

Introdução à Física de Partículas

Introduction to particle Physics

(1/4)



FILIPE JOAQUIM

IST Dep. de Física e CFTP, Lisboa, Portugal



16ª Escola de Professores no CERN em Língua Portuguesa 2024

16th CERN Portuguese Language Teachers Programme 2024

1-6 Setembro, CERN, Genebra



WIKIPEDIA
The Free Encyclopedia

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.”

4 aulas ? ? ! ! !





- Partículas e interacções
- As revoluções da Física no sec. XX
- A teoria do “quase-tudo”...
- Porquê “quase-tudo” ?

IMPOSSÍVEL SER RIGOROSO E PROFUNDO

MAIS DE 100 ANOS DE IDEIAS, TEORIAS, DESCOBERTAS ...



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.

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

Leucipo e Demócrito (500-400 A.C.)



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 interações fundamentais (as interações 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			Quarks spin = 1/2		
Sabor	Massa GeV/c ²	Carga Eléctrica	Sabor	Massa Aprox. GeV/c ²	Carga Eléctrica
ν_L neutrino* mais leve	$(0-2) \times 10^{-9}$	0	u up	0.002	2/3
e electrão	0.000511	-1	d down	0.005	-1/3
ν_M neutrino* intermédio	$(0.009-2) \times 10^{-9}$	0	c charm	1.3	2/3
μ muão	0.106	-1	s strange	0.1	-1/3
ν_H neutrino* pesado	$(0.05-2) \times 10^{-9}$	0	t top	173	2/3
τ tau	1.777	-1	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 \hbar , que é a unidade quântica de momento angular, com $\hbar = h/2\pi = 6.58 \times 10^{-25} \text{ GeV s} = 1.05 \times 10^{-34} \text{ J s}$.

Cargas eléctricas são dadas em unidades de carga eléctrica do próton. Em unidades SI, a carga eléctrica do próton é $1.60 \times 10^{-19} \text{ coulomb}$.

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/c² ($E = mc^2$) em que $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-10} \text{ joule}$. A massa do próton é $0.938 \text{ GeV}/c^2 = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$.

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_1 , ν_2 , e ν_3 , 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 bósons electricamente neutros (por ex. Z^0 , γ e $\eta_c = c\bar{c}$, mas não $K^0 = d\bar{s}$) são as próprias antipartículas.

Processos com Partículas

Estes diagramas são concepções artísticas. Áreas alaranjadas representam as nuvens de glúons.

$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$

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

$e^+ e^- \rightarrow \gamma + Z^0$

Um electrão e um pósitron (antielectrão), colidindo a altas energias, podem aniquilar-se para produzir mesões B^+ e B^0 por meio de um bóson Z ou fóton virtuais.

Estrutura dentro do Átomo



Se os prótons 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, ...

Electrofraco spin = 1			Forte (cor) spin = 1		
Nome	Massa GeV/c ²	Carga Eléctrica	Nome	Massa GeV/c ²	Carga Eléctrica
γ fóton	0	0	g glúo	0	0
W⁻ bósons W	80.39	-1	Bóson de Higgs spin = 0		
W⁺	80.39	+1			
Z bóson Z	91.188	0	Nome	Massa GeV/c ²	Carga Eléctrica
			H Higgs	126	0

Bóson de Higgs

O bóson 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 glúons (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 fótons, nas interacções fortes, partículas com carga de cor interagem trocando glúons.

Quarks Confinados em Mesões e Bárions

Quarks e glúons não podem ser isolados – estão confinados em partículas de cor neutra chamadas hádrons. Este confinamento (ligação) resulta das múltiplas trocas de glúons entre os constituintes "coloridos". Quando as partículas "coloridas" (quarks e glúons) 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 hádrons, que são as partículas observáveis.

Dois tipos de hádrons foram observados na natureza: mesões (q \bar{q}) e bárions (qqq). Entre os muitos tipos de bárions observados temos o próton (uud), antipróton ($\bar{u}\bar{u}\bar{d}$), e neutrão (udd). As cargas eléctricas dos quarks somam-se para o próton ter carga +1 e o neutrão carga 0. Entre os vários tipos de mesões temos o píon $^+$ (u \bar{d}), kaão K^+ (u \bar{s}), e B^0 (d \bar{s}).

Propriedades das Interações

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

Propriedade	Interação Gravitica	Interação Fraca	Interação Electromagnética (Electrofraca)	Interação Forte
Actua em:	Massa – Energia	Sabor	Carga Eléctrica	Carga de cor
Partículas afectadas:	Todas	Quarks, Leptões	Electricamente carregadas	Quarks, Glúons
Partículas mediadoras:	Gravitão (ainda por observar)	W⁺ W⁻ Z⁰	γ	Glúons
Intensidade a $\left\{ \begin{array}{l} 10^{-16} \text{ m} \\ 3 \times 10^{-17} \text{ m} \end{array} \right.$	10^{-41} 10^{-41}	0.8 10^{-4}	1 1	25 60

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 clipe, sobrepondo-se à gravidade exercida por todo o planeta Terra).

Saiba mais em ParticleAdventure.org



FERMIÕES

constituintes da matéria
spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...

Leptões spin = 1/2			Quarks spin = 1/2		
Sabor	Massa GeV/c ²	Carga Eléctrica	Sabor	Massa Aprox. GeV/c ²	Carga Eléctrica
ν_L neutrino* mais leve	$(0-2) \times 10^{-9}$	0	u up	0.002	2/3
e electrão	0.000511	-1	d down	0.005	-1/3
ν_M neutrino* intermédio	$(0.009-2) \times 10^{-9}$	0	c charm	1.3	2/3
μ muão	0.106	-1	s strange	0.1	-1/3
ν_H neutrino* pesado	$(0.05-2) \times 10^{-9}$	0	t top	173	2/3
τ tau	1.777	-1	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 fóton	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	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⁻ Z⁰	γ	Gluões
Intensidade a {	10^{-41}	0.8	1	25
	3×10^{-41}	10^{-4}	1	60

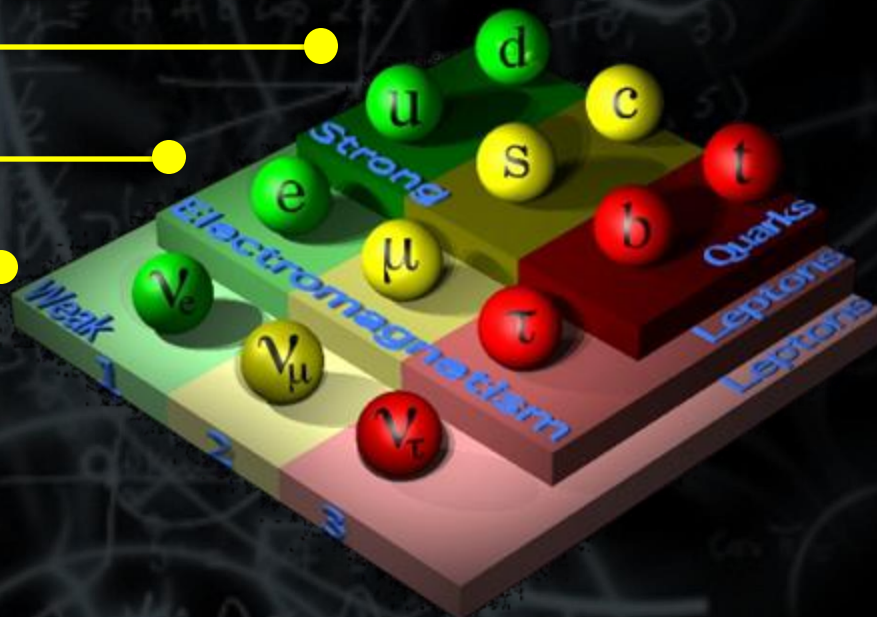
Força Forte (g)

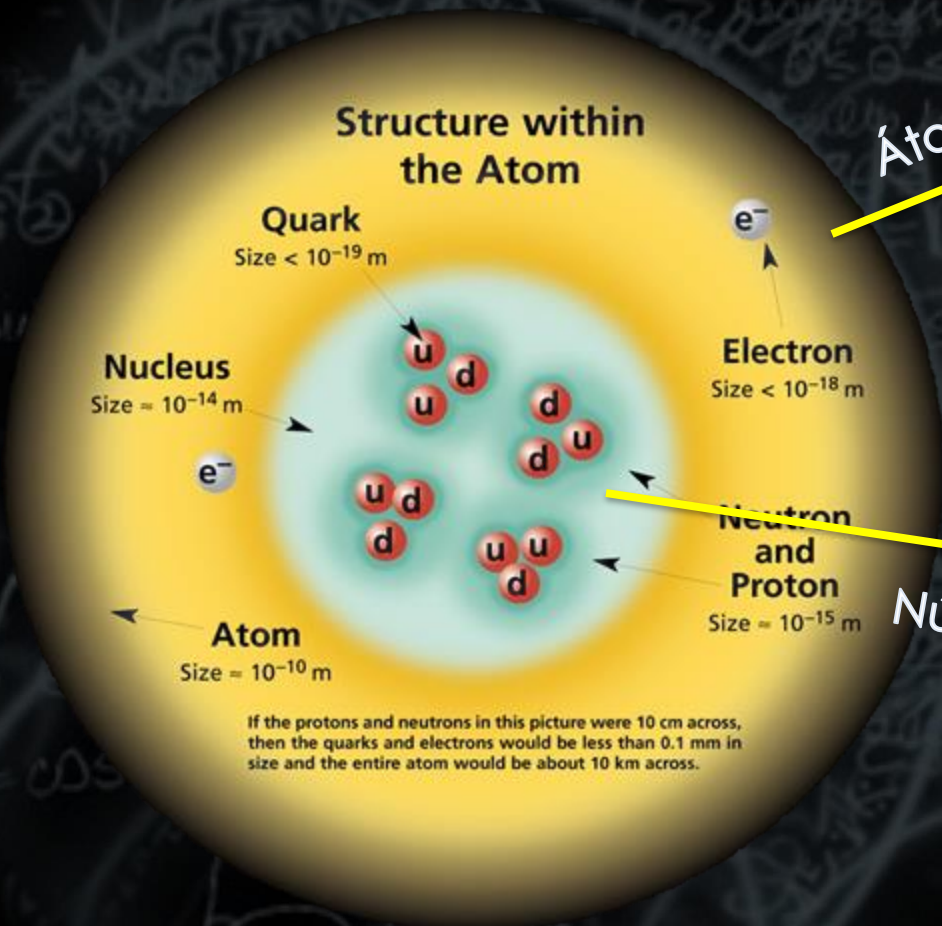
Força Electromagnética (γ)

Força fraca (W⁺, W⁻, Z⁰)

W⁺, W⁻ - Correntes carregadas

γ , Z⁰ - Correntes neutras





Átomo



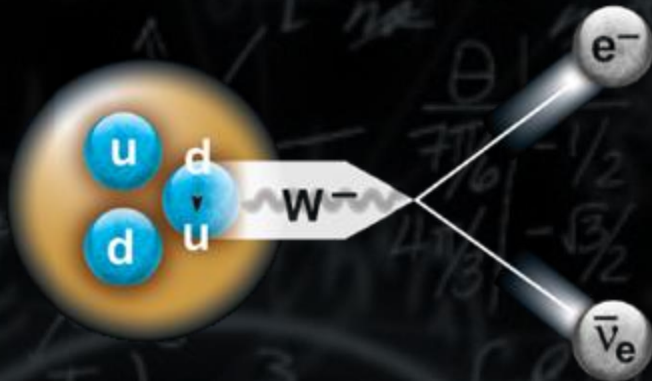
Núcleo



Processos com Partículas

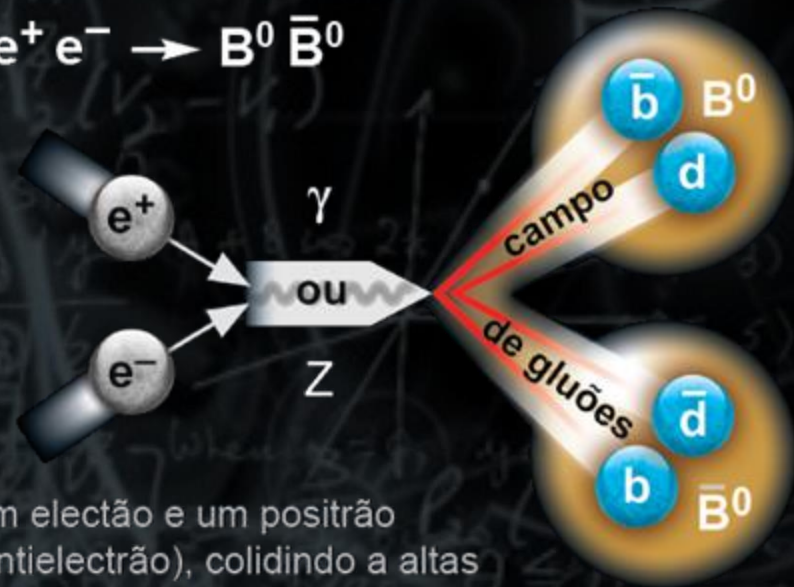
Estes diagramas são concepções artísticas. Áreas alaranjadas representam as núvens de glúons.

$$n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e$$



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

$$e^+ e^- \rightarrow B^0 \bar{B}^0$$



Um electrão 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)

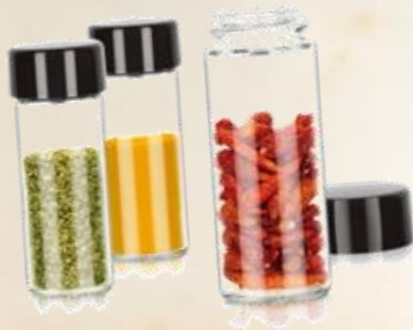


MasterChef

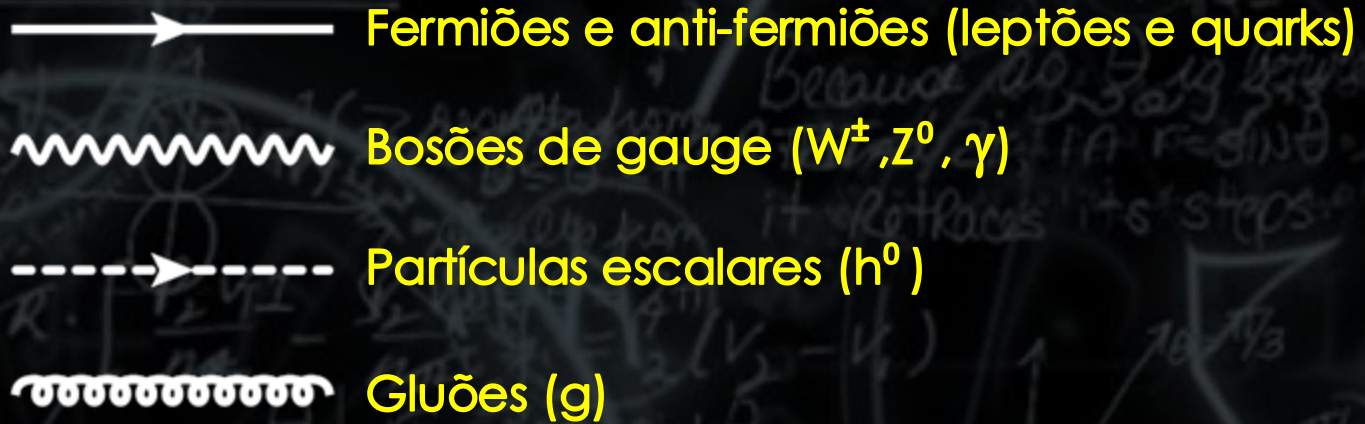
Partículas elementares



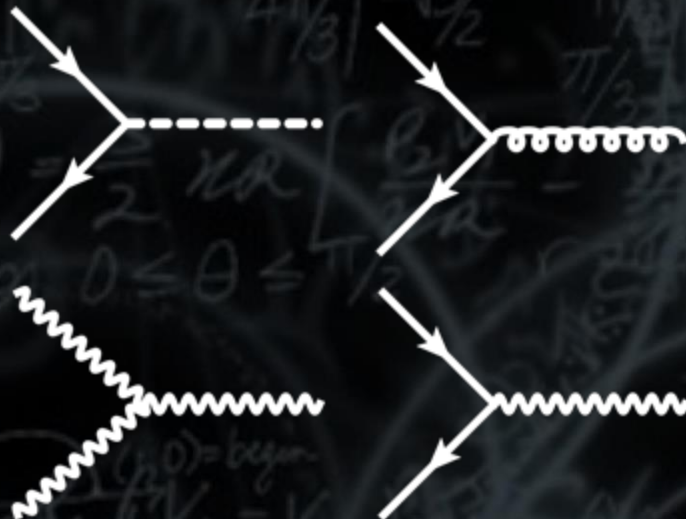
Interacções



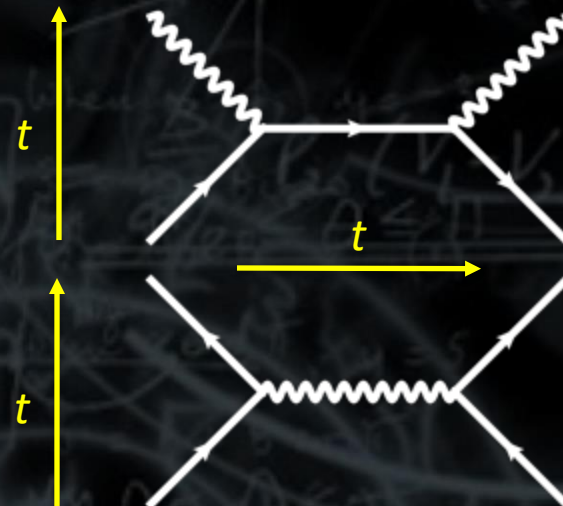
$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + i\bar{\Psi}\not{D}\Psi + h.c. + \bar{\Psi}_i \gamma_{ij} \Psi_j \phi + h.c. + |\partial_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$



Exemplos de acoplamentos



Exemplos de processos



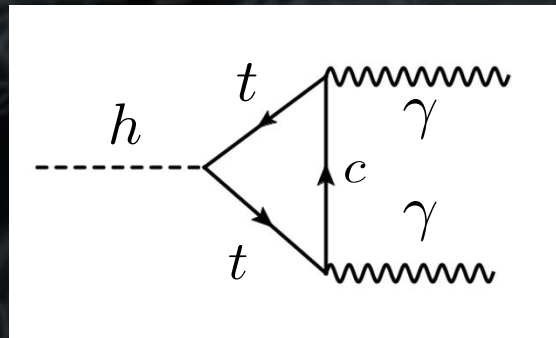
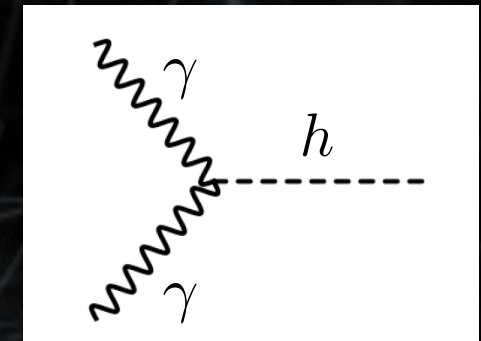
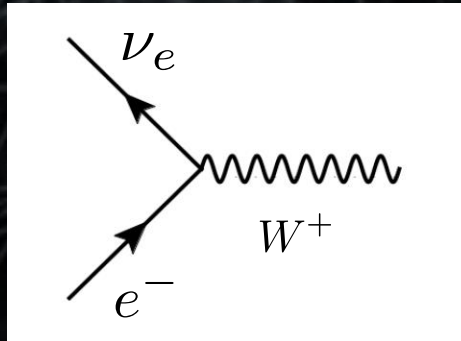
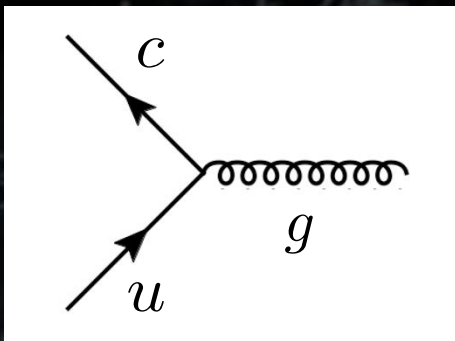
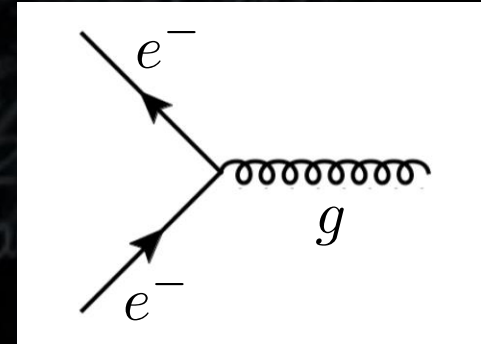
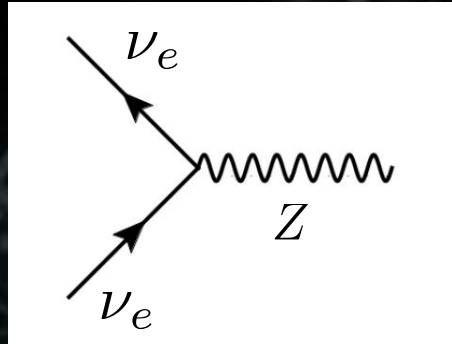
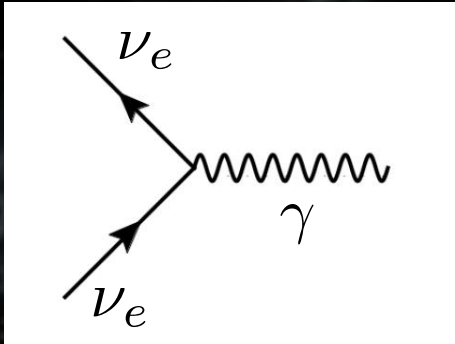
The central image shows a black mug with the following Lagrangian written on it:

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + i\bar{\psi}\not{D}\psi + \text{h.c.} + \chi_i y_{ij} \chi_j \phi + \text{h.c.} + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$

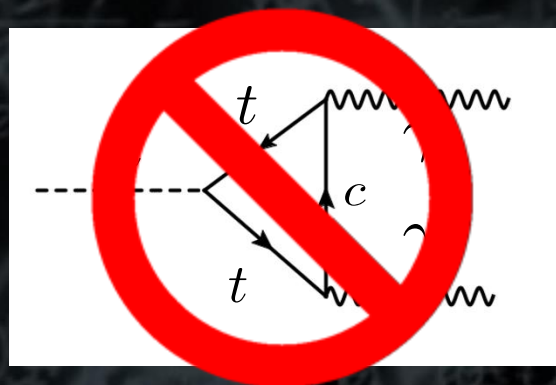
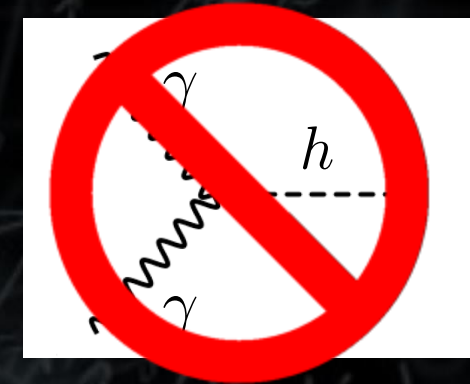
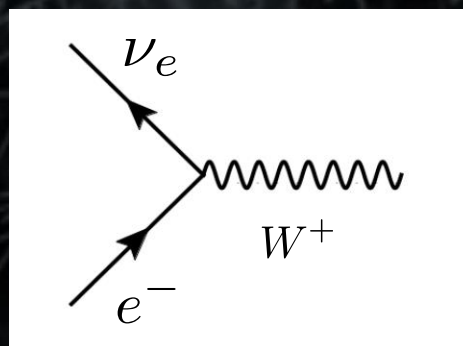
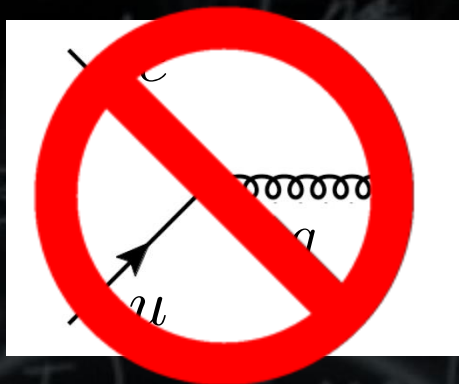
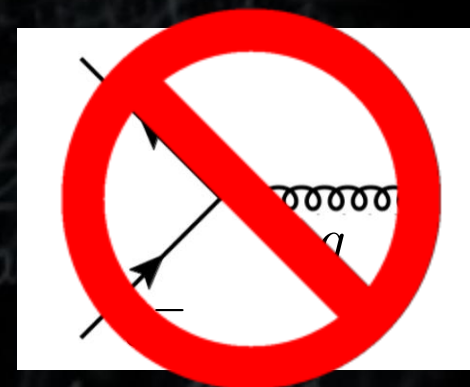
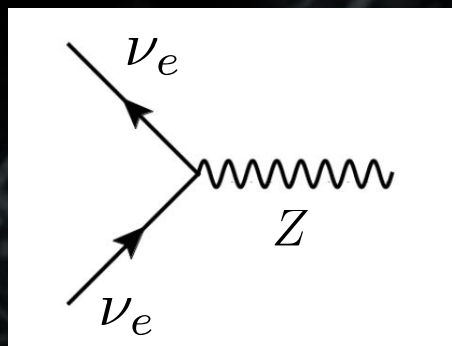
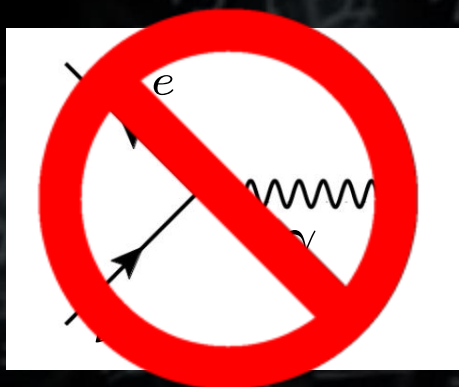
Five circular callouts illustrate Feynman diagrams for different interactions:

- Top:** A diagram showing a fermion line interacting with a gluon (curly line) and a photon (wavy line).
- Left:** A diagram showing a fermion line interacting with a photon (wavy line).
- Right:** A diagram showing a fermion line interacting with a gluon (curly line).
- Bottom-Left:** A diagram showing a fermion line interacting with a Higgs boson (curly line).
- Bottom-Right:** A diagram showing a fermion line interacting with a graviton (dashed line).

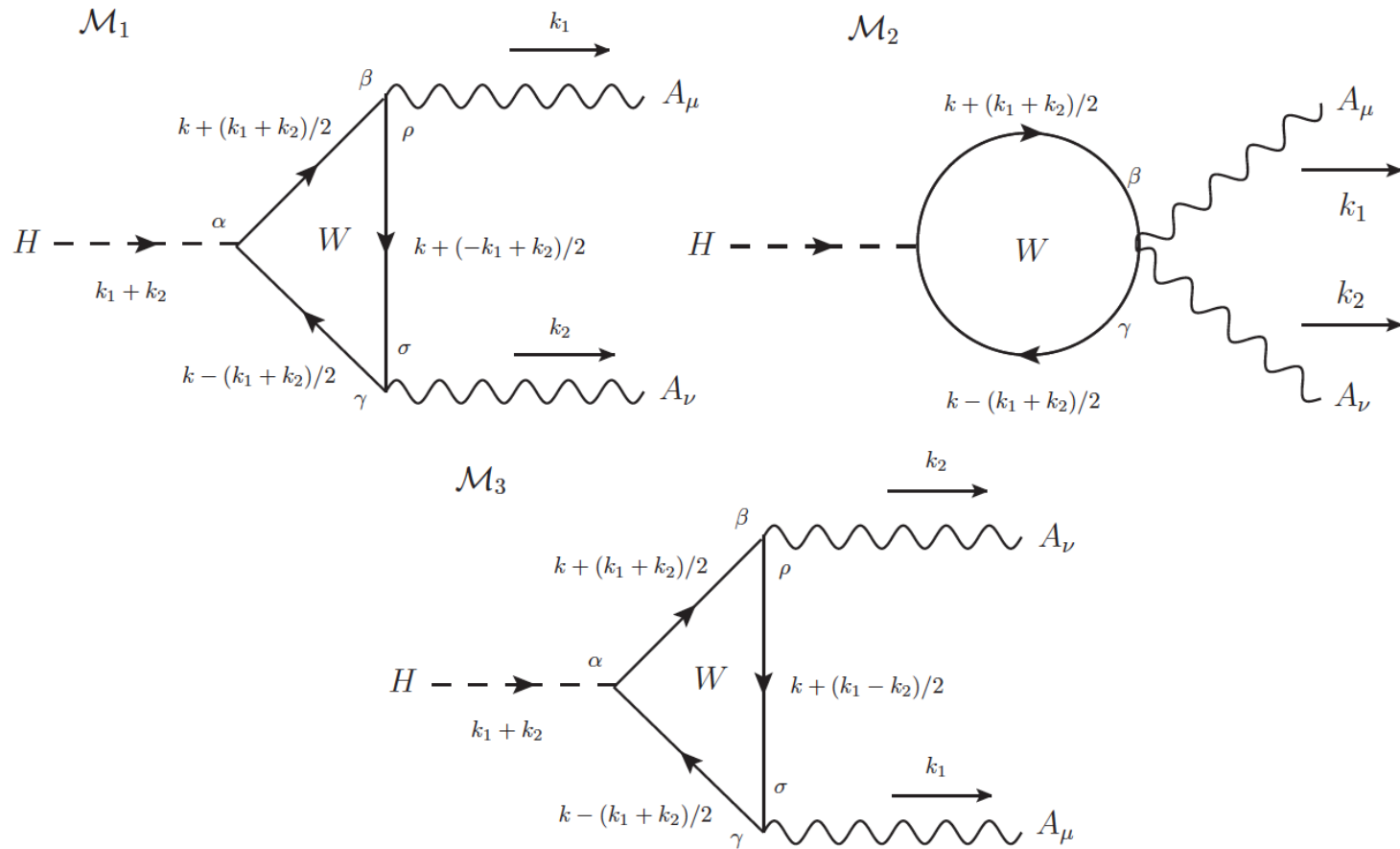
QUIS SOBRE REGRAS DE FEYNMAN (NÃO CONTA PARA NOTA)



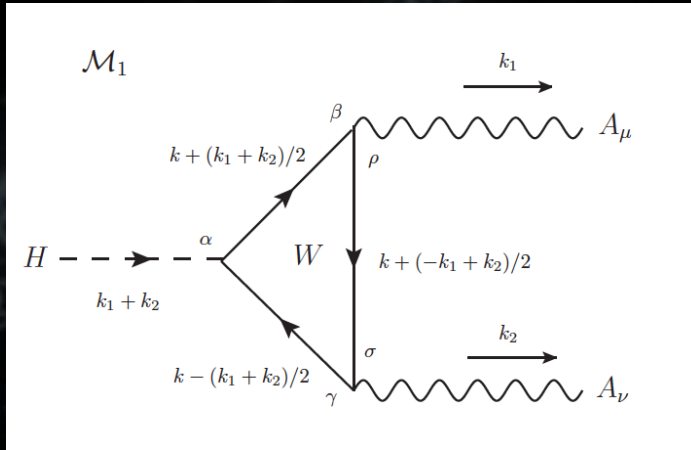
QUIS SOBRE REGRAS DE FEYNMAN (NÃO CONTA PARA NOTA)



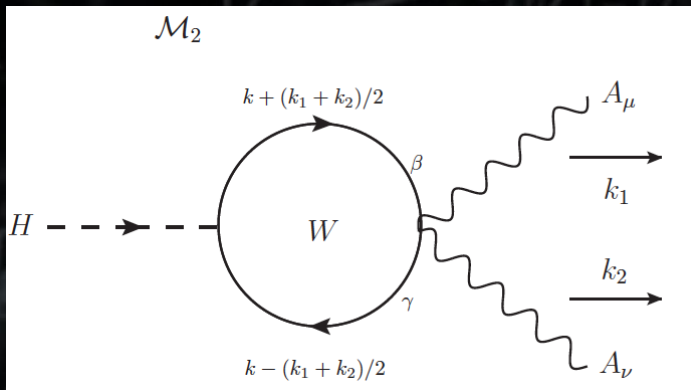
Representação diagramática



Representação matemática



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



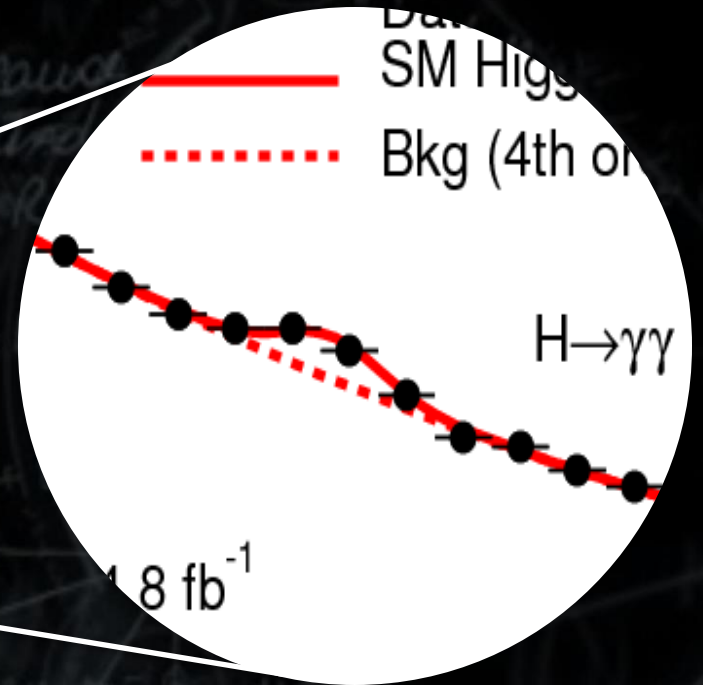
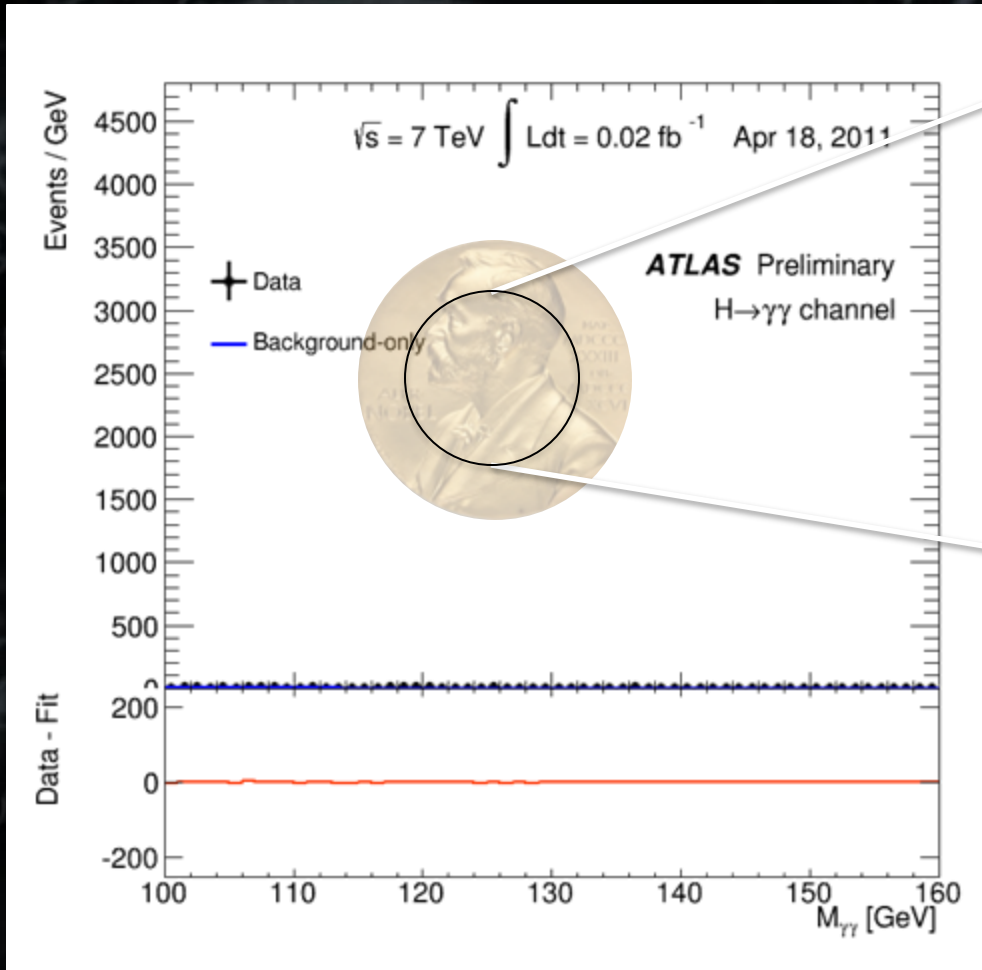
$$\mathcal{M}_2 = \frac{e^2 g M_W}{(2\pi)^4} \int d^4 k \left[g_\alpha^\beta - \left(k + \frac{k_1 + k_2}{2} \right)_\alpha \left(k + \frac{k_1 + k_2}{2} \right)^\beta \frac{1}{M_W^2} \right] \epsilon_\nu^*(k_2) \epsilon_\mu^*(k_1) \times \left[g^{\alpha\gamma} - \left(k - \frac{k_1 + k_2}{2} \right)^\alpha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

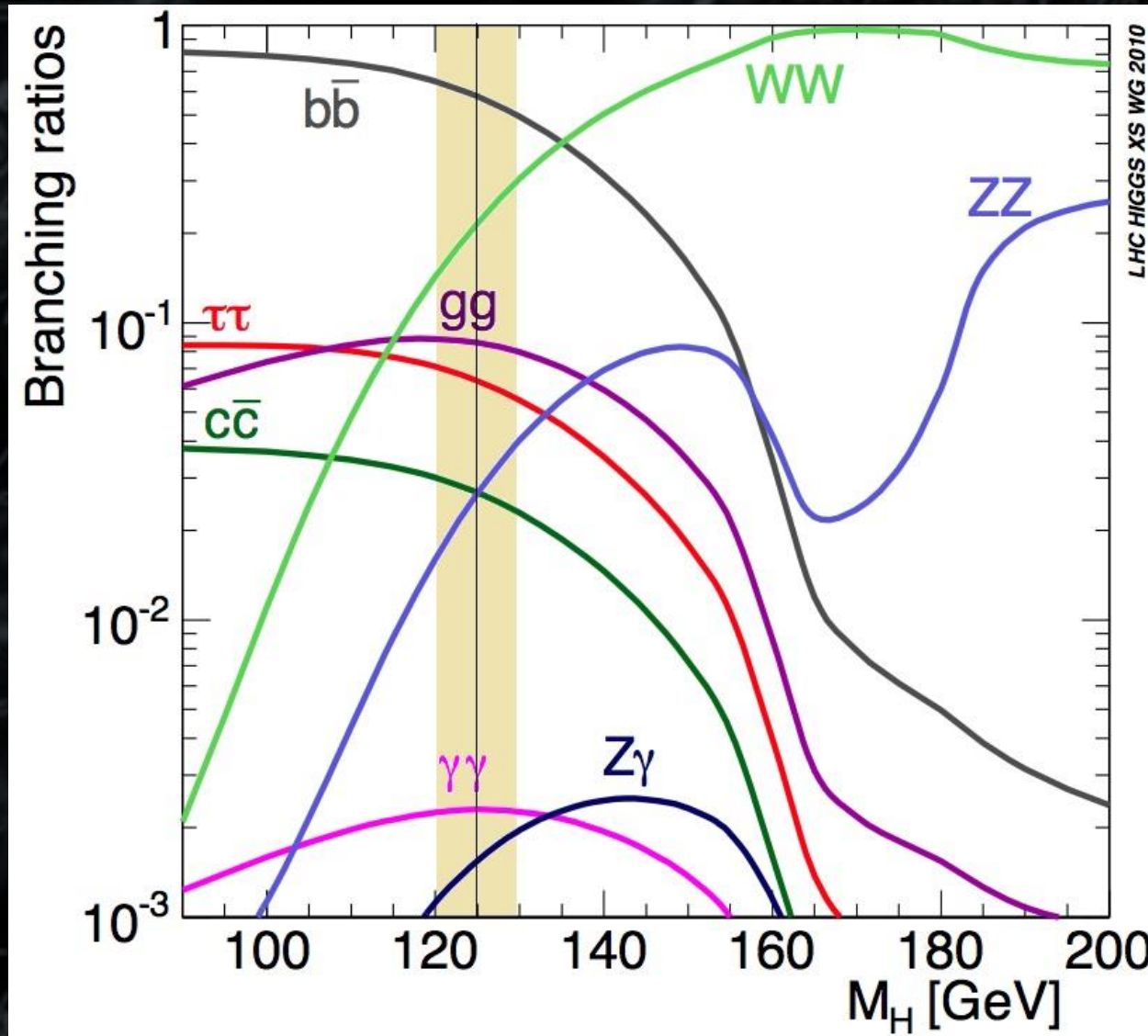
Resultado



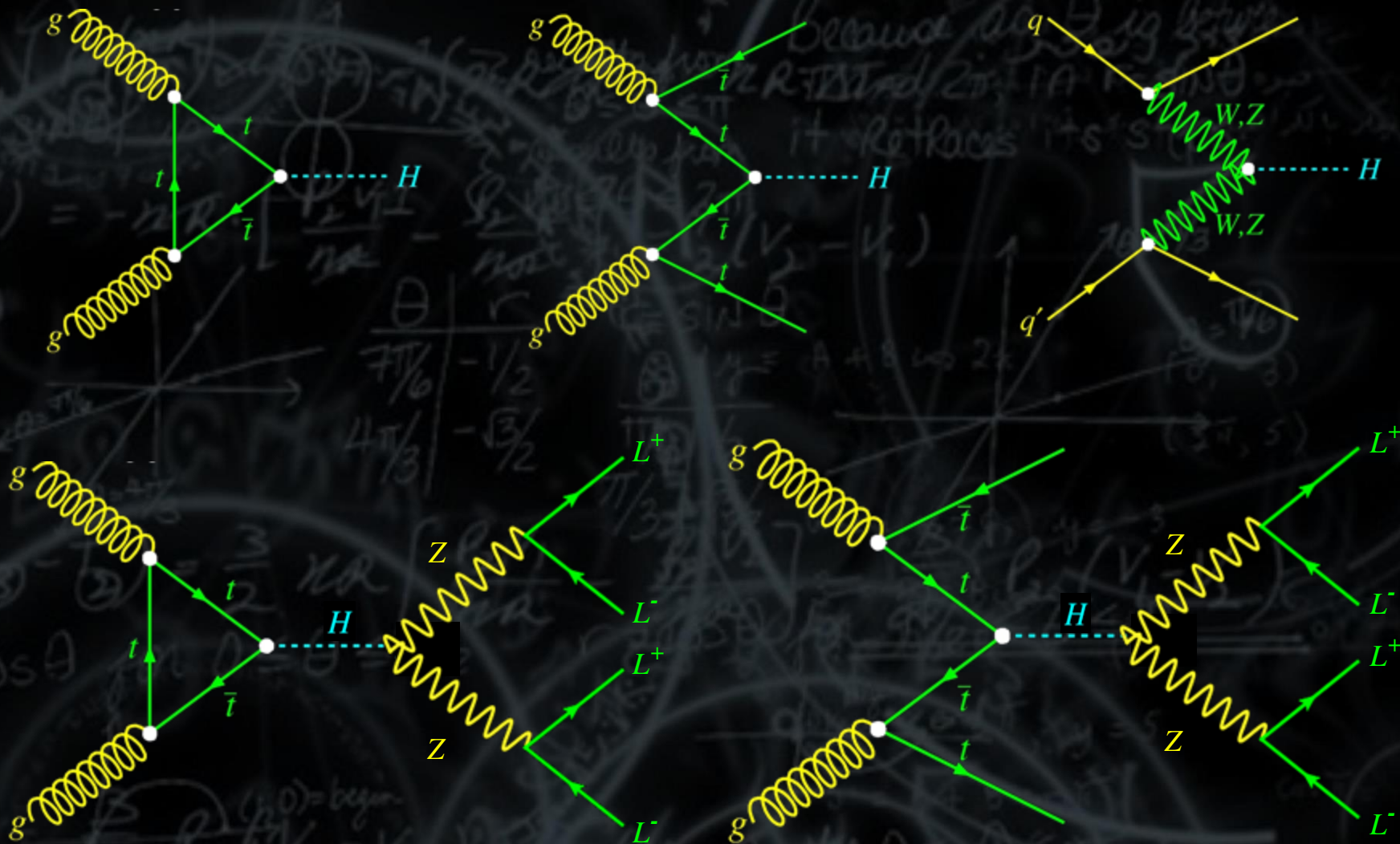
$$\Gamma(h^0 \rightarrow \gamma\gamma) = \frac{G_F \alpha^2 M_H^3}{128 \sqrt{2} \pi^3} \left| \sum_f N_c Q^2 A_{1/2}^H(\tau_f) + A_1^H(\tau_W) \right|^2$$

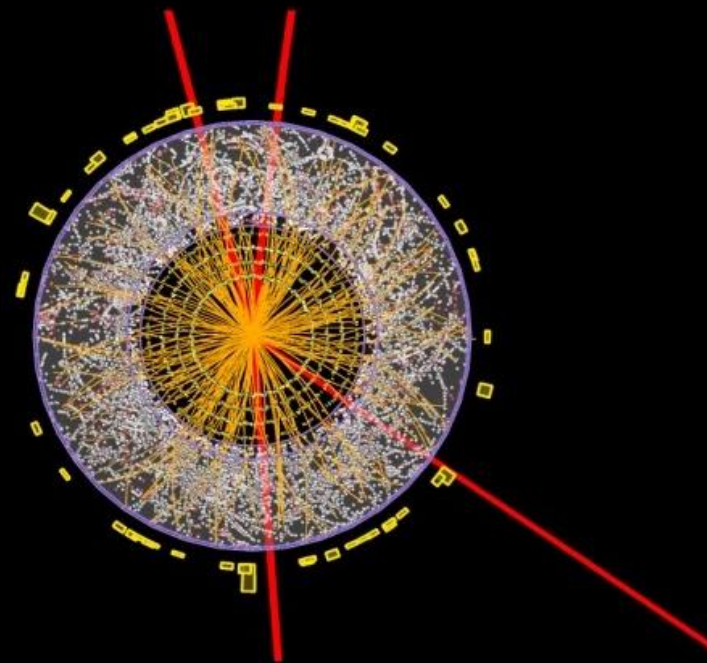
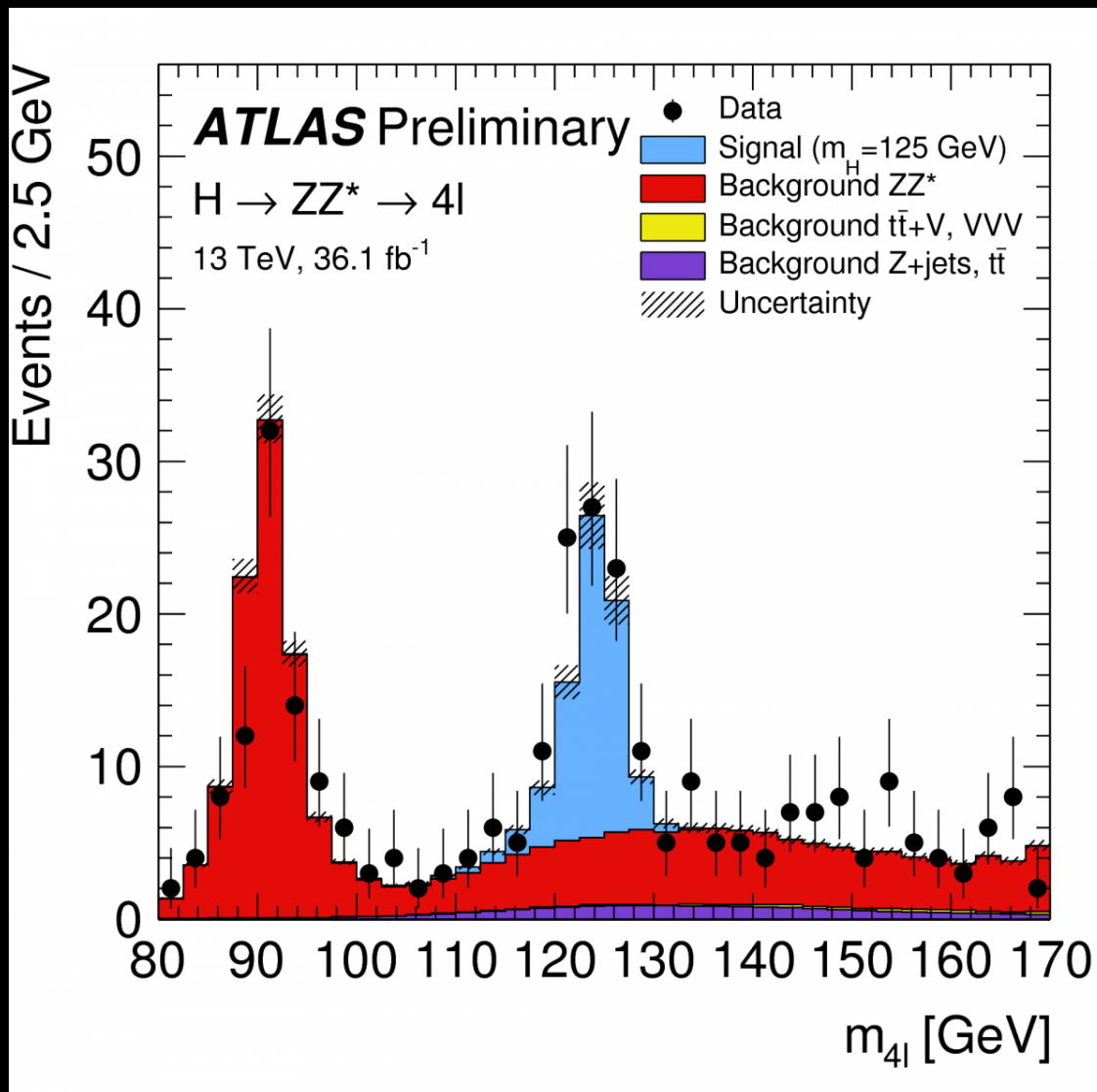
Exemplo: Canal de descoberta do Higgs





Mais exemplos...





Run: 204769
Event: 71902630
Date: 2012-06-10
Time: 13:24:31 CEST

Pictionary (diagramas de Feynman)



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

$\sim 2.5\sigma$

