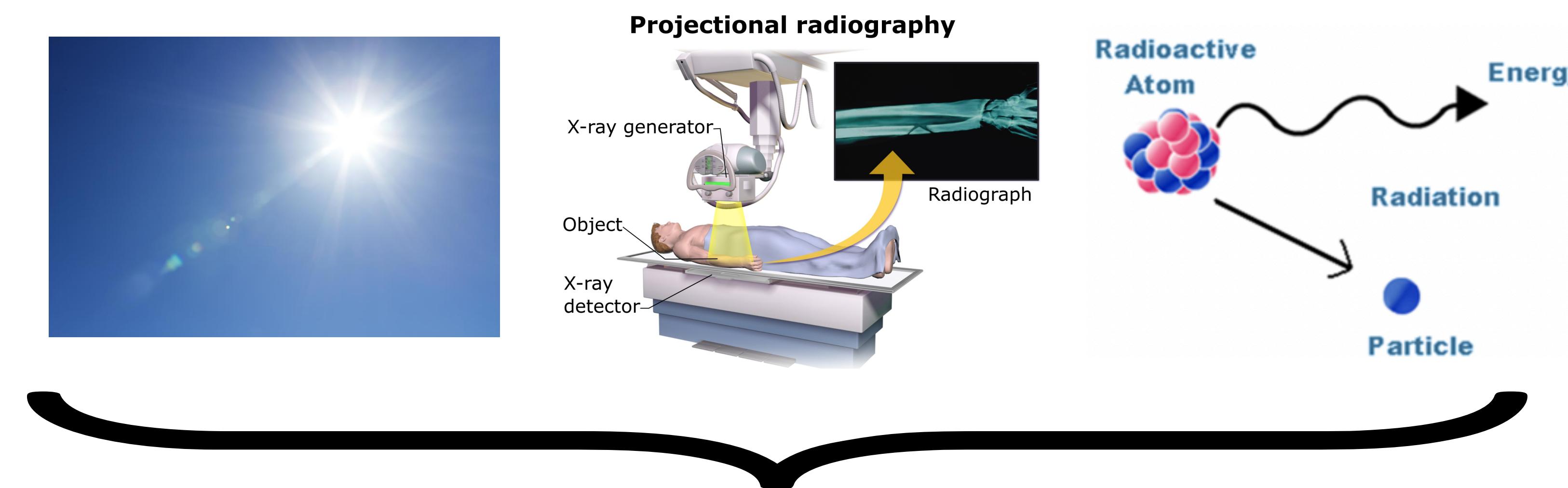
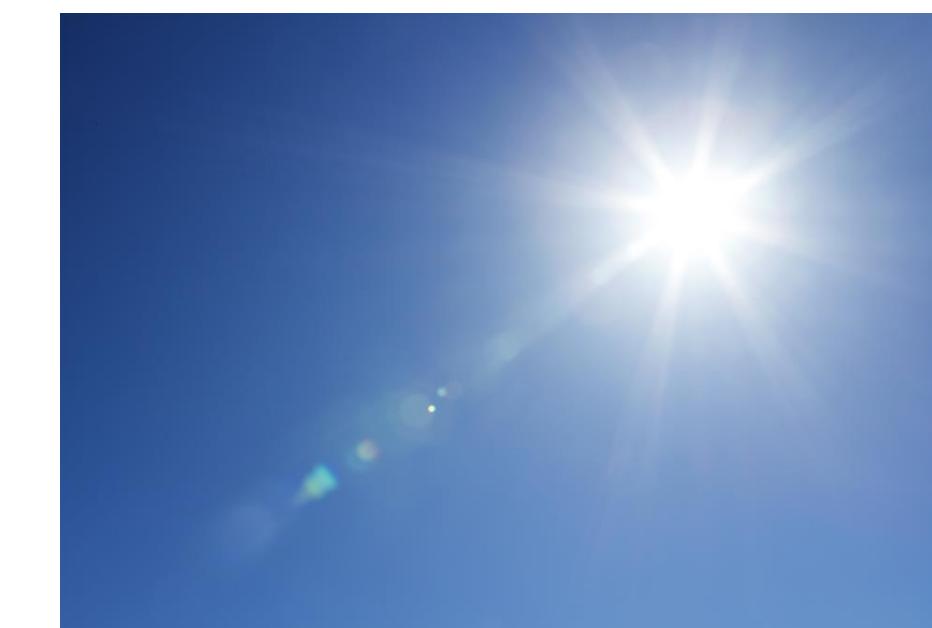
A Física de Partículas é o ramo de Física que estuda a natureza das partículas elementares que constituem a matéria e a radiação observável no Universo e as interações (forças) fundamentais necessárias para explicar o seu comportamento



Matéria: toda a substância com massa e volume

DEFINIÇÃO

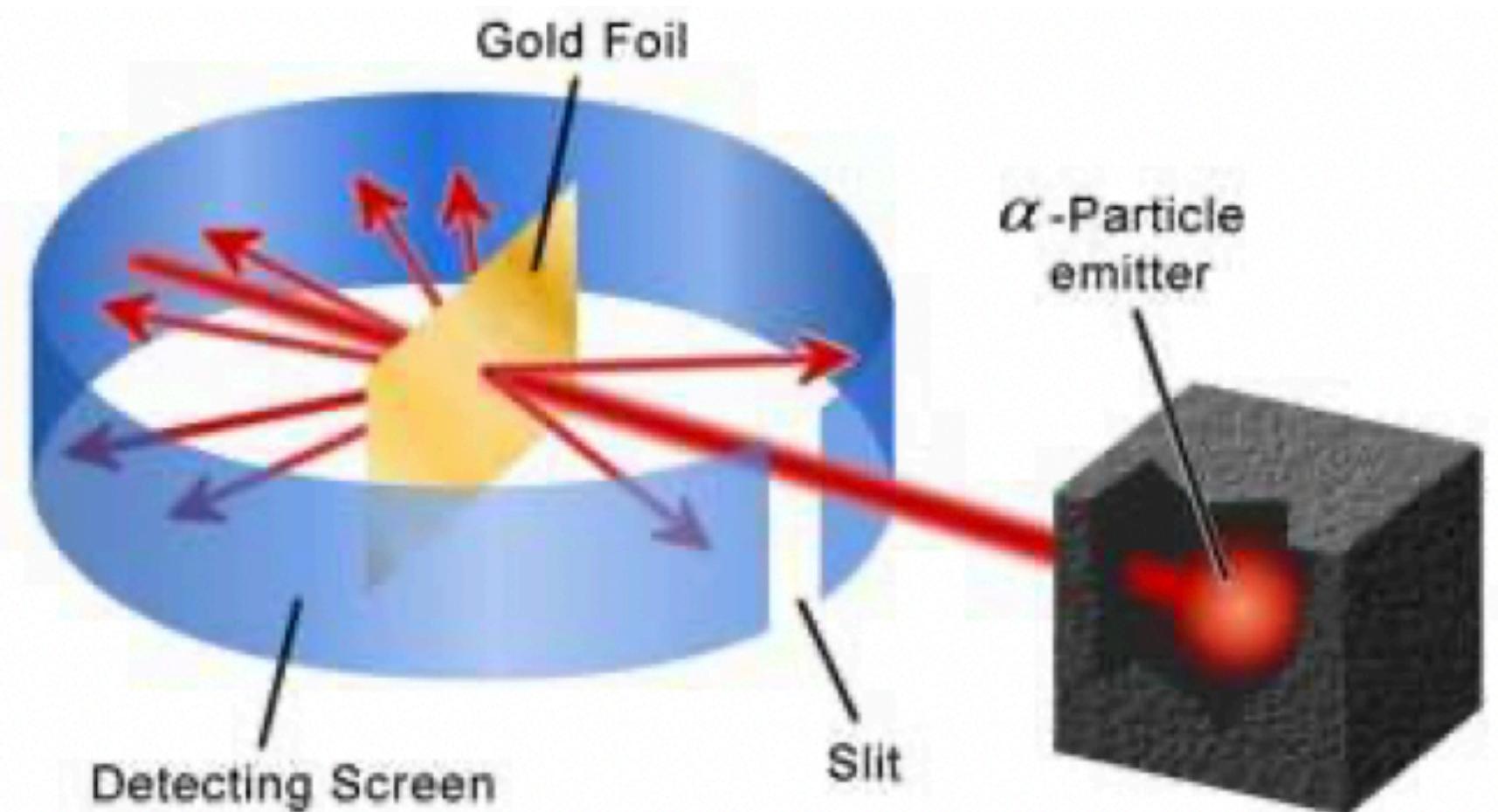
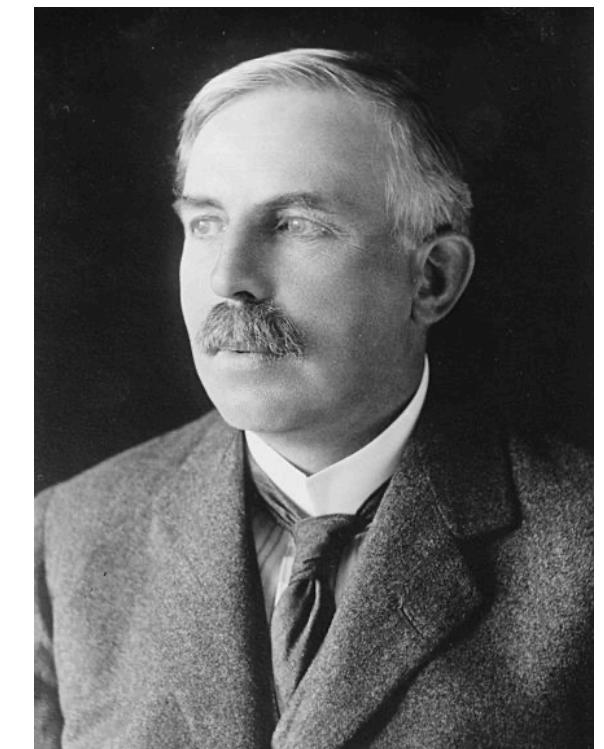
A Física de Partículas é o ramo de Física que estuda a natureza das partículas elementares que constituem a matéria e a radiação observável no Universo e as interações (forças) fundamentais necessárias para explicar o seu comportamento



Radiação: emissão e propagação de energia, radiação electromagnética (luz solar, raio X), radiação nuclear (desintegração de átomos radioactivos)

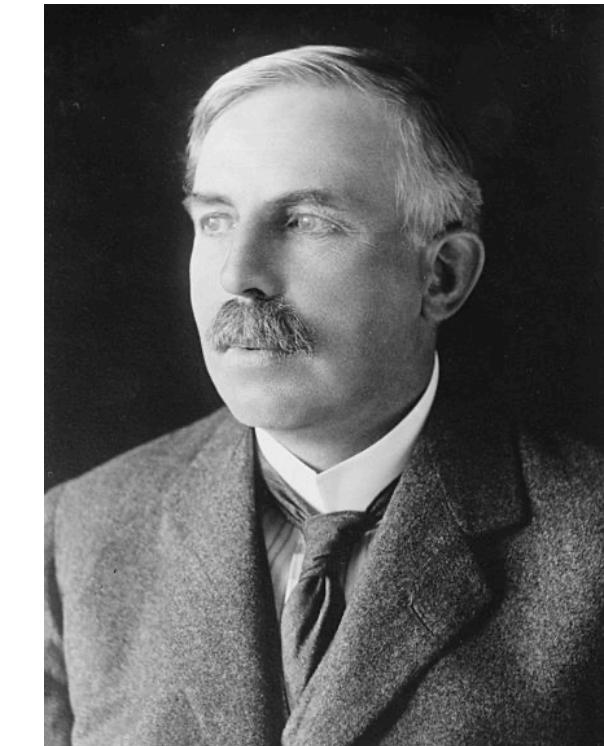
ÁTOMO: EXPERIÊNCIA DE RUTHERFORD 1909

Ideia: estudar a estrutura de átomo disparando um feixe de partículas α com carga positiva numa folha fina de Ouro e medir a dispersão das partículas α



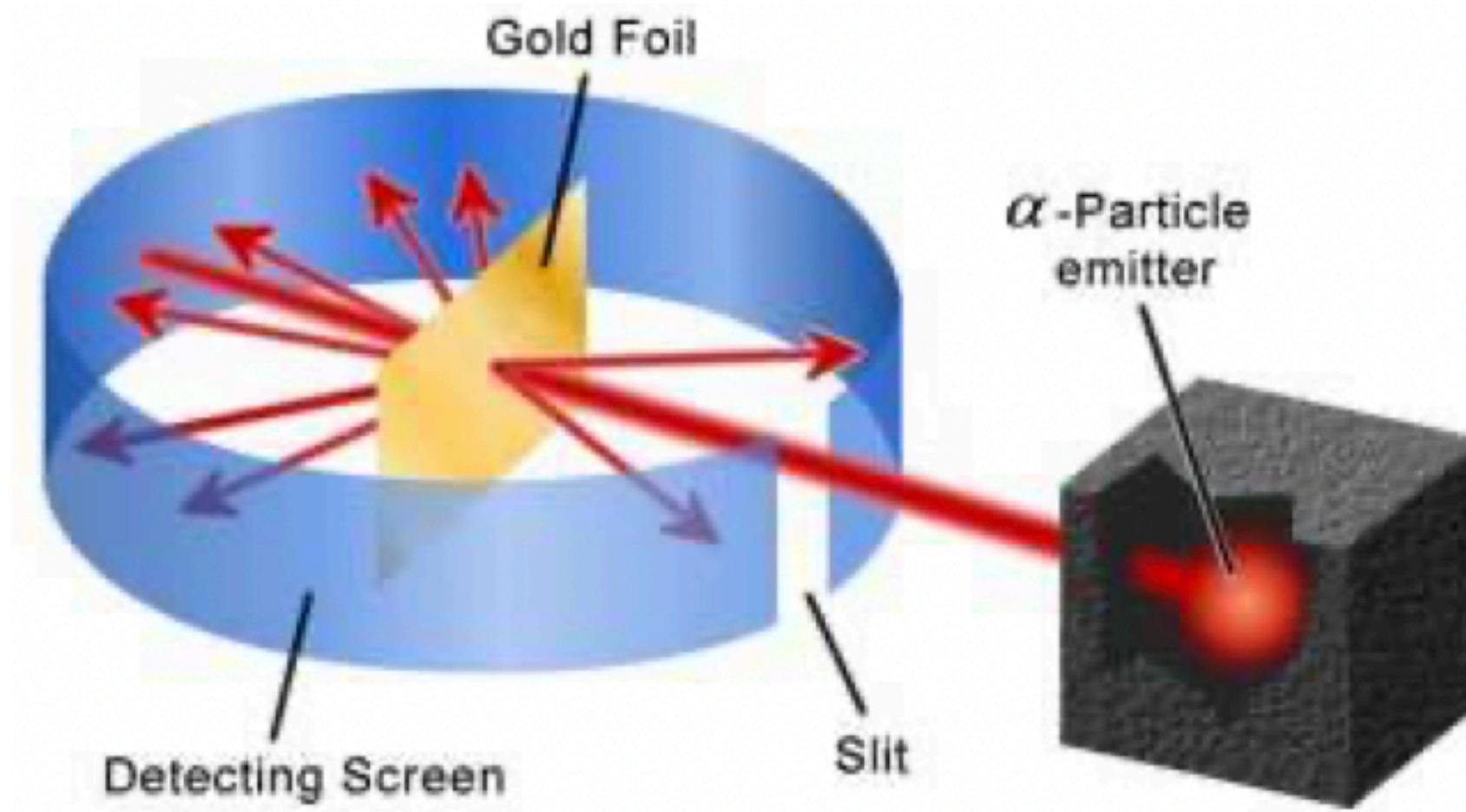
Experiência de Rutherford

ÁTOMO: EXPERIÊNCIA DE RUTHERFORD 1909

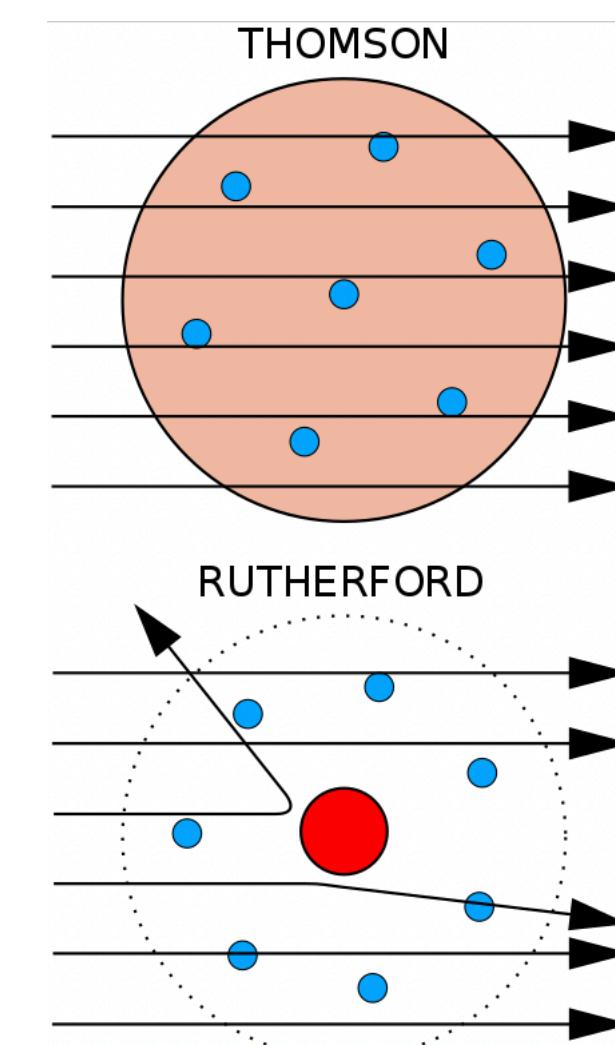


Ideia: estudar a estrutura de átomo disparando um feixe de partículas α com carga positiva numa folha fina de Ouro e medir a dispersão das partículas α

- Modelo de Thomson prevê a existência de pequenas deflexões
- Rutherford observou deflexões superiores a 180°
- Concluiu a existência no átomo de um centro massivo nuclear de dimensão 10^{-15} m rodeado por cargas negativas (electrões) até 10^{-10} m

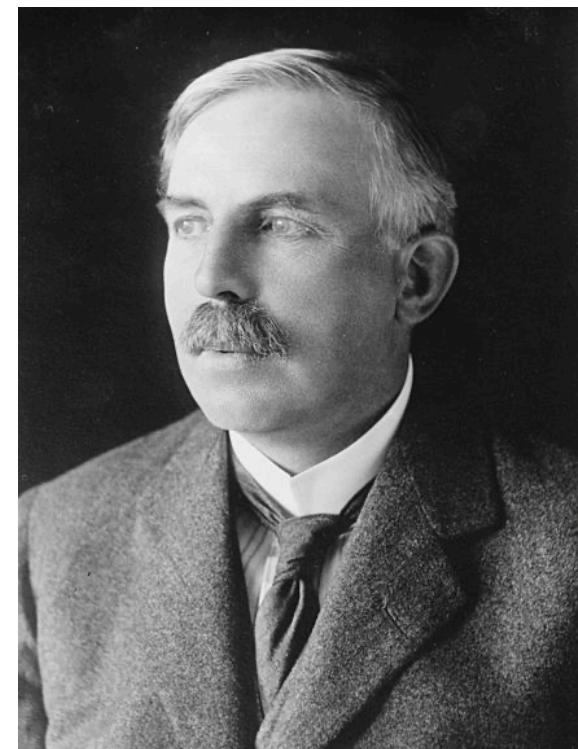


Experiência de Rutherford



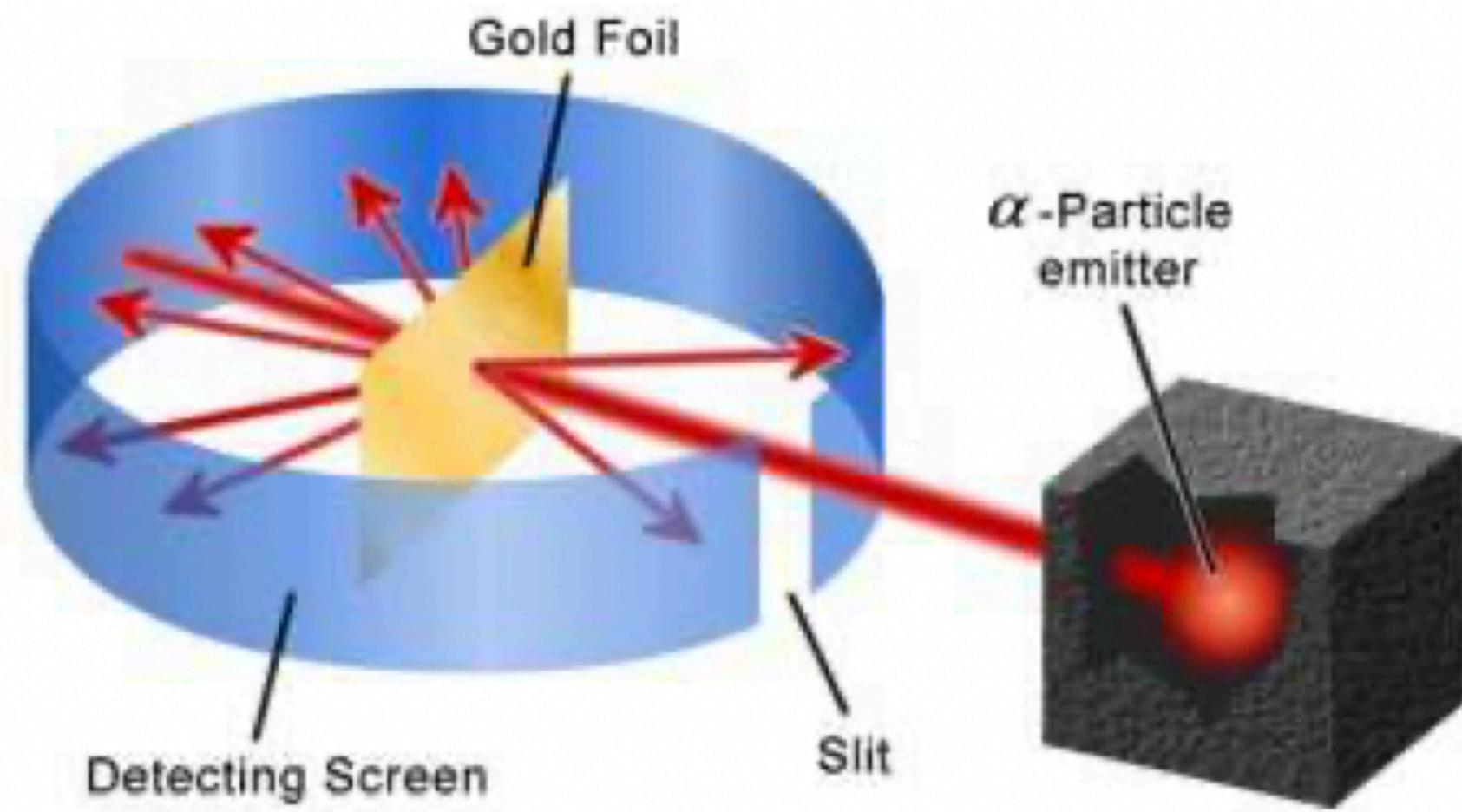
Modelos da estrutura do átomo

ÁTOMO: EXPERIÊNCIA DE RUTHERFORD 1909

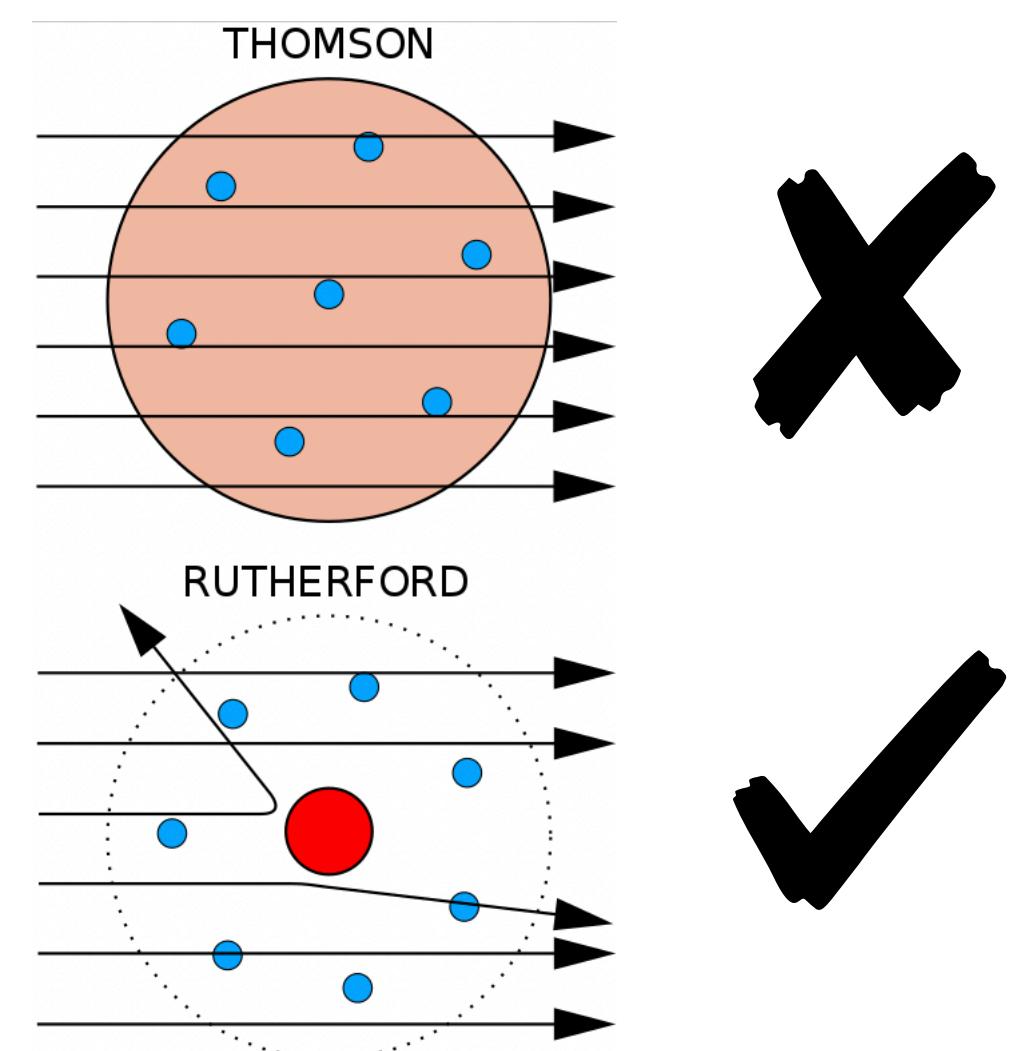


Ideia: estudar a estrutura de átomo disparando um feixe de partículas α com carga positiva numa folha fina de Ouro e medir a dispersão das partículas α

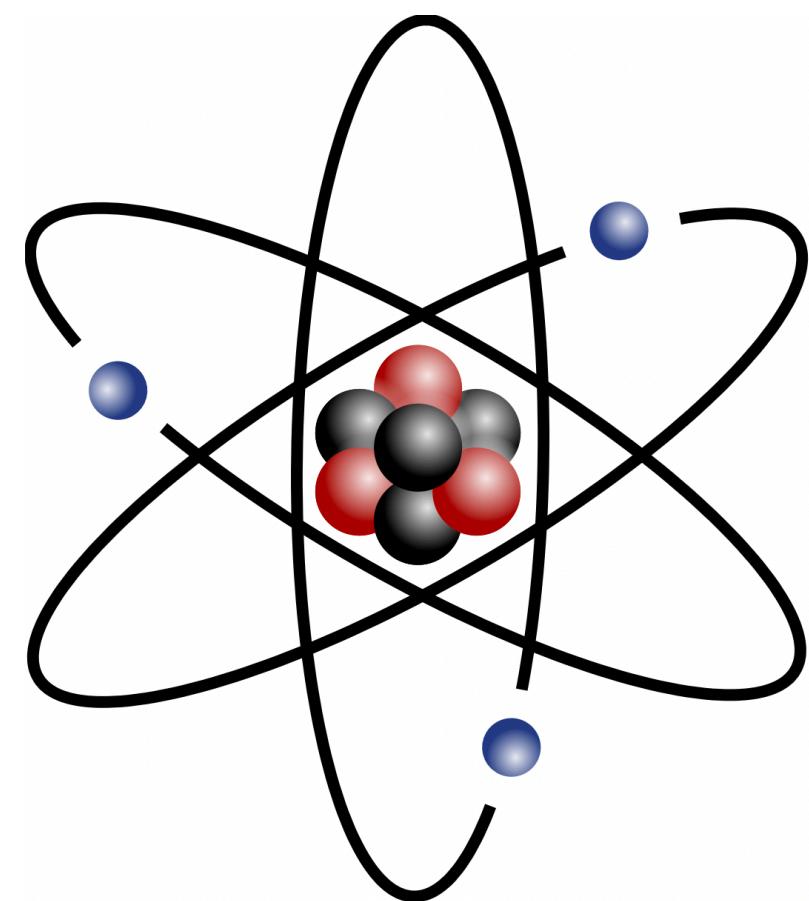
- Modelo de Thomson prevê a existência de pequenas deflexões
- Rutherford observou deflexões superiores a 180°
- Concluiu a existência no átomo de um centro massivo nuclear de dimensão 10^{-15} m rodeado por cargas negativas (electrões) até 10^{-10} m



Experiência de Rutherford



Modelos da estrutura do átomo

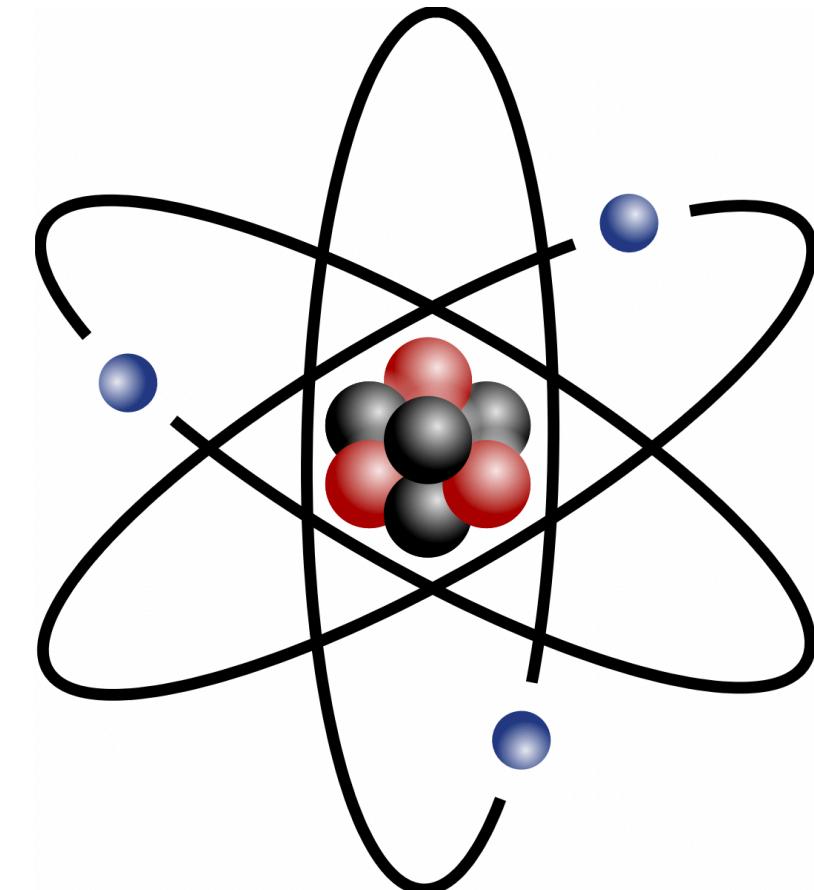


Modelo de Rutherford

REVOLUÇÃO NA FÍSICA: MECÂNICA QUÂNTICA 1915-1930

Física Clássica não consegue explicar explicar o modelo atómico de Rutherford:

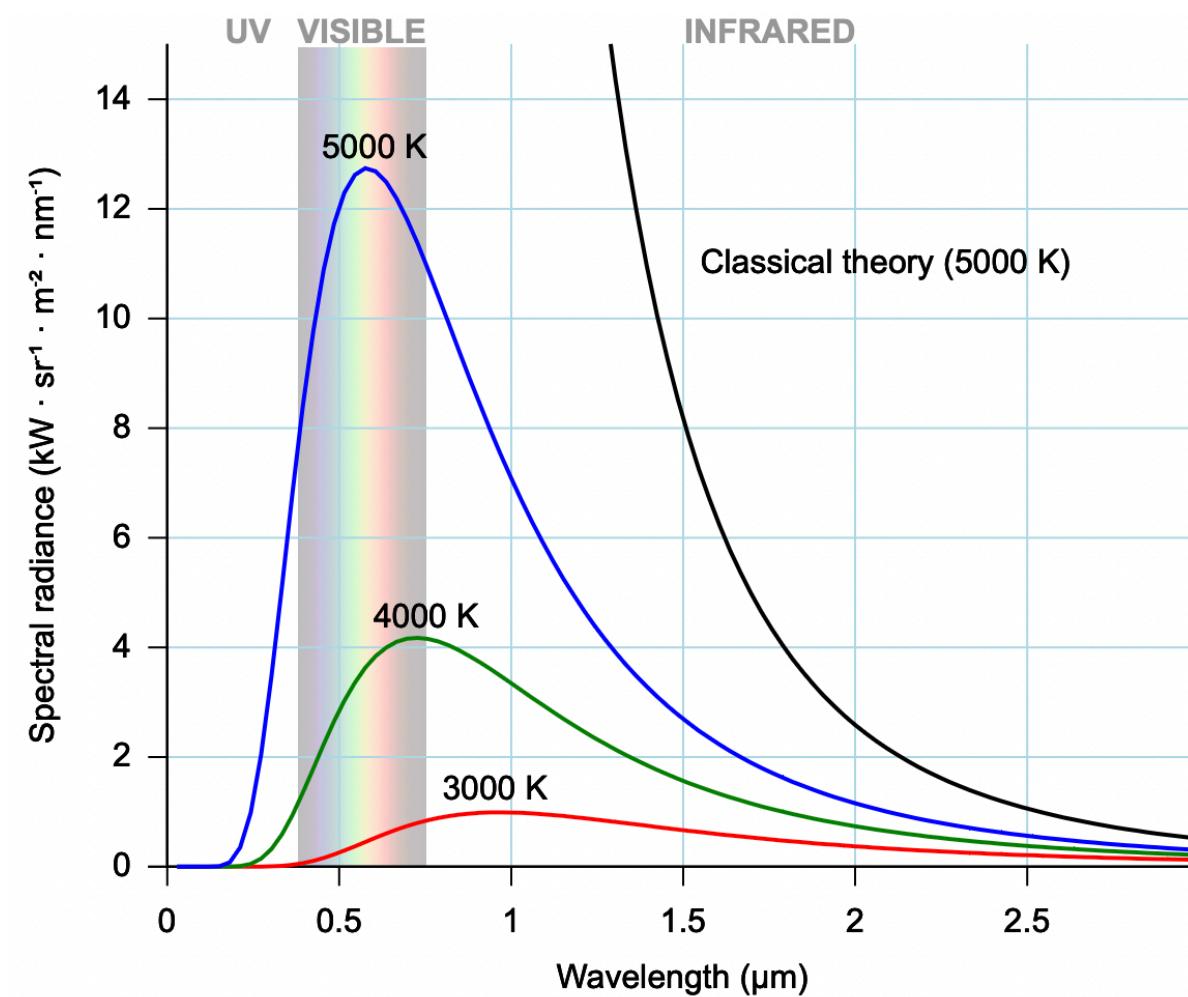
- cargas eléctricas em órbitas circulares como os electrões irradiam energia continuamente em movimento espiral colapsariam em direção ao núcleo



REVOLUÇÃO NA FÍSICA: MECÂNICA QUÂNTICA 1915-1930

Física Clássica não consegue explicar explicar o modelo atómico de Rutherford:

- cargas eléctricas em órbitas circulares como os electrões irradiam energia continuamente em movimento espiral colapsariam em direção ao núcleo
- Espectro de Planck → radiação emitida por corpo negro a Temperatura T diverge a baixos comprimentos de onda na Física Clássica

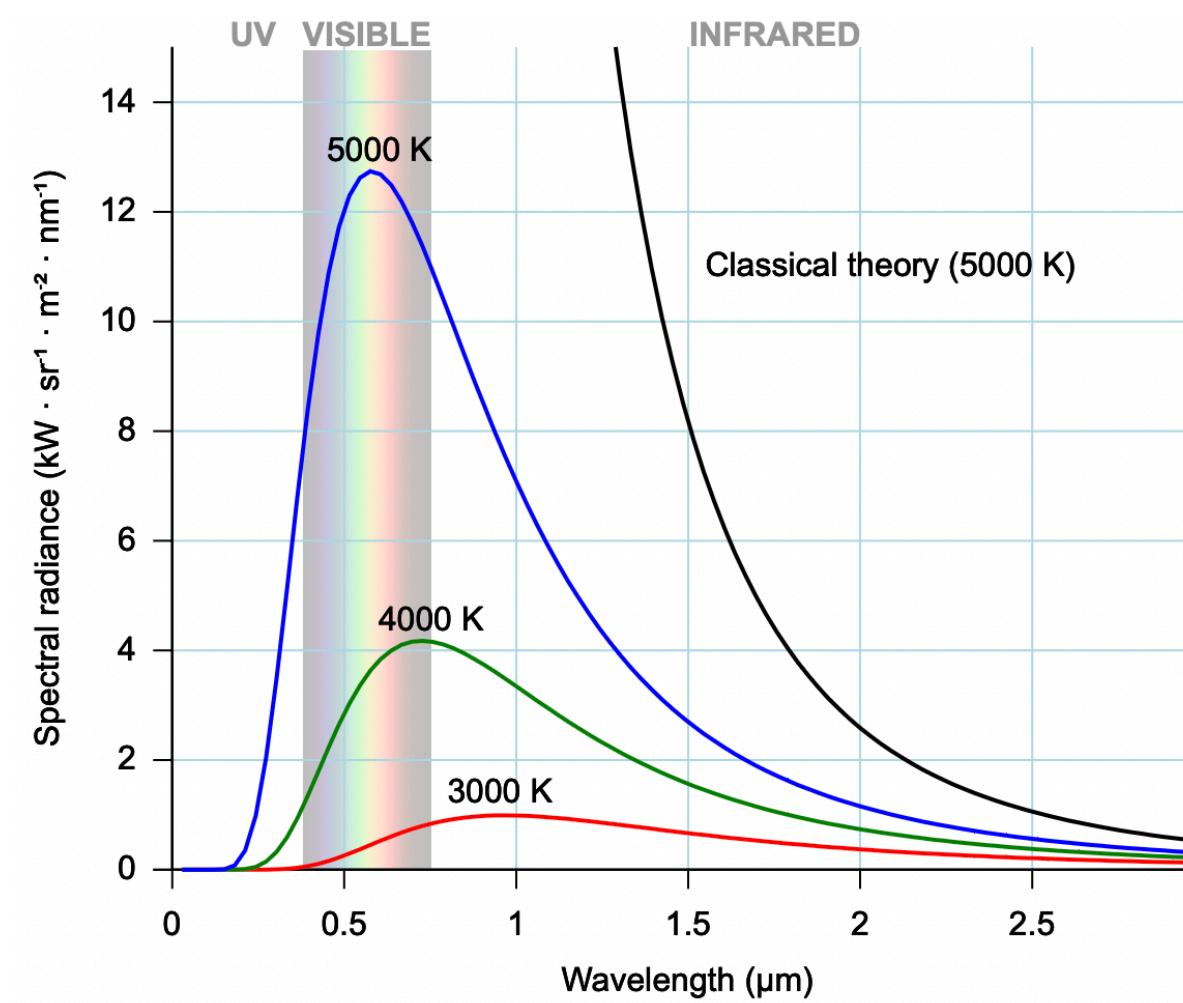


Espectro de emissão do corpo negro

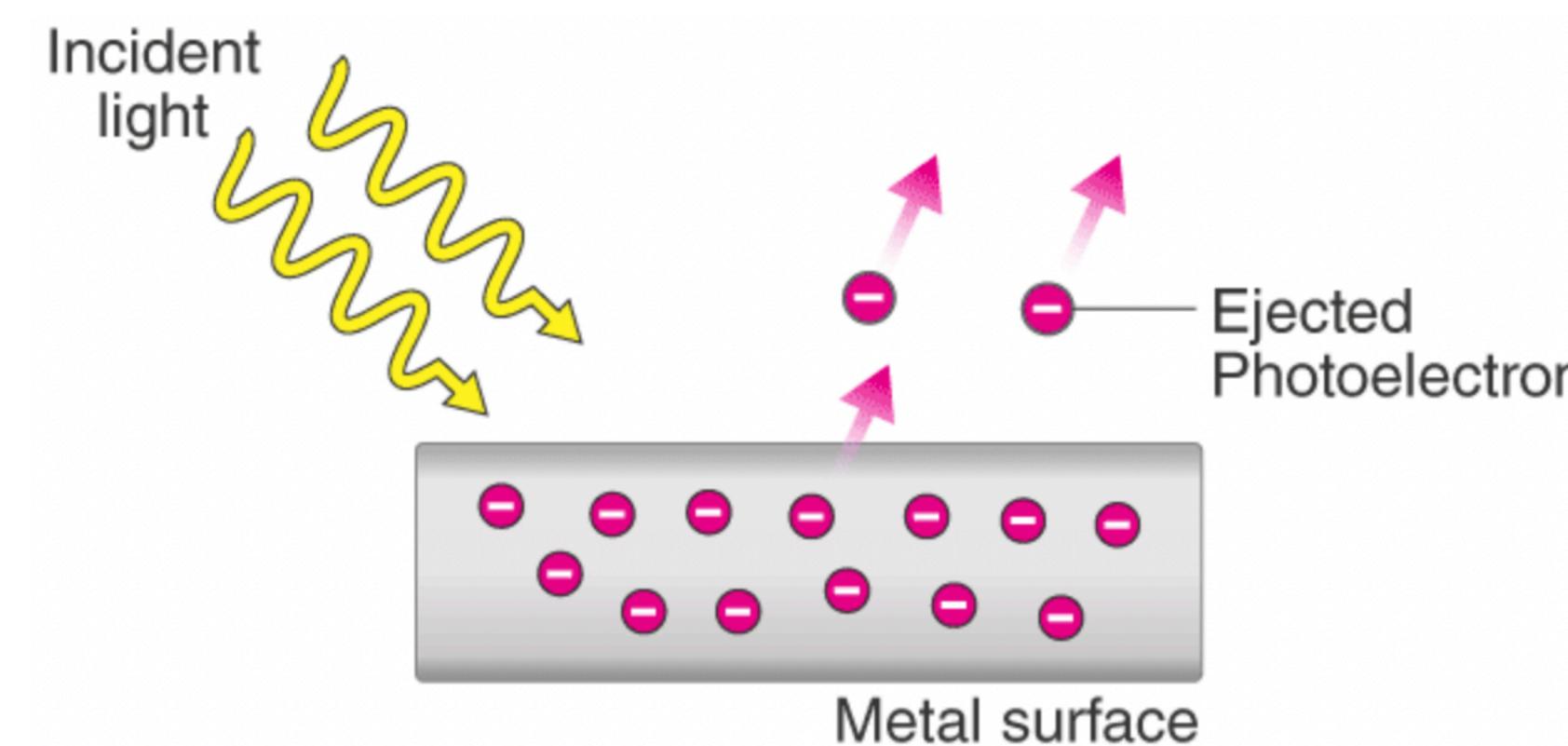
REVOLUÇÃO NA FÍSICA: MECÂNICA QUÂNTICA 1915-1930

Física Clássica não consegue explicar explicar o modelo atómico de Rutherford:

- cargas eléctricas em órbitas circulares como os electrões irradiam energia continuamente em movimento espiral colapsariam em direção ao núcleo
- Espectro de Planck → radiação emitida por corpo negro a Temperatura T diverge a baixos comprimentos de onda na Física Clássica
- Efeito fotoeléctrico (A.Einstein) → emissão de electrões de um objecto metálico quando exposto a radiação electromagnética a altas frequências. Energia cinética do electrão independente da intensidade da radiação



Espectro de emissão do corpo negro

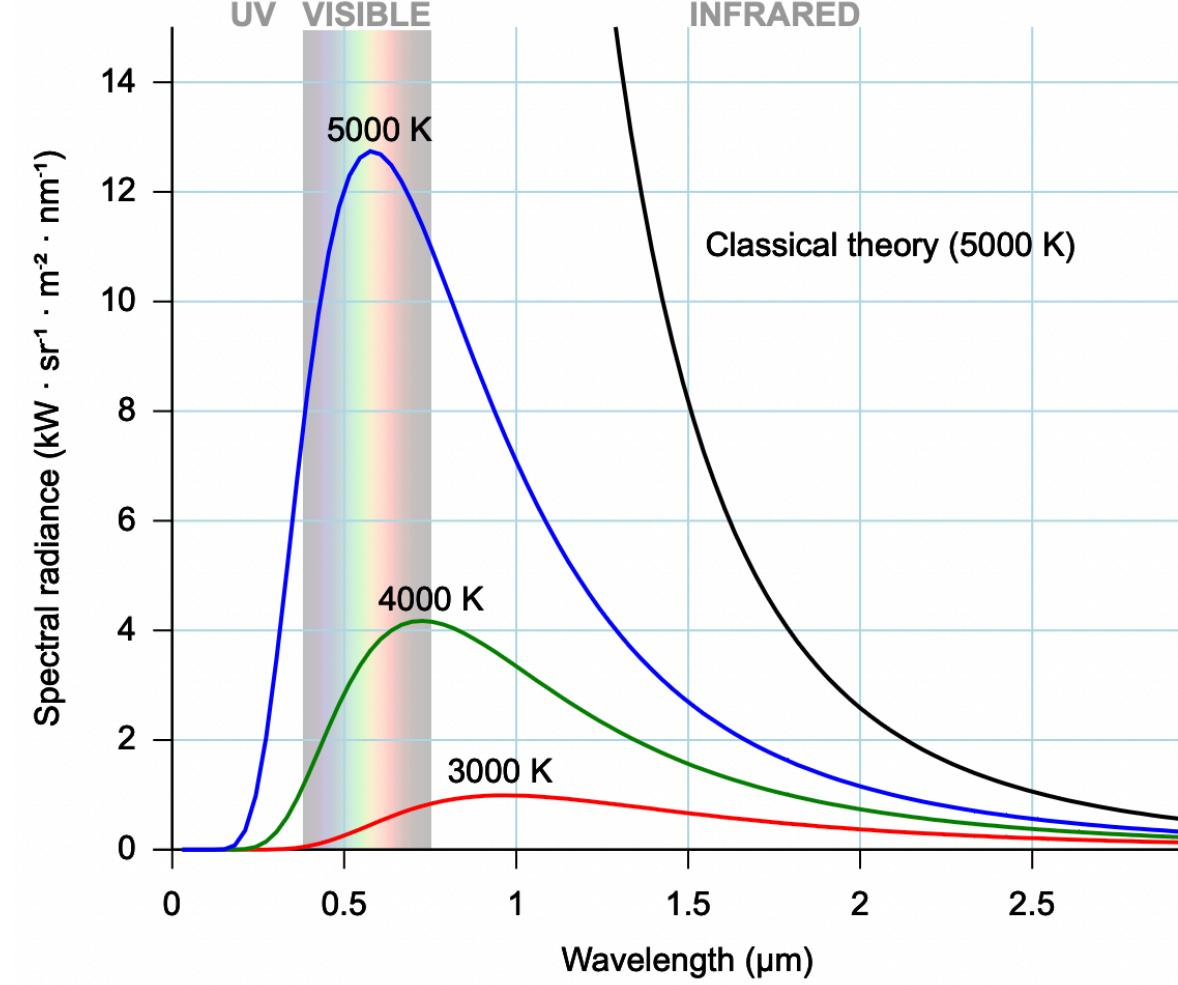


Efeito fotoeléctrico

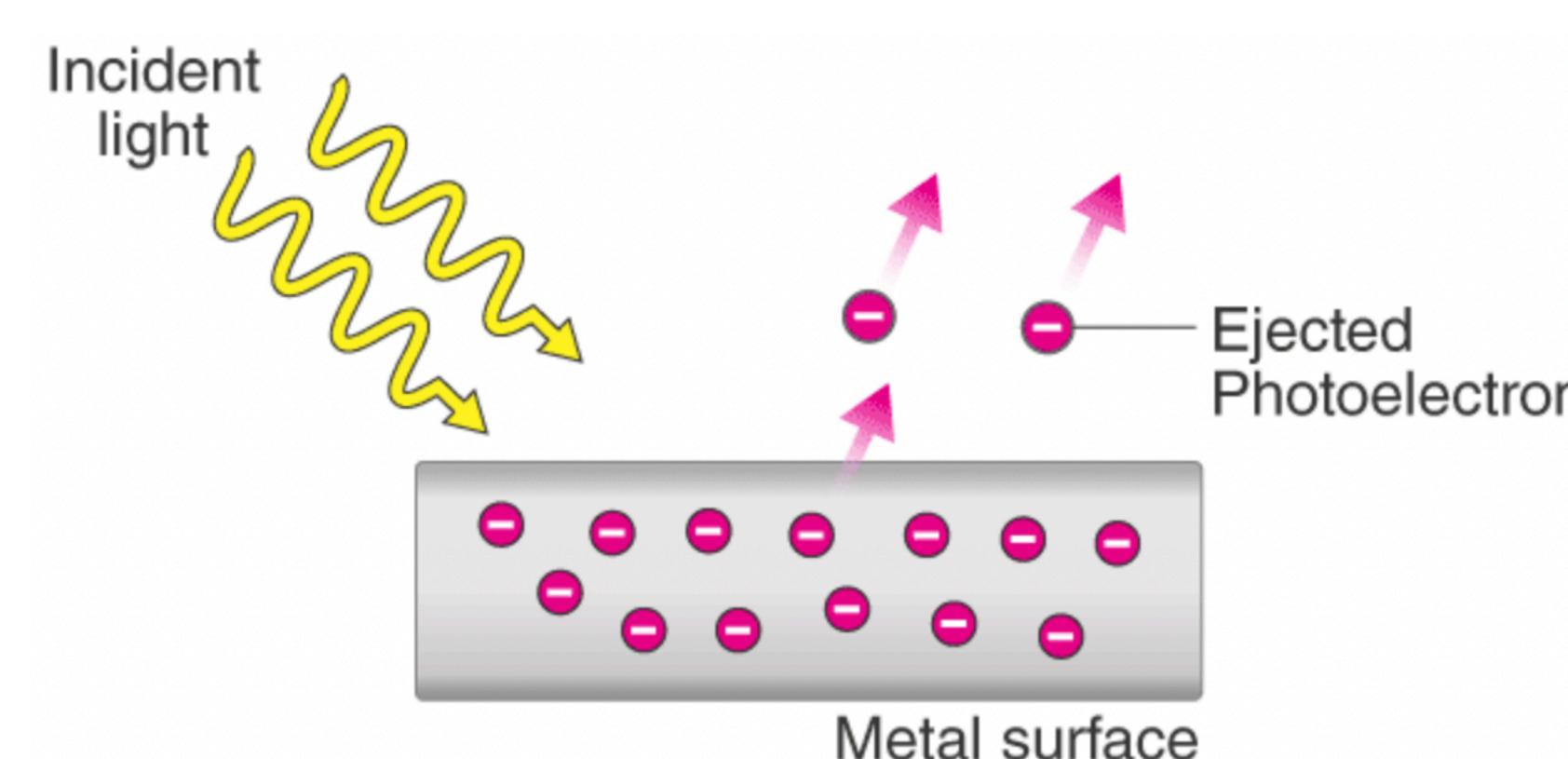
REVOLUÇÃO NA FÍSICA: MECÂNICA QUÂNTICA 1915-1930

Física Clássica não consegue explicar explicar o modelo atómico de Rutherford:

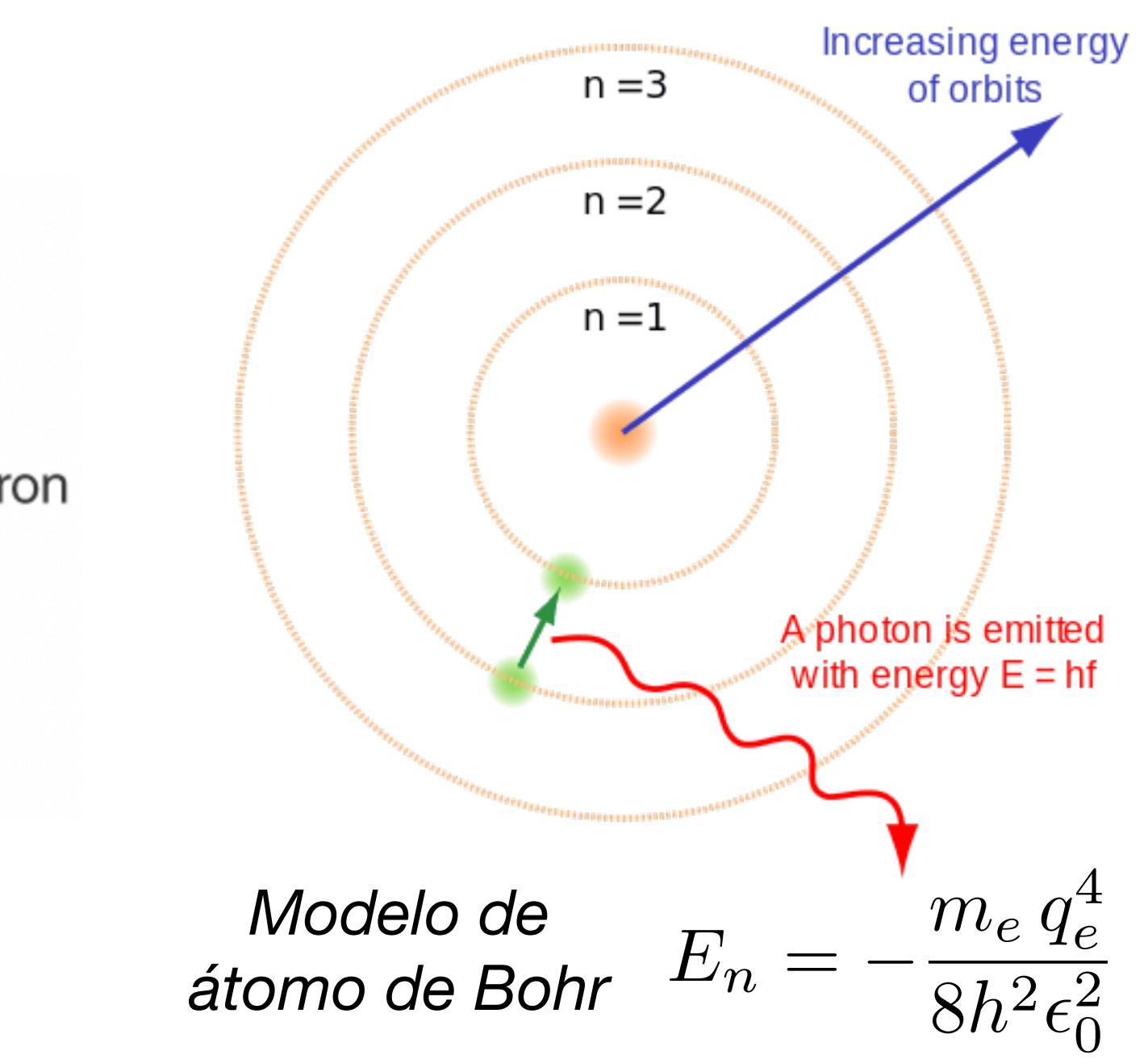
- cargas eléctricas em órbitas circulares como os electrões irradiam energia continuamente em movimento espiral colapsariam em direção ao núcleo
- Espectro de Planck → radiação emitida por corpo negro a Temperatura T diverge a baixos comprimentos de onda na Física Clássica
- Efeito fotoeléctrico (A.Einstein) → emissão de electrões de um objecto metálico quando exposto a radiação electromagnética a altas frequências. Energia cinética do electrão independente da intensidade da radiação
- Niels Bohr propõe que as energias dos electrões nos átomos também se encontram quantizadas e apenas existem em certos valores de energia permitidos



Espectro de emissão do corpo negro

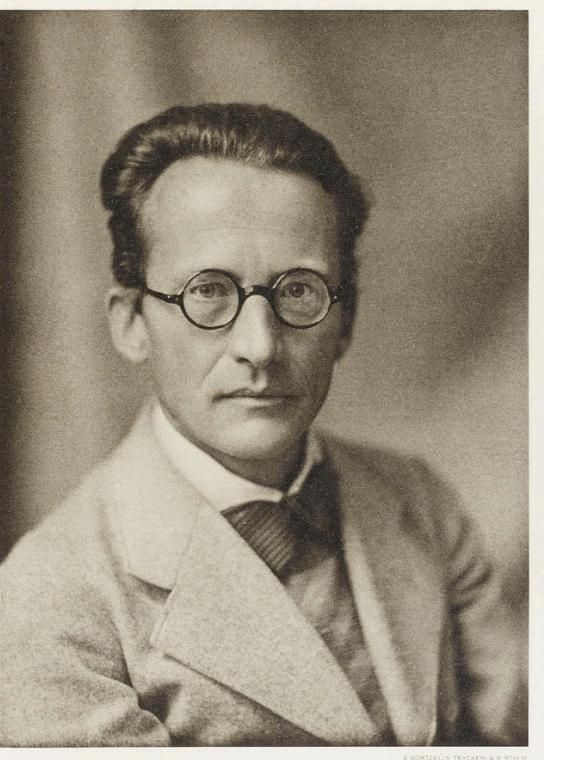


Efeito fotoeléctrico



$$\text{Modelo de átomo de Bohr} \quad E_n = -\frac{m_e q_e^4}{8h^2 \epsilon_0^2}$$

REVOLUÇÃO NA FÍSICA: MECÂNICA QUÂNTICA 1915-1930



Abandono do determinismo da Física Clássica $(x, t) \rightarrow \Psi(x, t)$

- Descrição de um sistema físico através de função de onda ψ complexa que obedece à equação de Schrödinger

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(x, t) = \left[-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + V(x, t) \right] \Psi(x, t)$$

- $\Psi(x, t)$ representa o estado do sistema para cada coordenada x e tempo t e equação descreve a evolução do sistema, fazer previsões
- Probabilidade de observar o sistema no ponto x e tempo t determinada a partir do quadrado da função de onda $\text{Pr}(x, t) = |\Psi(x, t)|^2$

REVOLUÇÃO NA FÍSICA: MECÂNICA QUÂNTICA 1915-1930



Abandono do determinismo da Física Clássica $(x, t) \rightarrow \Psi(x, t)$

- Descrição de um sistema físico através de função de onda ψ complexa que obedece à equação de Schrödinger

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(x, t) = \left[-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + V(x, t) \right] \Psi(x, t)$$

- $\Psi(x, t)$ representa o estado do sistema para cada coordenada x e tempo t e equação descreve a evolução do sistema, fazer previsões
- Probabilidade de observar o sistema no ponto x e tempo t determinada a partir do quadrado da função de onda $\text{Pr}(x, t) = |\Psi(x, t)|^2$
- Para o caso do electrão no átomo de Hidrogenio o potencial eléctrico tem a forma $V(r) = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2\mu} \nabla^2 - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \right) \psi(r, \theta, \varphi) = E\psi(r, \theta, \varphi)$$

Equação de Schrödinger para o átomo de Hidrogénio em coordenadas esféricas

$$\psi_{nlm}(r, \theta, \varphi) = \sqrt{\left(\frac{2}{na_0^*}\right)^3 \frac{(n-\ell-1)!}{2n(n+\ell)!}} e^{-\rho/2} \rho^\ell L_{n-\ell-1}^{2\ell+1}(\rho) Y_\ell^m(\theta, \varphi)$$

Solução da equação de Schrödinger para o átomo de Hidrogénio

$$|\psi_{1s}(r)|^2 = \frac{1}{\pi a_0^3} e^{-2r/a_0}$$

Probabilidade de encontrar o electrão no nível de menor energia



3 PROBLEMAS EM ABERTO

3 PROBLEMAS EM ABERTO

Equação de Schrödinger aplica-se
apenas a partículas não relativistas $v \ll c$

3 PROBLEMAS EM ABERTO

Equação de Schrödinger aplica-se apenas a partículas não relativistas $v \ll c$

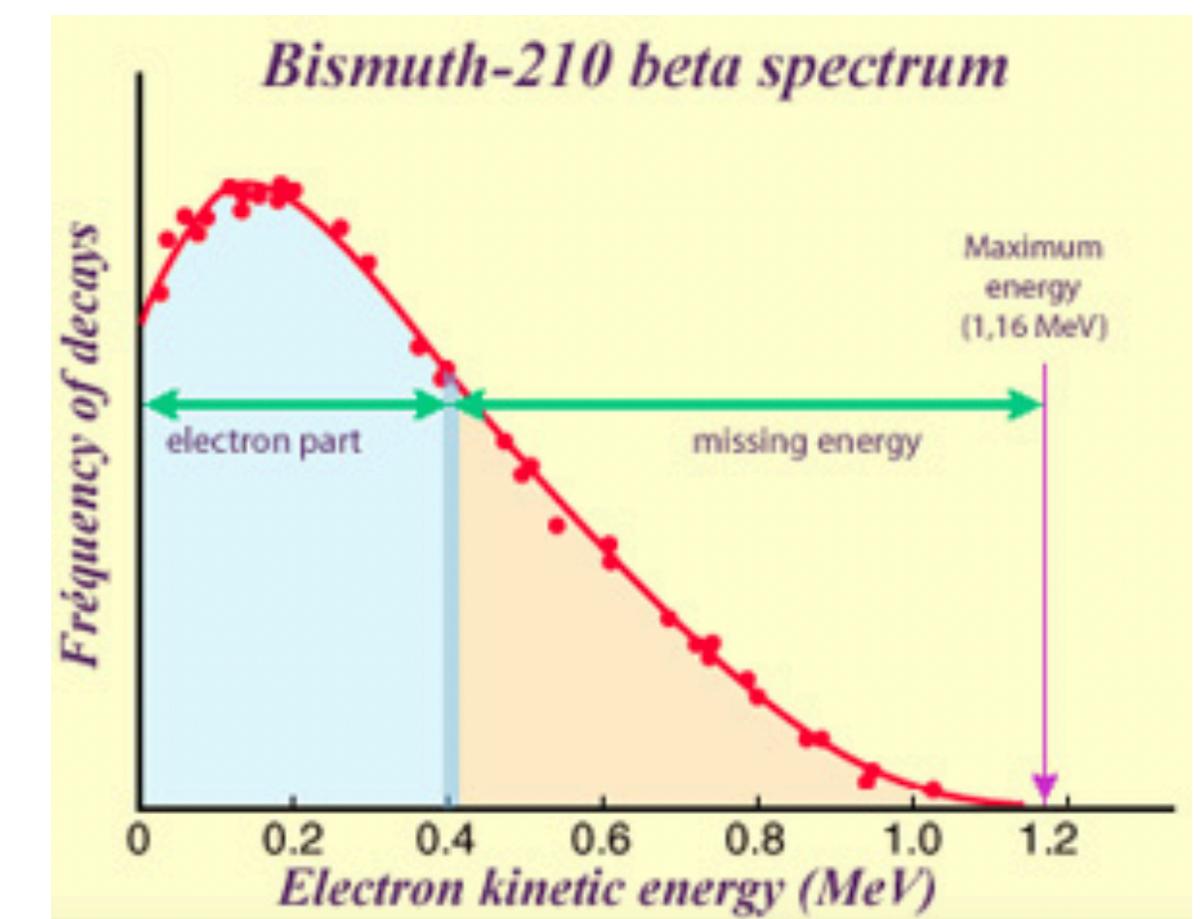
Núcleo do átomo é instável com alta densidade de cargas positivas que se repelem

3 PROBLEMAS EM ABERTO

Equação de Schrödinger aplica-se apenas a partículas não relativistas $v \ll c$

Núcleo do átomo é instável com alta densidade de cargas positivas que se repelem

Violação da lei de conservação de energia no decaimento radioactivo β



3 PROBLEMAS EM ABERTO

Equação de Schrödinger aplica-se apenas a partículas não relativistas $v \ll c$

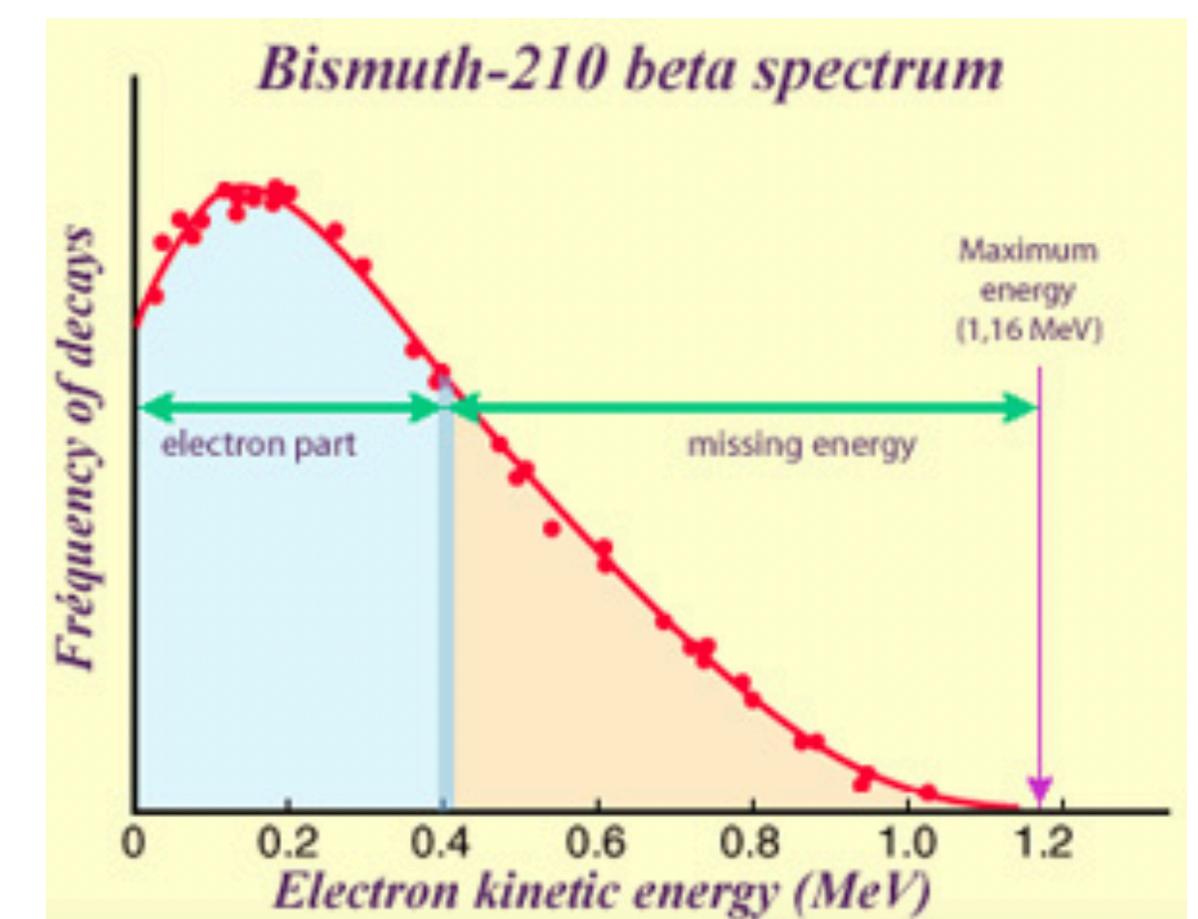
Dirac obtém em 1927 a equação quântica e relativista do electrão

$$i\hbar\gamma^\mu\partial_\mu\psi - mc\psi = 0$$

ψ é representado por uma matriz coluna de quatro elementos

Núcleo do átomo é instável com alta densidade de cargas positivas que se repelem

Violação da lei de conservação de energia no decaimento radioactivo β



3 PROBLEMAS EM ABERTO

Equação de Schrödinger aplica-se apenas a partículas não relativistas $v \ll c$

Dirac obtém em 1927 a equação quântica e relativista do electrão

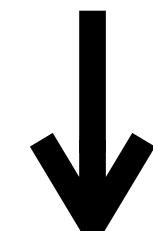
$$i\hbar\gamma^\mu\partial_\mu\psi - mc\psi = 0$$

ψ é representado por uma matriz coluna de quatro elementos

$$\psi \rightarrow \begin{pmatrix} \Psi_1 \\ \Psi_2 \\ \Psi_3 \\ \Psi_4 \end{pmatrix}$$

} Solução de energia positiva 2 estados de spin
} Solução de energia negativa 2 estados de spin

$$E = \pm \sqrt{p^2c^2 + m^2c^4}$$



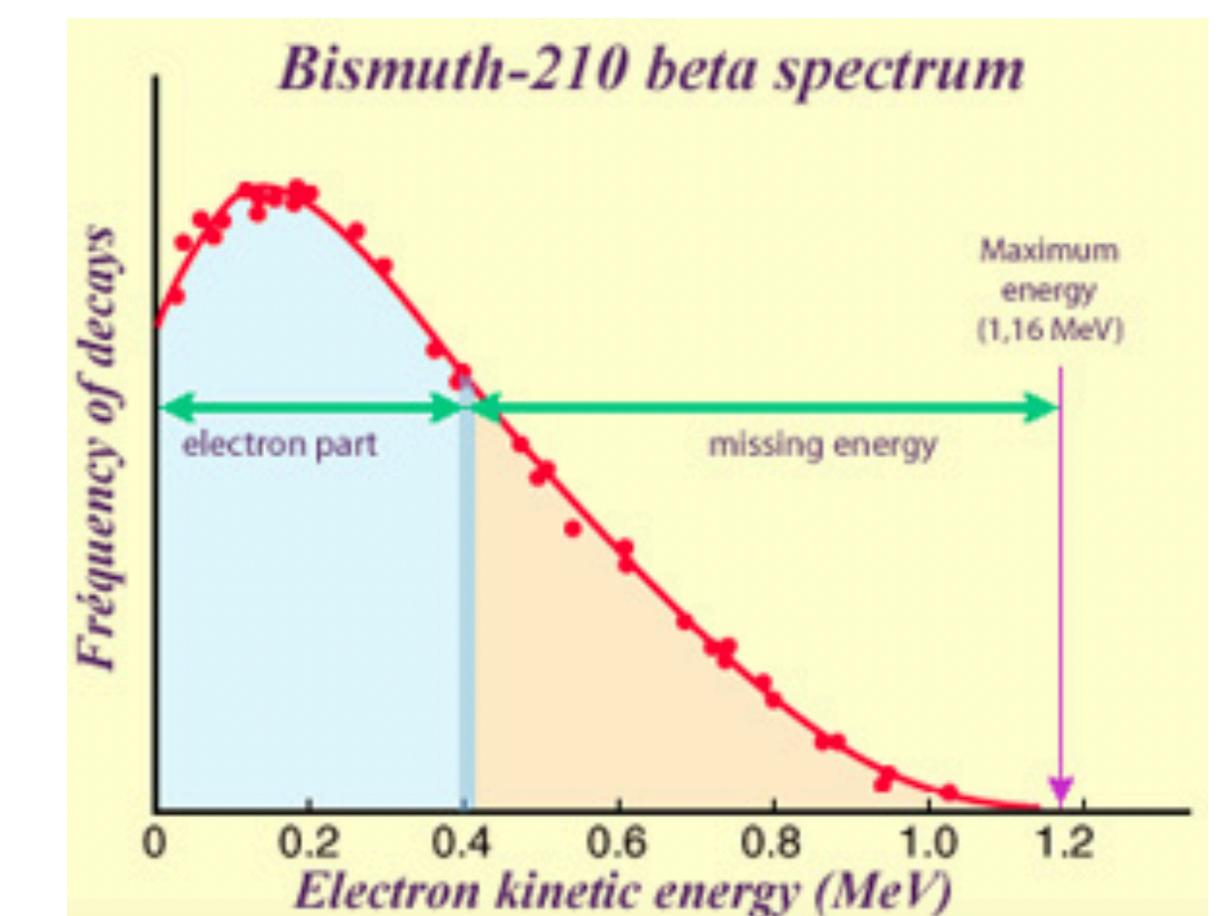
Partícula eléctrica de carga oposta → **positrão**

anti-partícula do electrão e⁺

- Anti-matéria observada pela primeira vez por Carl Anderson em 1932

Núcleo do átomo é instável com alta densidade de cargas positivas que se repelem

Violação da lei de conservação de energia no decaimento radioactivo β



3 PROBLEMAS EM ABERTO

Equação de Schrödinger aplica-se apenas a partículas não relativistas $v \ll c$

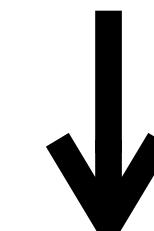
Dirac obtém em 1927 a equação quântica e relativista do electrão

$$i\hbar\gamma^\mu\partial_\mu\psi - mc\psi = 0$$

ψ é representado por uma matriz coluna de quatro elementos

$$\psi \rightarrow \begin{pmatrix} \Psi_1 \\ \Psi_2 \\ \Psi_3 \\ \Psi_4 \end{pmatrix} \quad \left. \begin{array}{l} \text{Solução de energia positiva 2 estados de spin} \\ \text{Solução de energia negativa 2 estados de spin} \end{array} \right\}$$

$$E = \pm \sqrt{p^2c^2 + m^2c^4}$$



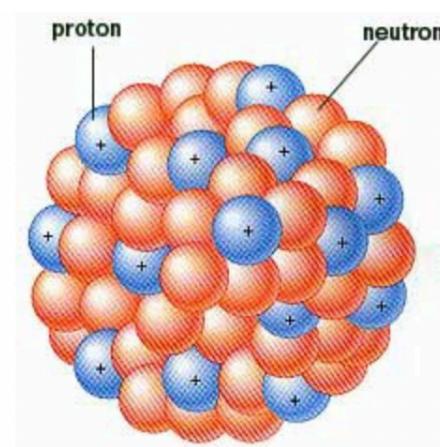
Partícula eléctrica de carga oposta \rightarrow **positrão**

anti-partícula do electrão e⁺

- Anti-matéria observada pela primeira vez por Carl Anderson em 1932

Núcleo do átomo é instável com alta densidade de cargas positivas que se repelem

Proposta a existência de uma partícula neutra no núcleo \rightarrow neutrão (Chadwick)

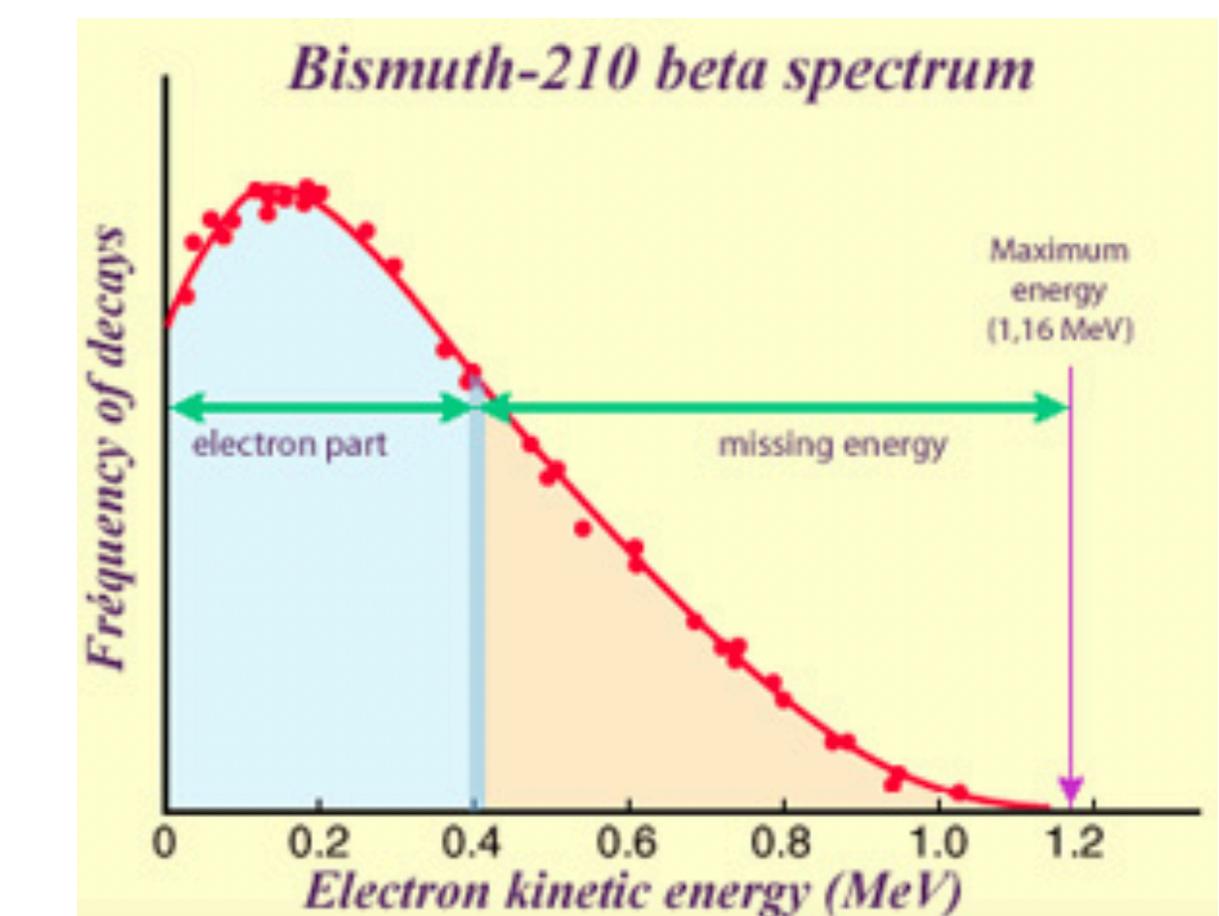


Proposta a existência de uma nova interação nuclear forte atractiva que vence a repulsão eléctrica Coulombiana dos protões (Yukawa)

$$V(r) = -g^2 \frac{e^{-\frac{m cr}{\hbar}}}{r^2}$$

\rightarrow mediada por uma nova partícula pesada o **mesão Pi** $m_\pi = 100$ MeV

Violação da lei de conservação de energia no decaimento radioactivo β



3 PROBLEMAS EM ABERTO

Equação de Schrödinger aplica-se apenas a partículas não relativistas $v \ll c$

Dirac obtém em 1927 a equação quântica e relativista do electrão

$$i\hbar\gamma^\mu\partial_\mu\psi - mc\psi = 0$$

ψ é representado por uma matriz coluna de quatro elementos

$$\psi \rightarrow \begin{pmatrix} \Psi_1 \\ \Psi_2 \\ \Psi_3 \\ \Psi_4 \end{pmatrix}$$

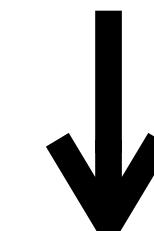
}

Solução de energia positiva 2 estados de spin

}

Solução de energia negativa 2 estados de spin

$$E = \pm \sqrt{p^2c^2 + m^2c^4}$$



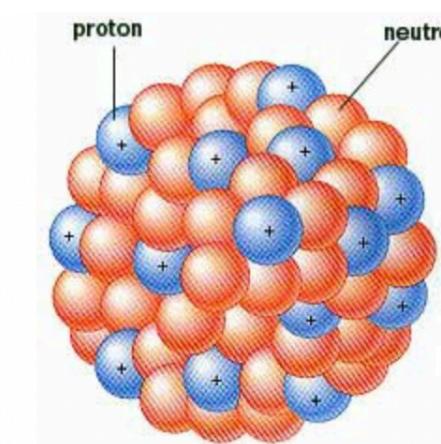
Partícula eléctrica de carga oposta → **positrão**

anti-partícula do electrão e⁺

- Anti-matéria observada pela primeira vez por Carl Anderson em 1932

Núcleo do átomo é instável com alta densidade de cargas positivas que se repelem

Proposta a existência de uma partícula neutra no núcleo → neutrão (Chadwick)



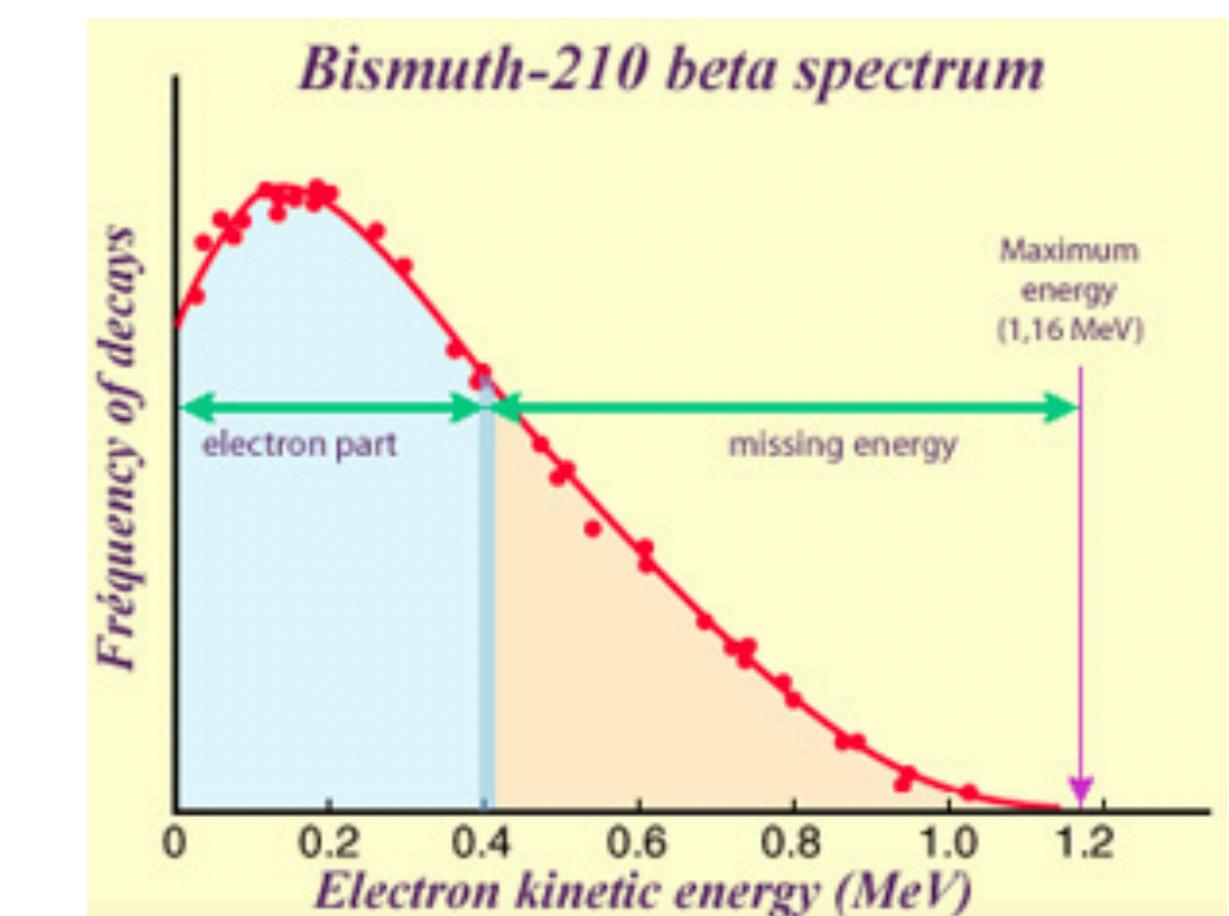
Proposta a existência de uma nova interação nuclear forte atractiva que vence a repulsão eléctrica Coulombiana dos protões (Yukawa)

$$V(r) = -g^2 \frac{e^{-\frac{m cr}{\hbar}}}{r^2}$$

→ mediada por uma nova partícula pesada o **mesão Pi** $m_\pi = 100 \text{ MeV}$

- Neutrão observado por Chadwick em 1932
- Mesão Pi descoberto em 1947

Violação da lei de conservação de energia no decaimento radioactivo β



3 PROBLEMAS EM ABERTO

Equação de Schrödinger aplica-se apenas a partículas não relativistas $v \ll c$

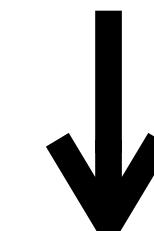
Dirac obtém em 1927 a equação quântica e relativista do electrão

$$i\hbar\gamma^\mu\partial_\mu\psi - mc\psi = 0$$

ψ é representado por uma matriz coluna de quatro elementos

$$\psi \rightarrow \begin{pmatrix} \Psi_1 \\ \Psi_2 \\ \Psi_3 \\ \Psi_4 \end{pmatrix} \quad \left. \begin{array}{l} \text{Solução de energia positiva 2 estados de spin} \\ \text{Solução de energia negativa 2 estados de spin} \end{array} \right\}$$

$$E = \pm \sqrt{p^2c^2 + m^2c^4}$$



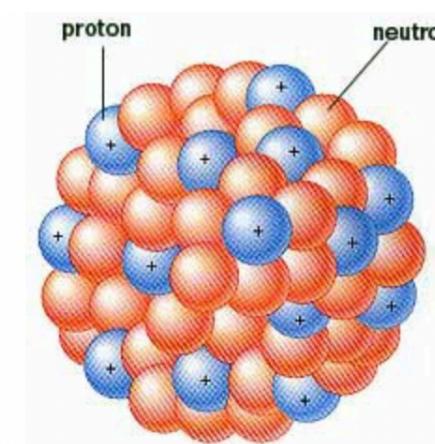
Partícula eléctrica de carga oposta → **positrão**

anti-partícula do electrão e⁺

- Anti-matéria observada pela primeira vez por Carl Anderson em 1932

Núcleo do átomo é instável com alta densidade de cargas positivas que se repelem

Proposta a existência de uma partícula neutra no núcleo → neutrão (Chadwick)



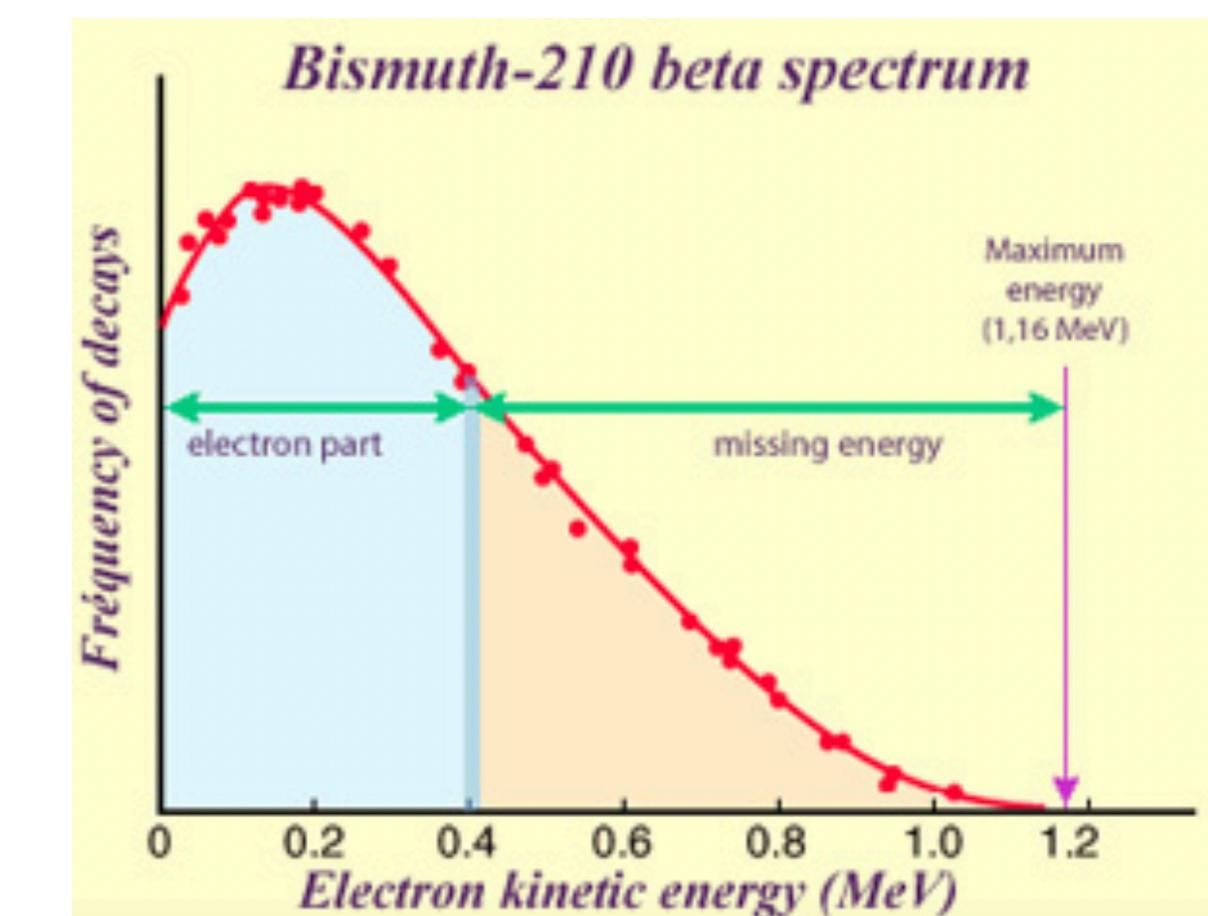
Proposta a existência de uma nova interação nuclear forte atractiva que vence a repulsão eléctrica Coulombiana dos protões (Yukawa)

$$V(r) = -g^2 \frac{e^{-\frac{m cr}{\hbar}}}{r^2}$$

→ mediada por uma nova partícula pesada o **mesão Pi** $m_\pi = 100 \text{ MeV}$

- Neutrão observado por Chadwick em 1932
- Mesão Pi descoberto em 1947

Violação da lei de conservação de energia no decaimento radioactivo β



Proposta a existência de uma nova partícula o neutrino (Pauli), com carga eléctrica neutra e de baixa massa e com interação fraca que seria emitida no decaimento β transportando a energia em falta

- Neutrino do electrão ν_e observado por George Cowan em 1956

MODELO SIMPLES DA FÍSICA DE PARTÍCULAS NA DECADA 1930-1940

As seguintes partículas descreveriam a matéria e radiação no Universo

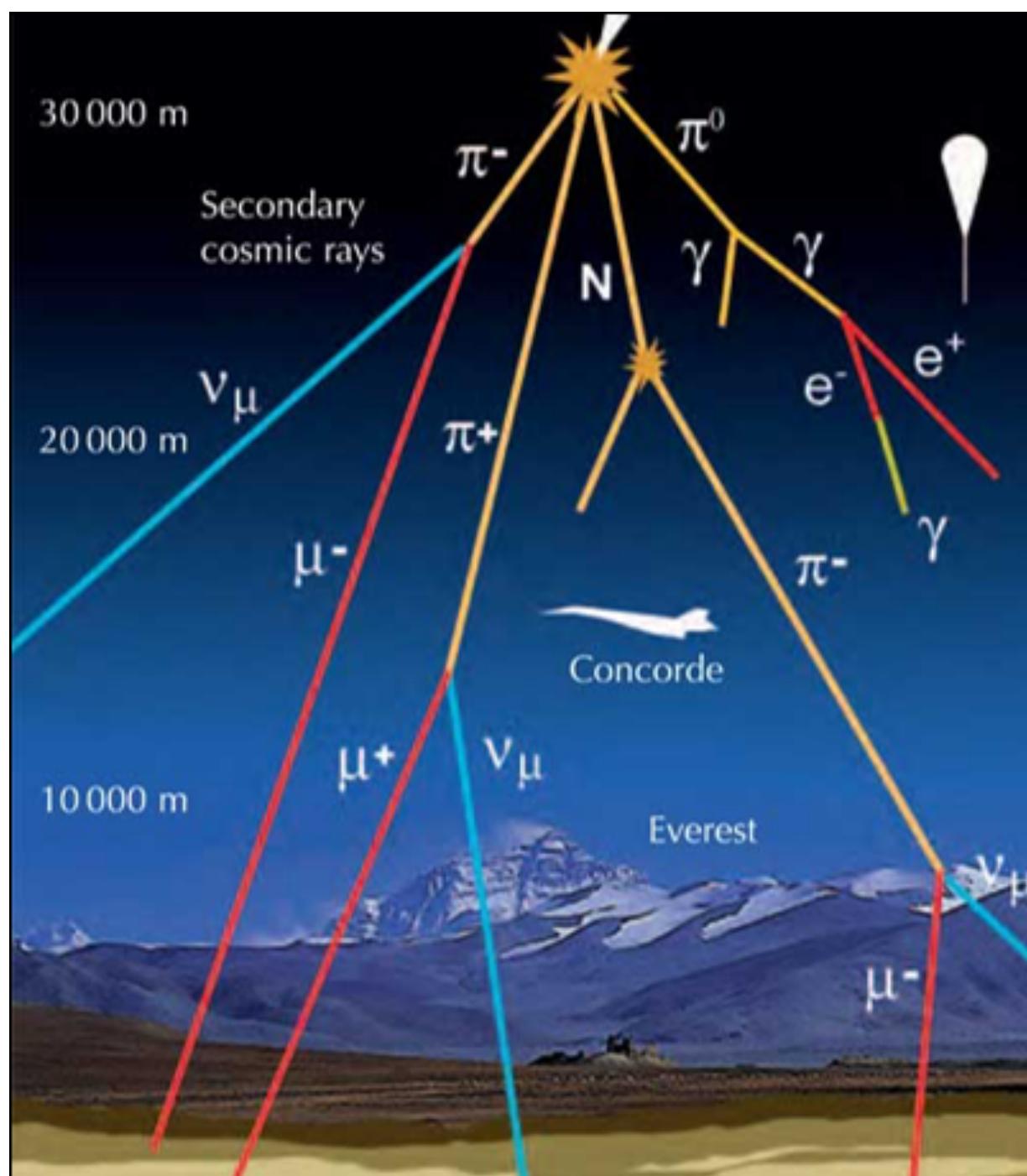
- Electrão- e , protão- p e neutrão- n e as suas anti-partículas
- Mesão Pi- π (interação forte) e o neutrino ν (decaimento β) e as suas anti-partículas

MODELO SIMPLES DA FÍSICA DE PARTÍCULAS NA DECADA 1930-1940

As seguintes partículas descreveriam a matéria e radiação no Universo

- Electrão-e, protão-p e neutrão-n e as suas anti-partículas
- Mesão Pi- π (interação forte) e o neutrino ν (decaimento β) e as suas anti-partículas

EXPERIÊNCIAS EM RAIOS COSMICOS 1940-1960



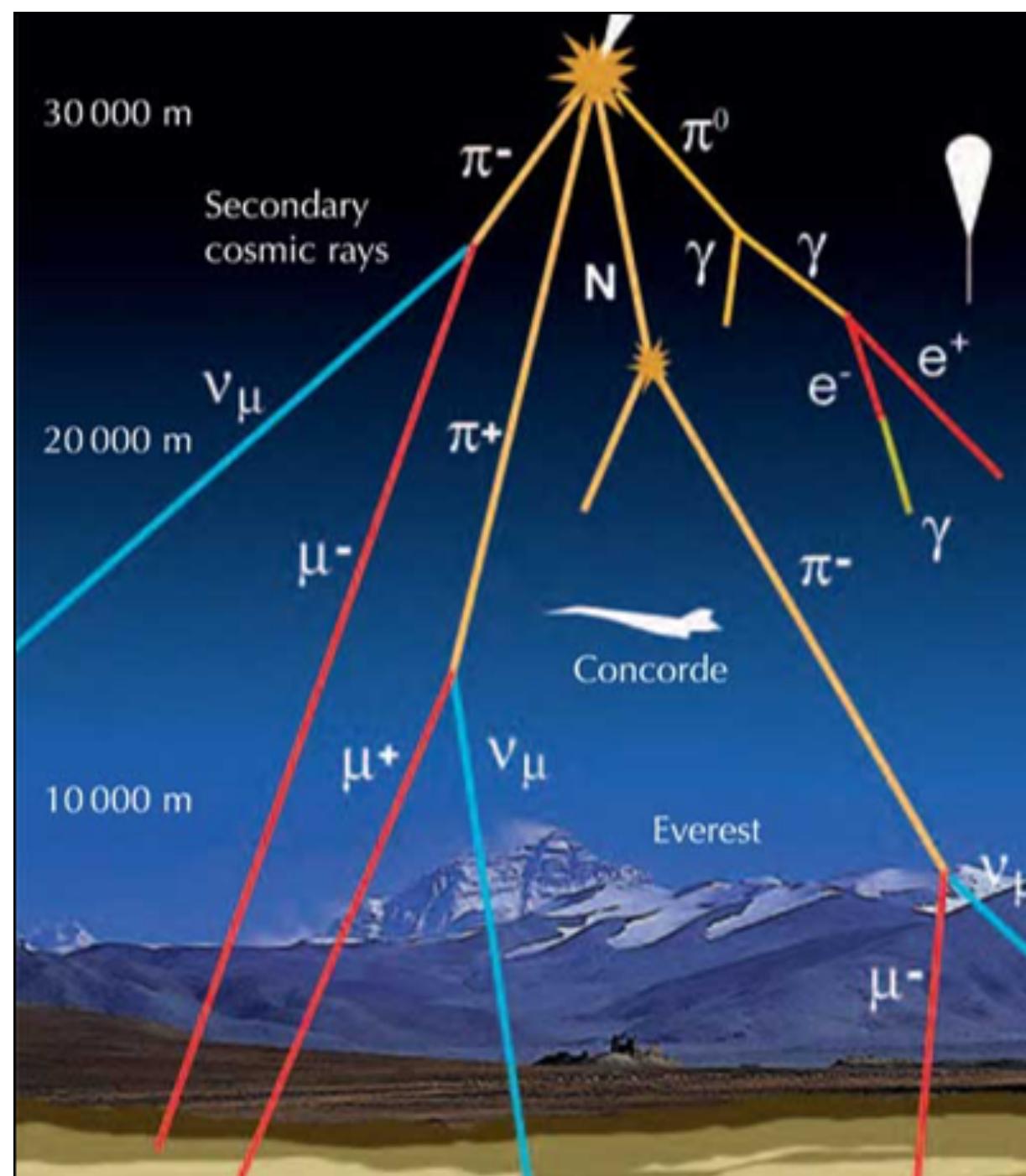
Experiências continuadas com raios cósmicos rapidamente levaram a descoberta de novas partículas baralhando as ideias dos físicos da altura

MODELO SIMPLES DA FÍSICA DE PARTÍCULAS NA DECADA 1930-1940

As seguintes partículas descreveriam a matéria e radiação no Universo

- Electrão-e, protão-p e neutrão-n e as suas anti-partículas
- Mesão Pi- π (interação forte) e o neutrino ν (decaimento β) e as suas anti-partículas

EXPERIÊNCIAS EM RAIOS COSMICOS 1940-1960



Experiências continuadas com raios cósmicos rapidamente levaram a descoberta de novas partículas baralhando as ideias dos físicos da altura

- descoberta do muão- μ partícula elementar semelhante ao electrão mas mais pesada $\mu \rightarrow e + 2\nu$
- descoberta do mesão K-kaon partícula semelhante ao Mesão Pi mas mais pesada $K^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$
- descoberta da partícula Lambda- Λ semelhante ao neutrão mas mais pesada $\Lambda^0 \rightarrow p^+ \pi^-$
- apesar de terem um decaimento rápido para partículas mais estáveis, podem ser amplamente estudadas e suas propriedades físicas como massa, carga eléctrica e spin determinadas
- na década de 60 o número destas partículas observadas aproxima-se do número de elementos químicos da tabela periódica
- tornou-se necessário encontrar uma ordem ou estrutura subjacente



MODELO DE QUARKS DE GELL-MANN E ZWEIG

Em 1964 Gell-Mann e Zweig propuseram que as novas partículas descobertas não seriam partículas elementares, mas sim partículas com estrutura e constituídas por quarks

- O modelo de quarks tem 6-tipos de quarks, 3 do tipo *up* com carga eléctrica $+2/3e$ e 3 do tipo *down* com carga eléctrica $-1/3e$

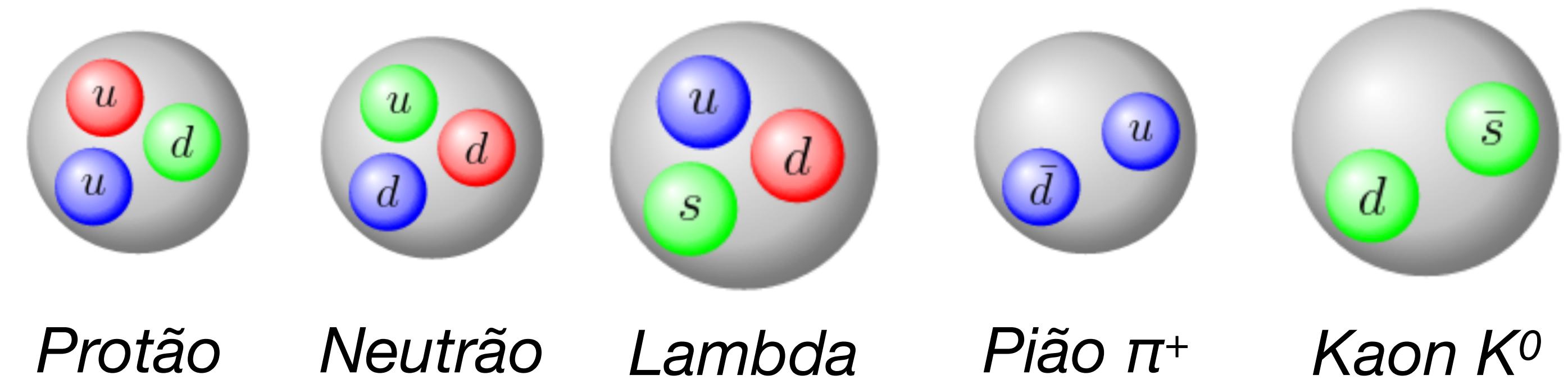
MODELO DE QUARKS DE GELL-MANN E ZWEIG

Em 1964 Gell-Mann e Zweig propuseram que as novas partículas descobertas não seriam partículas elementares, mas sim partículas com estrutura e constituídas por quarks

- O modelo de quarks tem 6-tipos de quarks, 3 do tipo *up* com carga eléctrica $+2/3e$ e 3 do tipo *down* com carga eléctrica $-1/3e$

mass charge 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
	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ 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

- O modelo proposto teve um sucesso estrondoso em classificar e agrupar todos os mesões (partículas compostas por 2 quarks) e bariões (partículas compostas por 3 quarks) que se conhecem actualmente ≈ 200



- Será apenas uma construção matemática ou pode-se observar mesmo a estrutura interna de um protão?

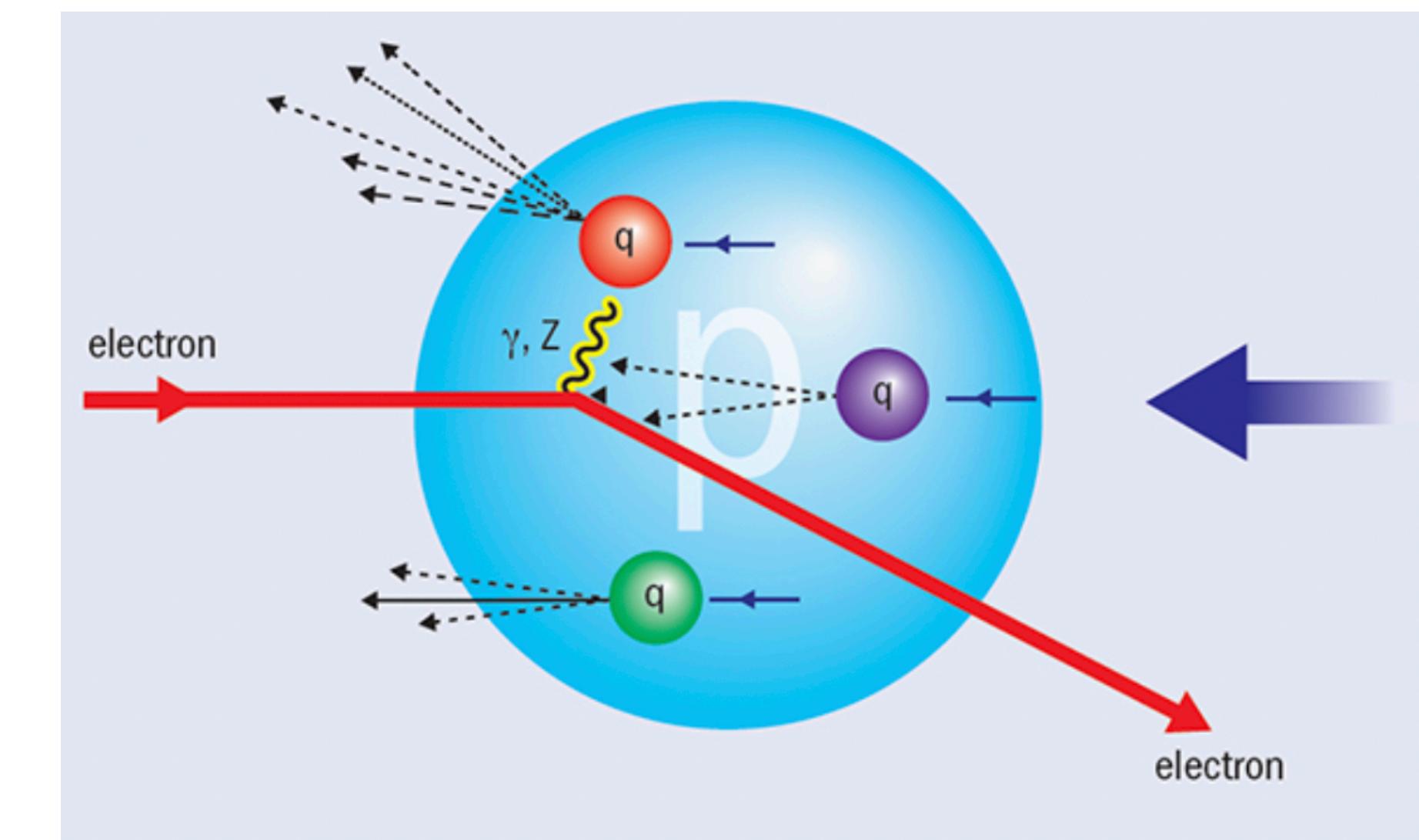
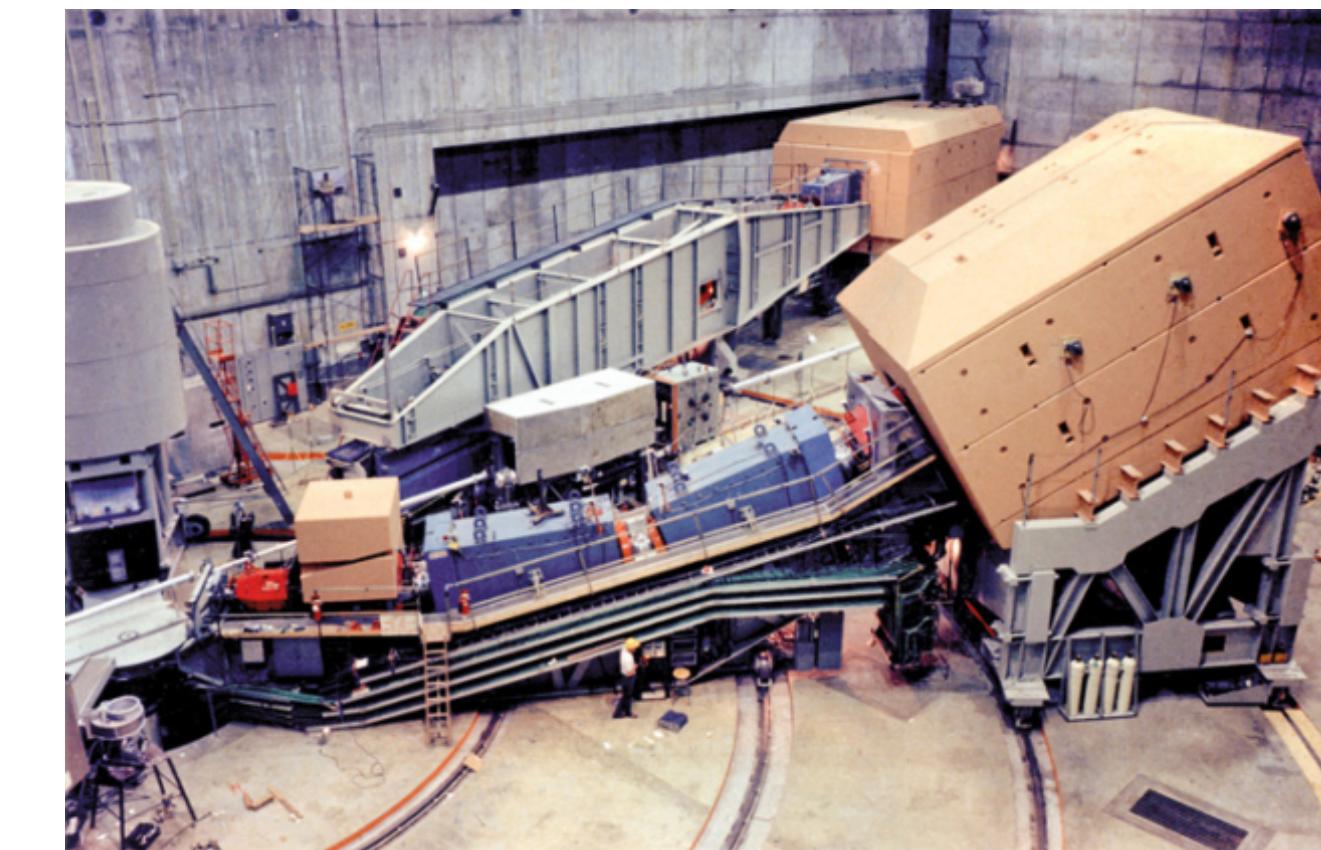
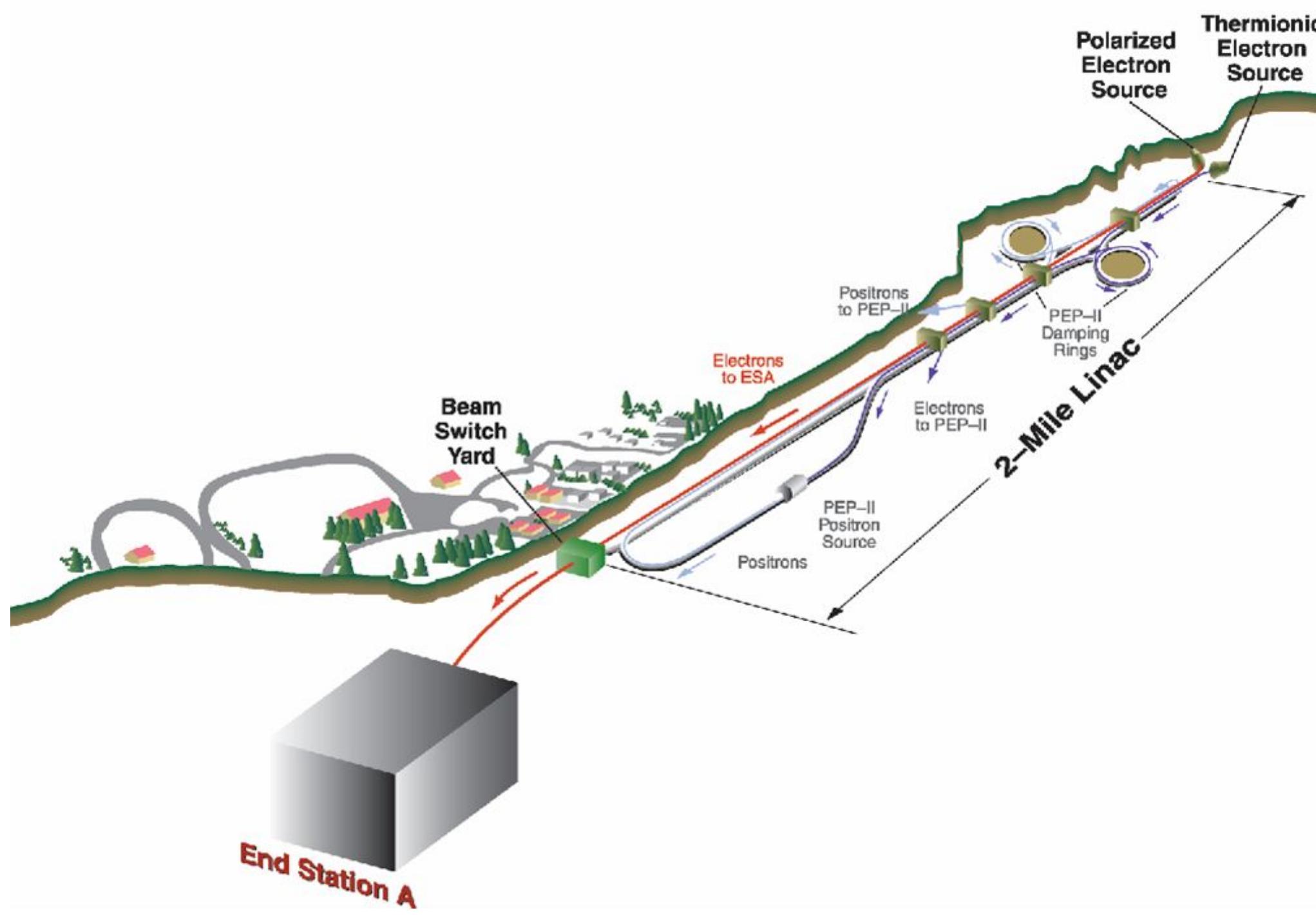


EXPERIÊNCIAS COM ACELERADORES DE PARTÍCULAS EM LABORATÓRIO

A hipótese do modelo dos quarks foi testada experimentalmente em laboratório na experiência SLAC (1967-1973) onde electrões acelerados colidem a altas energia com protões

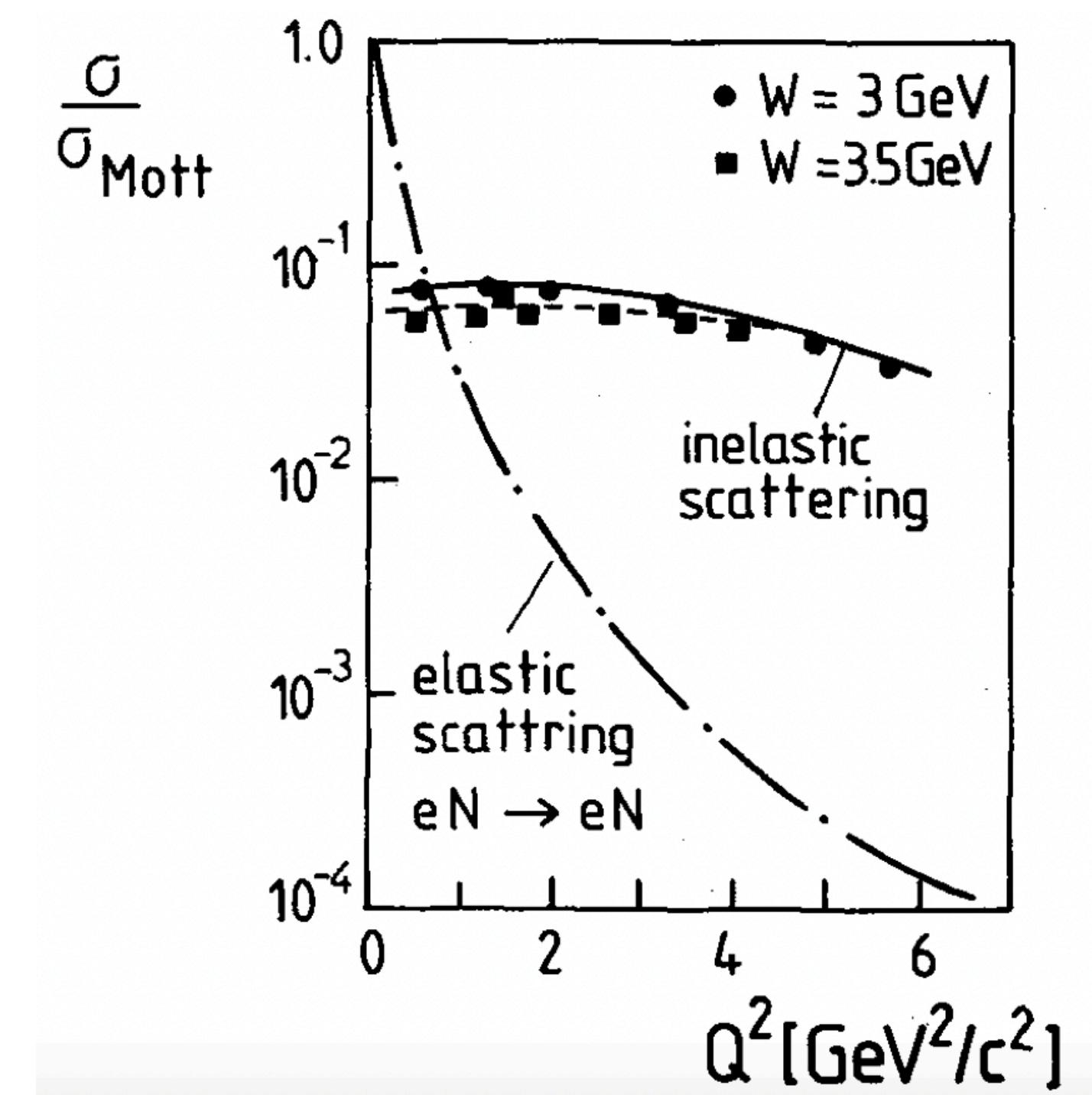
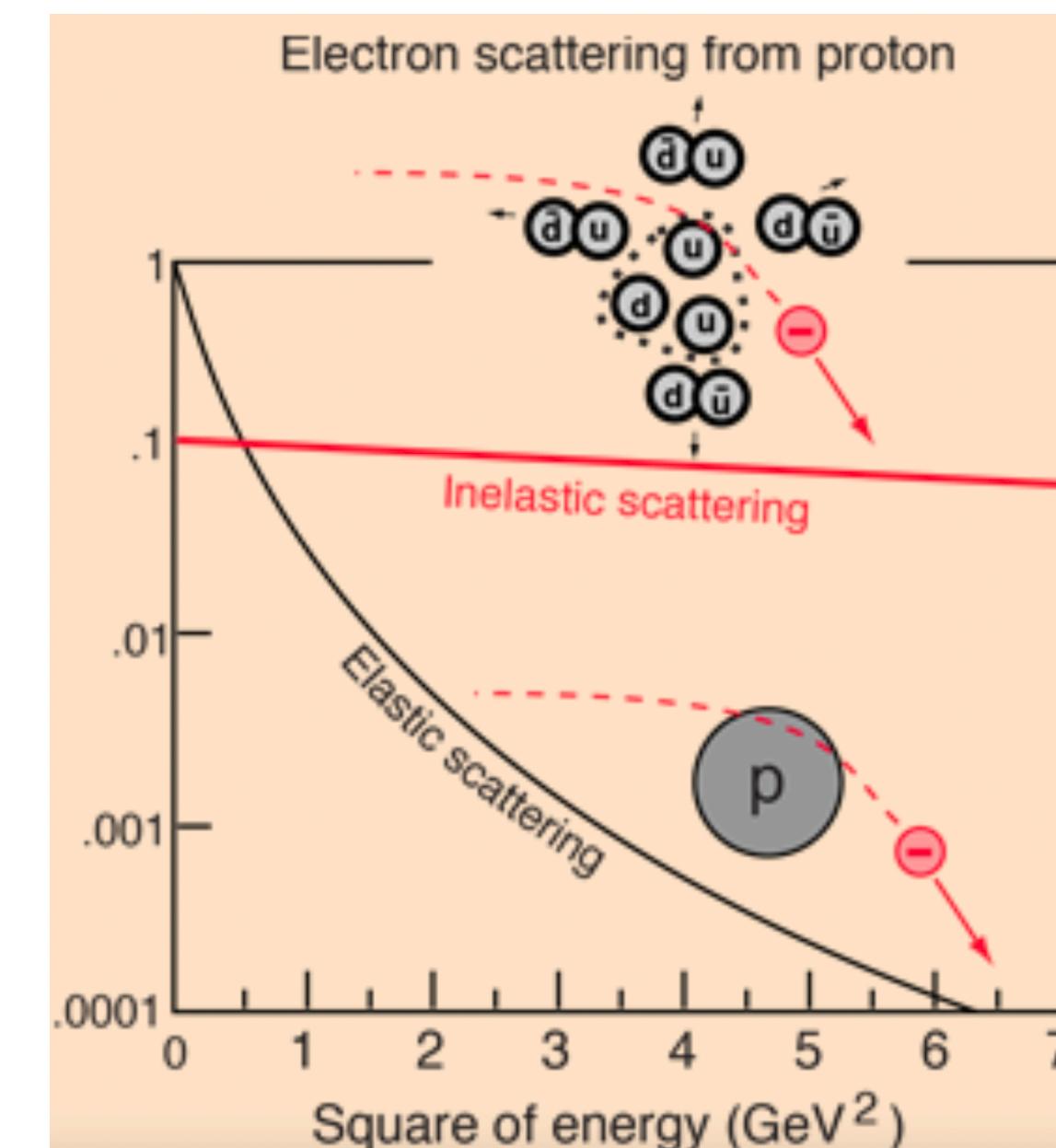
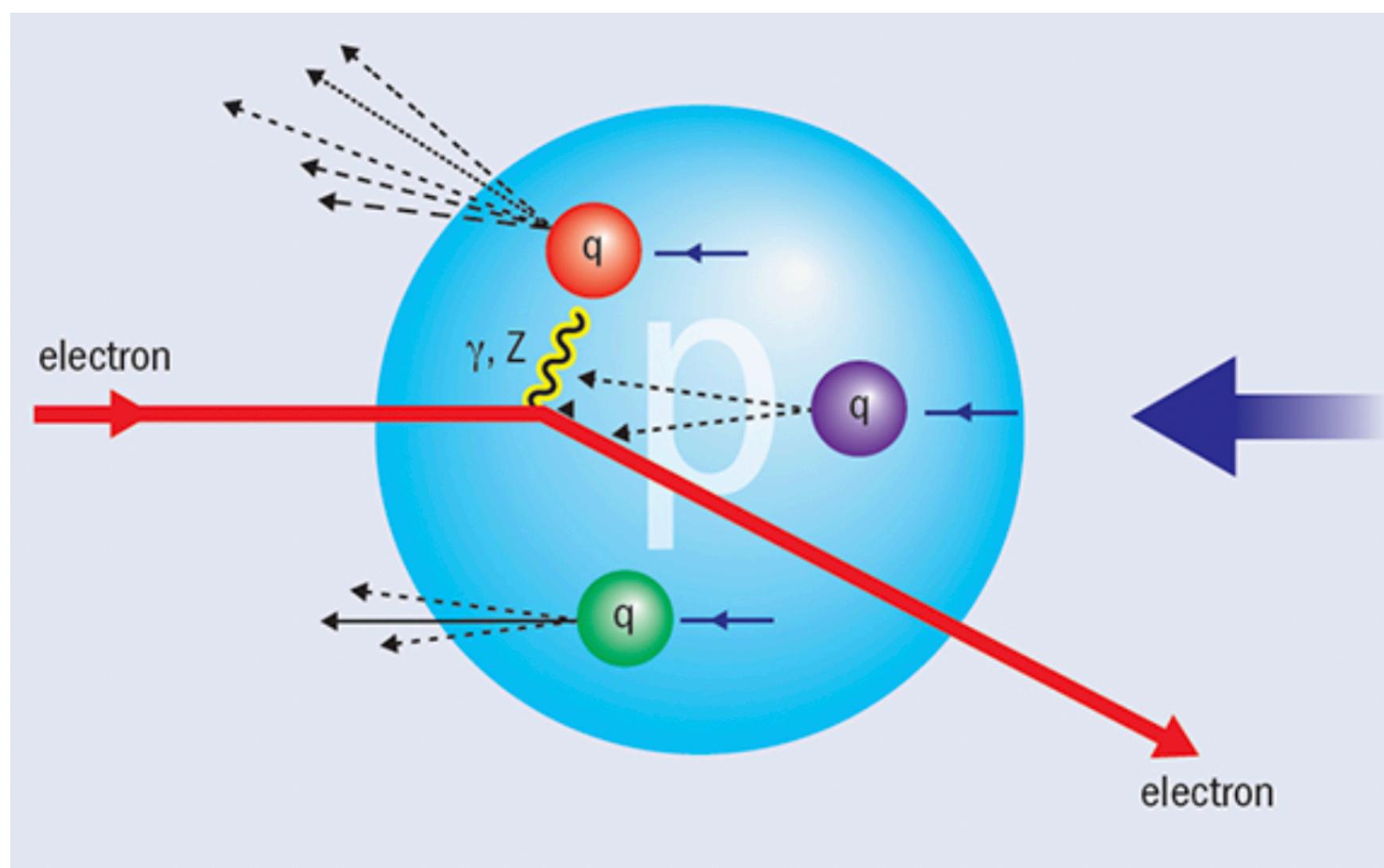
EXPERIÊNCIAS COM ACELERADORES DE PARTÍCULAS EM LABORATÓRIO

A hipótese do modelo dos quarks foi testada experimentalmente em laboratório na experiência SLAC (1967-1973) onde electrões acelerados colidem a altas energias com protões



EXPERIÊNCIAS COM ACELERADORES DE PARTÍCULAS EM LABORATÓRIO

A hipótese do modelo dos quarks foi testada experimentalmente em laboratório na experiência SLAC (1967-1973) onde electrões acelerados colidem a altas energia com protões

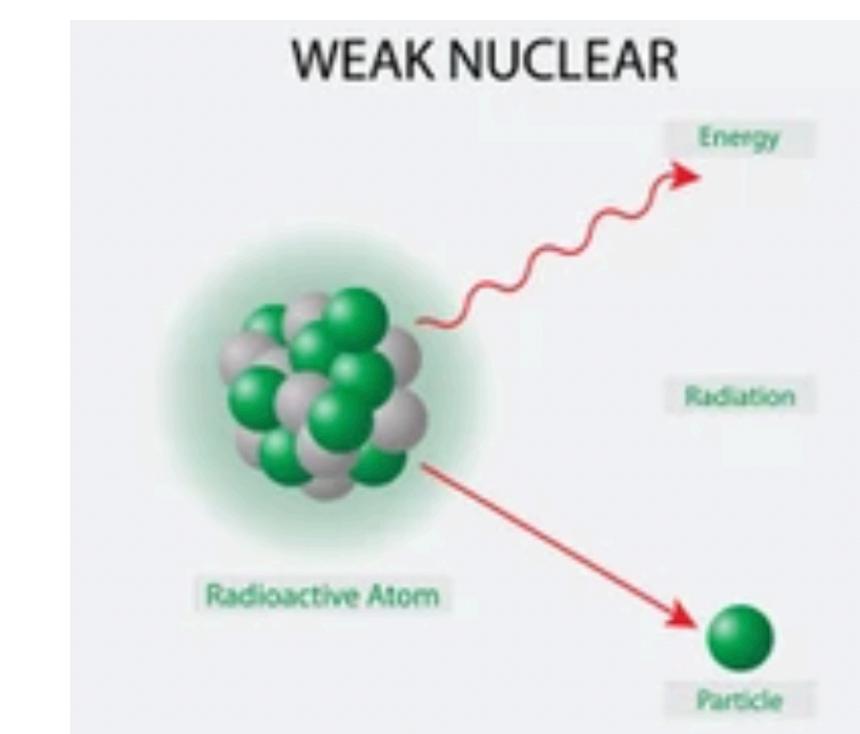
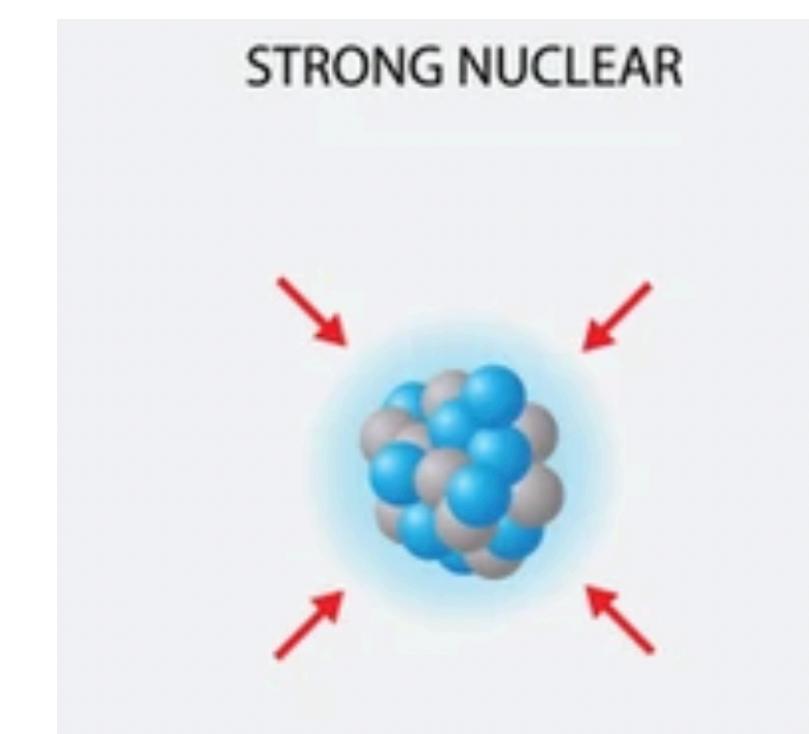
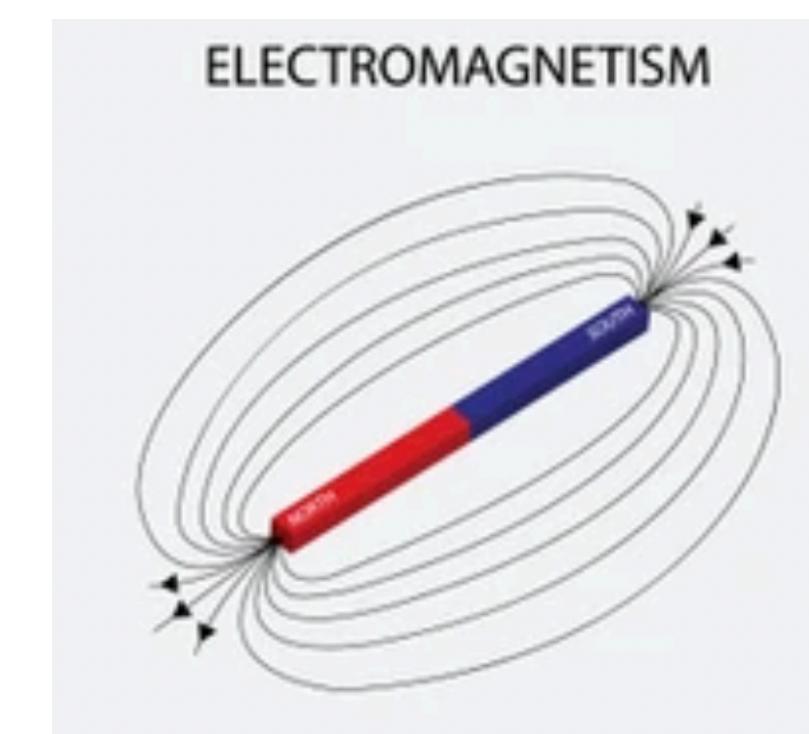


- A altas energias a secção inelástica $e+p \rightarrow e+X$ não decresce com o quadrado da energia da reação Q^2
- Primeira evidência do protão constituído por uma coleção de partículas elementares, os quarks

PARTÍCULAS ELEMENTARES DA MATÉRIA E INTERAÇÕES FUNDAMENTAIS

three generations of matter (fermions)			
	I	II	III
mass	=2.2 MeV/c ²	=1.28 GeV/c ²	=173.1 GeV/c ²
charge	2/3	2/3	2/3
spin	1/2	1/2	1/2
QUARKS	U up	C charm	t top
	=4.7 MeV/c ²	=96 MeV/c ²	=4.18 GeV/c ²
	-1/3	-1/3	-1/3
	1/2	1/2	1/2
	d down	s strange	b bottom
LEPTONS	e electron	μ muon	τ tau
	=0.511 MeV/c ²	=105.66 MeV/c ²	=1.7768 GeV/c ²
	-1	-1	-1
	1/2	1/2	1/2
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino
	<1.0 eV/c ²	<0.17 MeV/c ²	<18.2 MeV/c ²
	0	0	0
	1/2	1/2	1/2

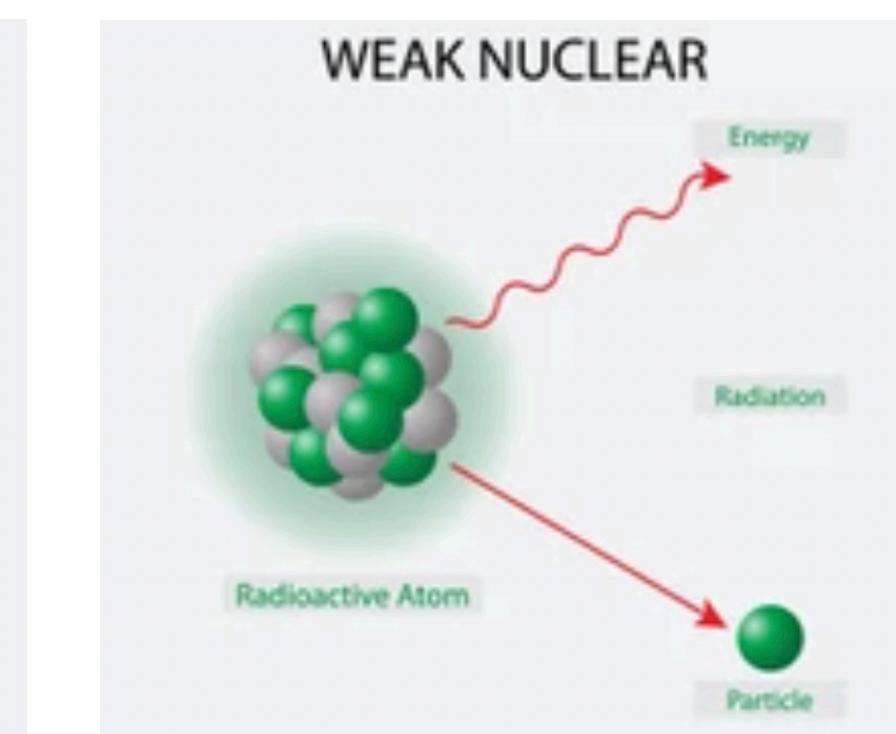
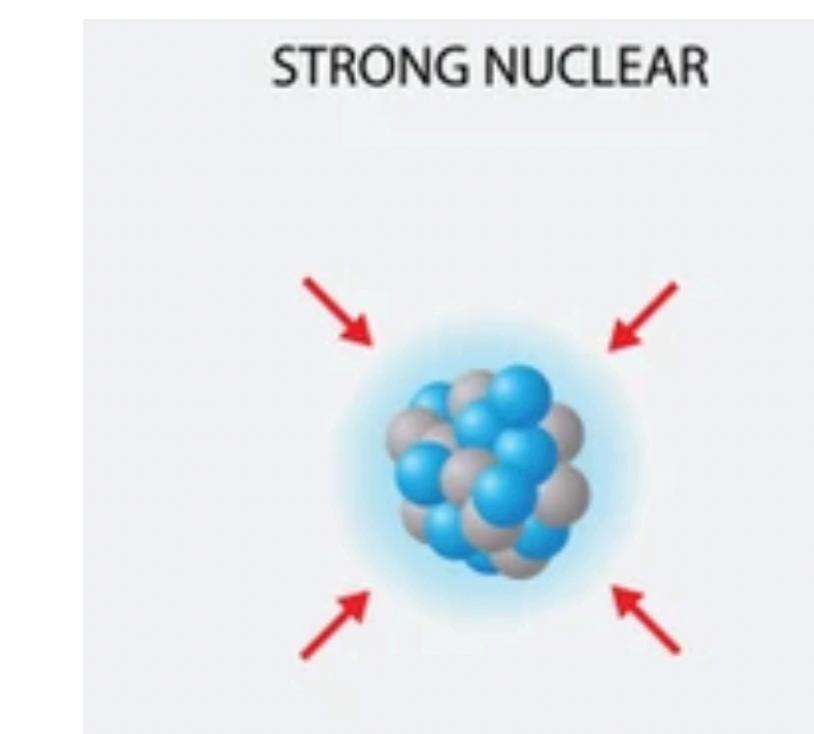
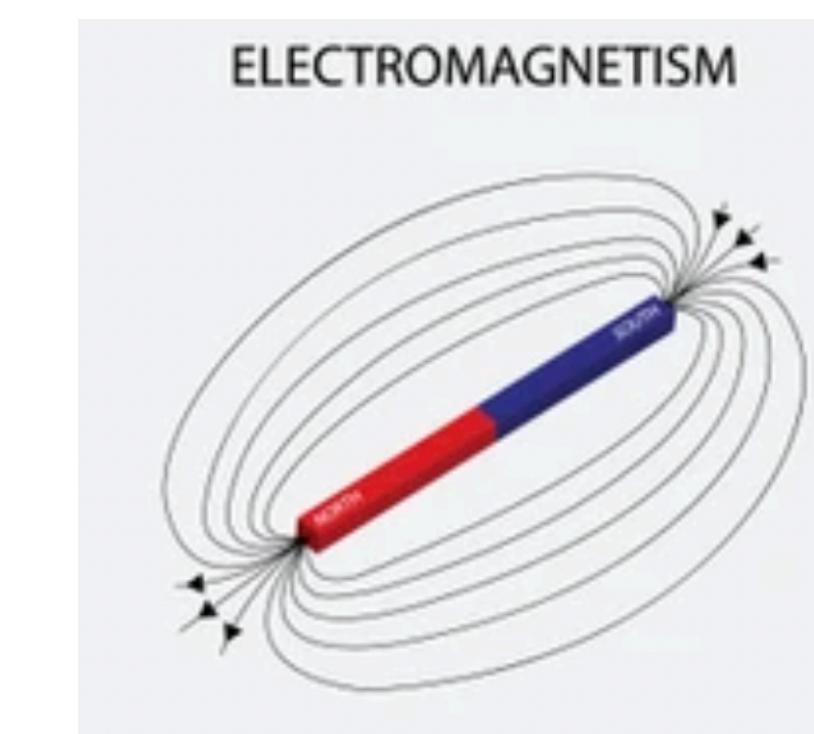
- 3 gerações de quarks e leptões, cópias idênticas, mas com massa diferente
fermiões com spin 1/2



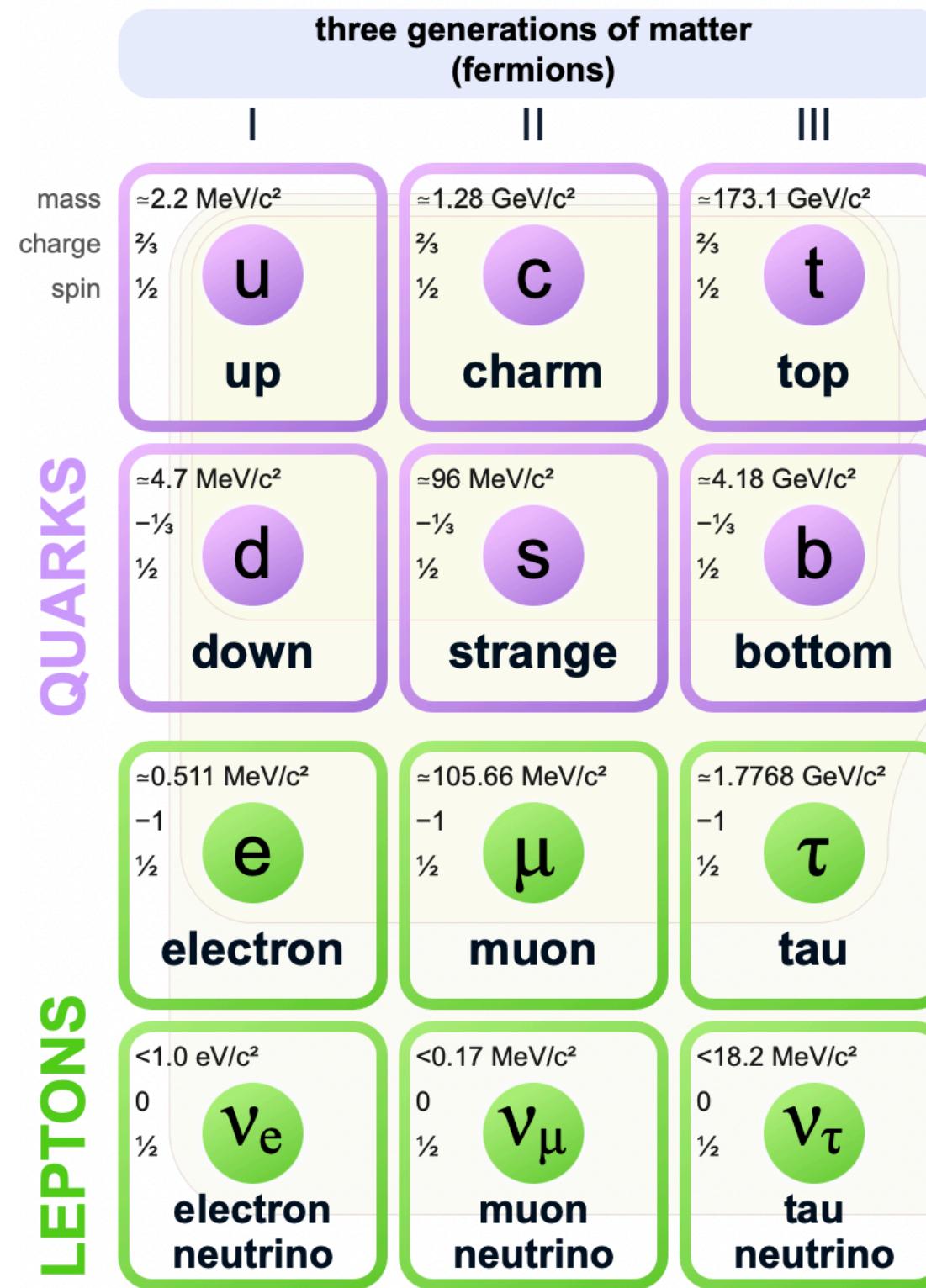
PARTÍCULAS ELEMENTARES DA MATÉRIA E INTERAÇÕES FUNDAMENTAIS

three generations of matter (fermions)			
	I	II	III
mass	=2.2 MeV/c ²	=1.28 GeV/c ²	=173.1 GeV/c ²
charge	2/3	2/3	2/3
spin	1/2	1/2	1/2
QUARKS	u up	c charm	t top
	=4.7 MeV/c ²	=96 MeV/c ²	=4.18 GeV/c ²
	d down	s strange	b bottom
LEPTONS	e electron	μ muon	τ tau
	<1.0 eV/c ²	<0.17 MeV/c ²	<18.2 MeV/c ²
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino

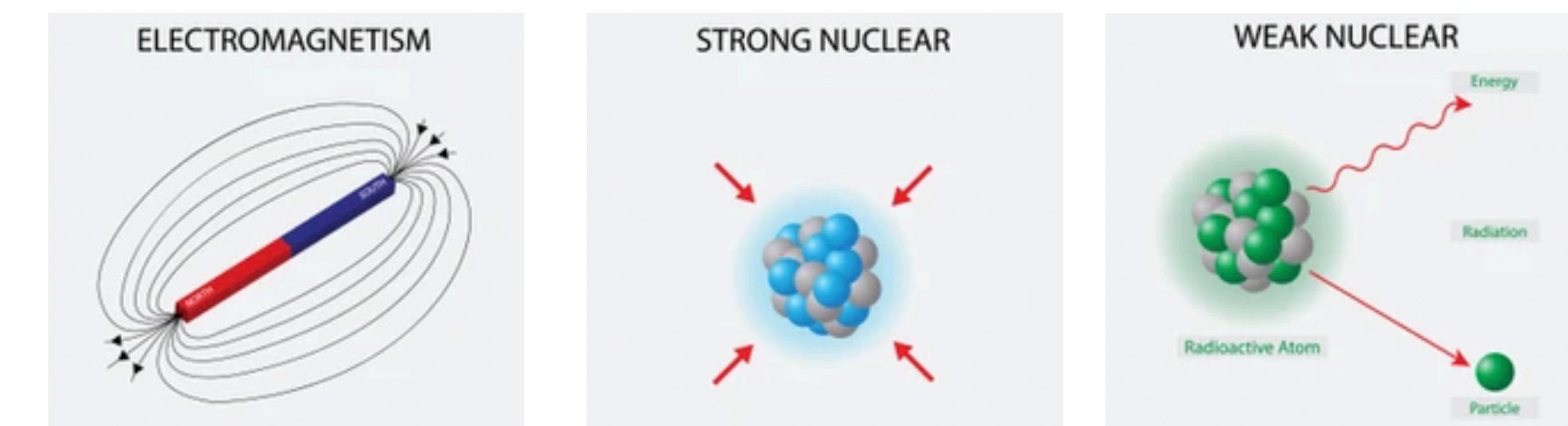
- 3 gerações de quarks e leptões, cópias idênticas, mas com massa diferente
- fermões com spin 1/2
- Quarks:
 - tem carga eléctrica → participam na interacção electromagnética
 - participam na interação nuclear forte, formando os núcleos dos átomos
 - participam na interação nuclear fraca, responsável pelo decaimento radioactivo β dos núcleos



PARTÍCULAS ELEMENTARES DA MATÉRIA E INTERAÇÕES FUNDAMENTAIS

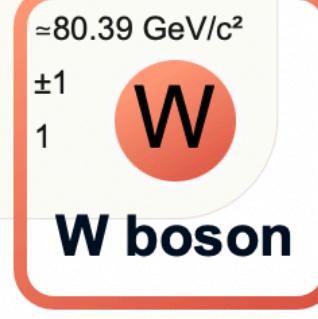
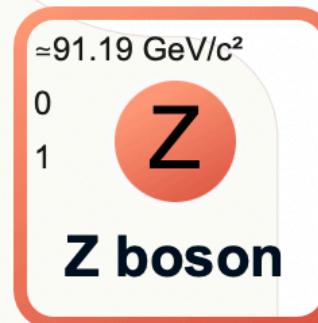


- 3 gerações de quarks e leptões, cópias idênticas, mas com massa diferente fermões com spin 1/2
- Quarks:
 - tem carga eléctrica → participam na interacção electromagnética
 - participam na interação nuclear forte, formando os núcleos dos átomos
 - participam na interação nuclear fraca, responsável pelo decaimento radioactivo β dos núcleos
- Leptões:
 - participam na interação na interacção electromagnética e interacção nuclear fraca, subprodutos de decaimentos de núcleos radioactivos



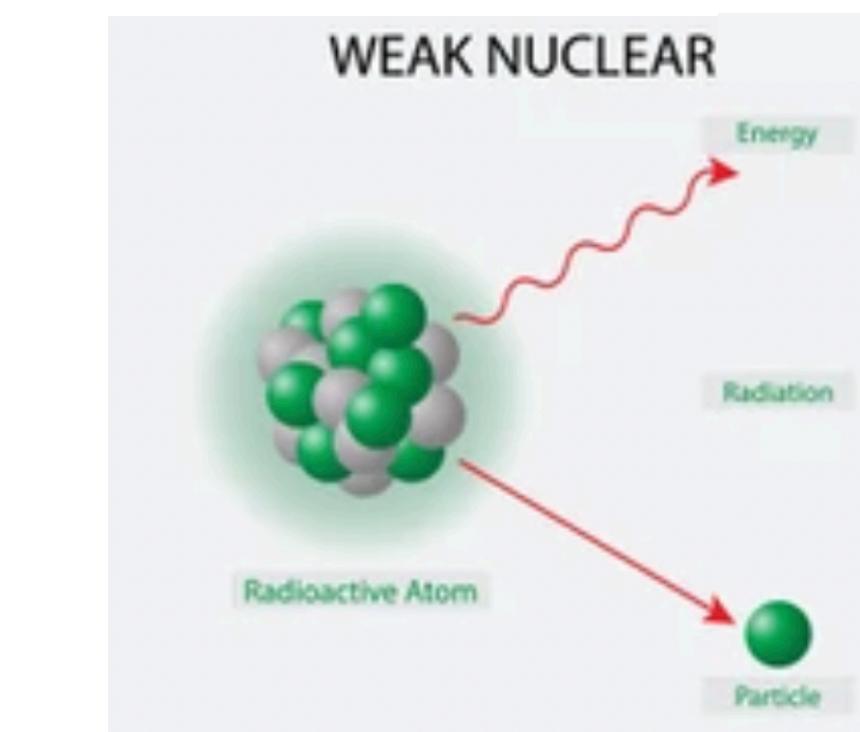
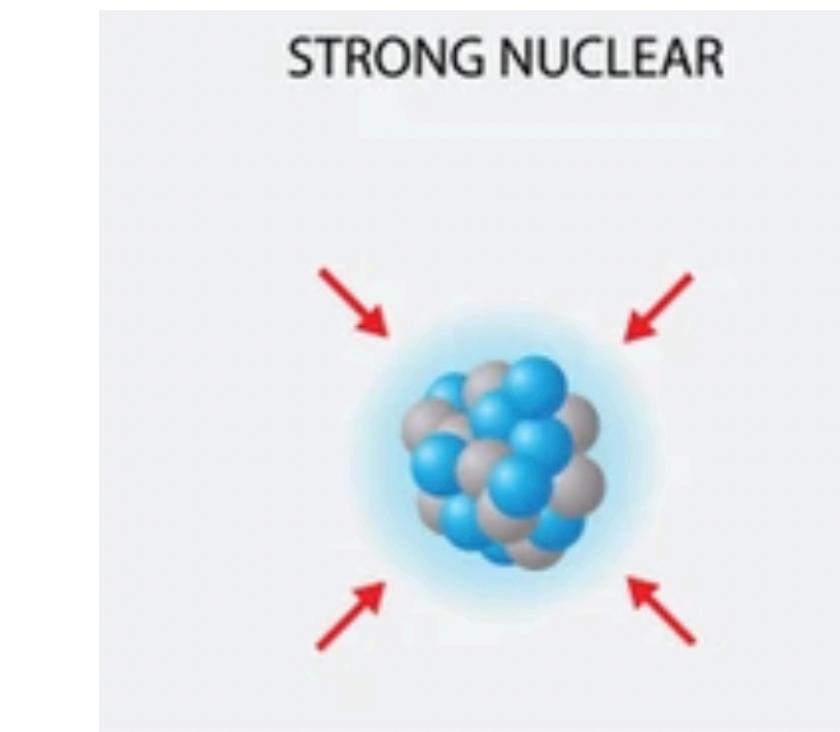
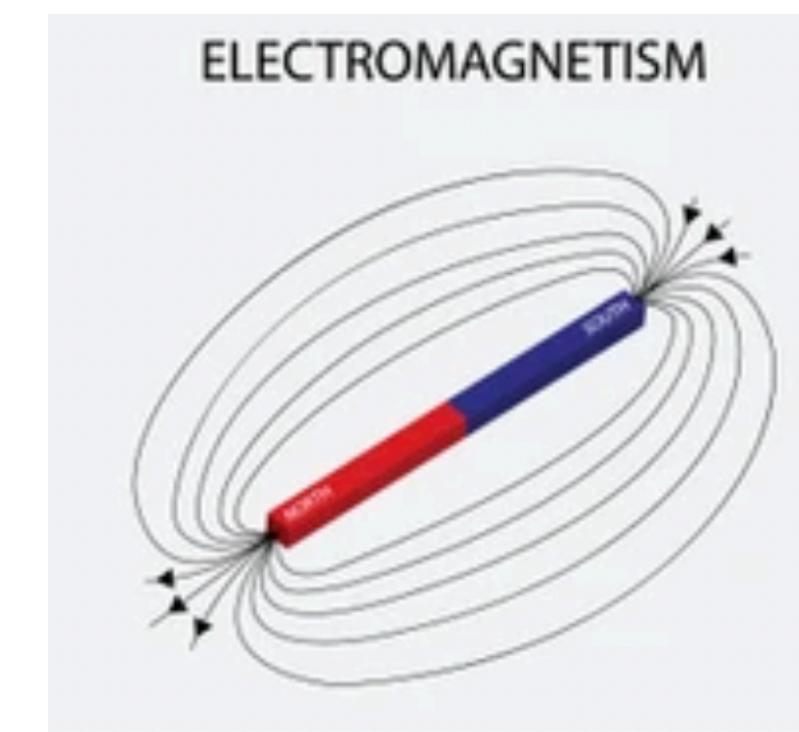
PARTÍCULAS ELEMENTARES MEDIADORES DAS INTERAÇÕES FUNDAMENTAIS

interactions / force carriers
(bosons)



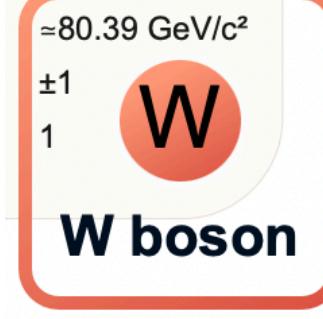
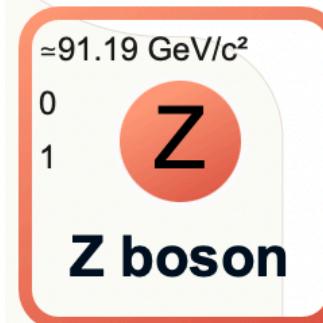
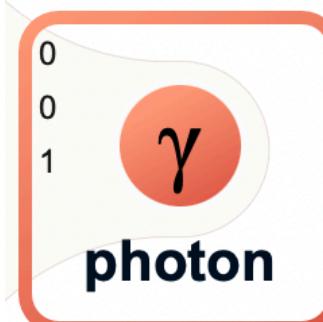
GAUGE BOSONS
VECTOR BOSONS

- Para cada interação fundamental existe uma partícula de spin 1 - bosão que actuam como o mediador ou partícula que transmite a força
 - electromagnetismo → fotão
 - força nuclear fraca → W^\pm, Z^0 pela primeira produzidos no CERN em 1983
 - força nuclear forte → gluão pela primeira produzido em DESY 1979



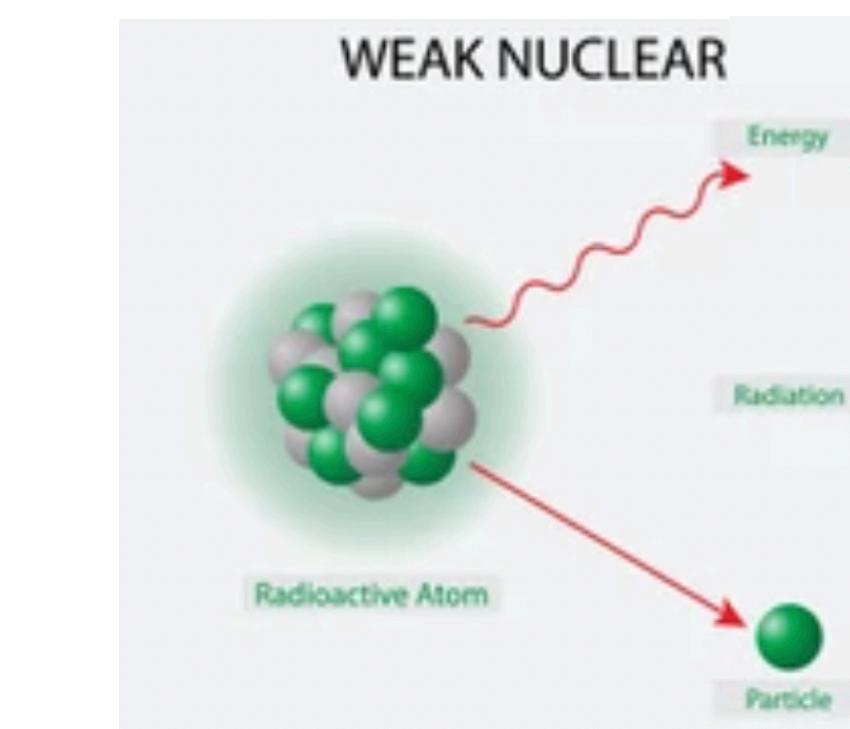
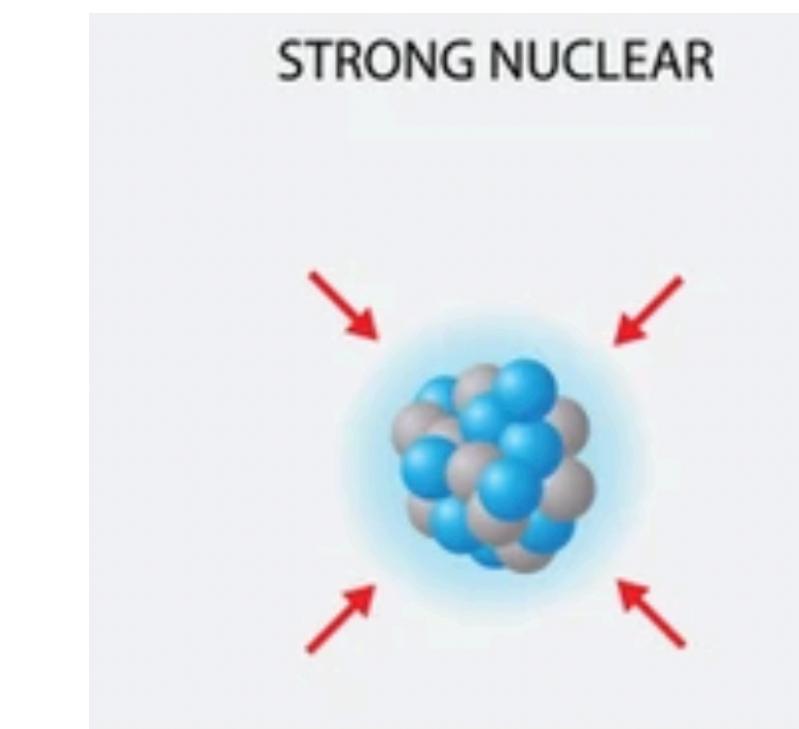
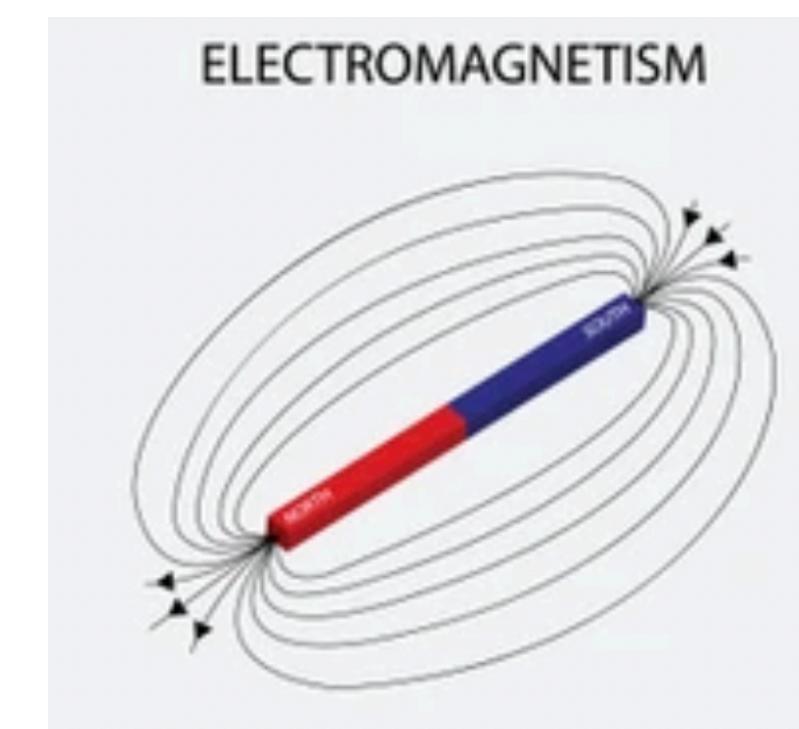
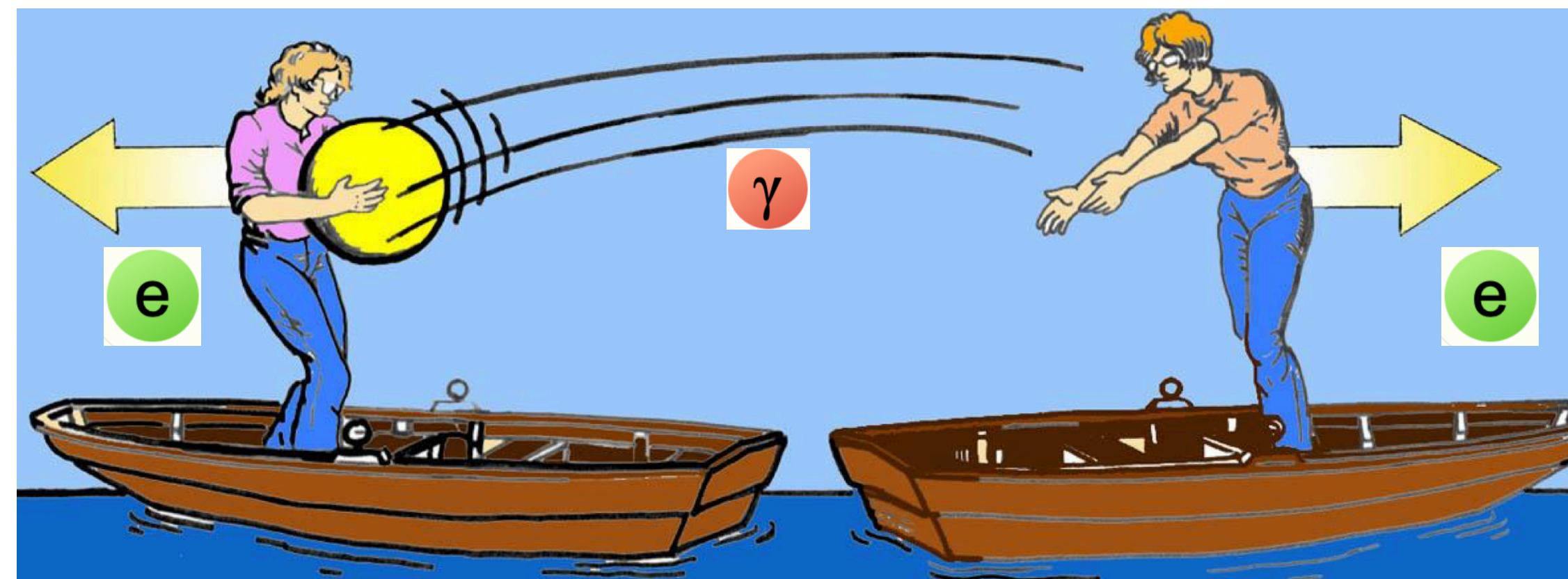
PARTÍCULAS ELEMENTARES MEDIADORES DAS INTERAÇÕES FUNDAMENTAIS

interactions / force carriers
(bosons)



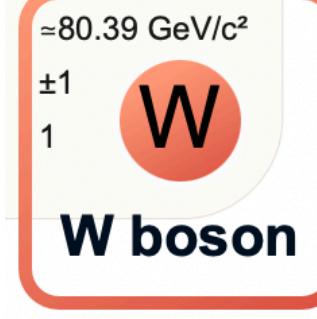
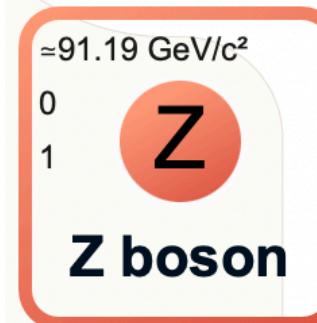
GAUGE BOSONS
VECTOR BOSONS

- Para cada interação fundamental existe uma partícula de spin 1 - bosão que actuam como o mediador ou partícula que transmite a força
 - electromagnetismo → fotão
 - força nuclear fraca → W^\pm, Z^0 pela primeira produzidos no CERN em 1983
 - força nuclear forte → gluão pela primeira produzido em DESY 1979



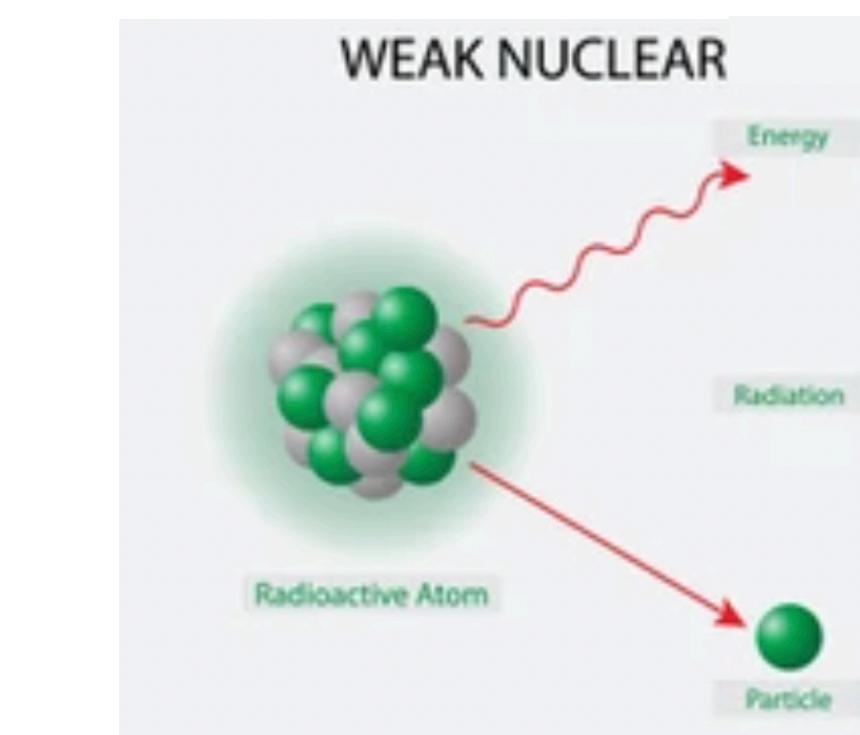
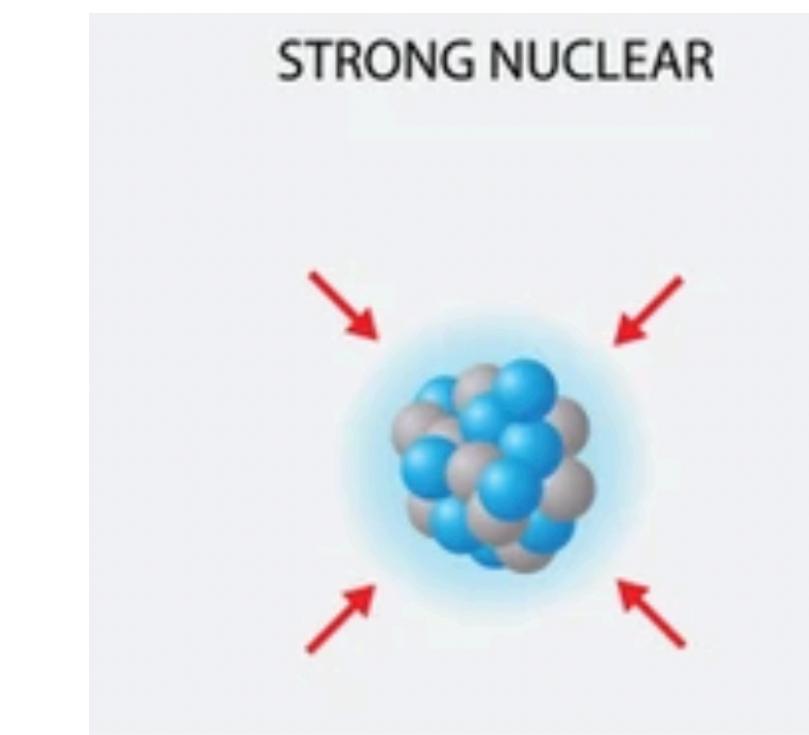
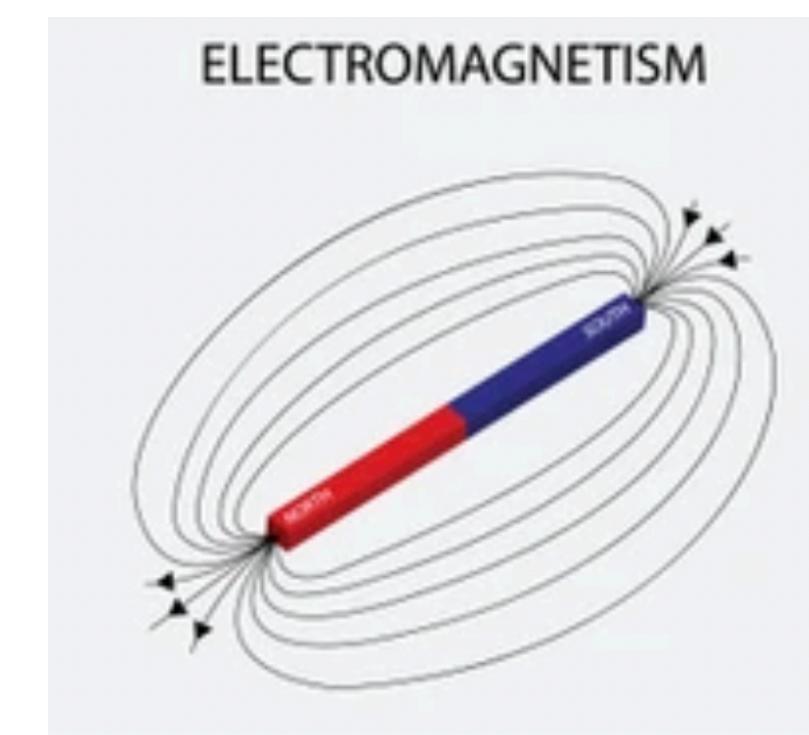
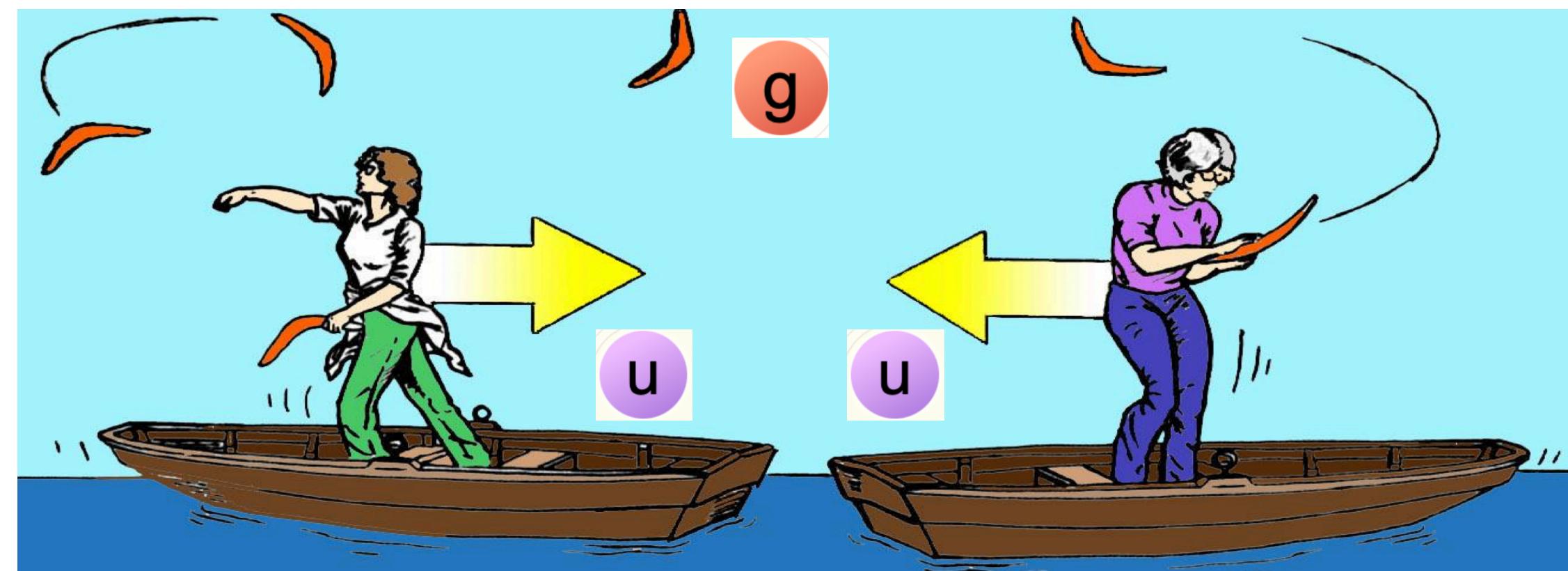
PARTÍCULAS ELEMENTARES MEDIADORES DAS INTERAÇÕES FUNDAMENTAIS

interactions / force carriers
(bosons)



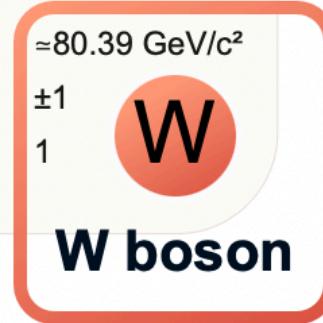
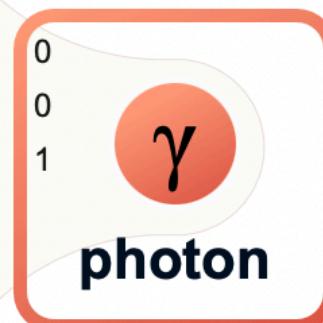
GAUGE BOSONS
VECTOR BOSONS

- Para cada interação fundamental existe uma partícula de spin 1 - bosão que actuam como o mediador ou partícula que transmite a força
 - electromagnetismo → fotão
 - força nuclear fraca → W^\pm, Z^0 pela primeira produzidos no CERN em 1983
 - força nuclear forte → gluão pela primeira produzido no DESY 1979



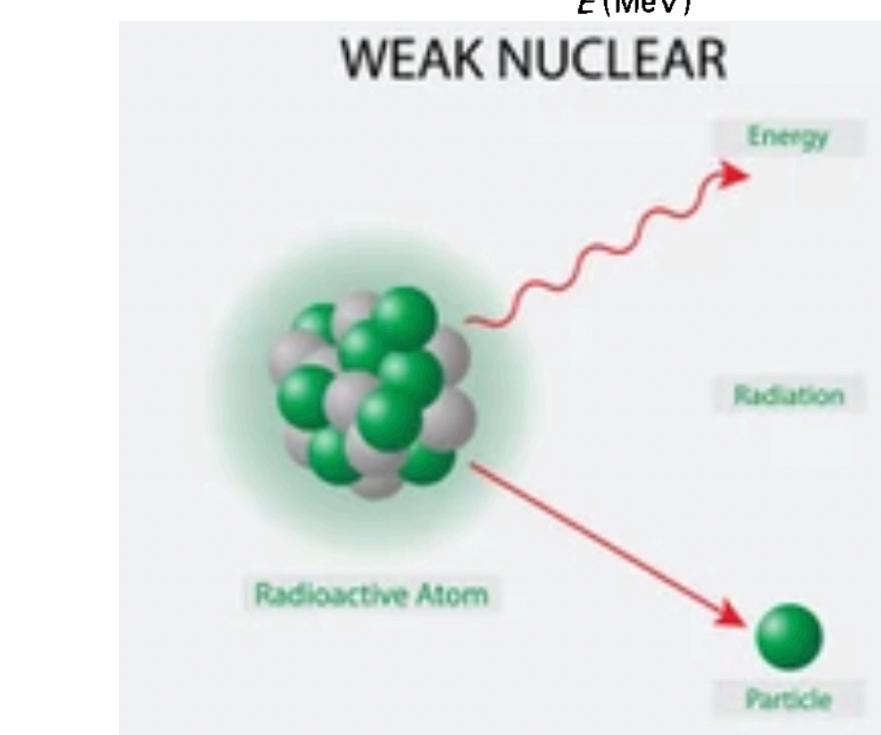
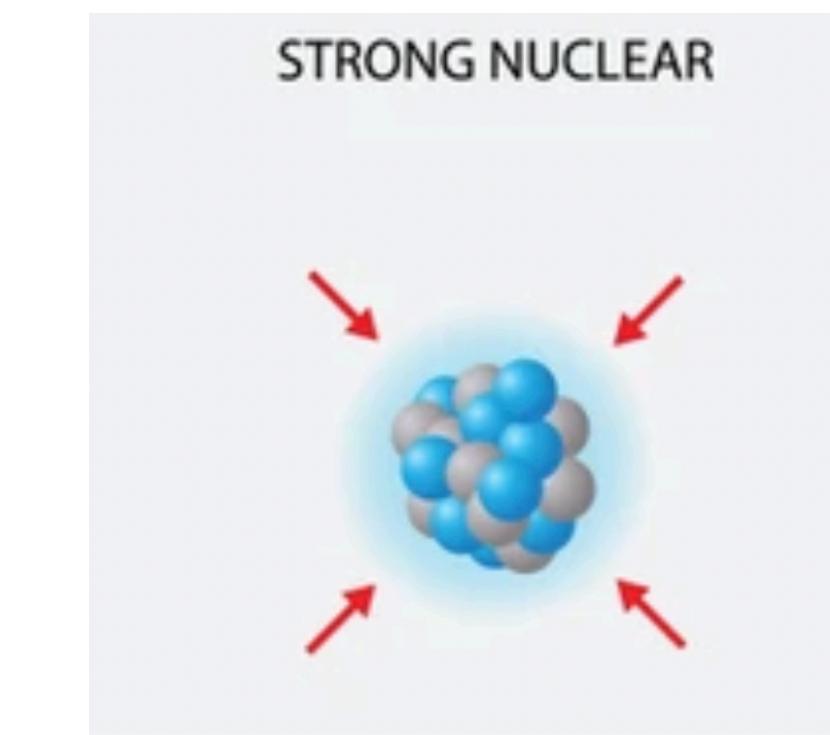
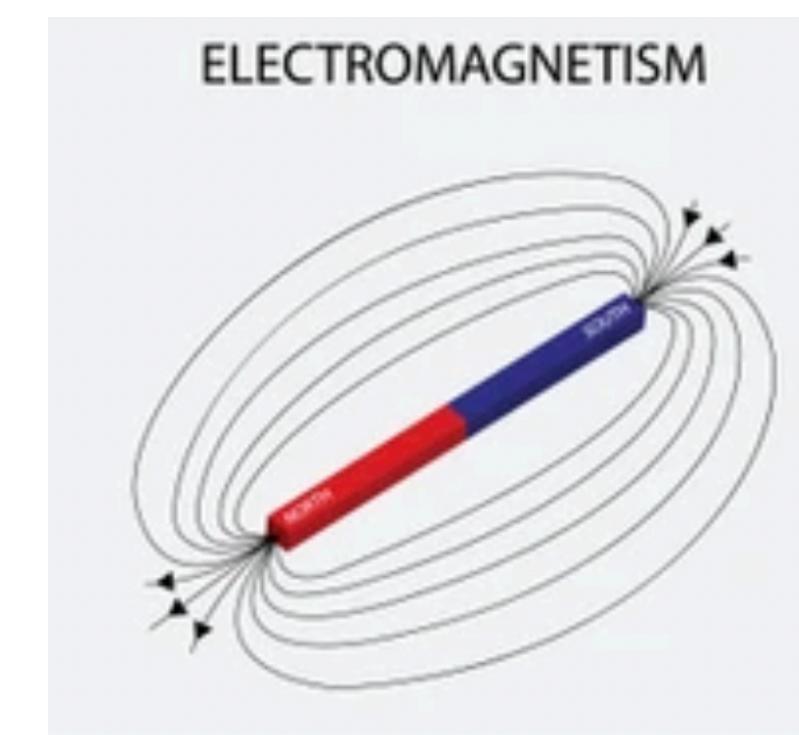
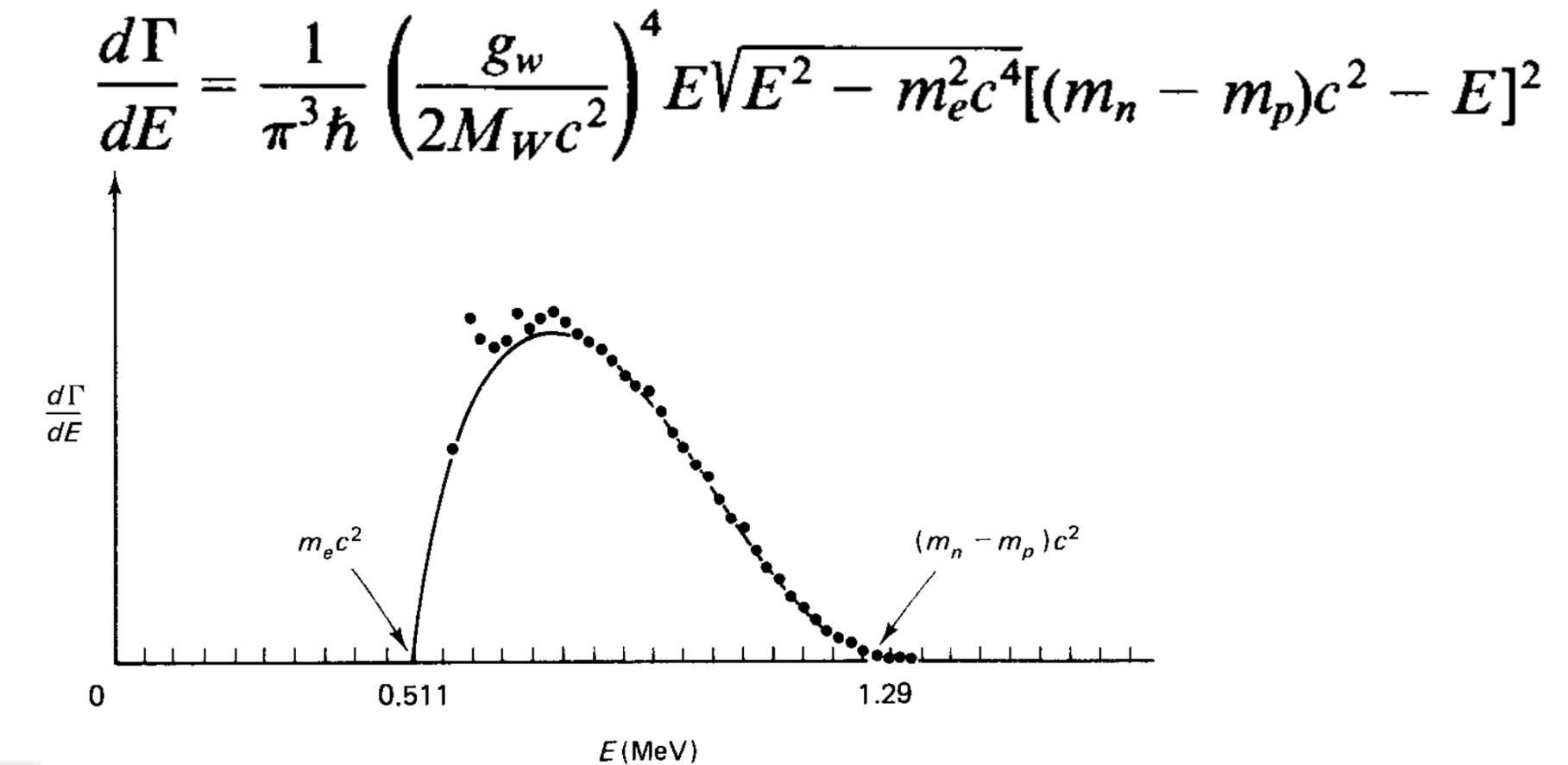
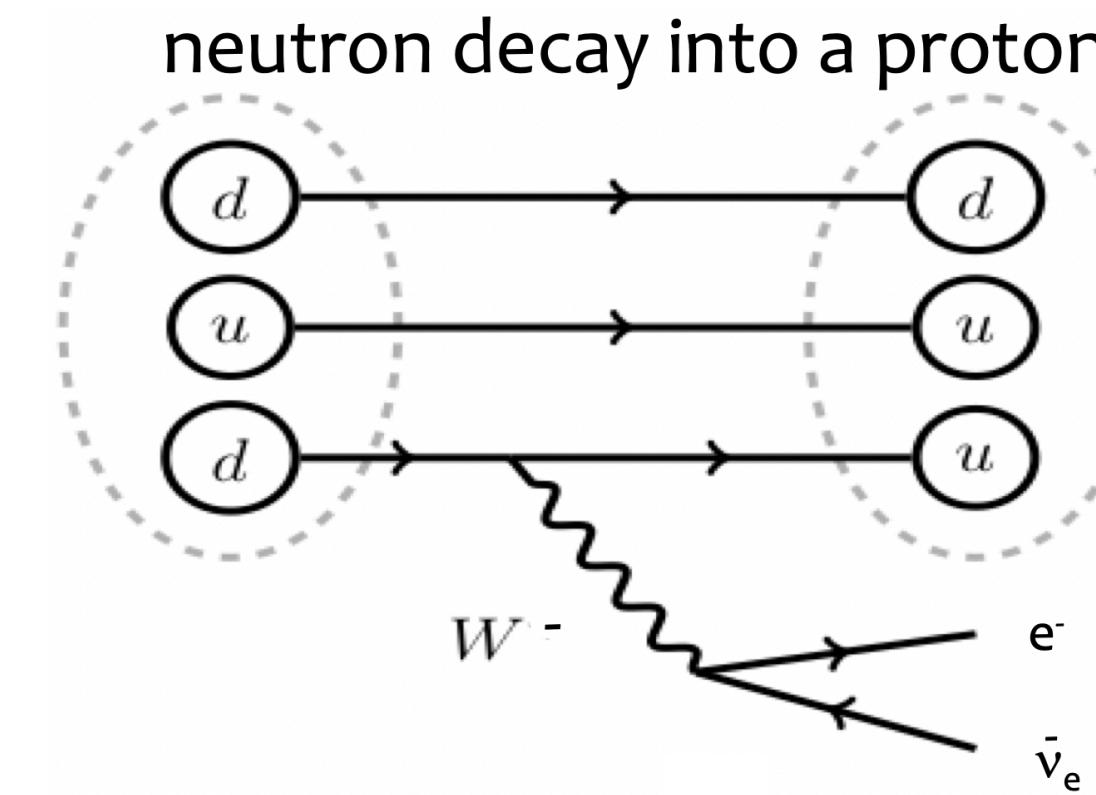
PARTÍCULAS ELEMENTARES MEDIADORES DAS INTERAÇÕES FUNDAMENTAIS

interactions / force carriers
(bosons)



GAUGE BOSONS
VECTOR BOSONS

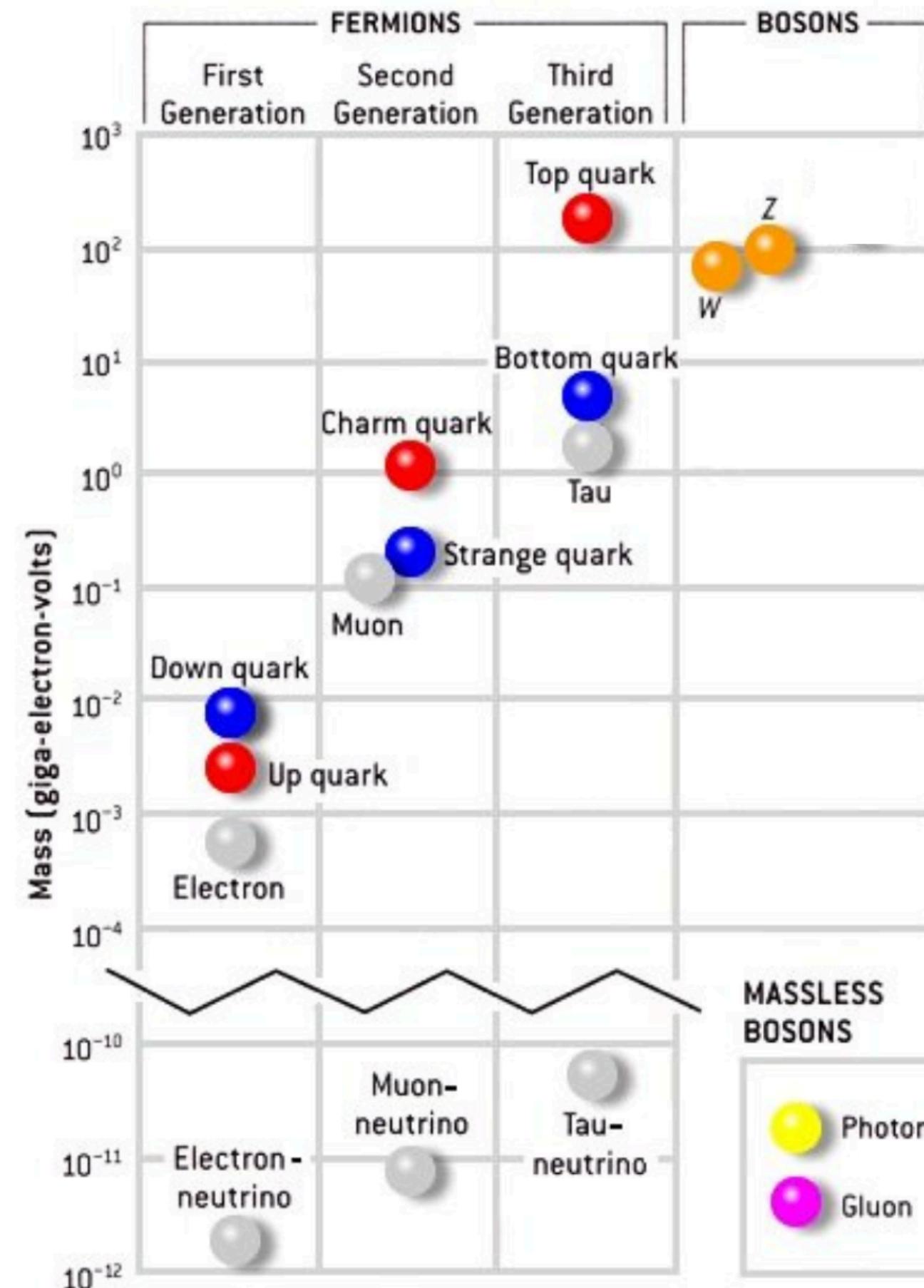
- Para cada interação fundamental existe uma partícula de spin 1 - bosão que actuam como o mediador ou partícula que transmite a força
 - electromagnetismo → fotão
 - força nuclear fraca → W^\pm, Z^0 pela primeira produzidos no CERN em 1983
 - força nuclear forte → gluão pela primeira produzido no DESY 1979





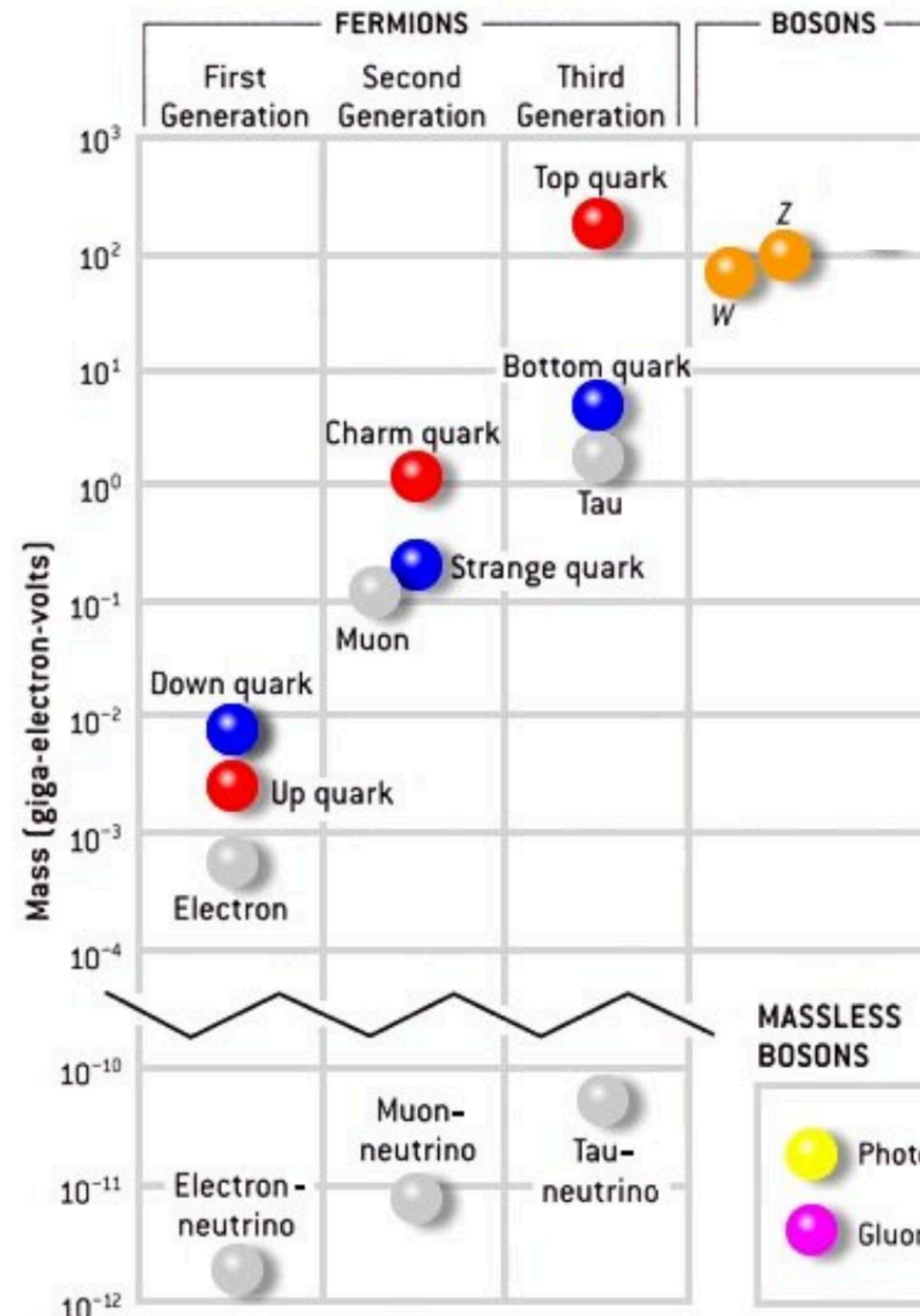
PARTÍCULAS ELEMENTARES: MASSA DAS PARTÍCULAS

PARTÍCULAS ELEMENTARES: MASSA DAS PARTÍCULAS



Massas dos fermões e dos bosões
do Modelo Padrão

PARTÍCULAS ELEMENTARES: MASSA DAS PARTÍCULAS



- As simetrias matemáticas do Modelo Padrão de Física de Partículas proíbem que os mediadores da interação fraca tenham massa, em contradição com as observações experimentais
- Físico Peter Higgs em 1964 propõe solucionar este problema introduzindo no Modelo Padrão de Física Partículas um campo escalar (spin 0) de uma nova interação o campo de Higgs que permeia o Universo

*Massas dos fermões e dos bosões
do Modelo Padrão*



MASSA DAS PARTÍCULAS E MECANISMO DE HIGGS

- Físico Peter Higgs em 1964 propõe solucionar este problema introduzindo no Modelo Padrão de Física Partículas um campo escalar (spin 0) de uma nova interação o campo de Higgs que permeia o Universo



$$\phi = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \phi_1 + i\phi_2 \\ \phi_3 + i\phi_4 \end{pmatrix} \quad \mathcal{L}_{\text{Higgs}} = \frac{1}{2} (\partial_\mu \phi)^* (\partial_\mu \phi) + V(\phi)$$

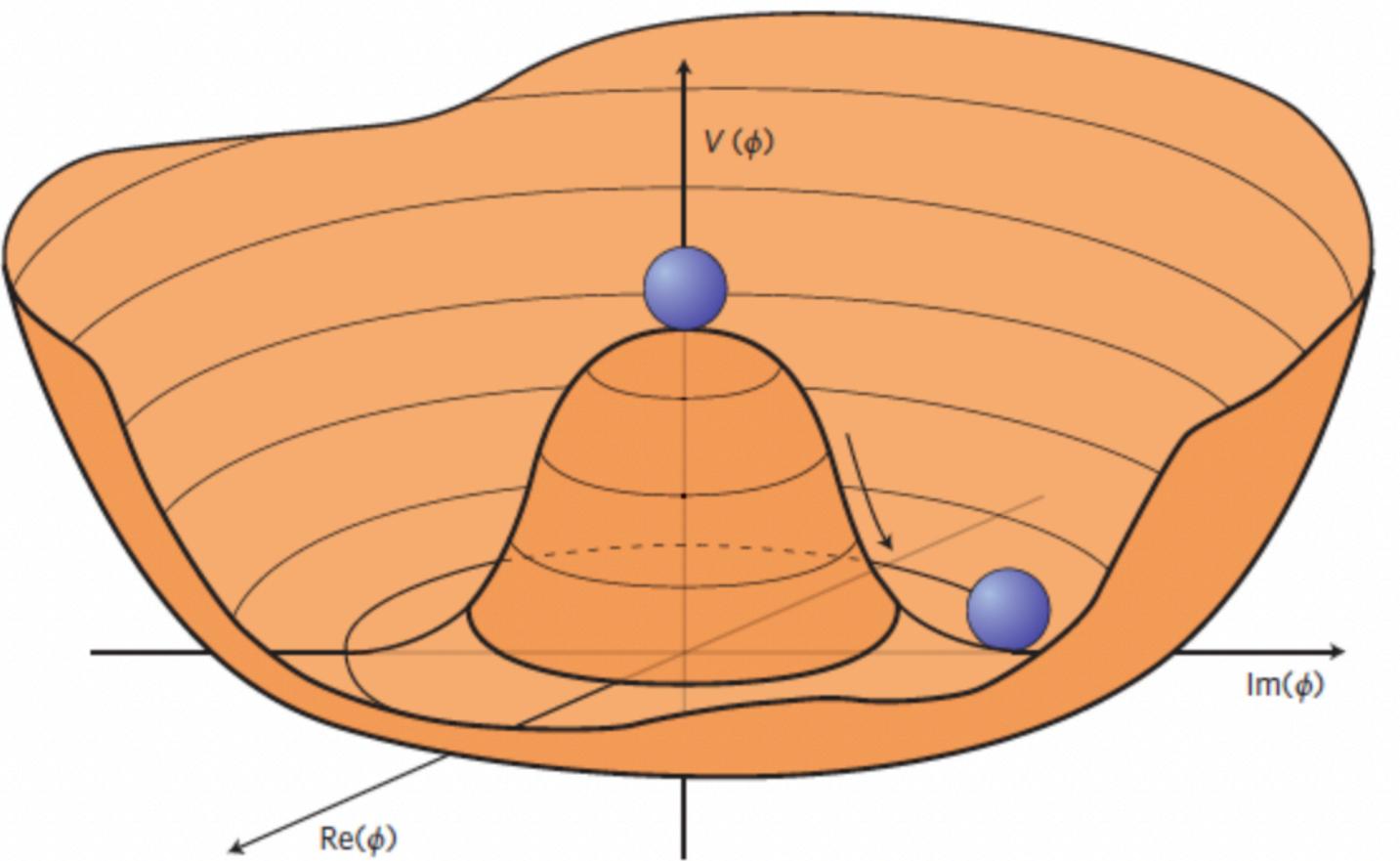
MASSA DAS PARTÍCULAS E MECANISMO DE HIGGS

- Físico Peter Higgs em 1964 propõe solucionar este problema introduzindo no Modelo Padrão de Física Partículas um campo escalar (spin 0) de uma nova interação o campo de Higgs que permeia o Universo



$$\phi = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \phi_1 + i\phi_2 \\ \phi_3 + i\phi_4 \end{pmatrix}$$

$$\mathcal{L}_{\text{Higgs}} = \frac{1}{2} (\partial_\mu \phi)^* (\partial_\mu \phi) + V(\phi)$$



$$V(\phi) = \mu^2 |\phi|^2 + \lambda |\phi|^4$$
$$\mu^2 < 0 \Rightarrow \phi_{min} = \pm v = \pm \sqrt{\frac{-\mu^2}{\lambda}}$$

MASSA DAS PARTÍCULAS E MECANISMO DE HIGGS

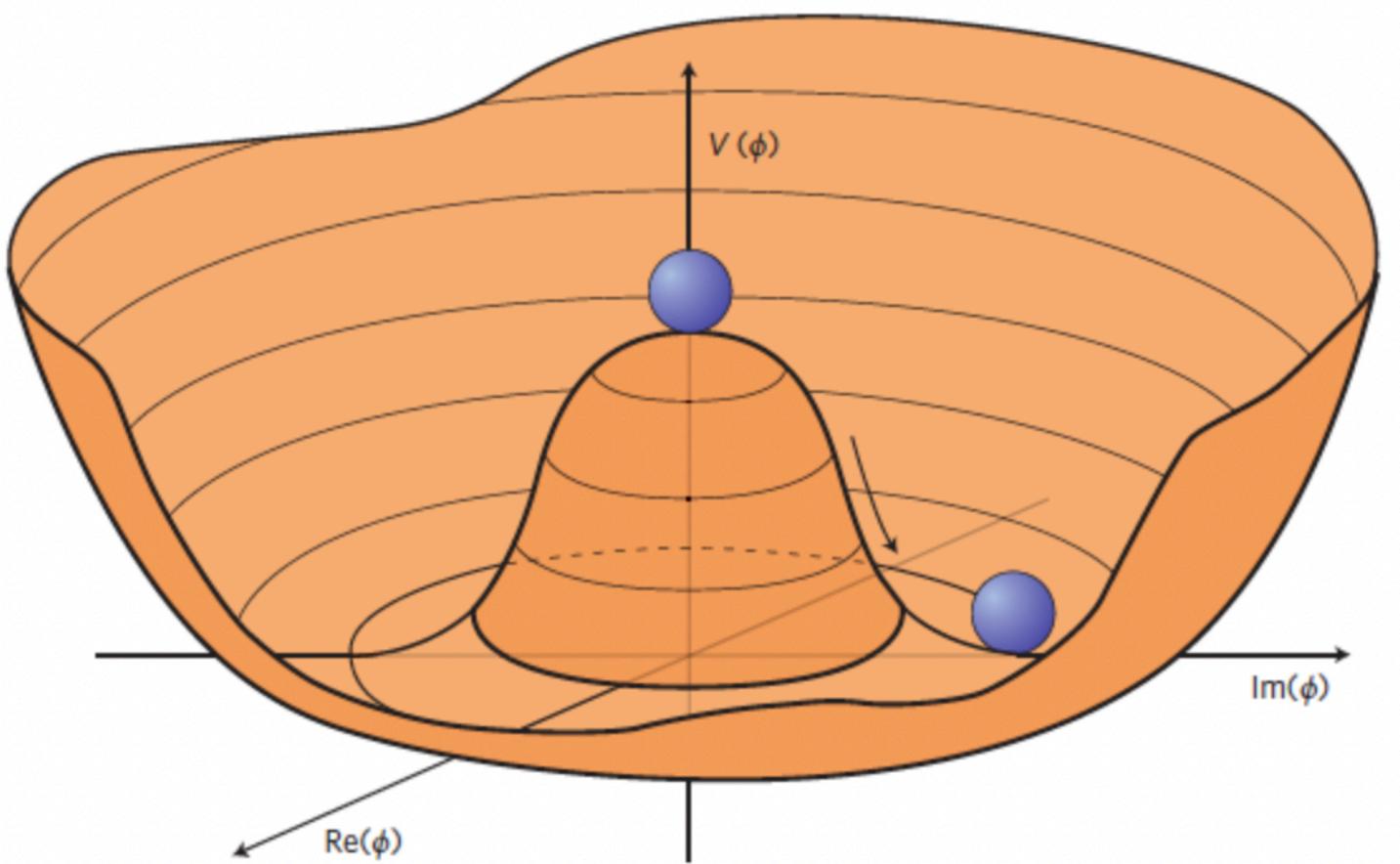
- Físico Peter Higgs em 1964 propõe solucionar este problema introduzindo no Modelo Padrão de Física Partículas um campo escalar (spin 0) de uma nova interação o campo de Higgs que permeia o Universo



$$\phi = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \phi_1 + i\phi_2 \\ \phi_3 + i\phi_4 \end{pmatrix}$$

$$\mathcal{L}_{\text{Higgs}} = \frac{1}{2} (\partial_\mu \phi)^* (\partial_\mu \phi) + V(\phi)$$

- Interações das partículas com o campo de Higgs determinadas pelo potencial de Higgs
- A altas energias o Potential tem um estado simétrico meta-estável, a baixas energias o potential tem um mínimo que **quebra espontaneamente** essa **simetria**



$$V(\phi) = \mu^2 |\phi|^2 + \lambda |\phi|^4$$
$$\mu^2 < 0 \Rightarrow \phi_{min} = \pm v = \pm \sqrt{\frac{-\mu^2}{\lambda}}$$

MASSA DAS PARTÍCULAS E MECANISMO DE HIGGS

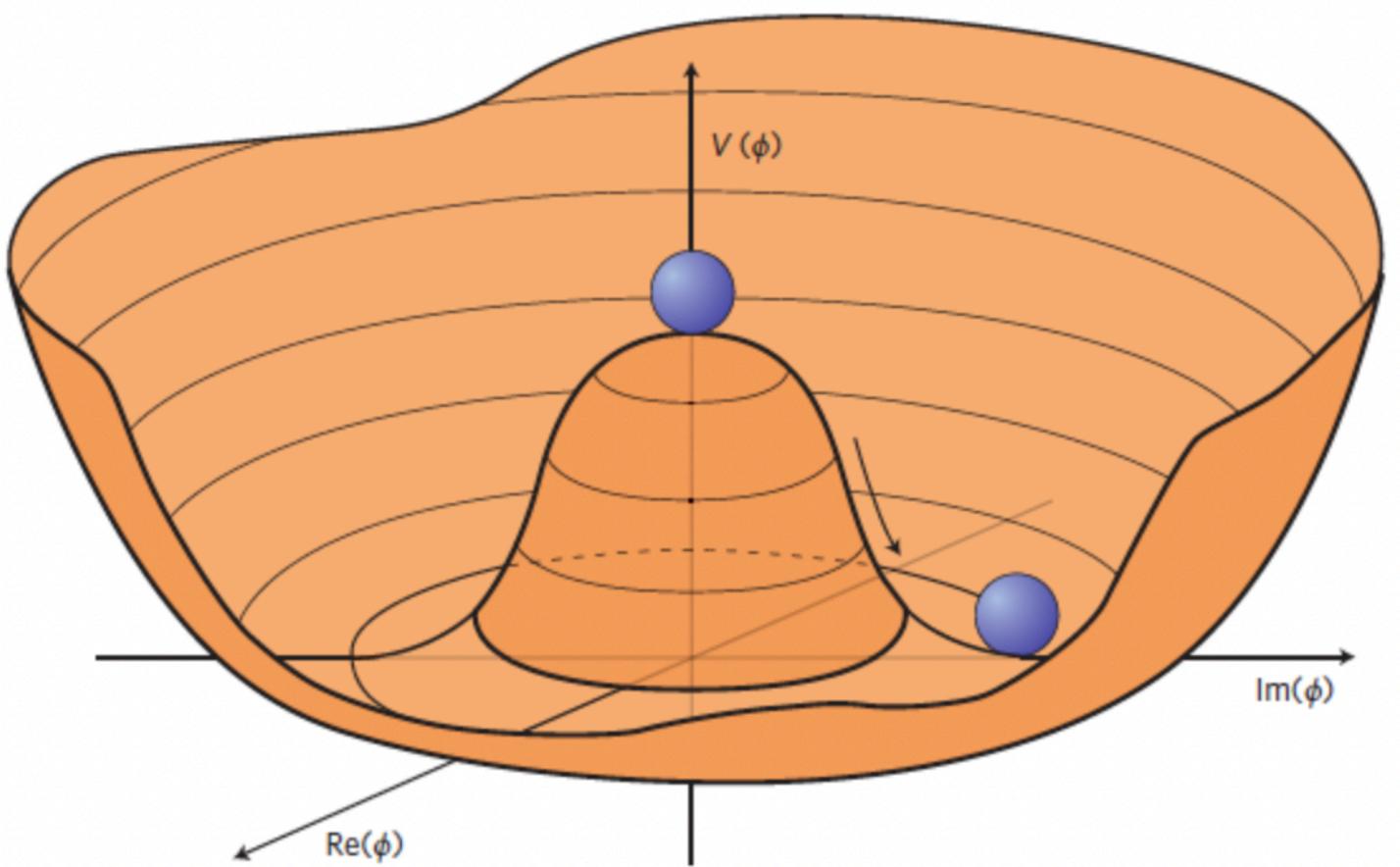
- Físico Peter Higgs em 1964 propõe solucionar este problema introduzindo no Modelo Padrão de Física Partículas um campo escalar (spin 0) de uma nova interação o campo de Higgs que permeia o Universo



$$\phi = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \phi_1 + i\phi_2 \\ \phi_3 + i\phi_4 \end{pmatrix}$$

$$\mathcal{L}_{\text{Higgs}} = \frac{1}{2} (\partial_\mu \phi)^* (\partial_\mu \phi) + V(\phi)$$

- Interações das partículas com o campo de Higgs determinadas pelo potencial de Higgs
- A altas energias o Potential tem um estado simétrico meta-estável, a baixas energias o potential tem um mínimo que **quebra espontaneamente** essa **simetria**
- Os 3 bosões da interação fraca adquirem massa e o fotão permanece sem massa



$$V(\phi) = \mu^2 |\phi|^2 + \lambda |\phi|^4$$
$$\mu^2 < 0 \Rightarrow \phi_{min} = \pm v = \pm \sqrt{-\frac{\mu^2}{\lambda}}$$

MASSA DAS PARTÍCULAS E MECANISMO DE HIGGS



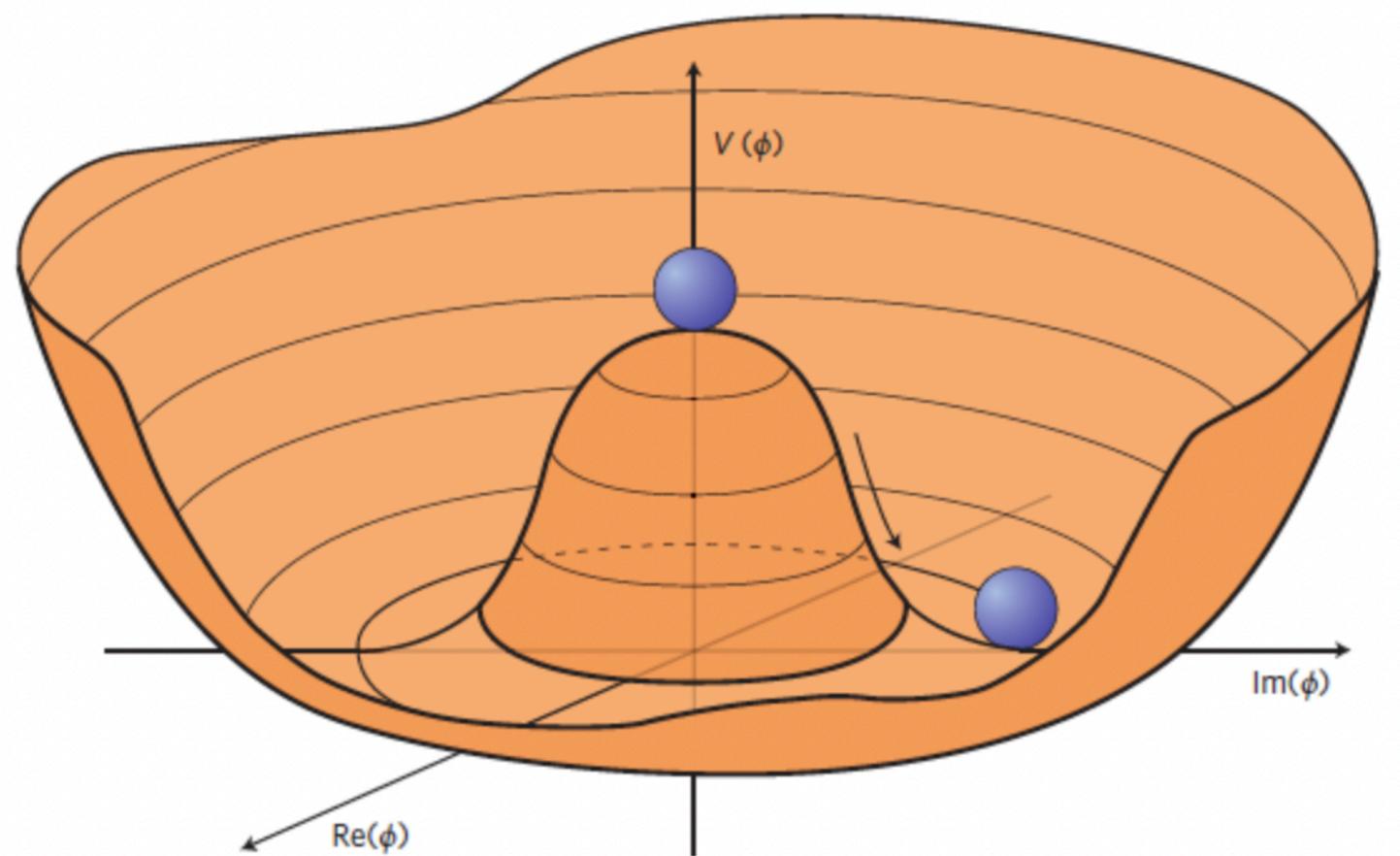
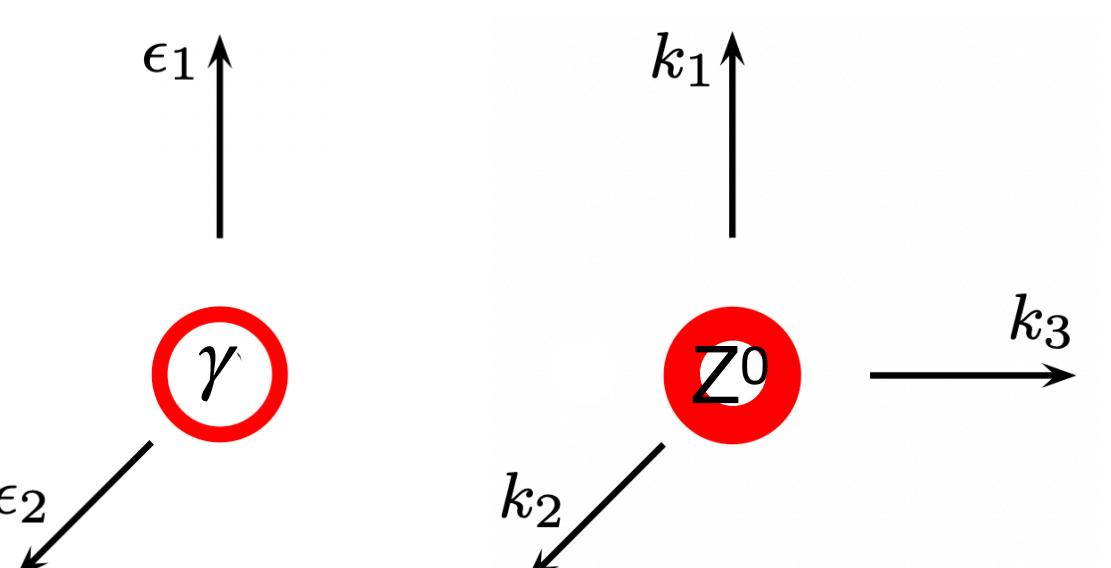
- Físico Peter Higgs em 1964 propõe solucionar este problema introduzindo no Modelo Padrão de Física Partículas um campo escalar (spin 0) de uma nova interação o campo de Higgs que permeia o Universo

$$\phi = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \phi_1 + i\phi_2 \\ \phi_3 + i\phi_4 \end{pmatrix}$$

$$\mathcal{L}_{\text{Higgs}} = \frac{1}{2} (\partial_\mu \phi)^* (\partial_\mu \phi) + V(\phi)$$

- Interações das partículas com o campo de Higgs determinadas pelo potencial de Higgs
- A altas energias o Potential tem um estado simétrico meta-estável, a baixas energias o potential tem um mínimo que **quebra espontaneamente** essa **simetria**
- Os 3 bosões da interação fraca adquirem massa e o fotão permanece sem massa

Massa (GeV)	Z^0	W^\pm
LEP	91.1875 ± 0.0021	80.439 ± 0.050
$p\bar{p}$	91.1876 ± 0.0039	80.454 ± 0.059



$$V(\phi) = \mu^2 |\phi|^2 + \lambda |\phi|^4$$

$$\mu^2 < 0 \Rightarrow \phi_{min} = \pm v = \pm \sqrt{-\frac{\mu^2}{\lambda}}$$

MASSA DAS PARTÍCULAS E MECANISMO DE HIGGS

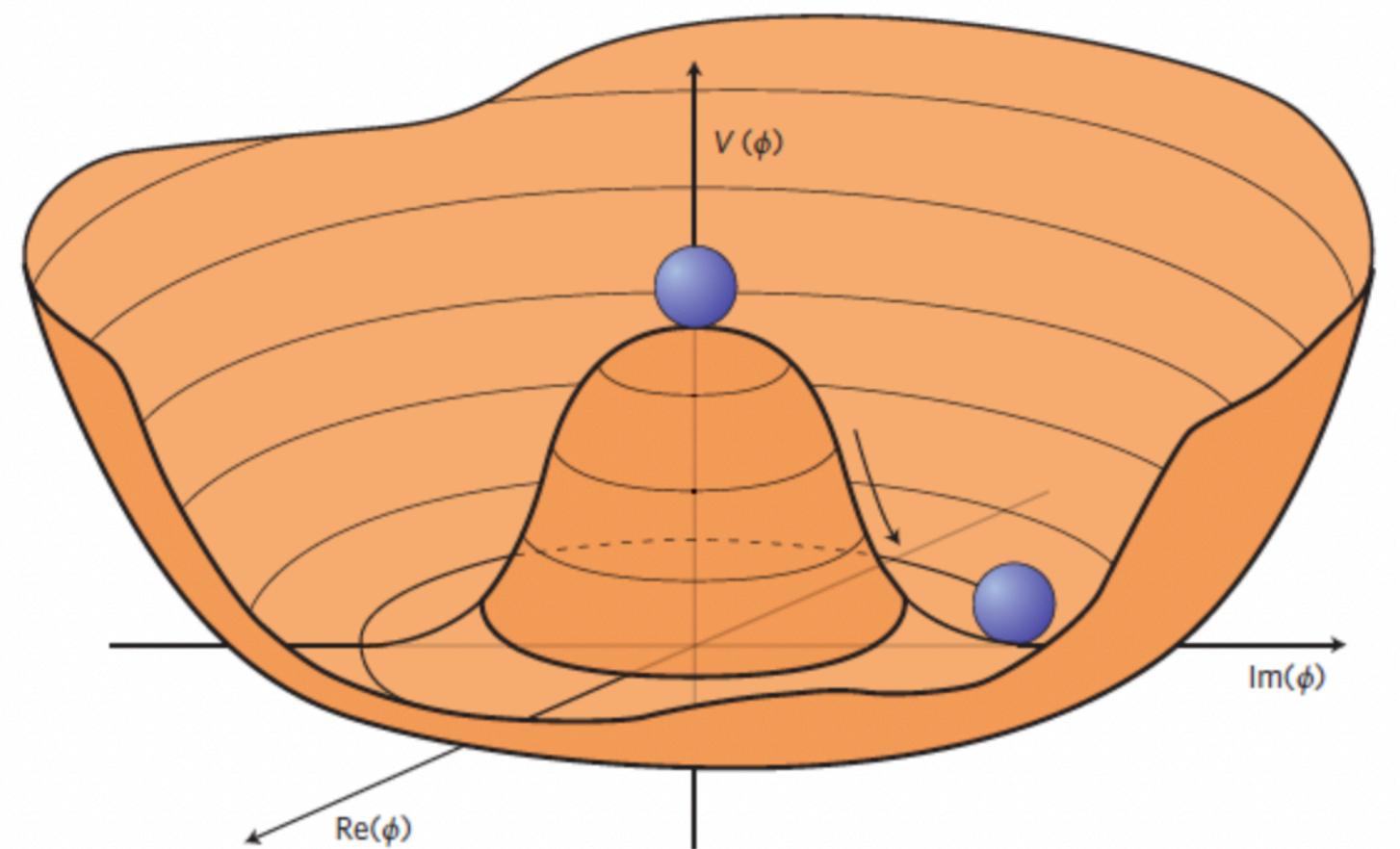


- Físico Peter Higgs em 1964 propõe solucionar este problema introduzindo no Modelo Padrão de Física Partículas um campo escalar (spin 0) de uma nova interação o campo de Higgs que permeia o Universo

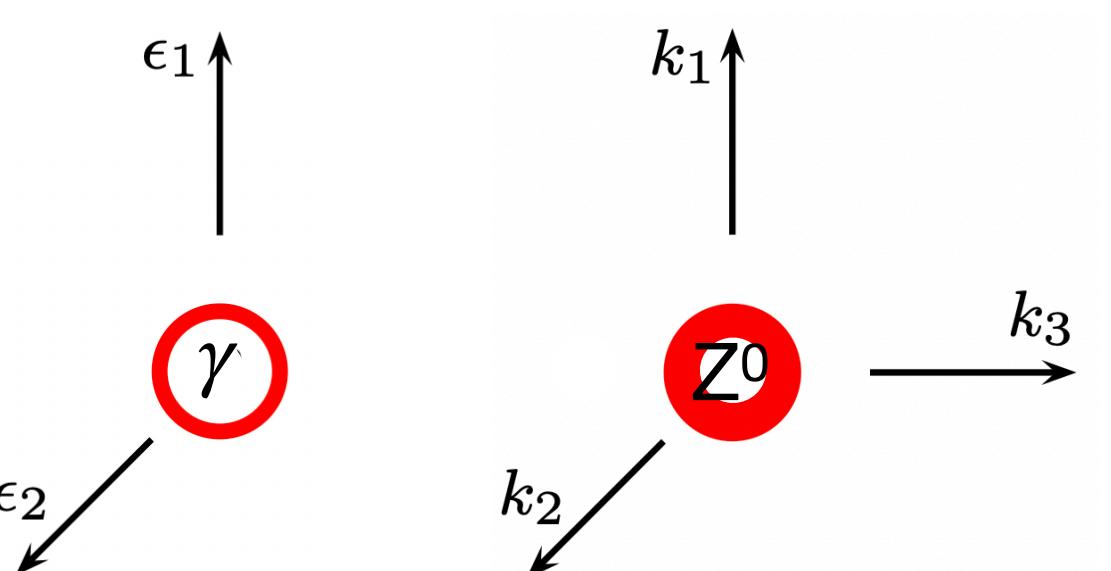
$$\phi = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \phi_1 + i\phi_2 \\ \phi_3 + i\phi_4 \end{pmatrix}$$

$$\mathcal{L}_{\text{Higgs}} = \frac{1}{2} (\partial_\mu \phi)^* (\partial_\mu \phi) + V(\phi)$$

- Interações das partículas com o campo de Higgs determinadas pelo potencial de Higgs
- A altas energias o Potential tem um estado simétrico meta-estável, a baixas energias o potential tem um mínimo que **quebra espontaneamente** essa **simetria**
- Os 3 bosões da interação fraca adquirem massa e o fotão permanece sem massa



Massa (GeV)	Z^0	W^\pm
LEP	91.1875 ± 0.0021	80.439 ± 0.050
$p\bar{p}$	91.1876 ± 0.0039	80.454 ± 0.059



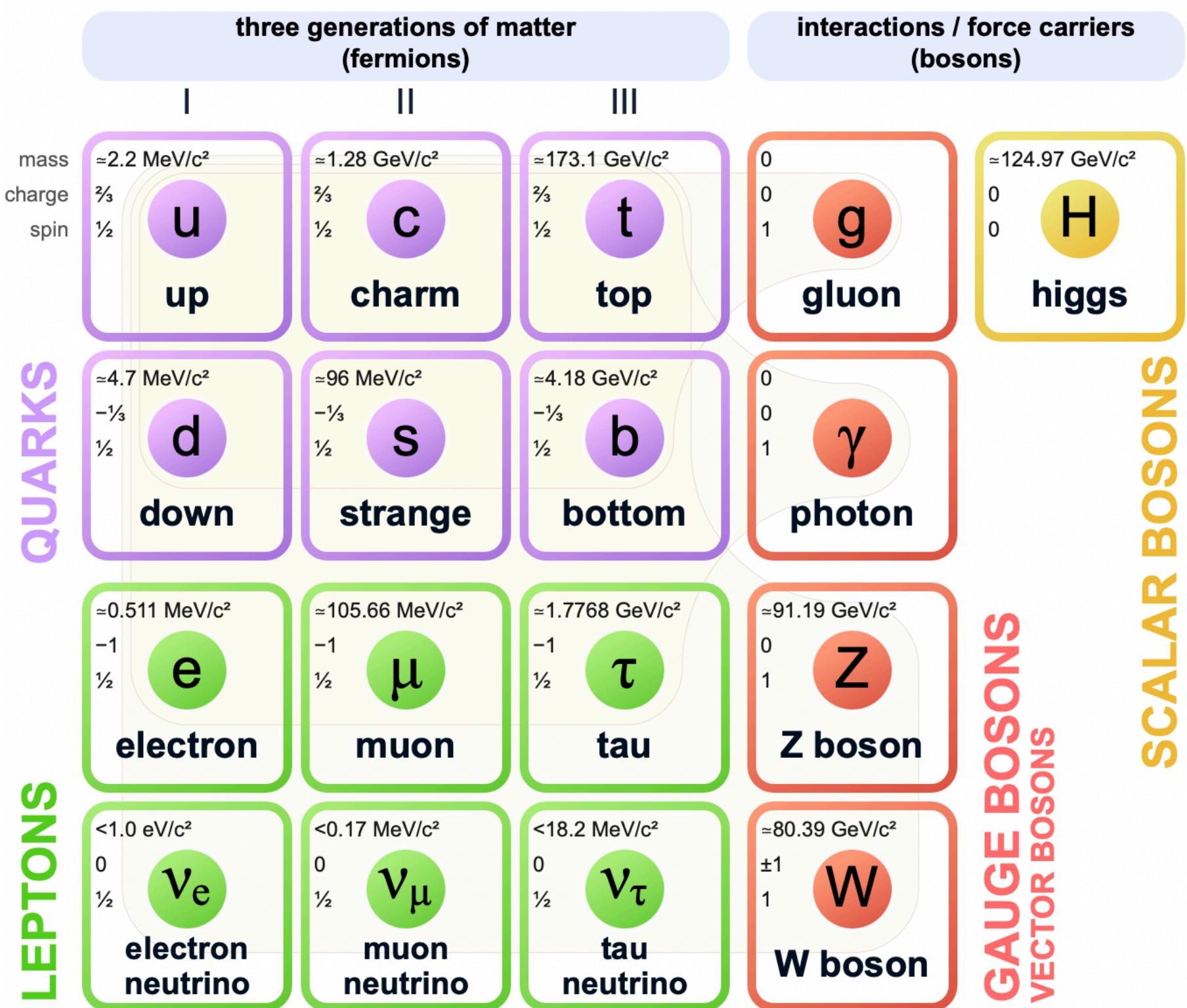
$$V(\phi) = \mu^2 |\phi|^2 + \lambda |\phi|^4$$

$$\mu^2 < 0 \Rightarrow \phi_{min} = \pm v = \pm \sqrt{-\frac{\mu^2}{\lambda}}$$

- Modelo prevê a existência da partícula Higgs associada ao campo de Higgs → observada no LHC no CERN pela primeira vez em 2012

MODELO PADRÃO DA FÍSICA DE PARTÍCULAS

Standard Model of Elementary Particles

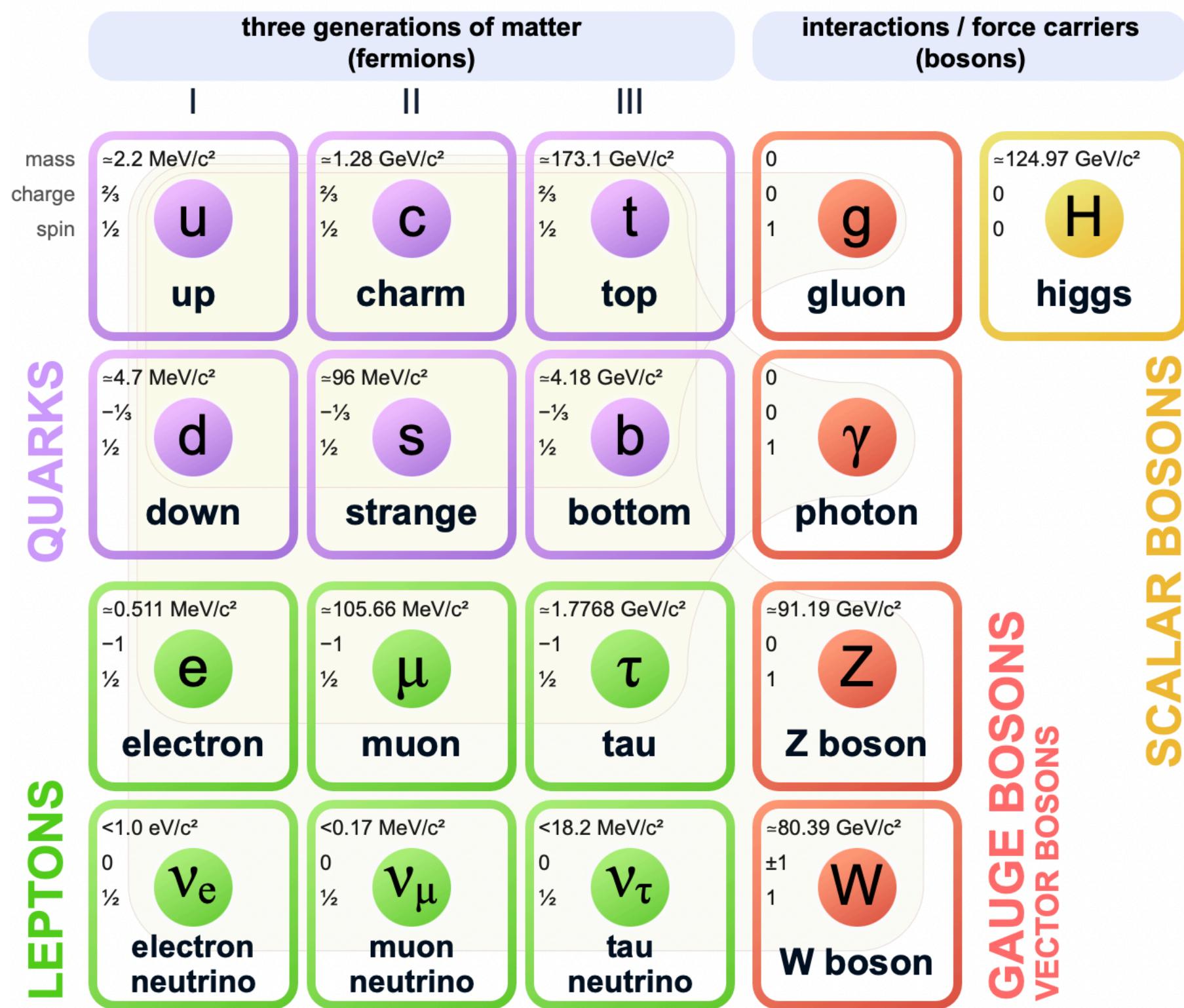


- Descreve todas as partículas e antipartículas subatómicas conhecidas e como elas interagem

Deixa ainda vários problemas em aberto:

MODELO PADRÃO DA FÍSICA DE PARTÍCULAS

Standard Model of Elementary Particles



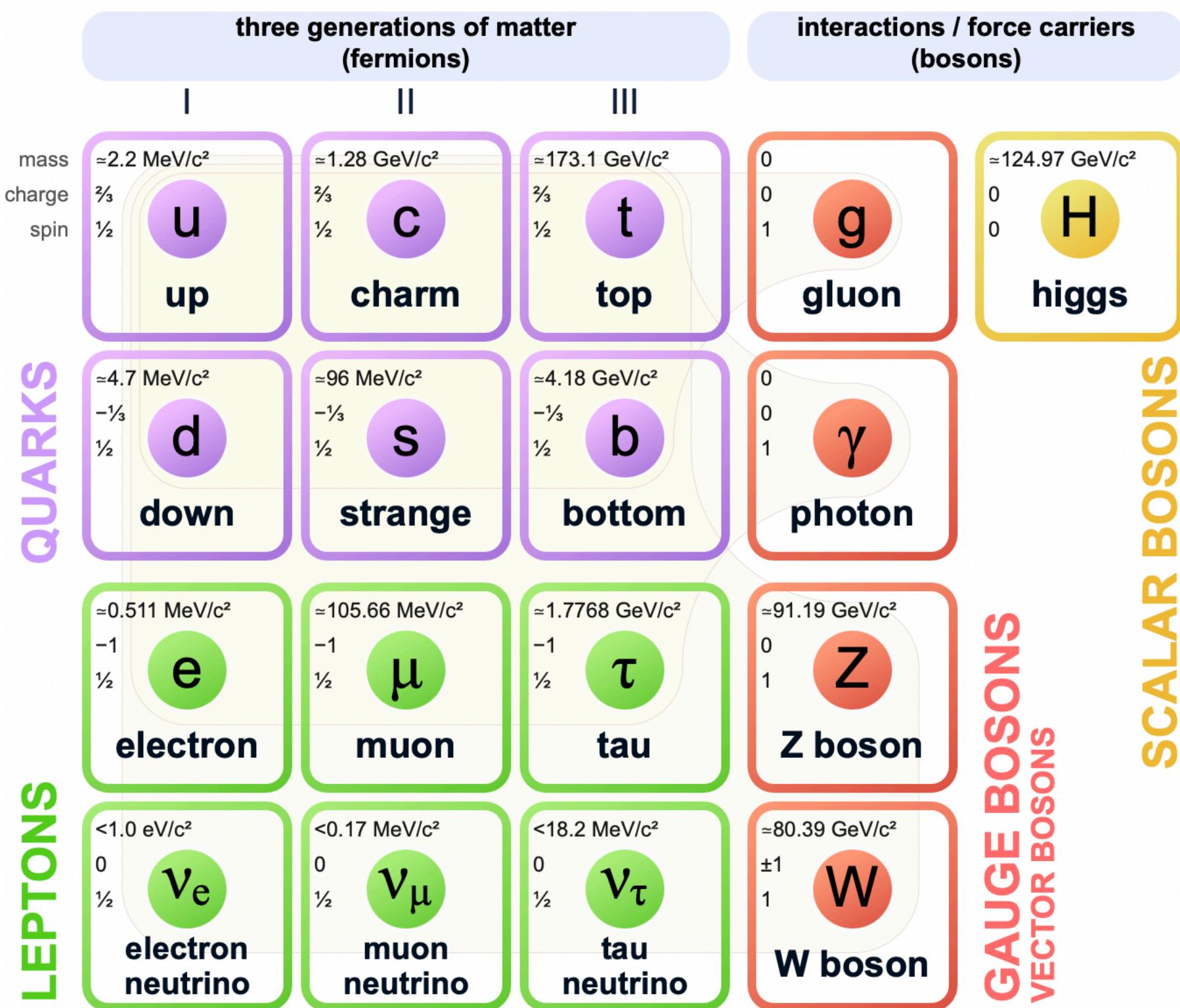
- Descreve todas as partículas e antipartículas subatómicas conhecidas e como elas interagem

Deixa ainda vários problemas em aberto:

- Porque existe mais matéria do que anti-matéria no Universo?

MODELO PADRÃO DA FÍSICA DE PARTÍCULAS

Standard Model of Elementary Particles



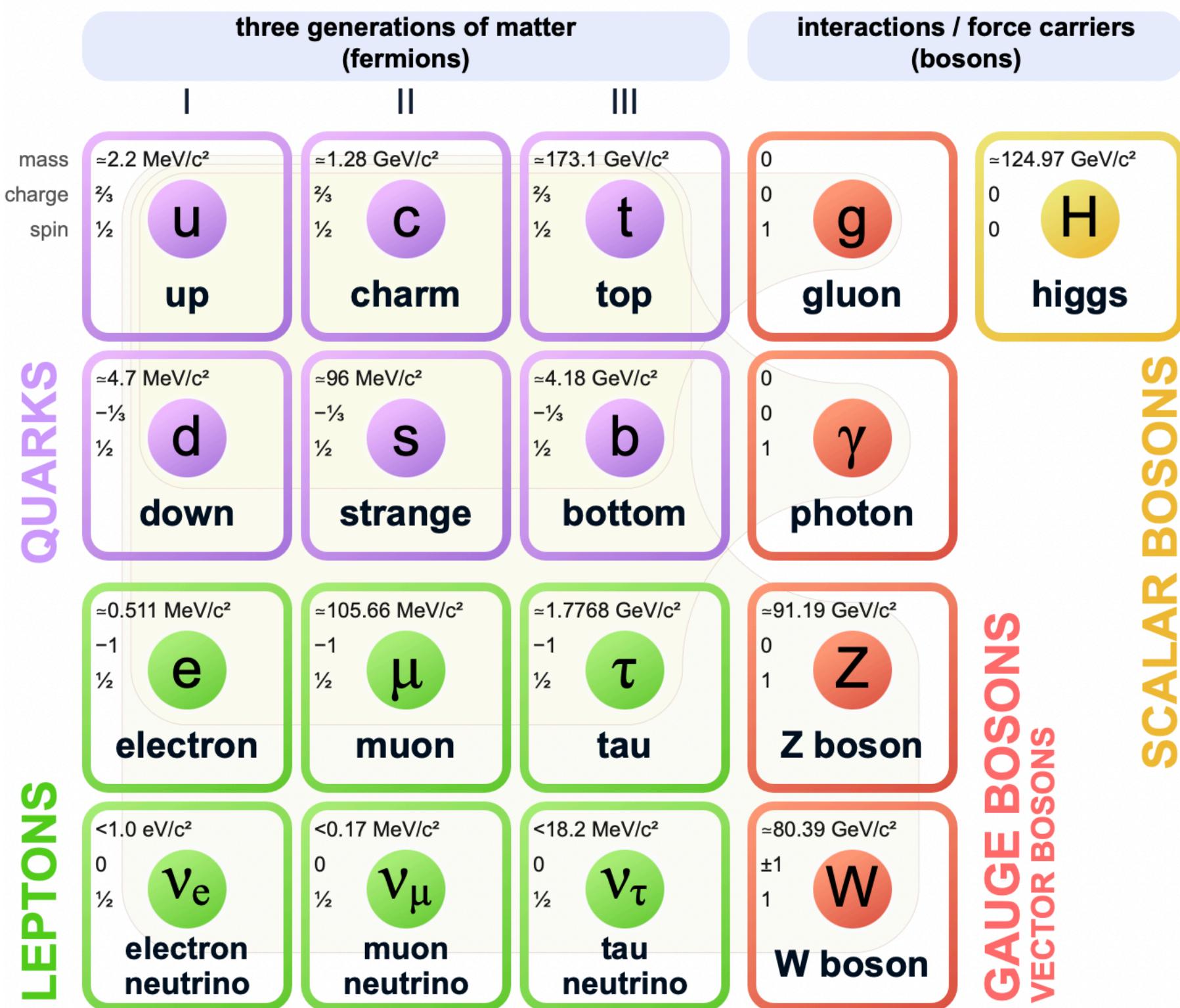
- Descreve todas as partículas e antipartículas subatómicas conhecidas e como elas interagem

Deixa ainda vários problemas em aberto:

- Porque existe mais matéria do que anti-matéria no Universo?
- Porque existem 3 famílias de quarks e leptões?

MODELO PADRÃO DA FÍSICA DE PARTÍCULAS

Standard Model of Elementary Particles



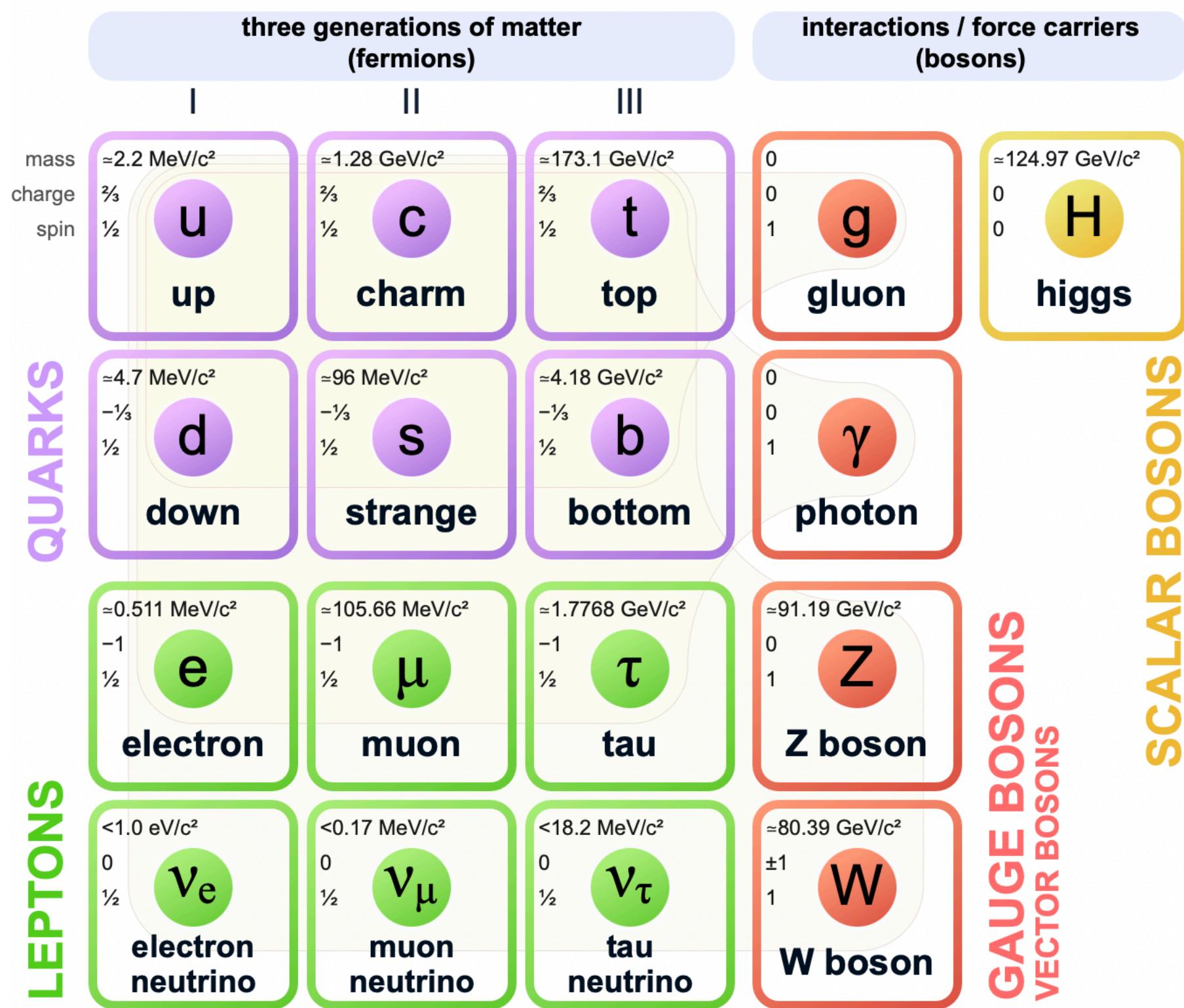
- Descreve todas as partículas e antipartículas subatómicas conhecidas e como elas interagem

Deixa ainda vários problemas em aberto:

- Porque existe mais matéria do que anti-matéria no Universo?
- Porque existem 3 famílias de quarks e leptões?
- Qual é a origem do potencial de Higgs?

MODELO PADRÃO DA FÍSICA DE PARTÍCULAS

Standard Model of Elementary Particles



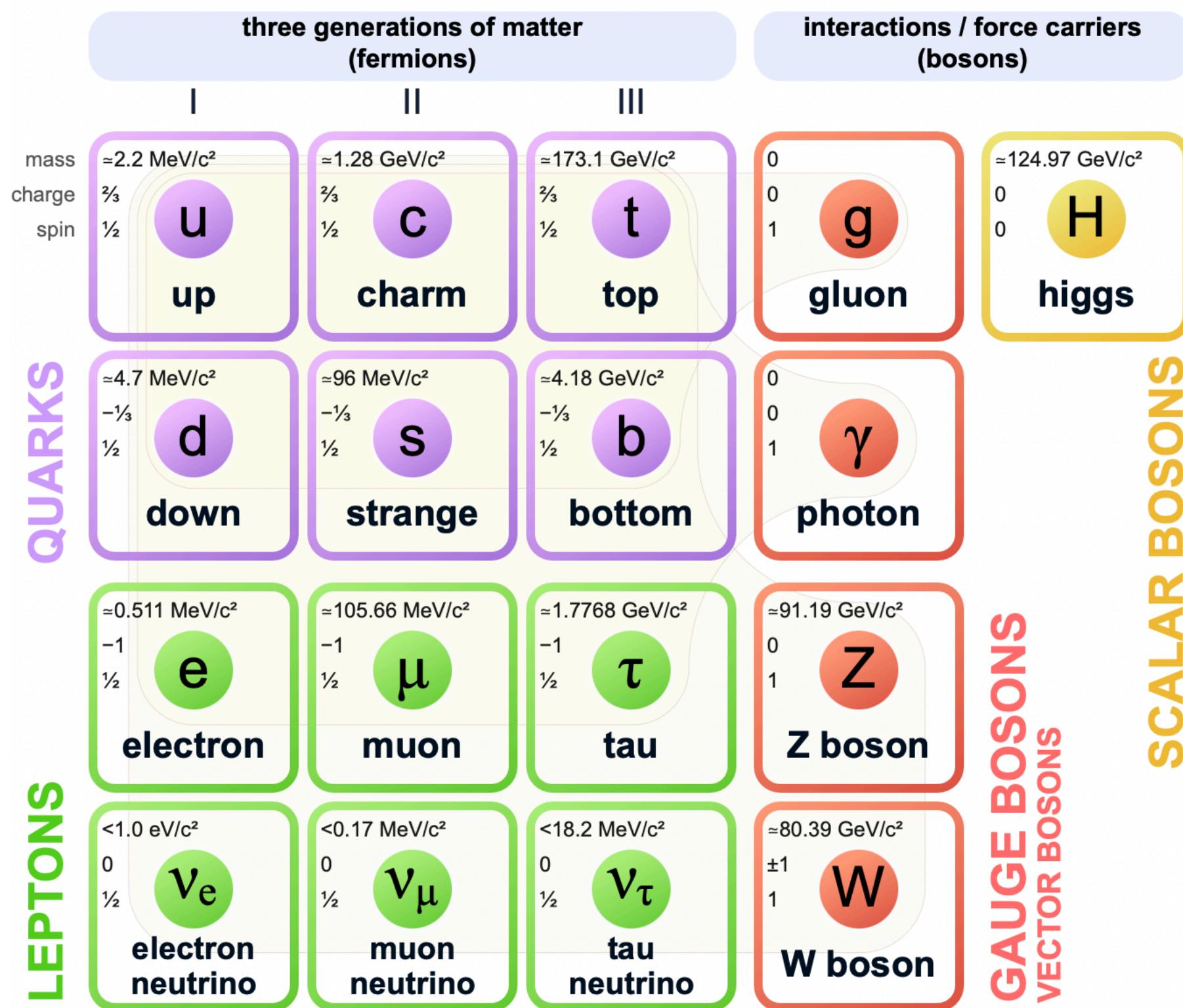
- Descreve todas as partículas e antipartículas subatómicas conhecidas e como elas interagem

Deixa ainda vários problemas em aberto:

- Porque existe mais matéria do que anti-matéria no Universo?
- Porque existem 3 famílias de quarks e leptões?
- Qual é a origem do potencial de Higgs?
- Porque é que as partículas tem os valores de massa que têm e não outros?

MODELO PADRÃO DA FÍSICA DE PARTÍCULAS

Standard Model of Elementary Particles



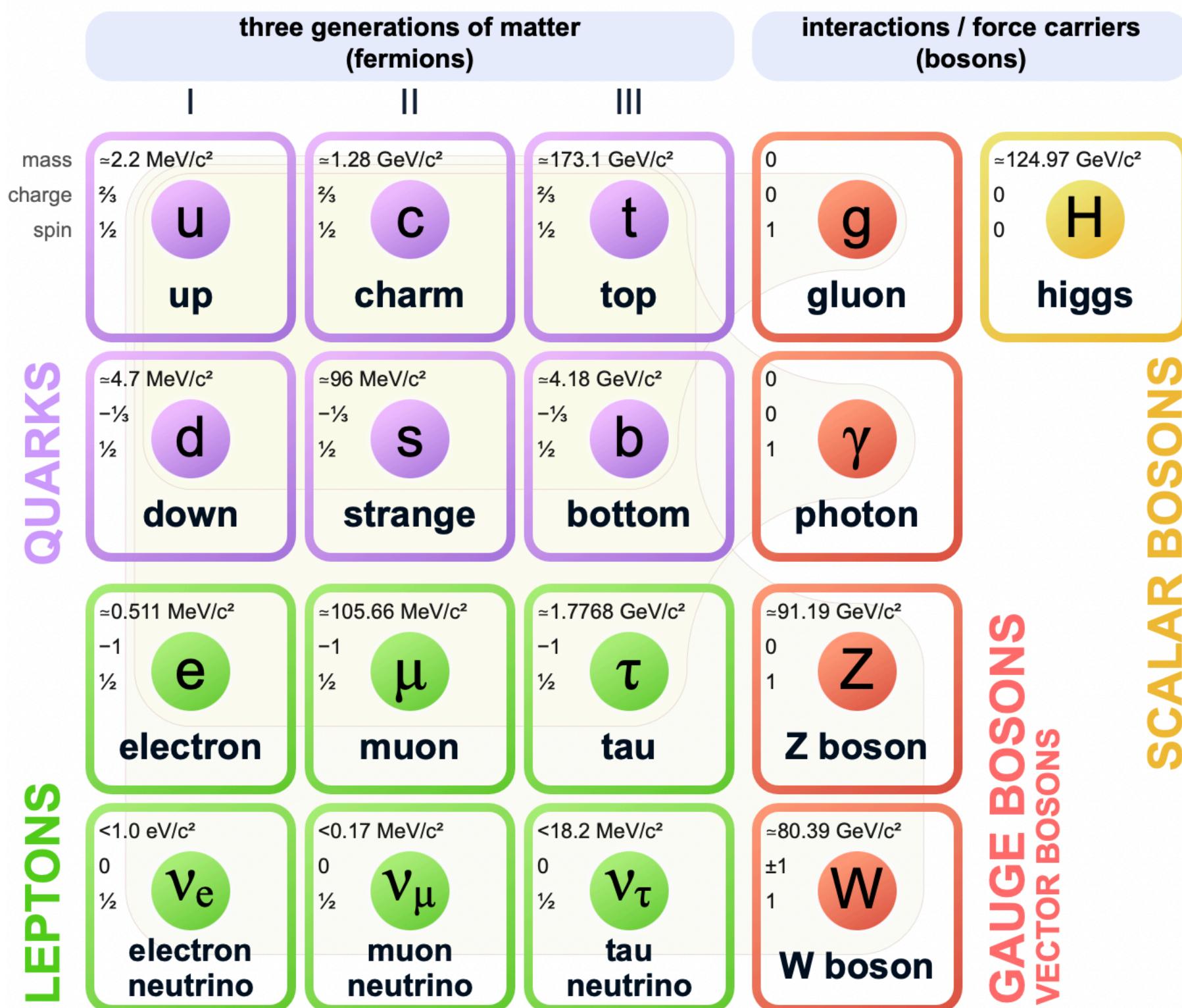
- Descreve todas as partículas e antipartículas subatómicas conhecidas e como elas interagem

Deixa ainda vários problemas em aberto:

- Porque existe mais matéria do que anti-matéria no Universo?
- Porque existem 3 famílias de quarks e leptões?
- Qual é a origem do potencial de Higgs?
- Porque é que as partículas tem os valores de massa que têm e não outros?
- Será que as partículas elementares são mesmo partículas elementares?

MODELO PADRÃO DA FÍSICA DE PARTÍCULAS

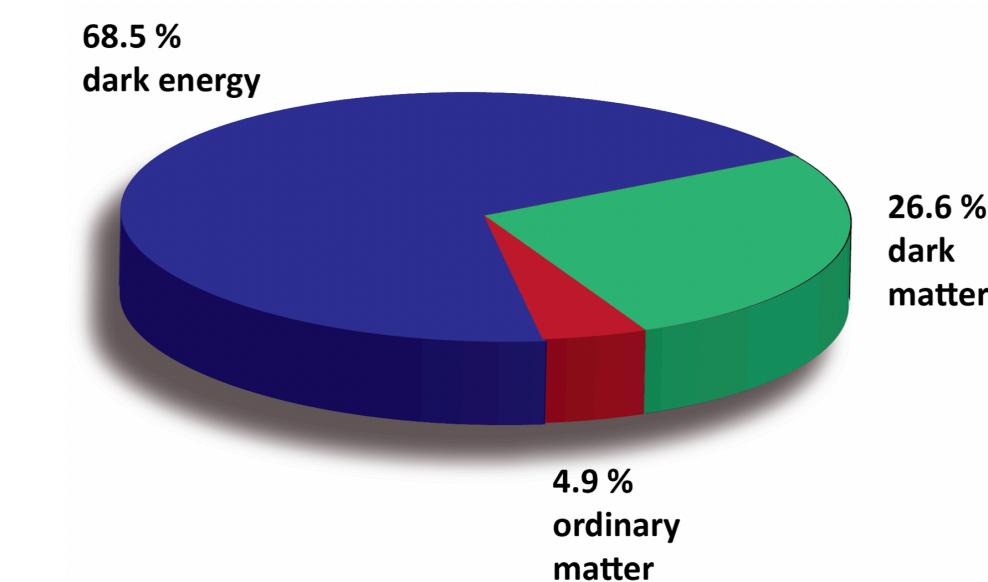
Standard Model of Elementary Particles



- Descreve todas as partículas e antipartículas subatómicas conhecidas e como elas interagem

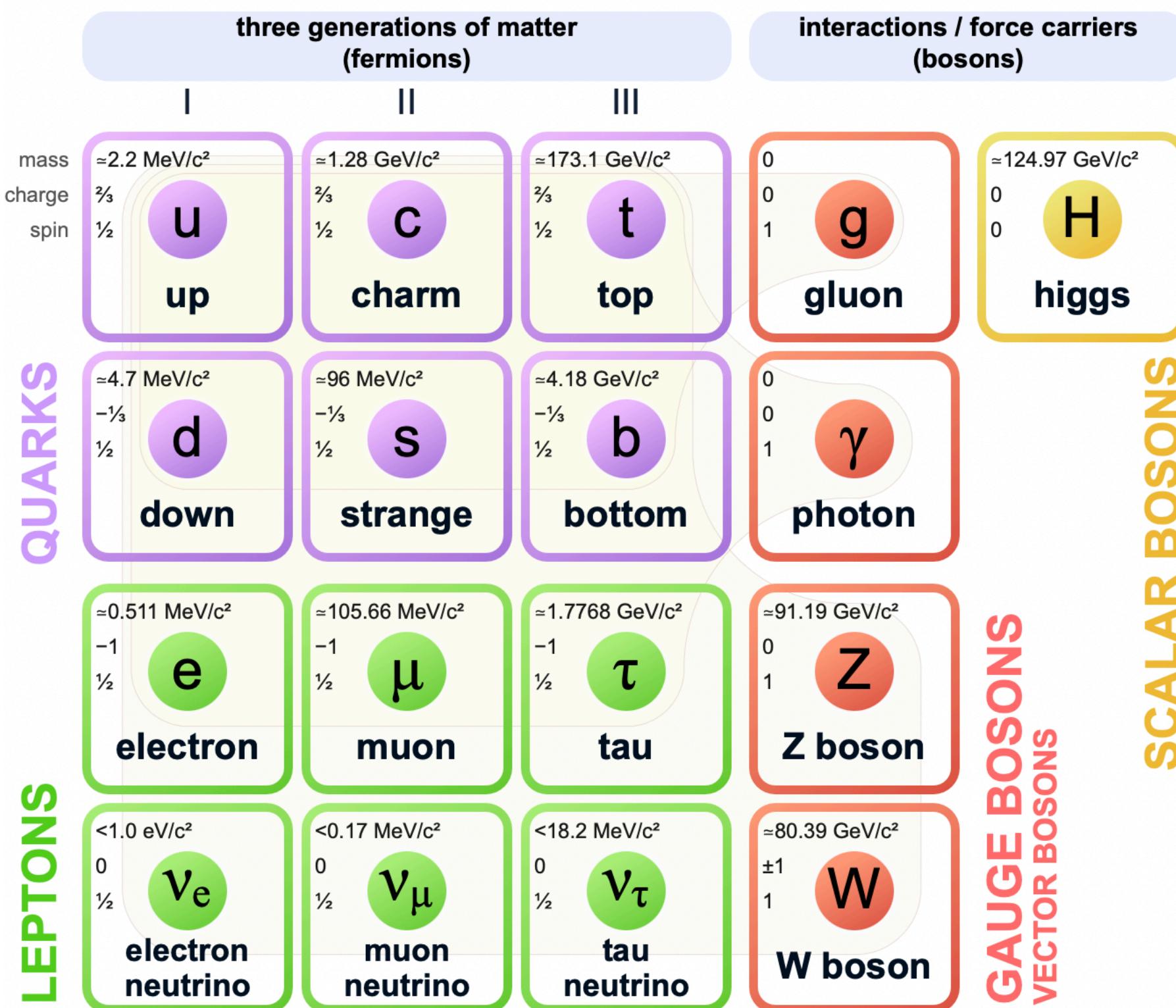
Deixa ainda vários problemas em aberto:

- Porque existe mais matéria do que anti-matéria no Universo?
- Porque existem 3 famílias de quarks e leptões?
- Qual é a origem do potencial de Higgs?
- Porque é que as partículas tem os valores de massa que têm e não outros?
- Será que as partículas elementares são mesmo partículas elementares?
- Qual é a origem da matéria escura presente nas galáxias? Modelo padrão não tem um candidato para a matéria escura e descreve apenas 5% da energia presente no Universo



MODELO PADRÃO DA FÍSICA DE PARTÍCULAS

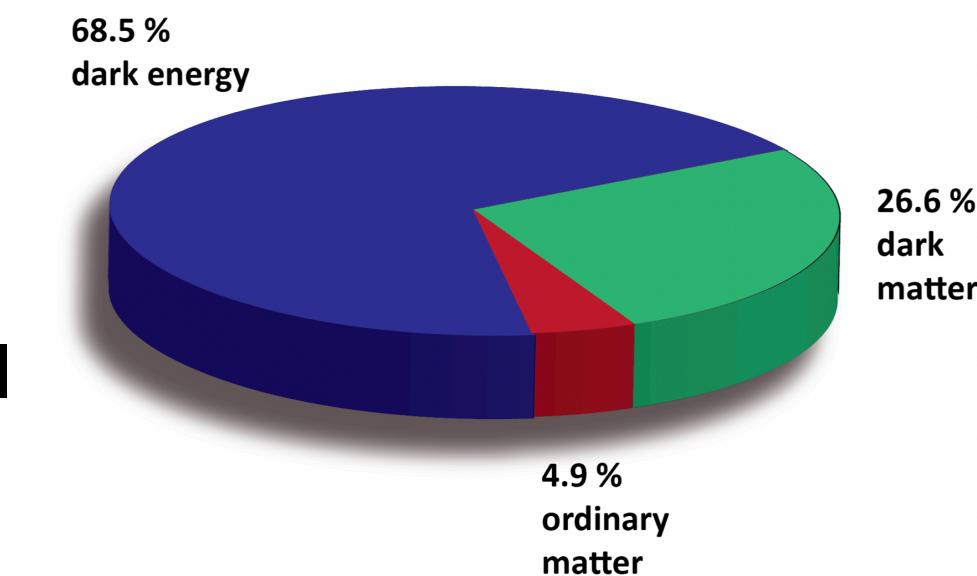
Standard Model of Elementary Particles



- Descreve todas as partículas e antipartículas subatómicas conhecidas e como elas interagem

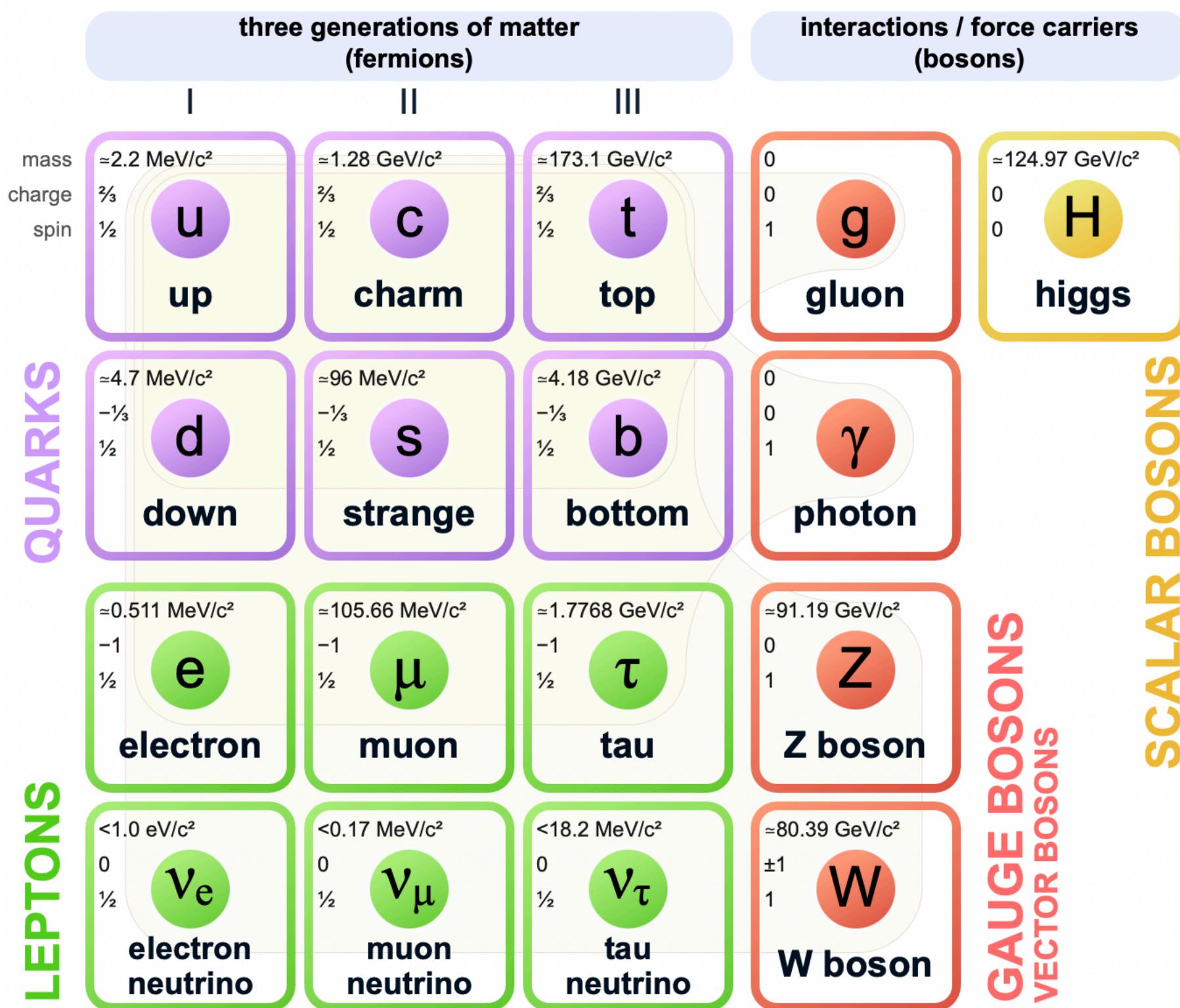
Deixa ainda vários problemas em aberto:

- Porque existe mais matéria do que anti-matéria no Universo?
- Porque existem 3 famílias de quarks e leptões?
- Qual é a origem do potencial de Higgs?
- Porque é que as partículas tem os valores de massa que têm e não outros?
- Será que as partículas elementares são mesmo partículas elementares?
- Qual é a origem da matéria escura presente nas galáxias? Modelo padrão não tem um candidato para a matéria escura e descreve apenas 5% da energia presente no Universo
- O modelo padrão não inclui a interação gravitacional



MODELO PADRÃO DA FÍSICA DE PARTÍCULAS

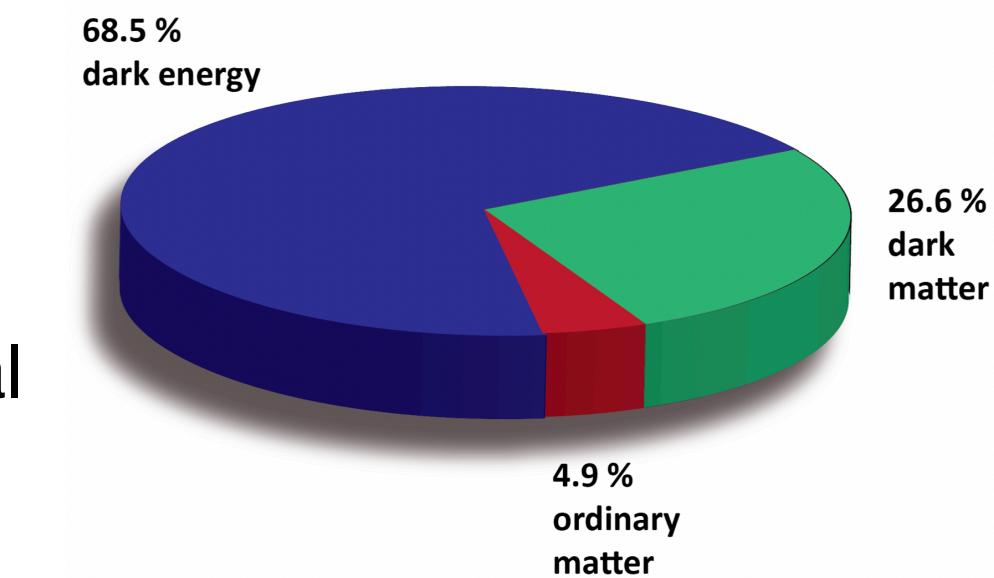
Standard Model of Elementary Particles



- Descreve todas as partículas e antipartículas subatómicas conhecidas e como elas interagem

Deixa ainda vários problemas em aberto:

- Porque existe mais matéria do que anti-matéria no Universo?
- Porque existem 3 famílias de quarks e leptões?
- Qual é a origem do potencial de Higgs?
- Porque é que as partículas tem os valores de massa que têm e não outros?
- Será que as partículas elementares são mesmo partículas elementares?
- Qual é a origem da matéria escura presente nas galáxias? Modelo padrão não tem um candidato para a matéria escura e descreve apenas 5% da energia presente no Universo
- O modelo padrão não inclui a interação gravitacional



Obrigado pela vossa atenção