Introdução à Física de Partículas

Introduction to particle Physics

(1/4)

FILIPE JOAQUIM

IST Dep. de Física e CFTP , Lisboa, Portugal

Escola de Professores no CERN em Língua Portuguesa 2019

CERN Portuguese Language Teachers Programme 2019

1 – 6 Setembro, CERN, Genebra

A Física de partículas é um ramo da Física que estuda os constituintes elementares da matéria e da radiação, e a interação entre eles e suas aplicações. É também chamada de Física de altas energias, porque muitas partículas elementares só podem ser criadas a energias elevadas, logo a detecção destas também é possível apenas a altas energias de aceleração. O elétron e o próton foram as únicas partículas aceleradas até os dias de hoje, outras nunca foram detectadas (como o gráviton) e as restantes foram detectadas através da radiação cósmica (como o méson pi e o méson mu).

A Física de partículas, estudada pela Mecânica Quântica (parte da Física Moderna), busca o fundamental, o nível mais básico da matéria e da Natureza. Todo o nosso mundo visível se fundamenta nesse nível invisível das partículas elementares.

"Todo o nosso mundo visível se fundamenta nesse nível invisível das partículas elementares."

- Partículas e interacções
- As revoluções da Física no sec. XX
- A teoria do "quase-tudo" (ou quase nada)...
- Porquê "quase-tudo" ?

IMPOSSÍVEL SER RIGOROSO E PROFUNDO

MAIS DE 100 ANOS DE IDEIAS, TEORIAS, DESCOBERTAS …

O ADEUS AOS DEUSES. ÁTOMOS E ESPAÇOS VAZIO

Tales de Mileto (624-547 A.C.)

Tales de Mileto foi pioneiro no que respeita à procura da origem das substâncias e suas transformações sem recorrer a entidades divinas (mitologia).

ἄτομος Átomo

Indivisível

A matéria é composta por algumas espécies de átomos fundamentais, que diferem na sua forma e tamanho, e por espaço vazio.

Leucipo e Demócrito (500-400 A.C.)

A complexidade da Natureza é o resultado das inúmeras combinações destes átomos e das suas posições no espaço vazio.

Atomismo baseado no raciocínio abstrato e filosófico. Mas...

A ideia de que a matéria é constituída por unidades discretas está na base da Física moderna.

1-2 Matter is made of atoms

If, in some cataclysm, all of scientific knowledge were to be destroyed, and only one sentence passed on to the next generations of creatures, what statement would contain the most information in the fewest words? I believe it is the *atomic hypothesis* (or the atomic *fact*, or whatever you wish to call it) that *all things are made of atoms—little particles that move around in perpetual motion, attracting each other when they are a little distance apart, but repelling upon being squeezed into one another*. In that one sentence, you will see, there is an *enormous* amount of information about the world, if just a little imagination and thinking are applied.

In "Feynman lectures on Physics", R. Feynman, 1964.

O MODELO PADRÃO DAS

PARTÍCULAS E INTERACÇÕES FUNDAMENTAIS

O Modelo Padrão é uma teoria quântica que resume o nosso conhecimento actual da física das partículas e interacções fundamentais (as interacções manifestam-se através das forças e dos decaimentos das partículas instáveis).

FERMIÕES
constituintes da matéria
spin = 1/2, 3/2, 5/2, …

Leptões spin =1/2

Sabor	Massa GeV/c²	Carga Eléctrica
ν_L neutrino* mais leve	$(0-2)\times10^{-9}$	0
e electrão	0.000511	−1
ν_M neutrino* intermédio	$(0.009-2)\times10^{-9}$	0
μ muão	0.106	−1
ν_H neutrino* pesado	$(0.05-2)\times10^{-9}$	0
τ tau	1.777	−1

Quarks spin =1/2

Sabor	Massa Aprox. GeV/c²	Carga Eléctrica
u up	0.002	2/3
d down	0.005	−1/3
c charm	1.3	2/3
s strange	0.1	−1/3
t top	173	2/3
b bottom	4.2	−1/3

*Ver em baixo o parágrafo sobre neutrinos.

Spin é o momento angular intrínseco das partículas. O spin é dado em unidades de ħ, que é a unidade quântica de momento angular, com $\hbar = h/2\pi = 6.58\times10^{-25}$ GeV s $=1.05\times10^{-34}$ J s.

Cargas eléctricas são dadas em unidades de carga eléctrica do protão. Em unidades SI, a carga eléctrica do protão é 1.60×10^{-19} coulomb.

A unidade de **Energia** em física de partículas é o electrão-volt (eV), a energia ganha por um electrão ao atravessar a diferença de potencial de um volt. **Massas** são dadas em GeV/c^2 (E= mc^2)
em que 1 GeV = 10^9 eV =1.60×10^{-10} joule.
A massa do protão é 0.938 GeV/c^2 = 1.67×10^{-27} kg.

Neutrinos
Os neutrinos são produzidos no Sol, supernovas, reactores nucleares, colisões em aceleradores, e muitos outros processos. Qualquer neutrino pode ser descrito como um de três estados de sabor de neutrinos: ν_e, ν_μ, ou ν_τ, de acordo com o tipo de leptão associado na sua produção. Cada estado destes é uma mistura quântica de três estados de massa de neutrinos ν_L, ν_M, e ν_H, para os quais os intervalos de massas são indicados na tabela. O estudo dos neutrinos pode ajudar à compreensão da assimetria matéria--antimatéria e da evolução das estrelas e das estruturas das galáxias.

Matéria e Antimatéria
Para cada tipo de partícula existe o correspondente tipo de antipartícula, indicado com uma barra sobre o símbolo da partícula (excepto se se mostrar a carga + ou –). A partícula e a antipartícula têm a mesma massa e spin mas cargas eléctricas opostas. Alguns bosões electricamente neutros (por ex., Z^0, γ, e $\eta_c = c\bar{c}$, mas não $K^0 = d\bar{s}$) são as próprias antipartículas.

Estrutura dentro do Átomo

Se os protões e neutrões tivessem um tamanho de 10 cm, então os quarks e os electrões seriam menores do que 0.1 mm, e o átomo teria 10 km de diâmetro.

BOSÕES
mediadores das forças
spin = 0, 1, 2, …

Electrofraca spin = 1

Nome	Massa GeV/c²	Carga Eléctrica
γ fotão	0	0
W^-	80.39	1
W^+ bosões W	80.39	+1
Z bosão Z	91.188	0

Forte (cor) spin = 1

Nome	Massa GeV/c²	Carga Eléctrica
g glúão	0	0

Bosão de Higgs spin = 0

Nome	Massa GeV/c²	Carga Eléctrica
H Higgs	126	0

Bosão de Higgs
O bosão de Higgs é um elemento fundamental do Modelo Padrão. A sua descoberta confirma o mecanismo pelo qual as partículas elementares adquirem massa.

Carga de cor
Só os quarks e os glúões é que possuem "carga de cor" e são sensíveis à interacção forte. Cada quark pode ter uma de três cores ("vermelho", "verde", "azul"). Mas estas não têm nada que ver com as cores da luz visível. Tal como as partículas electricamente carregadas interagem trocando fotões, nas interacções fortes, partículas com carga de cor interagem trocando glúões.

Quarks Confinados em Mesões e Bariões
Quarks e glúões não podem ser isolados – estão confinados em partículas de cor neutra chamadas **hadrões**. Este confinamento (ligação) resulta das múltiplas trocas de glúões entre os constituintes "coloridos". Quando as partículas "coloridas" (quarks e glúões) se afastam, a energia no campo de forças de cor entre elas aumenta. Esta energia pode ser convertida em sucessivos pares quark-antiquark. Estes quarks (q) e antiquarks ($\bar{q}$) combinam-se em hadrões, que são as partículas observáveis.

Dois tipos de hadrões foram observados na natureza: **mesões** $q\bar{q}$ e **bariões** qqq. Entre os muitos tipos de bariões observados temos o protão (uud), antiprotão ($\bar{u}\bar{u}\bar{d}$), e neutrão (udd). As cargas eléctricas dos quarks somam-se para o protão ter carga 1 e o neutrão carga 0. Entre os vários tipos de mesões temos o pião π^+ ($u\bar{d}$), kaão K^- ($s\bar{u}$), e B^0 ($d\bar{b}$).

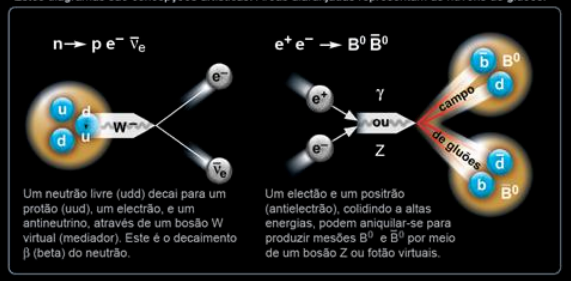
Propriedades das Interacções

As intensidades das interacções são indicadas relativamente à intensidade da força electromagnética entre dois quarks u separados pelas distâncias referidas.

Propriedade	Interacção Gravítica	Interacção Fraca (Electrofraca)	Interacção Electromagnética	Interacção Forte
Actua em:	Massa – Energia	Sabor	Carga Eléctrica	Carga de cor
Partículas afectadas:	Todas	Quarks, Leptões	Electricamente carregadas	Quarks, Glúões
Partículas mediadoras:	Gravitão (ainda por observar)	W^+ W^- Z^0	γ	Glúões
Intensidade a 10^{-18} m	10^{-41}	0.8	1	25
Intensidade a 3×10^{-17} m	10^{-41}	10^{-4}	1	60

Saiba mais em ParticleAdventure.org

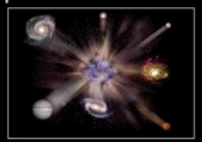
Processos com Partículas
Estes diagramas são concepções artísticas. Áreas alaranjadas representam as núvens de glúões.



Um neutrão livre (udd) decai para um protão (uud), um electrão, e um antineutrino, através de um bosão W virtual (mediador). Este é o decaimento β (beta) do neutrão.

Um electão e um positrão (antielectrão), colidindo a altas energias, podem aniquilar-se para produzir mesões B^0 e $\bar{B}^0$ por meio de um bosão Z ou fotão virtuais.

Mistérios por resolver
Motivados por novas questões na nossa compreensão física do Universo, os físicos de partículas seguem caminhos diferentes na direcção de novas descobertas maravilhosas. As experiências poderão vir a encontrar dimensões extra de espaço, buracos negros microscópicos, ou sinais da teoria das cordas.

Porque acelera o Universo?

A expansão do Universo parece estar a acelerar. Será devido à Constante Cosmológica de Einstein? Se não, poderão as experiências vir a revelar novas forças da Natureza ou até dimensões (escondidas) de espaço?

Onde está a Antimatéria?

Matéria e antimatéria terão sido criadas em iguais quantidades no Big Bang. Porque é que agora vemos só matéria, à excepção de quantidades diminutas de antimatéria criadas em laboratório ou nos Raios Cósmicos?

O que é a Matéria Escura?

Grande parte da massa observada nas galáxias e aglomerados de galáxias é formada por matéria invisível. Pode esta matéria escura ser feita de novos tipos de partículas que apenas interagem fracamente com a matéria normal?

Existem Dimensões Extra?

Uma indicação para dimensões extra de espaço pode ser a baixíssima intensidade da força gravítica, quando comparada com as outras três forças fundamentais da Natureza (um íman pode levantar um clip, sobrepondo-se à gravidade exercida por todo o planeta Terra).

FERMIÕES constituintes da matéria spin = 1/2, 3/2, 5/2, …

Leptões spin =1/2

Sabor	Massa GeV/c^2	Carga Eléctrica
ν_L neutrino* mais leve	$(0-2)\times10^{-9}$	0
e electrão	0.000511	–1
ν_M neutrino* intermédio	$(0.009-2)\times10^{-9}$	0
μ muão	0.106	–1
ν_H neutrino* pesado	$(0.05-2)\times10^{-9}$	0
τ tau	1.777	–1

Quarks spin =1/2

Sabor	Massa Aprox. GeV/c^2	Carga Eléctrica
u up	0.002	2/3
d down	0.005	–1/3
c charm	1.3	2/3
s strange	0.1	–1/3
t top	173	2/3
b bottom	4.2	–1/3

BOSÕES mediadores das forças spin = 0, 1, 2, …

Electrofraca spin = 1

Nome	Massa GeV/c^2	Carga Eléctrica
γ fotão	0	0
W^-	80.39	-1
W^+ bosões W	80.39	+1
Z bosão Z	91.188	0

Forte (cor) spin = 1

Nome	Massa GeV/c^2	Carga Eléctrica
g gluão	0	0

Bosão de Higgs spin = 0

Nome	Massa GeV/c^2	Carga Eléctrica
H Higgs	126	0

HADRÕES

Baryons qqq and Antibaryons $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$

Baryons are fermionic hadrons.
There are about 120 types of baryons.

Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c^2	Spin
p	proton	uud	1	0.938	1/2
$\bar{p}$	anti-proton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	–1	0.938	1/2
n	neutron	udd	0	0.940	1/2
Λ	lambda	uds	0	1.116	1/2
Ω^-	omega	sss	–1	1.672	3/2

Mesons $q\bar{q}$

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

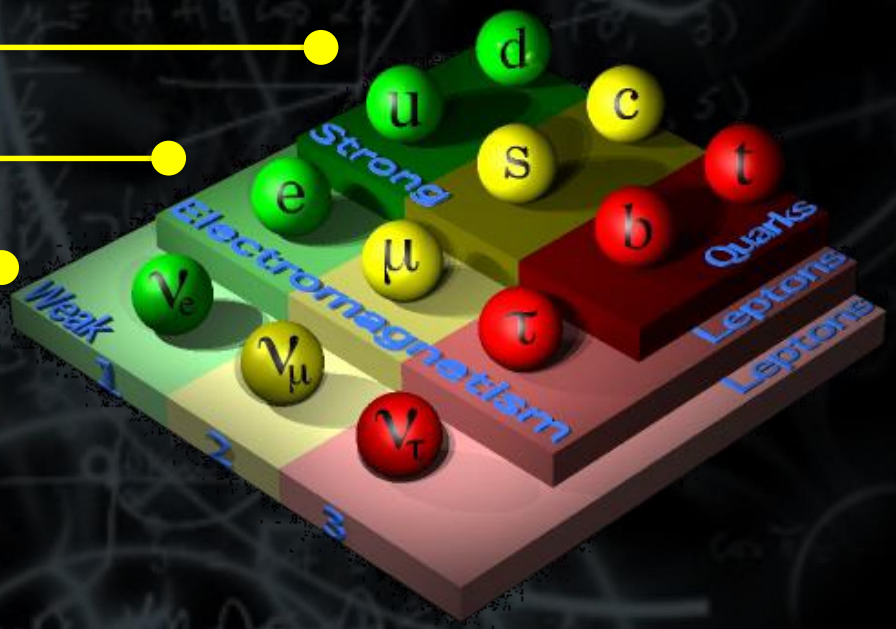
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c^2	Spin
π^+	pion	$u\bar{d}$	+1	0.140	0
K^-	kaon	$s\bar{u}$	–1	0.494	0
ρ^+	rho	$u\bar{d}$	+1	0.770	1
B^0	B-zero	$d\bar{b}$	0	5.279	0
η_c	eta-c	$c\bar{c}$	0	2 .980	0

Propriedade	Interacção Gravítica	Interacção Fraca (Electrofraca)	Interacção Electromagnética (Electrofraca)	Interacção Forte
Actua em:	Massa – Energia	Sabor	Carga Eléctrica	Carga de cor
Partículas afectadas:	Todas	Quarks, Leptões	Electricamente carregadas	Quarks, Gluões
Partículas mediadoras:	Gravitão (ainda por observar)	W^+ W^- Z^0	γ	Gluões
Intensidade a 10^{-18} m	10^{-41}	0.8	1	25
Intensidade a 3×10^{-17} m	10^{-41}	10^{-4}	1	60

Força Forte (g)

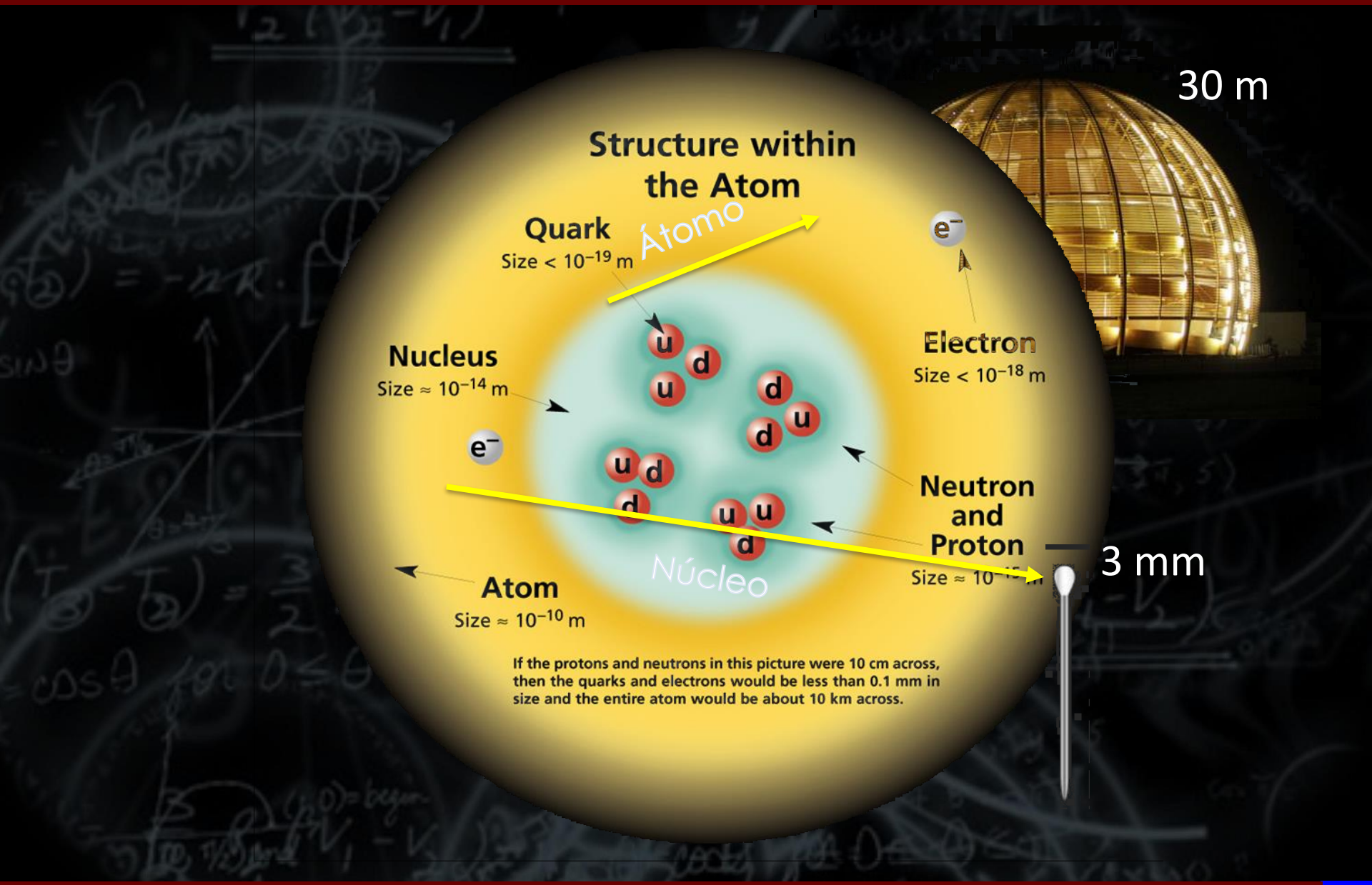
Força Electromagnética (γ)

Força fraca (W^+, W^-, Z^0)



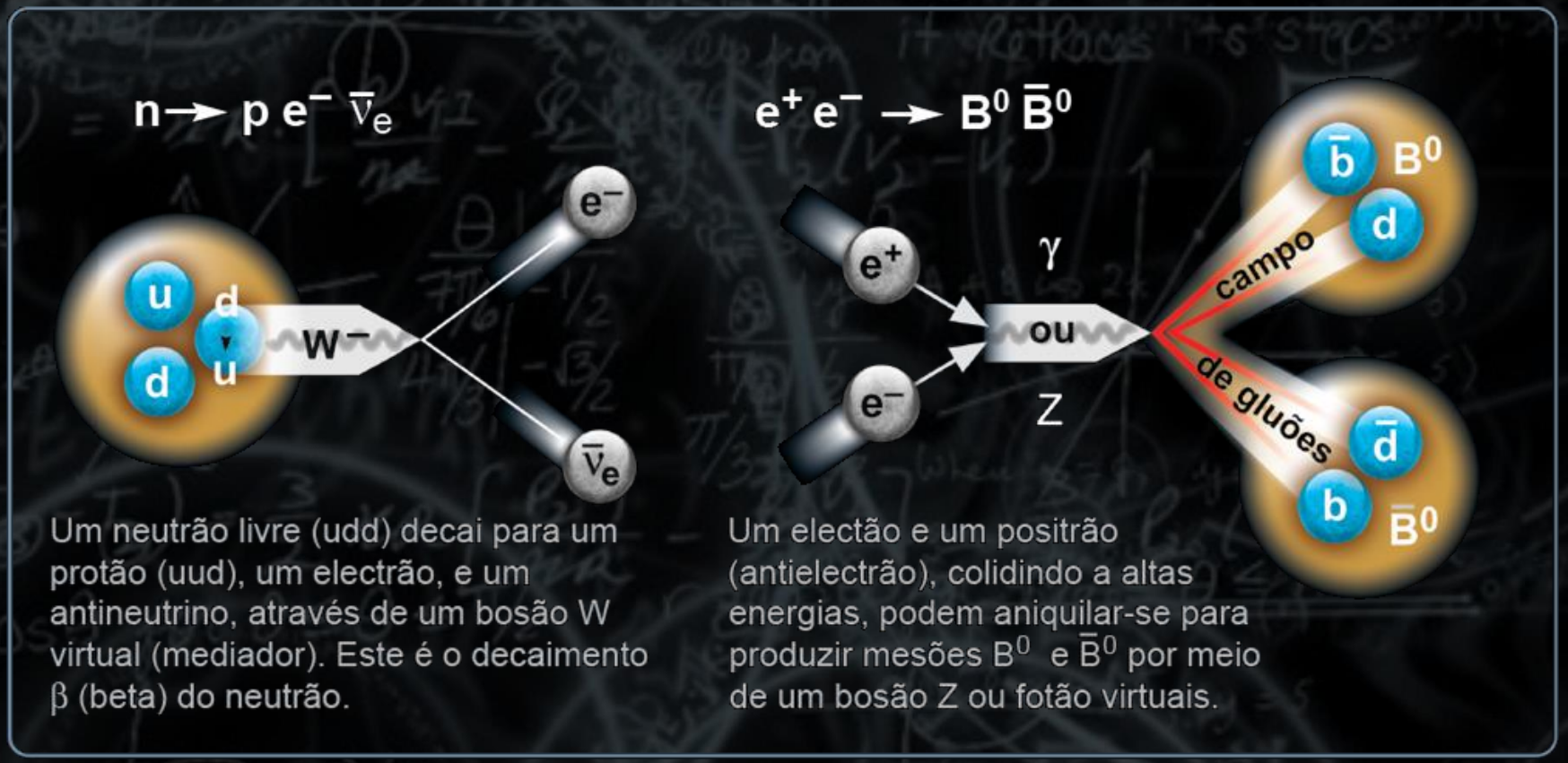
W^+, W^- - Correntes carregadas

γ, Z^0 - Correntes neutras


30 m
Structure within the Atom
Quark
Size < 10^{-19} m
Átomo
e^-
Nucleus
Size ≈ 10^{-14} m
Electron
Size < 10^{-18} m
u
d
e^-
Neutron and Proton
Size ≈ 10^{-15} m
Núcleo
3 mm
Atom
Size ≈ 10^{-10} m
If the protons and neutrons in this picture were 10 cm across, then the quarks and electrons would be less than 0.1 mm in size and the entire atom would be about 10 km across.

Processos com Partículas

Estes diagramas são concepções artísticas. Áreas alaranjadas representam as núvens de gluões.



Um neutrão livre (udd) decai para um protão (uud), um electrão, e um antineutrino, através de um bosão W virtual (mediador). Este é o decaimento β (beta) do neutrão.

Um electão e um positrão (antielectrão), colidindo a altas energias, podem aniquilar-se para produzir mesões B^0 e $\bar{B}^0$ por meio de um bosão Z ou fotão virtuais.

QUAIS AS REGRAS DO JOGO?

QUAIS OS PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS QUE ESTABELECEM
O MODO COMO ESTES PROCESSOS PODEM OCORRER?

O MODELO PADRÃO
(STANDARD MODEL)

Partículas elementares

Interacções

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$$

$$+ i \bar{\Psi} \not{D} \Psi + h.c.$$

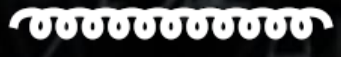
$$+ \bar{\Psi}_i y_{ij} \Psi_j \phi + h.c.$$

$$+ |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$

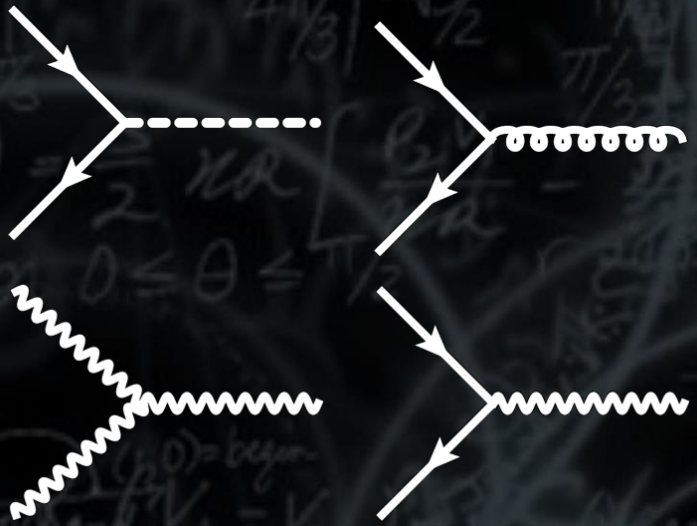
Fermiões e anti-fermiões (leptões e quarks)

Bosões de gauge ($W^{\pm}$, Z^0, γ)

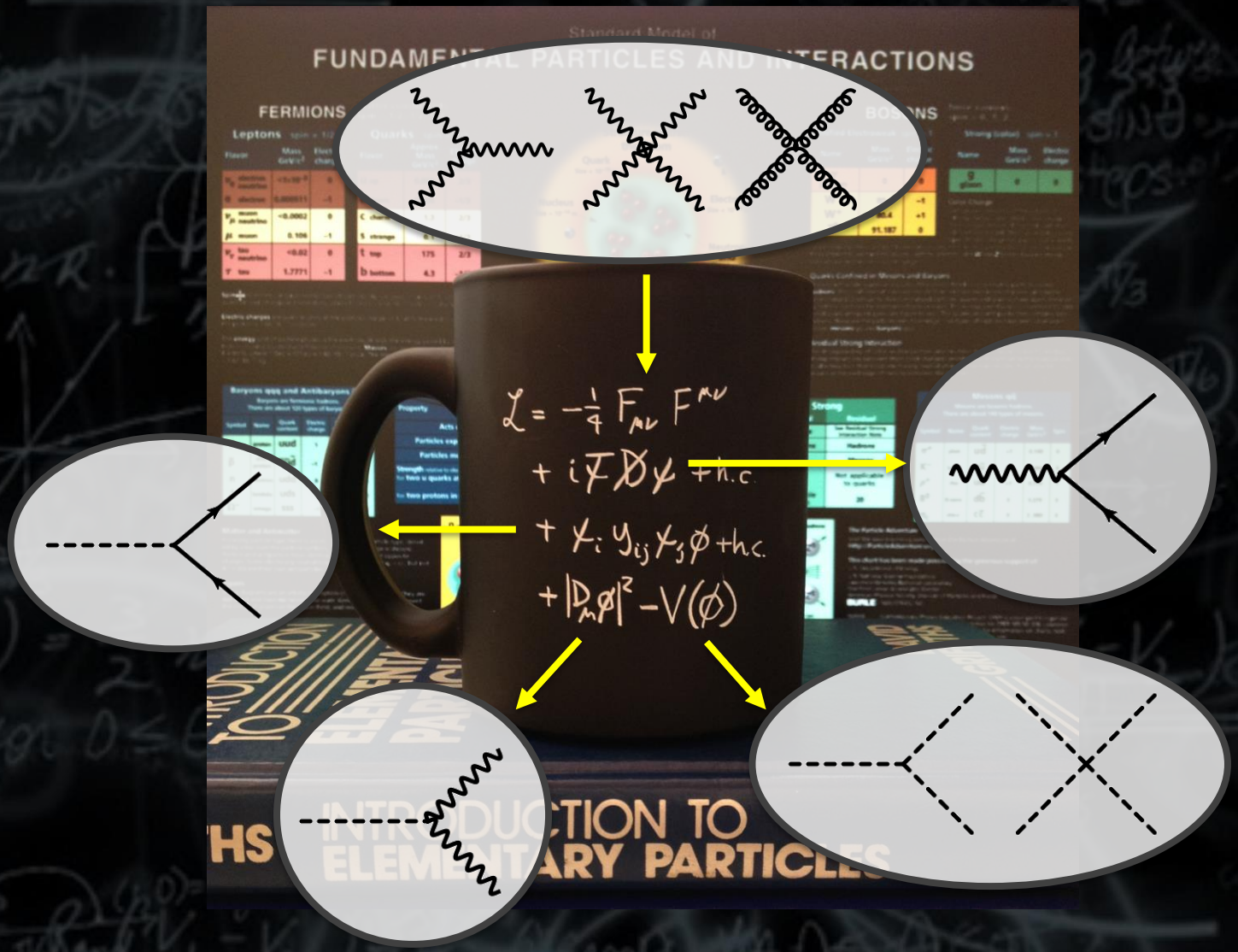
Partículas escalares (h^0)

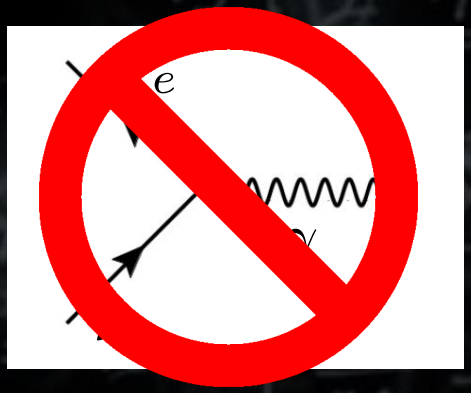

Gluões (g)

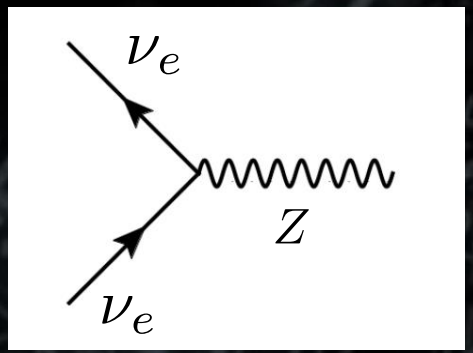
Exemplos de acoplamentos

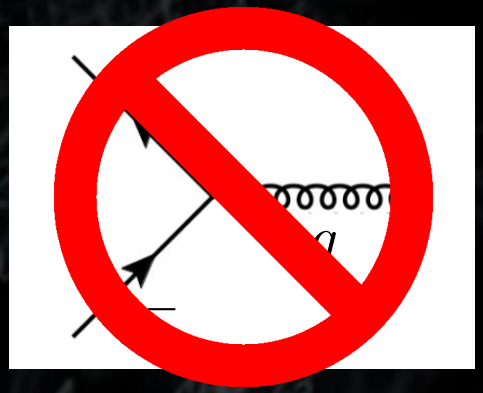


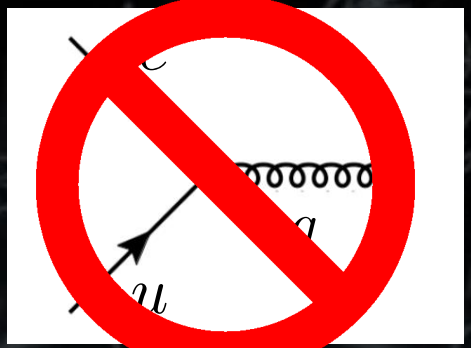
Exemplos de processos

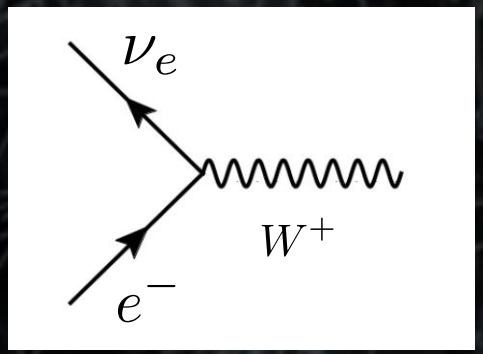

FUNDAMENTAL PARTICLES AND INTERACTIONS
FERMIONS
Leptons
BOSONS
$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$
$+ i\bar{\psi} \not{D} \psi + h.c.$
$+ Y_i \, y_{ij} \, Y_j \, \phi + h.c.$
$+ |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$
INTRODUCTION TO
ELEMENTARY PARTICLES

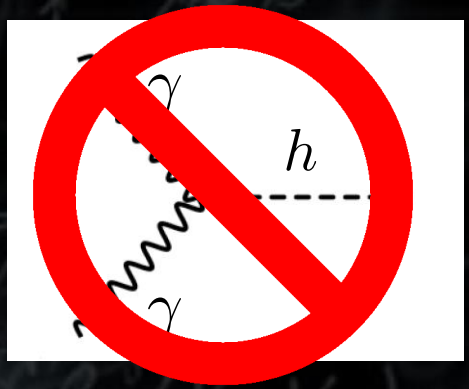


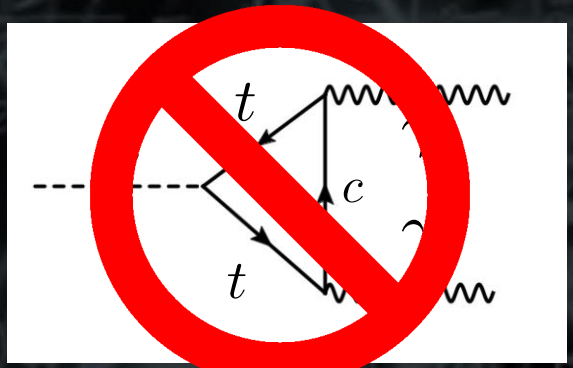

ν_e
Z
ν_e



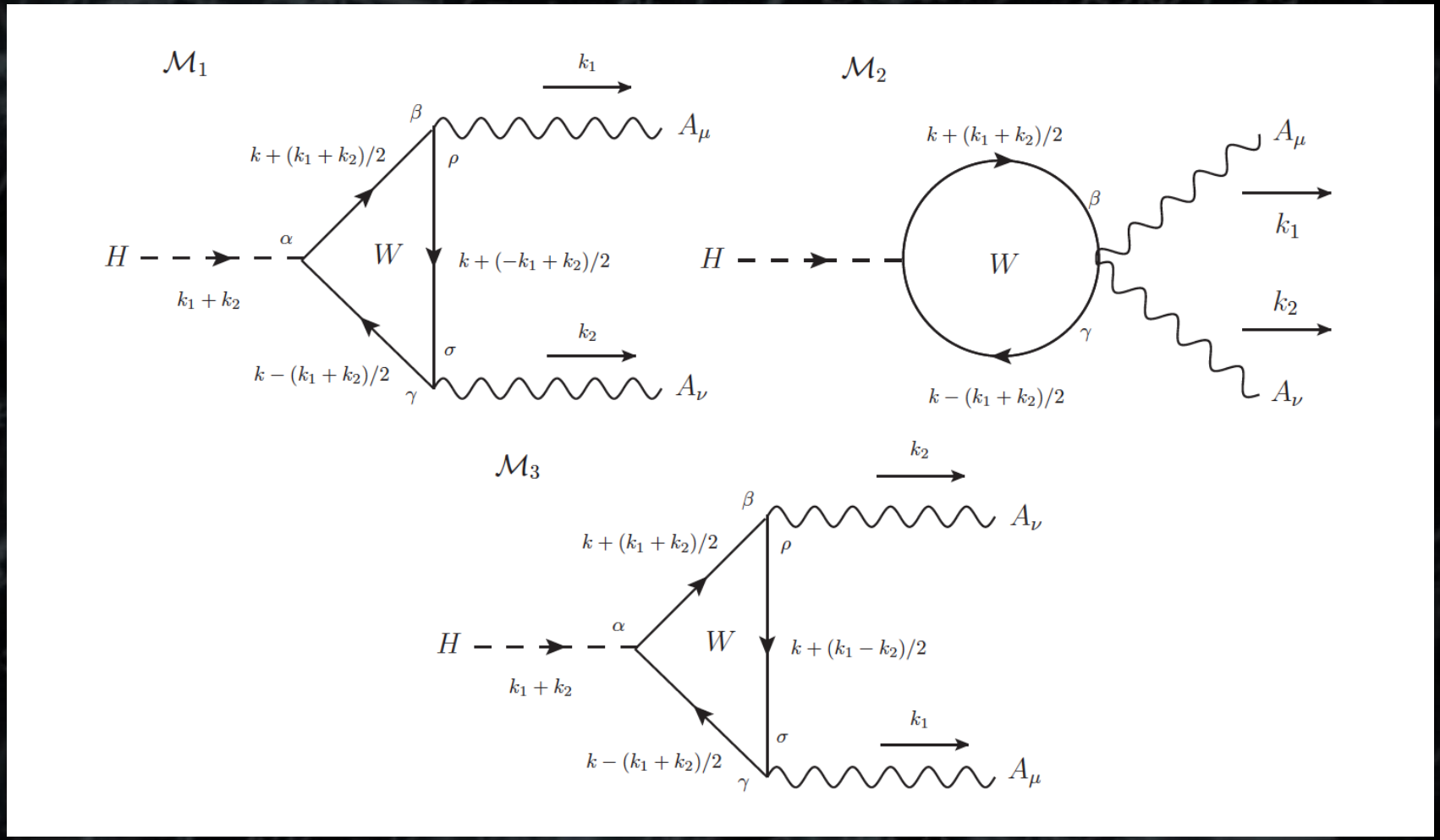



ν_e
W^+
e^-

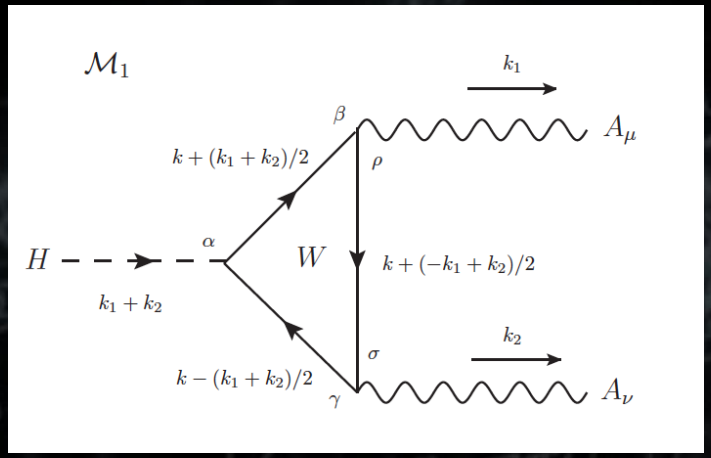

γ
h
γ


t
c
t

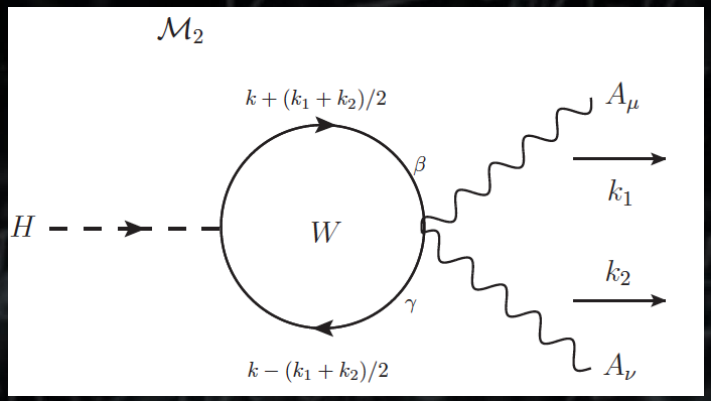
Representação diagramática



Representação matemática



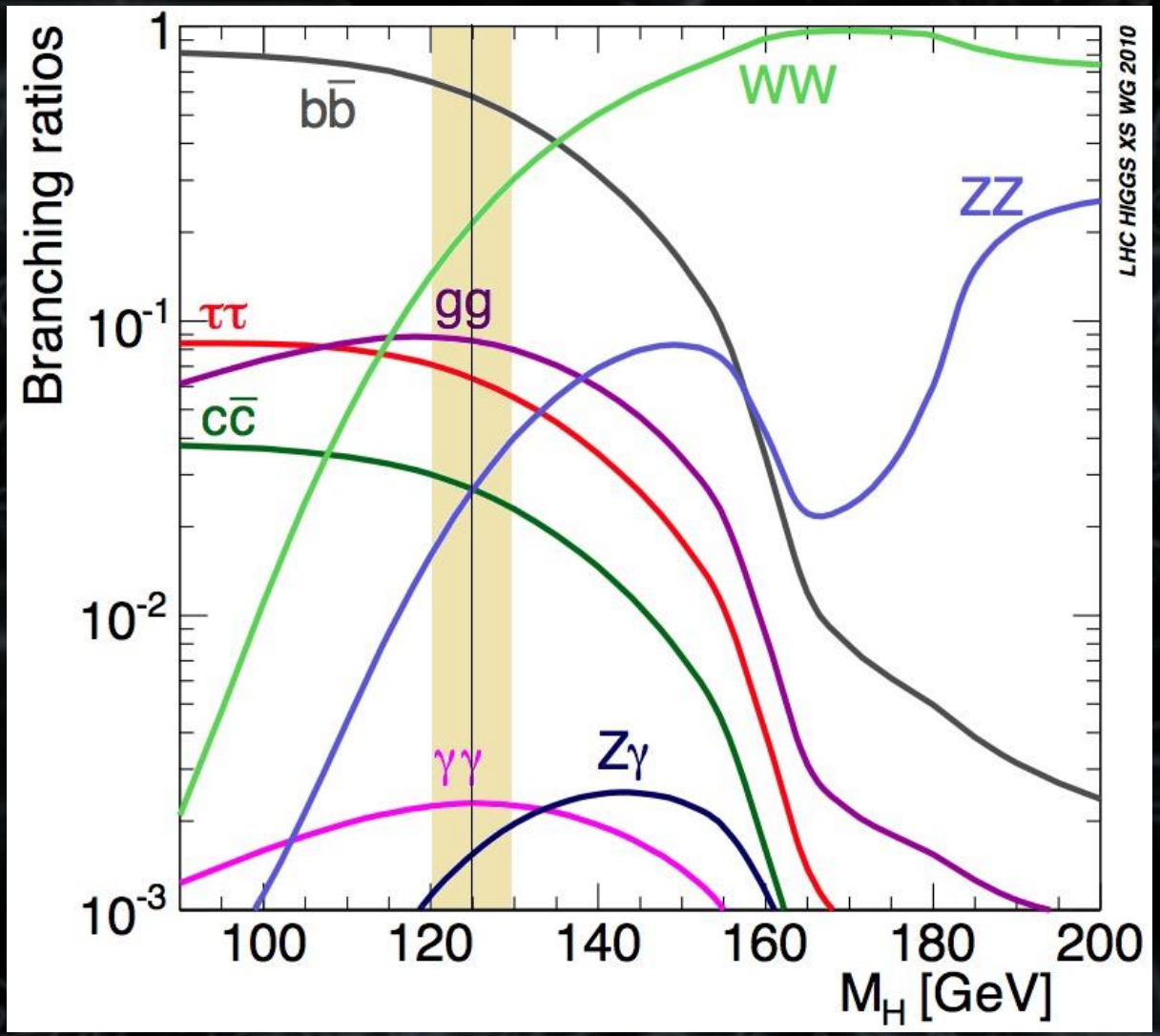
$$\mathcal{M}_1 = \frac{-e^2 g M_W}{(2\pi)^4}\int \mathrm{d}^4k \left[\overset{(a)}{g^{\beta}_{\alpha}} - \left(k+\frac{k_1+k_2}{2}\right)_{\alpha}\overset{(d)}{\left(k+\frac{k_1+k_2}{2}\right)^{\beta}}\frac{1}{M_W^2}\right]\epsilon^*_\nu(k_2)\epsilon^*_\mu(k_1)$$
$$\left[\overset{(b)}{g^{\rho\sigma}} - \left(k+\frac{-k_1+k_2}{2}\right)^{\rho}\overset{(e)}{\left(k+\frac{-k_1+k_2}{2}\right)^{\sigma}}\frac{1}{M_W^2}\right]\left[\overset{(c)}{g^{\alpha\gamma}} - \left(k-\frac{k_1+k_2}{2}\right)^{\alpha}\overset{(f)}{\left(k-\frac{k_1+k_2}{2}\right)^{\gamma}}\frac{1}{M_W^2}\right]$$
$$\left[\left(k+\frac{3k_1+k_2}{2}\right)_{\rho} g_{\beta\mu} + \left(k+\frac{-3k_1+k_2}{2}\right)_{\beta} g_{\mu\rho} + (-2k-k_2)_{\mu}\, g_{\rho\beta}\right]$$
$$\left(k-\frac{k_1+3k_2}{2}\right)_{\sigma} g_{\gamma\nu} + \left(k+\frac{-k_1+3k_2}{2}\right)_{\gamma} g_{\nu\sigma} + (-2k+k_1)_{\nu}\, g_{\sigma\gamma}$$
$$\frac{}{\left[\left(k+\frac{k_1+k_2}{2}\right)^2 - M_W^2 + i\epsilon\right]\left[\left(k+\frac{-k_1+k_2}{2}\right)^2 - M_W^2 + i\epsilon\right]\left[\left(k-\frac{k_1+k_2}{2}\right)^2 - M_W^2 + i\epsilon\right]}\,. \tag{3.31}$$



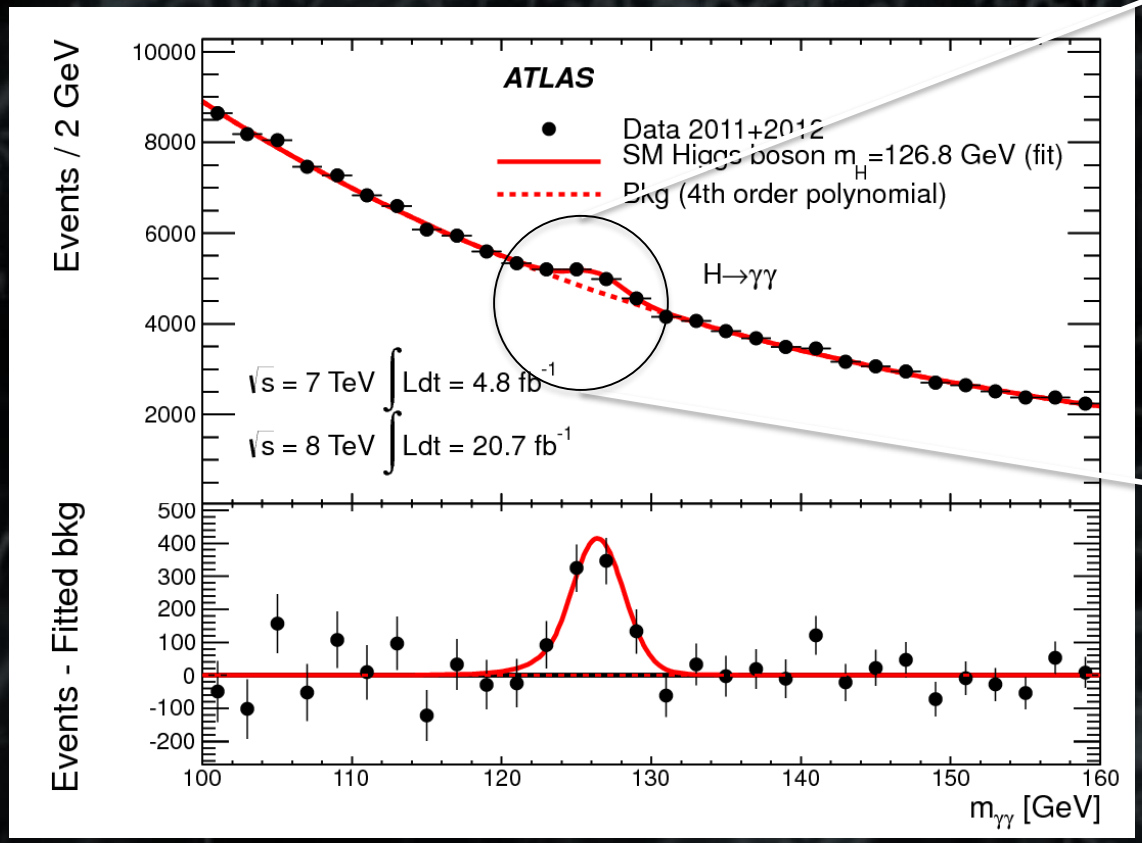
$$\mathcal{M}_2 = \frac{e^2 g M_W}{(2\pi)^4}\int \mathrm{d}^4k \left[\overset{(a)}{g^{\beta}_{\alpha}} - \left(k+\frac{k_1+k_2}{2}\right)_{\alpha}\overset{(c)}{\left(k+\frac{k_1+k_2}{2}\right)^{\beta}}\frac{1}{M_W^2}\right]\epsilon^*_\nu(k_2)\epsilon^*_\mu(k_1)$$
$$\times\left[\overset{(b)}{g^{\alpha\gamma}} - \left(k-\frac{k_1+k_2}{2}\right)^{\alpha}\overset{(d)}{\left(k-\frac{k_1+k_2}{2}\right)^{\gamma}}\frac{1}{M_W^2}\right]$$
$$\times\frac{2\, g_{\mu\nu}\, g_{\beta\gamma} - g_{\mu\beta}\, g_{\nu\gamma} - g_{\mu\gamma}\, g_{\nu\beta}}{\left[\left(k+\frac{k_1+k_2}{2}\right)^2 - M_W^2 + i\epsilon\right]\left[\left(k-\frac{k_1+k_2}{2}\right)^2 - M_W^2 + i\epsilon\right]}\,.$$

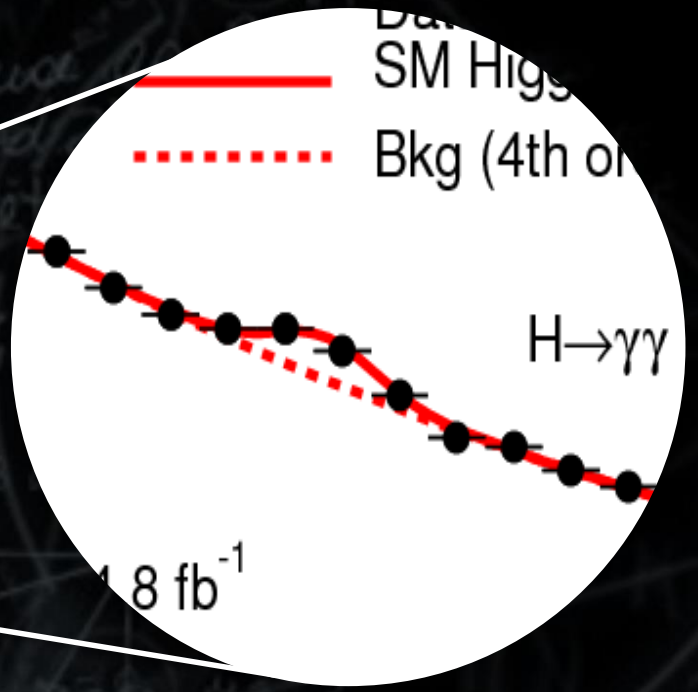
Resultado

$$\Gamma(h^0\to\gamma\gamma) = \frac{G_F\alpha^2 M_H^3}{128\sqrt{2}\pi^3}\left|\sum_f N_c Q^2 A^H_{1/2}(\tau_f) + A^H_1(\tau_W)\right|^2$$

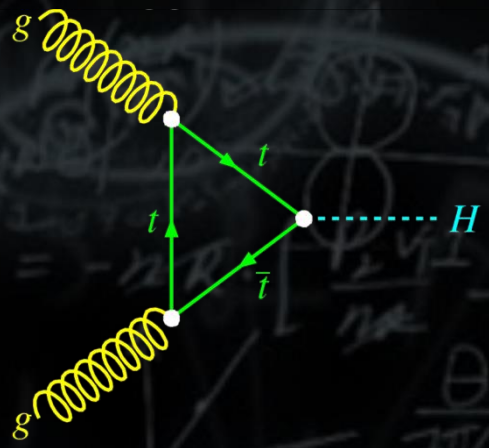

Branching ratios
1
10^{-1}
10^{-2}
10^{-3}
$b\bar{b}$
WW
ZZ
$\tau\tau$
gg
$c\bar{c}$
$\gamma\gamma$
$Z\gamma$
100
120
140
160
180
200
M_H [GeV]
LHC HIGGS XS WG 2010

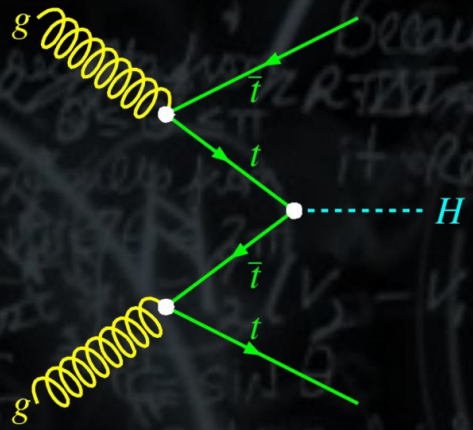
Comparação com a experiência

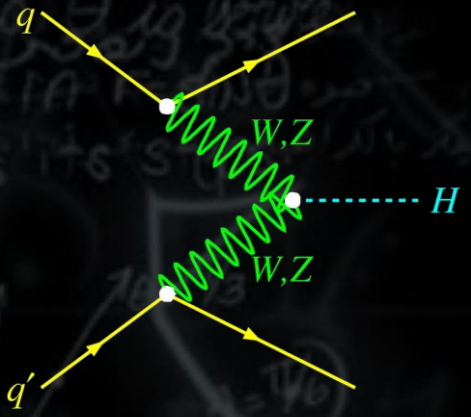


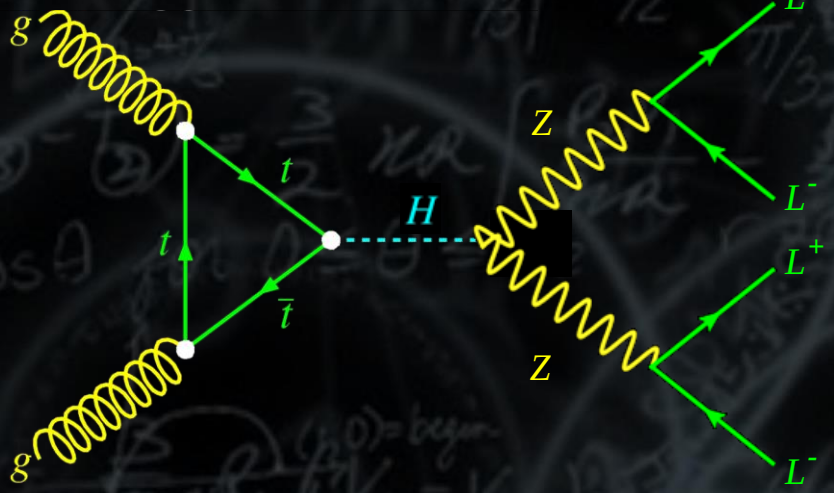


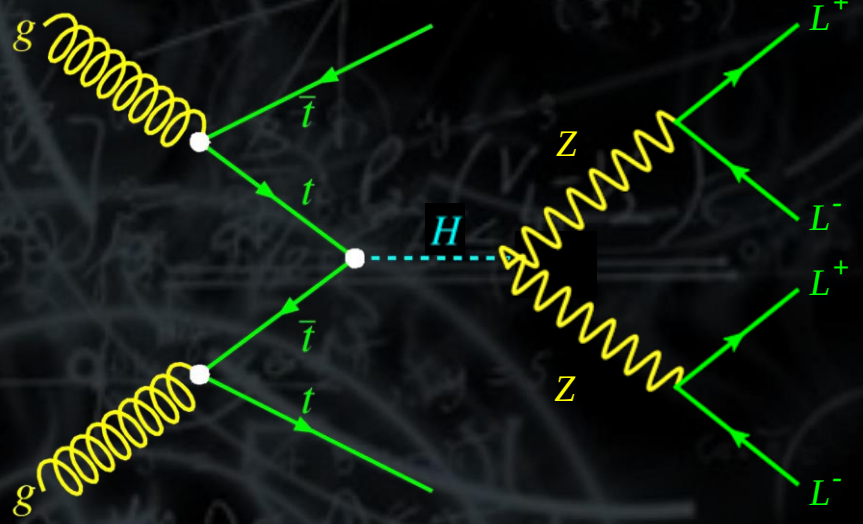
Mais exemplos...



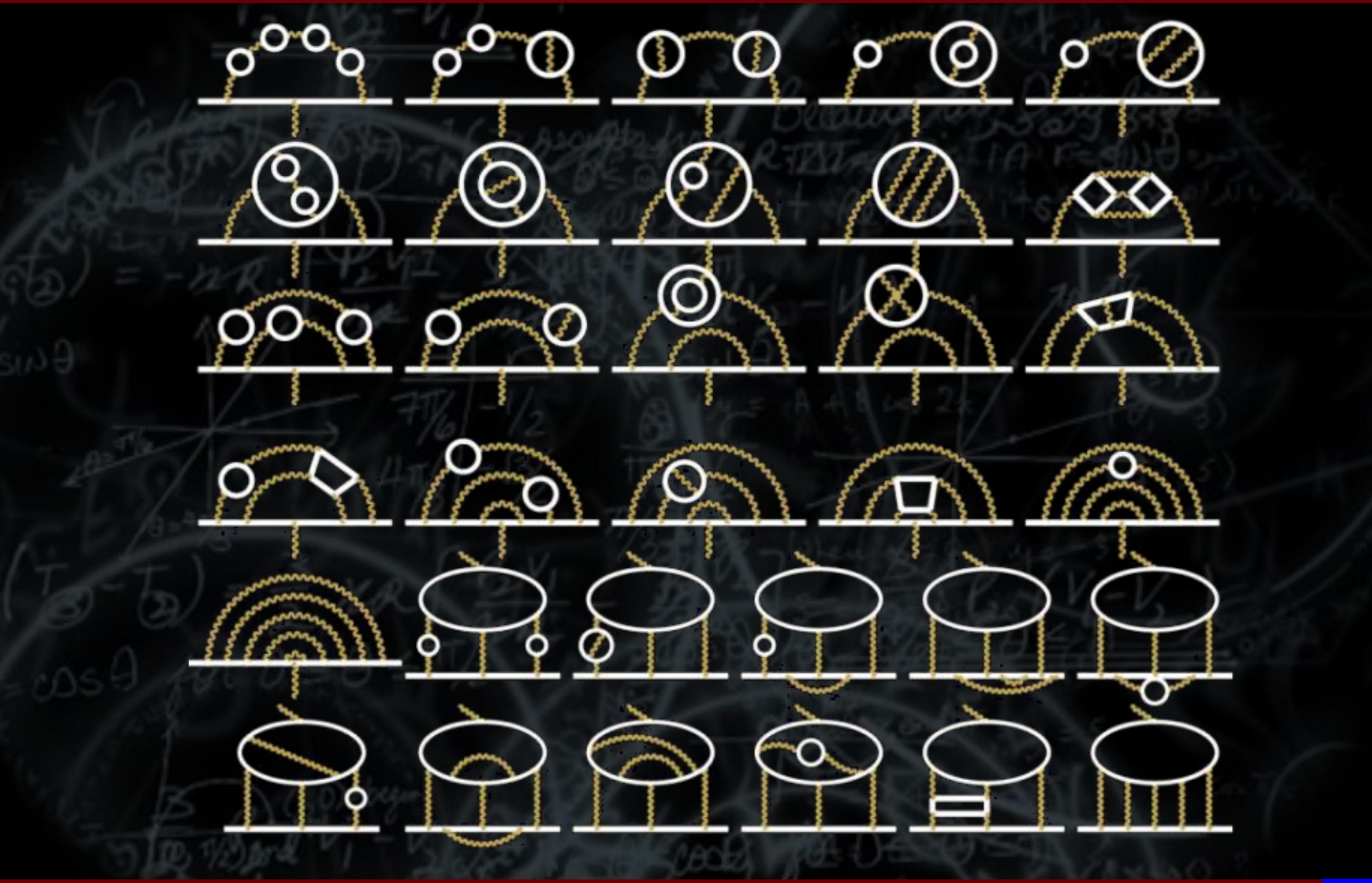


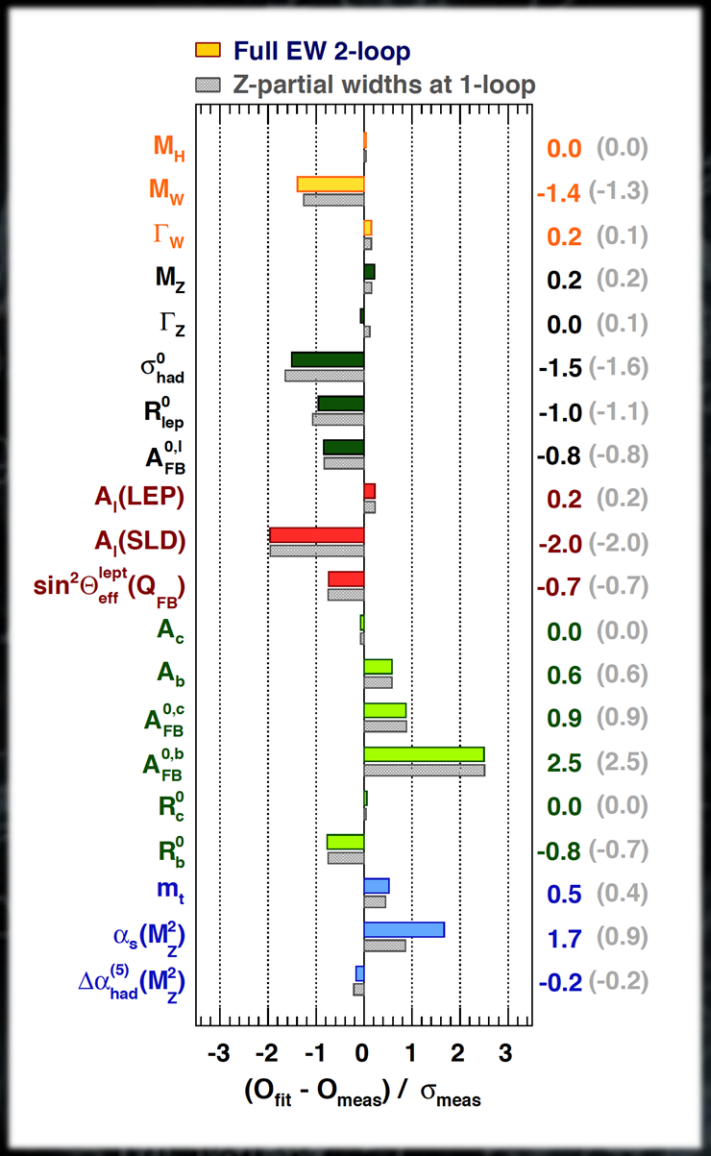






Pictionary (diagramas de Feynman)





O MODELO PADRÃO ESTÁ DE ACORDO COM (QUASE TODOS) OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS A

$\sim 2.5\sigma$