



Universidade
Federal da Bahia



Os sabores pesados

Sessão A, 04 de Setembro de 2018

Eliza Melo, eliza@cern.ch



Sumário

1. Introdução e Motivação física do sabor, física nova, CKM, unitariedade
2. Detecção LHC como uma “fábrica” de SP
3. Produção

A física do <<sabor>> ?

O que é ? Por que? Como?

Bósons

→ “Forças”

g

γ

W^{\pm}

Z^0

H

Fermions

→ “Matéria”

u

Quarks

d

e^-

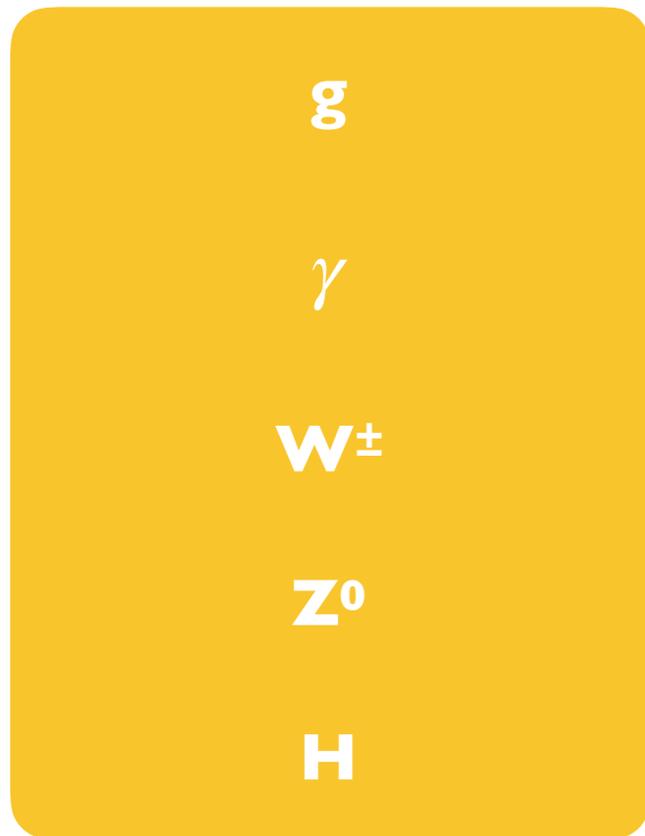
Leptons

ν_e

A física do <<sabor>> ?

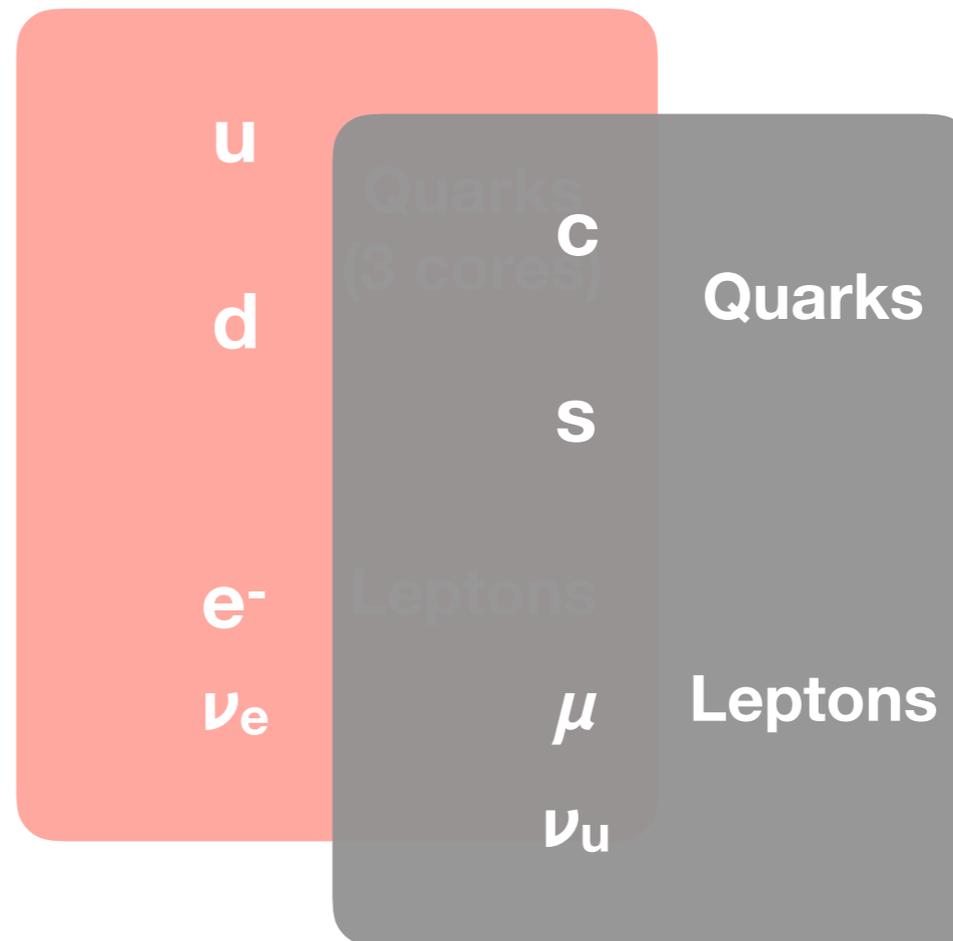
Bósons

→ “Forças”



Fermions

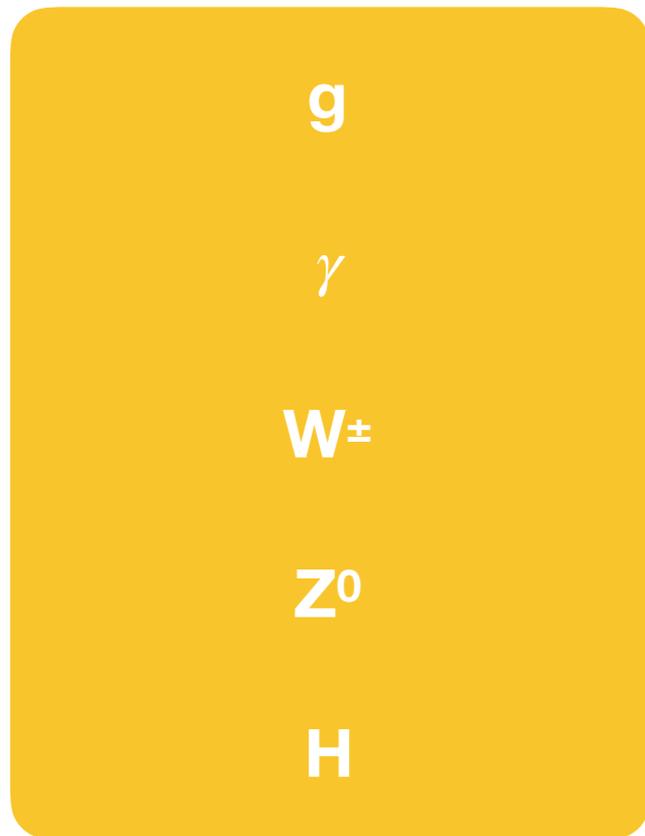
→ “Matéria”



A física do <<sabor>> ?

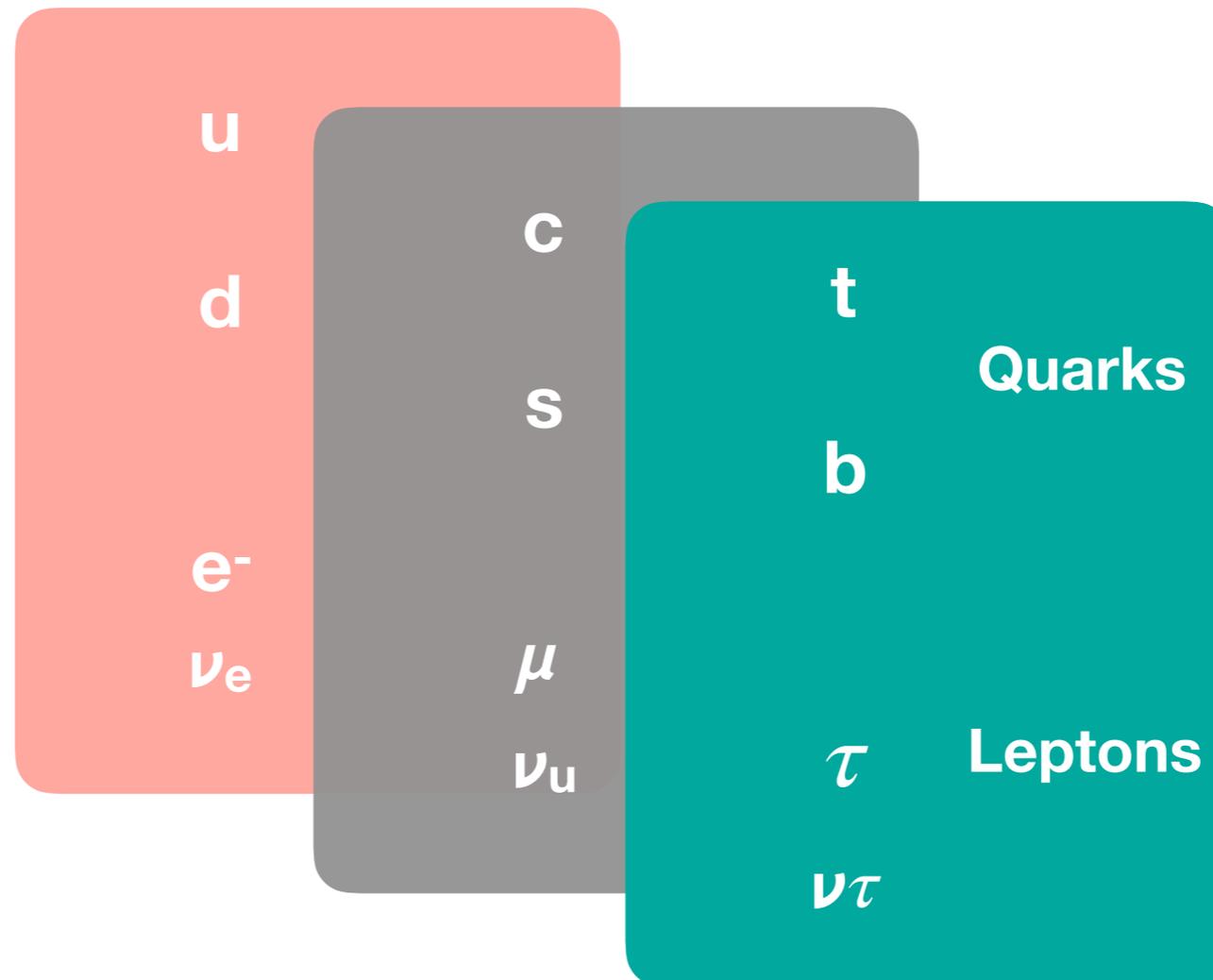
Bósons

→ “Forças”



Fermions

→ “Matéria”



A física do «sabor»? ?

massa →	$\sim 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\sim 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\sim 173.07 \text{ GeV}/c^2$	0	$\sim 126 \text{ GeV}/c^2$
carga	$2/3$	$2/3$	$2/3$	0	0
spin	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	0
	u up	c charm	t top	g glúon	H bóson de Higgs
QUARKS	$\sim 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\sim 95 \text{ MeV}/c^2$	$\sim 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$	0	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	d down	s strange	b bottom	γ fóton	
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	$1.777 \text{ GeV}/c^2$	$91.2 \text{ GeV}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	e elétron	μ múon	τ tau	Z bóson Z	
LÉPTONS	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	$80.4 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	± 1	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	ν_e neutrino do elétron	ν_μ neutrino do múon	ν_τ neutrino do tau	W bóson W	BÓSONS DE CALIBRE



Simetria do sabor: um pouco de história



1932: A descoberta do Nêutron - com a mesma massa, mesmo acoplamento a interação forte do próton

No mesmo ano, Heisenberg propõe que os nêutrons e os prótons são um 'isospin-doublet'

➡ **dois estados quânticos da mesma partícula (spin \uparrow e spin \downarrow)**

$$p: (l; l_z) = (\frac{1}{2}; +\frac{1}{2})$$

↑

$$n: (l; l_z) = (\frac{1}{2}; -\frac{1}{2})$$

↓

Os quarks u e d tem massas “semelhantes” (comparada com a escala da QCD)

➡ **porém as massas não são iguais-**quebra da simetria!****

física do <<sabor>>?

quarks leves:

u,d: na região da física nuclear

s: decaimentos raros de kaon testa o MP

$$m_u \approx 3 \text{ MeV}$$

$$m_d \approx 5 \text{ MeV}$$

$$m_s \approx 100 \text{ MeV}$$

$$m_c \approx 1300 \text{ MeV}$$

$$m_b \approx 4200 \text{ MeV}$$

$$m_t \approx 170000 \text{ MeV}$$

top: não é tão pesado!
O quark top tem sua própria fenomenologia

$$m_{\nu_1} \leq 10^{-6} \text{ MeV}$$

$$m_{\nu_2} \leq 10^{-6} \text{ MeV}$$

$$m_{\nu_3} \leq 10^{-6} \text{ MeV}$$

neutrinos: tem sua própria fenomenologia, não é detectado diretamente no LHC

$$m_e \approx 0.5 \text{ MeV}$$

$$m_\mu \approx 100 \text{ MeV}$$

$$m_\tau \approx 1800 \text{ MeV}$$

léptons leves carregados:
Ex.: momentos de dipolo magnético e elétrico

tau: busca por violação do sabor do lépton, $\tau \rightarrow \mu\mu\mu$

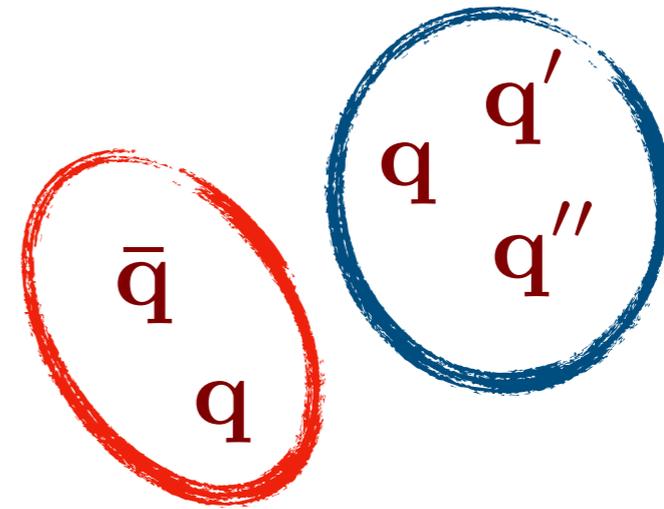
Estudo dos quarks b e c

- ▶ sabor escondido aka quarkonia: $\psi(c\bar{c})$, $\Upsilon(b\bar{b})$, $\chi_{c,b}$ e os estados exóticos, X,Y,Z
- ▶ open Charms: mésons D
- ▶ open Beauty, B mésons (B_u, B_d, B_s, B_c) e bárions b ($\Lambda_b, \Xi_b, \Omega_b\dots$)

nota:

- <<física do B>> refere-se ao estudo da interação da mudança de sabor dos mésons com quark-b

O zoológico de partículas



25 mésons

➡ Todos já foram observados (o último foi o B_c^\pm em 1998)

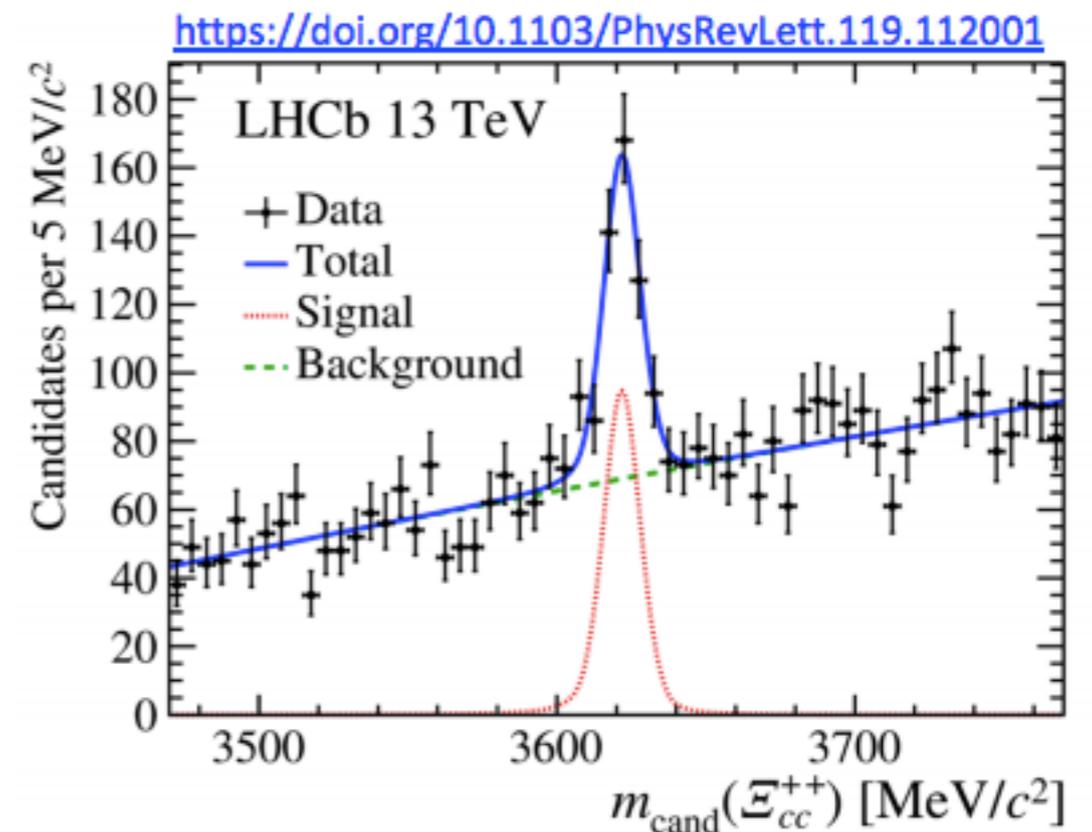
35 bárions

➡ Muitos ainda não foram descobertos - LHCb descobriu

o bárion Ξ_{cc}^{++} (ccu)

12 outros bárions com >1 quark pesado (=b ou c) ainda não foram observados

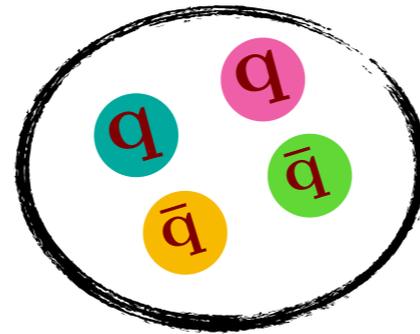
Além dos estados "excitados" (assim como átomos) com diferentes massas e propriedades



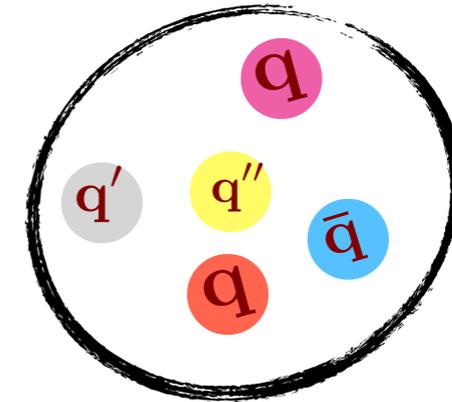
Descobrir novos estados e medir suas propriedades (massa, tempo de vida, os decaimentos) fornece uma ferramenta poderosa para estudar e melhorar os cálculos da QCD

O zoológico de partículas

Enigma de longa data - por que apenas mésons e bárions? Por que não outras combinações de quarks ?



tetraquark

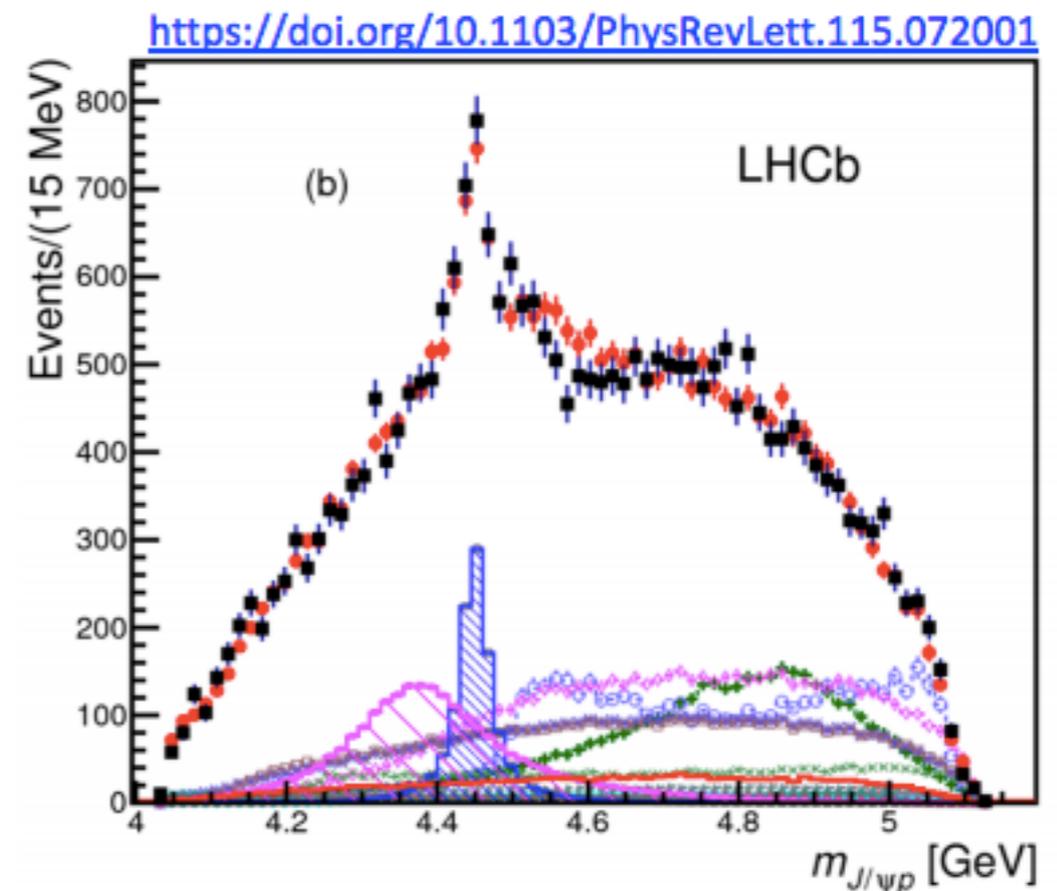


pentaquark

Em 2015, o LHCb fez a primeira descoberta de (dois!) estados pentaquark ($uudc\bar{c}$)

Existem muitos outros candidatos, mas muitas vezes difíceis para identificar sua natureza

Um novo campo se abrindo!



física do <<sabor>>?

Parâmetros do Modelo Padrão:

- Acoplamento de gauge
- 2 parâmetros de Higgs
- 6 massas dos quarks
- 3(+3) massas dos léptons
- 3 ângulos de mistura + 1 fase \rightarrow matriz CKM
- (3 ângulos de mistura + 1 fase) \rightarrow matriz PMNS

(...)= com os neutrinos de Dirac

física do <<sabor>>?

Parâmetros do Modelo Padrão:

- Acoplamento de gauge
- 2 parâmetros de Higgs

- 6 massas dos quarks
- 3(+3) massas dos léptons
- 3 ângulos de mistura + 1 fase \rightarrow matriz CKM
- (3 ângulos de mistura + 1 fase) \rightarrow matriz PMNS

(...)= com os neutrinos de Dirac



**Parâmetros
do sabor**

O papel da física do sabor

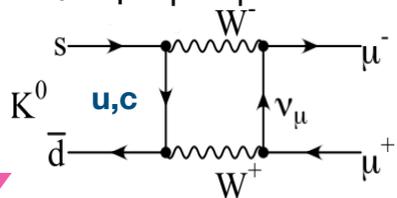
- na busca por **física nova**;
- entender por que o **MP** parece tão fundamental;
- em aprender sobre os mistérios da **estrutura de sabor** do MP (e AMP);
- em conectar a **violação de CP** à assimetria matéria-antimatéria no universo observável;
- na compreensão da **QCD**, e sondando as propriedades da matéria **desconfinada** a alta temperatura e densidade;
- extra: como uma ferramenta experimental & sonda.
 - serve como sonda ou fundo dominante no MP e em buscas por AMP
 - para a calibração do detector(performance do detector, campo magnético)

Descobertas indiretas via fronteira de precisão

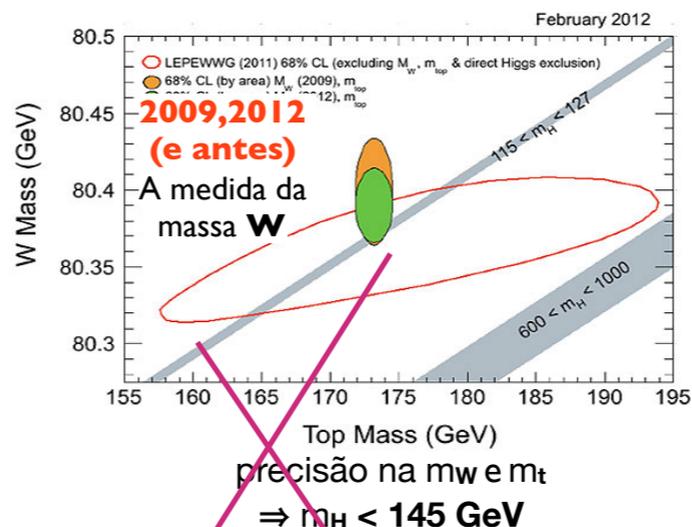
Nova física pode aparecer na fronteira de precisão antes da fronteira energética

- ▶ kaon (1947), Λ^0 (1950) levou a descoberta da **estranheza**;
- ▶ mecanismo GIM (1970) antes da descoberta do **charm** (1974);
- ▶ violação de CP (1964) antes da descoberta do **bottom** (1977) & **top** (1995);
- ▶ corrente neutra (1973) antes da descoberta do **Z** (1983);
- ▶ medida de precisão das massas do W e t que limitou a massa do **Higgs**, etc!

1970
Mecanismo de GIM
(Glashow–Iliopoulos–Maiani)
requer um quarto-quark : **Charm**
ex.: $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ e por que não $K^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$

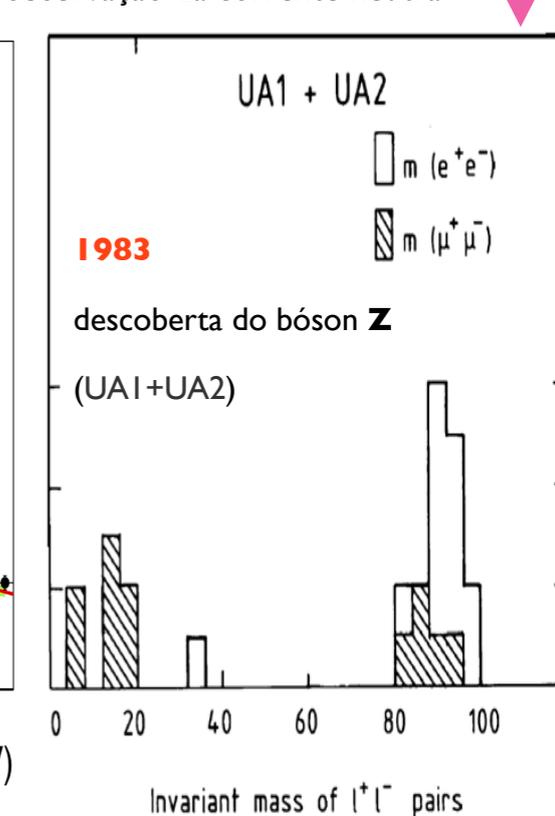
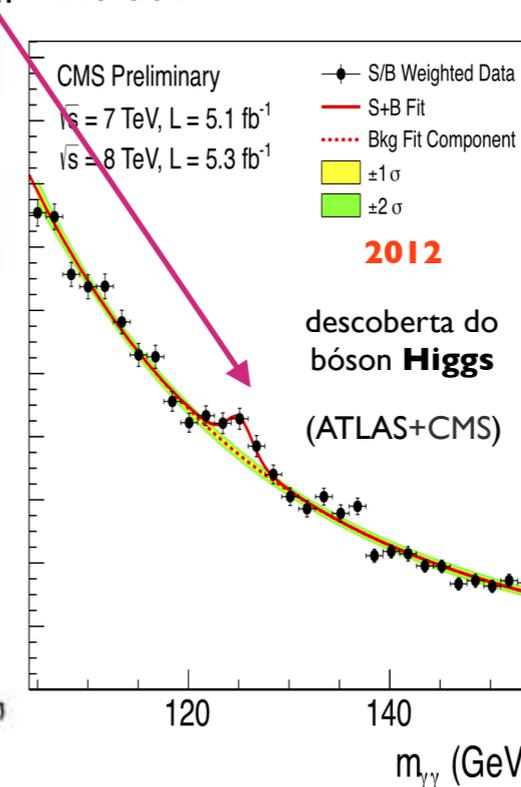
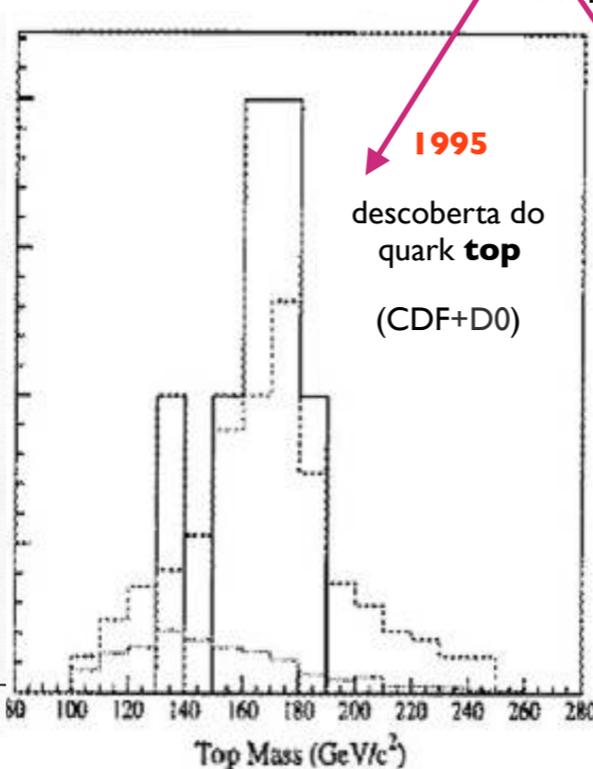
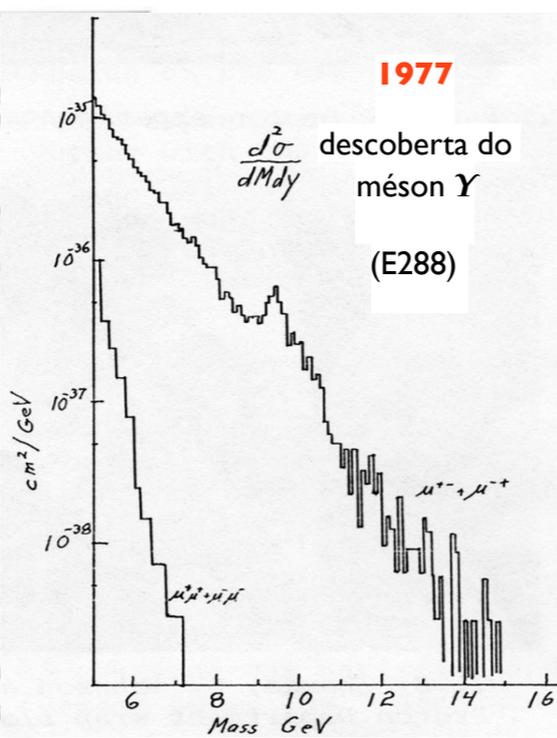
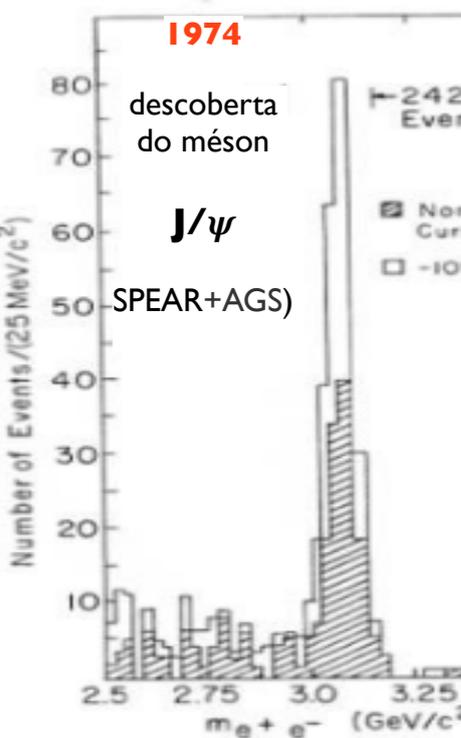


1973
Kobayashi e Maskawa
estimaram a terceira geração de quark **bottom e top**
para explicar a violação CP
(descoberta em **1964** no sistema do kaon)



$\bar{\nu}_\mu e^- \rightarrow \bar{\nu}_\mu e^-$

observação da corrente neutra



Violação de CP

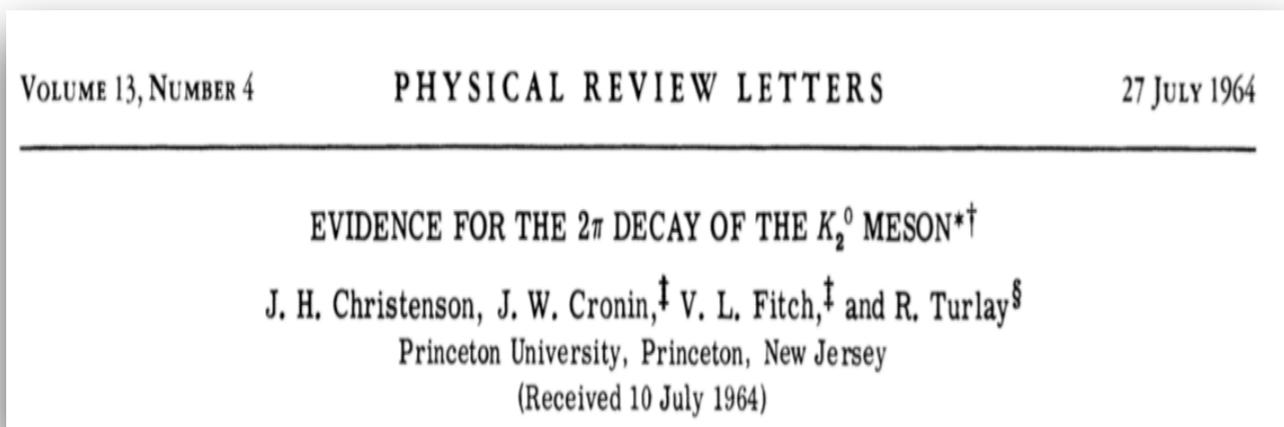
Simetria CP:

C(conjugação de carga): converte partículas \longleftrightarrow antipartícula

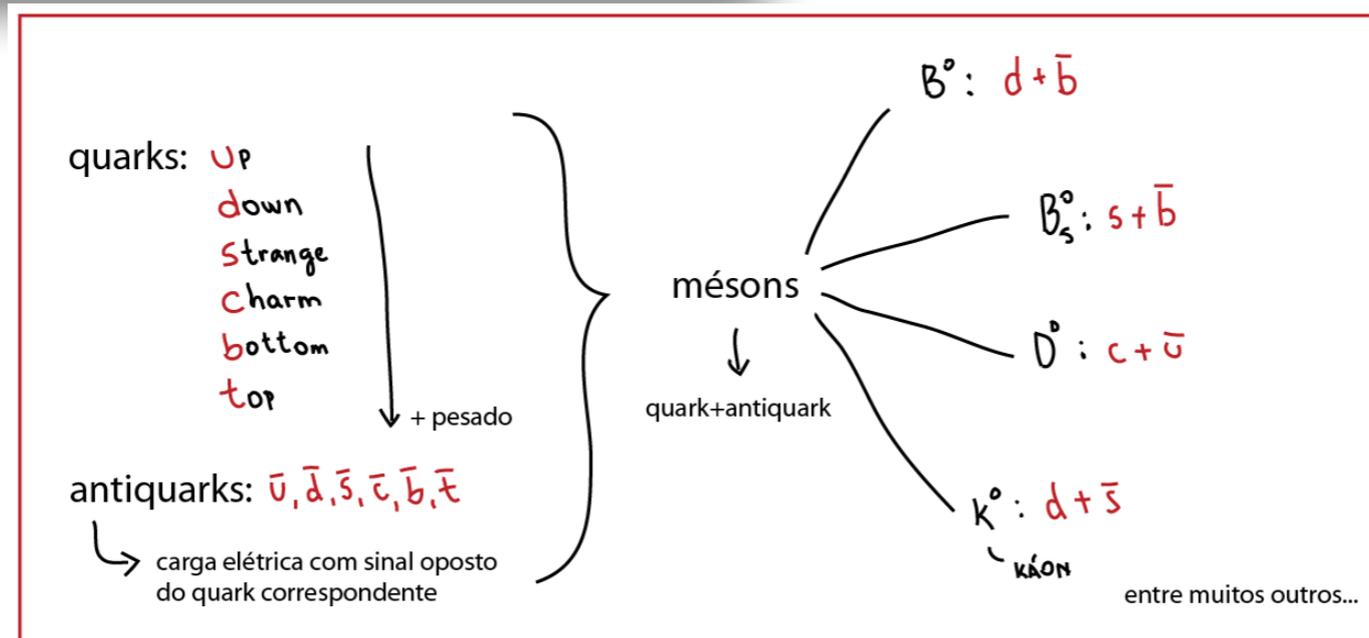
P(paridade): inverte todas as coordenadas espaciais e o (\Rightarrow spin)

Essa simetria é violada em certos tipos de decaimentos via interação fraca

Simetria \longleftrightarrow conservação dos número quânticos



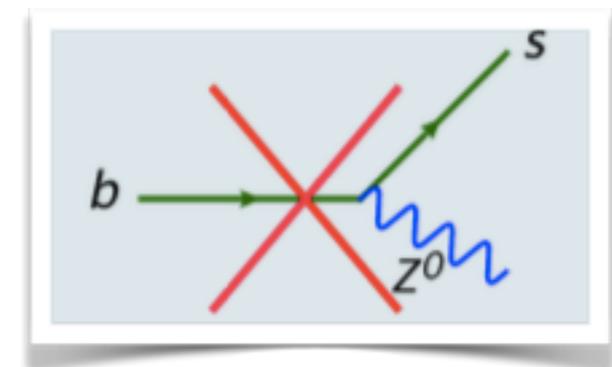
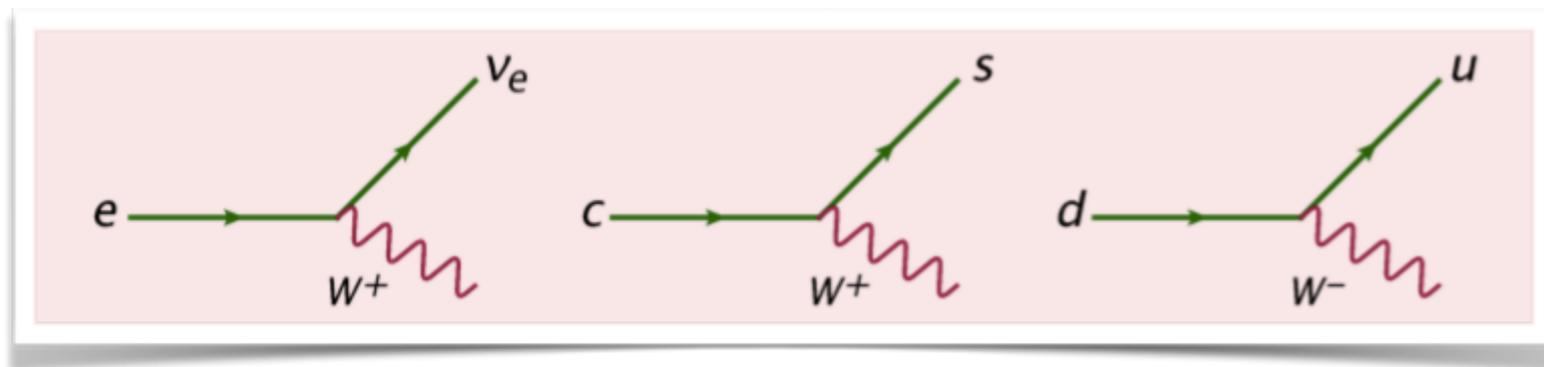
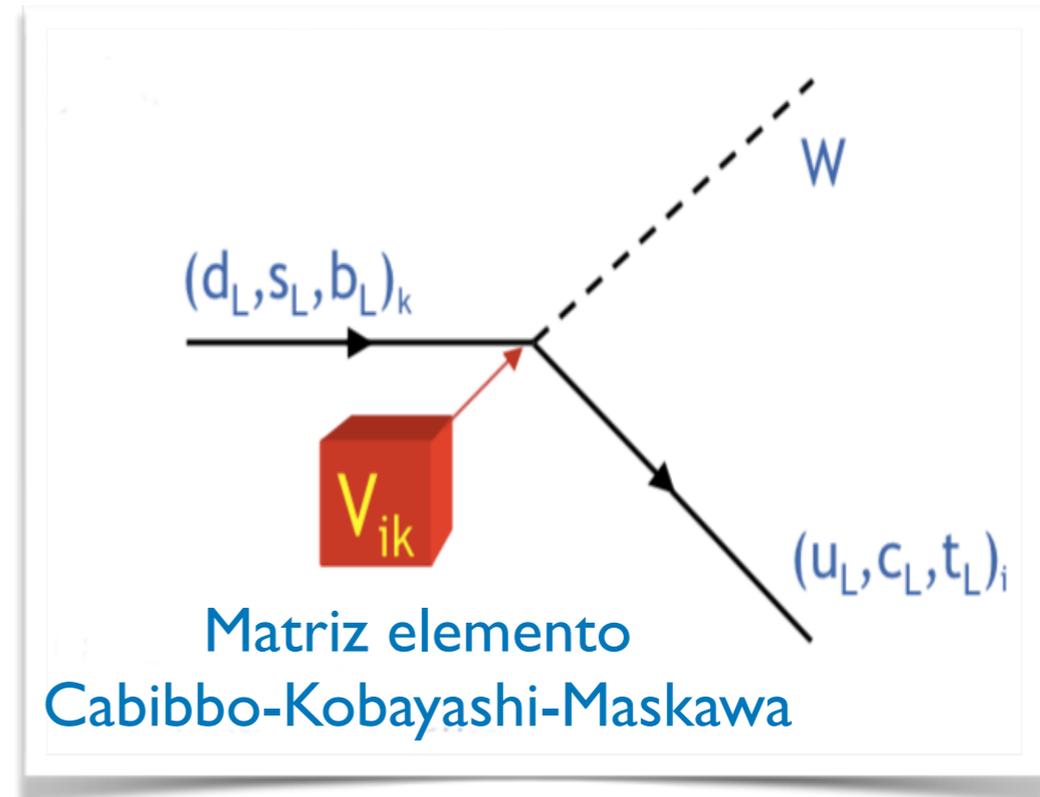
Se um processo muda ao se inverter as coordenadas e trocar partícula por antipartícula, então ele não é invariante sob CP, e se diz que CP foi violada



física do <<sabor>>

A física do sabor estuda a comunicação entre diferentes famílias(gerações)

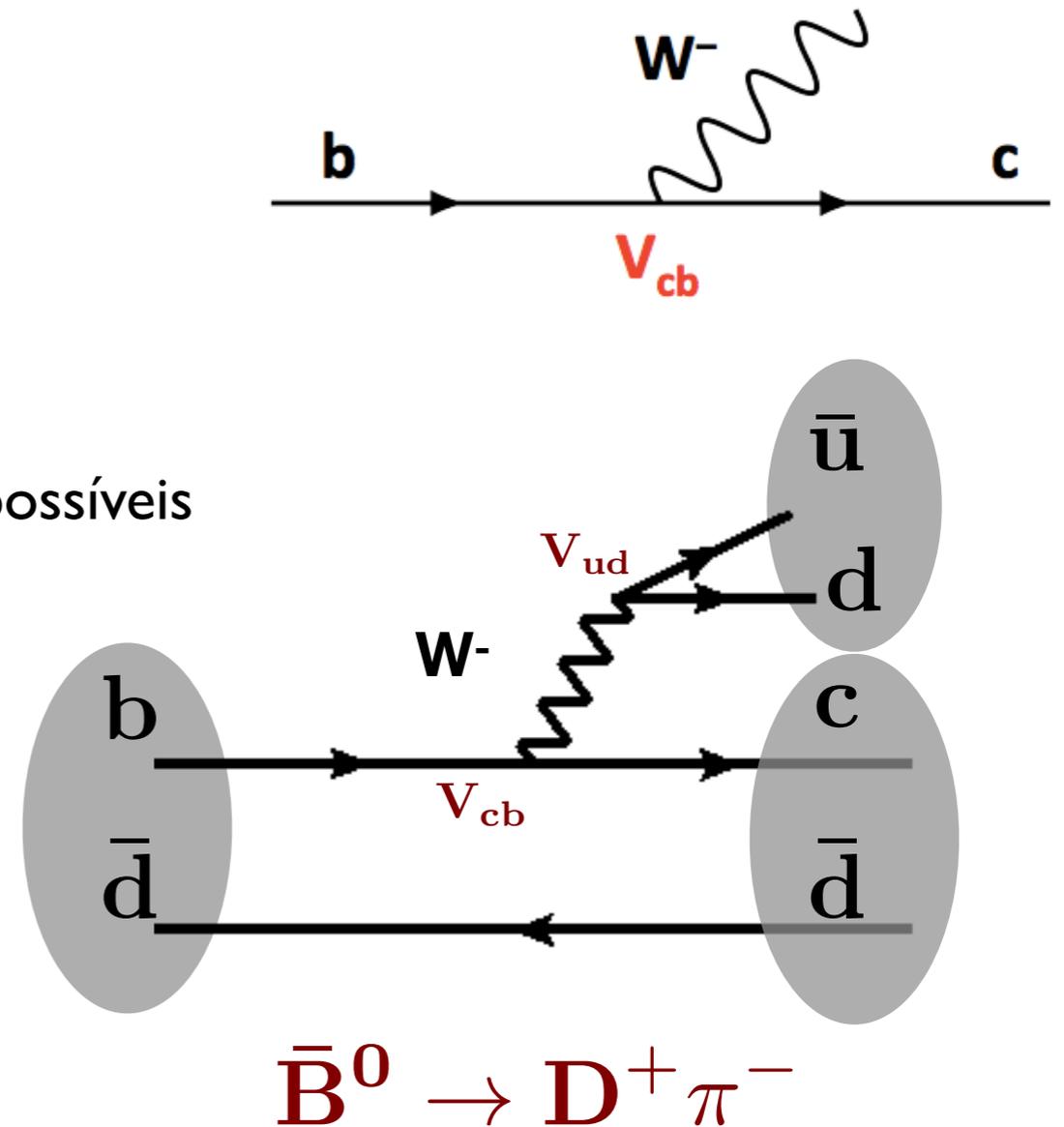
massa →	≈2.3 MeV/c ²	≈1.275 GeV/c ²	≈173.07 GeV/c ²	0	≈126 GeV/c ²
carga →	2/3	2/3	2/3	0	0
spin →	1/2	1/2	1/2	1	0
	u up	c charm	t top	g glúon	H bóson de Higgs
QUARKS					
	≈4.8 MeV/c ²	≈95 MeV/c ²	≈4.18 GeV/c ²	0	
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	d down	s strange	b bottom	γ fóton	
	0.511 MeV/c ²	105.7 MeV/c ²	1.777 GeV/c ²	91.2 GeV/c ²	
	-1	-1	-1	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	e elétron	μ múon	τ tau	Z bóson Z	
LÉPTONS					
	<2.2 eV/c ²	<0.17 MeV/c ²	<15.5 MeV/c ²	80.4 GeV/c ²	
	0	0	0	±1	
	1/2	1/2	1/2	1	
	ν_e neutrino do elétron	ν_μ neutrino do múon	ν_τ neutrino do tau	W bóson W	
					BÓSONS DE CALIBRE



Física do sabor <<pesado(quark)>>

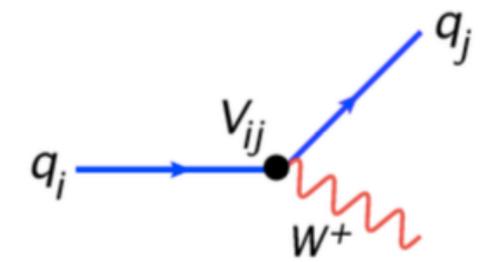
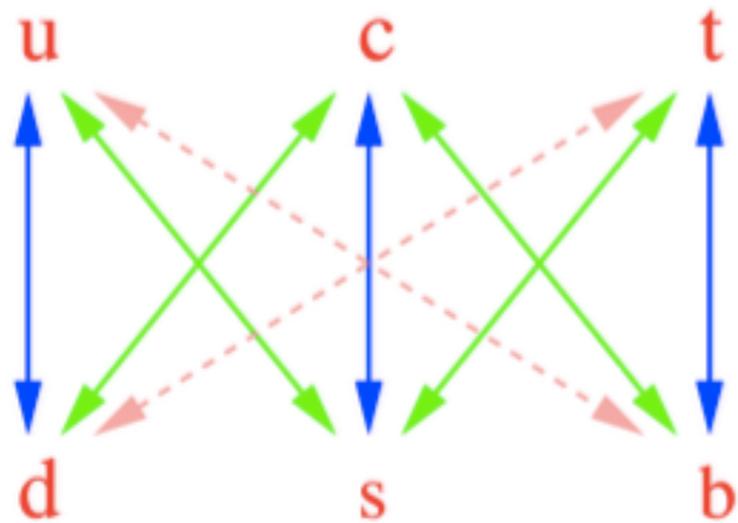
Os quarks mudam de sabor através da interação fraca carregada

⇒ Muitas combinações possíveis , muitos decaimentos possíveis
para diferentes estados finais



... sensível a novas partículas e sem efeitos MP

A Matriz de mistura dos quarks



$$\mathbf{V}_{\text{CKM}} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} 1 - \lambda^2/2 & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \lambda^2/2 & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix} + \mathcal{O}(\lambda^4)$$

- Parametrização de Wolfenstein expande em série de potências de $\lambda \approx 0.22$ (ou seja $\sin\theta_c$)
- Matriz 3x3, V_{td} e V_{ub} são complexos

Status experimental:

$$\begin{bmatrix} |V_{ud}| & |V_{us}| & |V_{ub}| \\ |V_{cd}| & |V_{cs}| & |V_{cb}| \\ |V_{td}| & |V_{ts}| & |V_{tb}| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.97434^{+0.00011}_{-0.00012} & 0.22506 \pm 0.00050 & 0.00357 \pm 0.00015 \\ 0.22492 \pm 0.00050 & 0.97351 \pm 0.00013 & 0.0411 \pm 0.0013 \\ 0.00875^{+0.00032}_{-0.00033} & 0.0403 \pm 0.0013 & 0.99915 \pm 0.00005 \end{bmatrix}$$

<http://pdg.lbl.gov/2016/reviews/rpp2016-rev-ckm-matrix.pdf>

A Matriz de mistura dos quarks

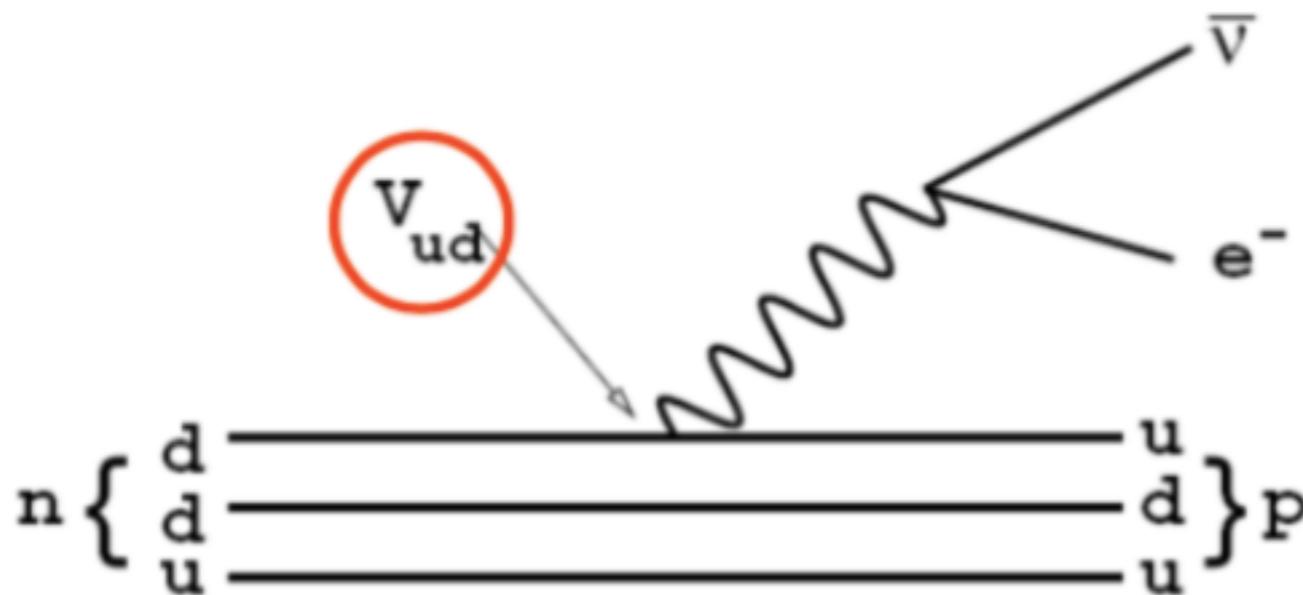
Como medir os elementos da matriz CKM?

⇒ taxas dos decaimentos das partículas

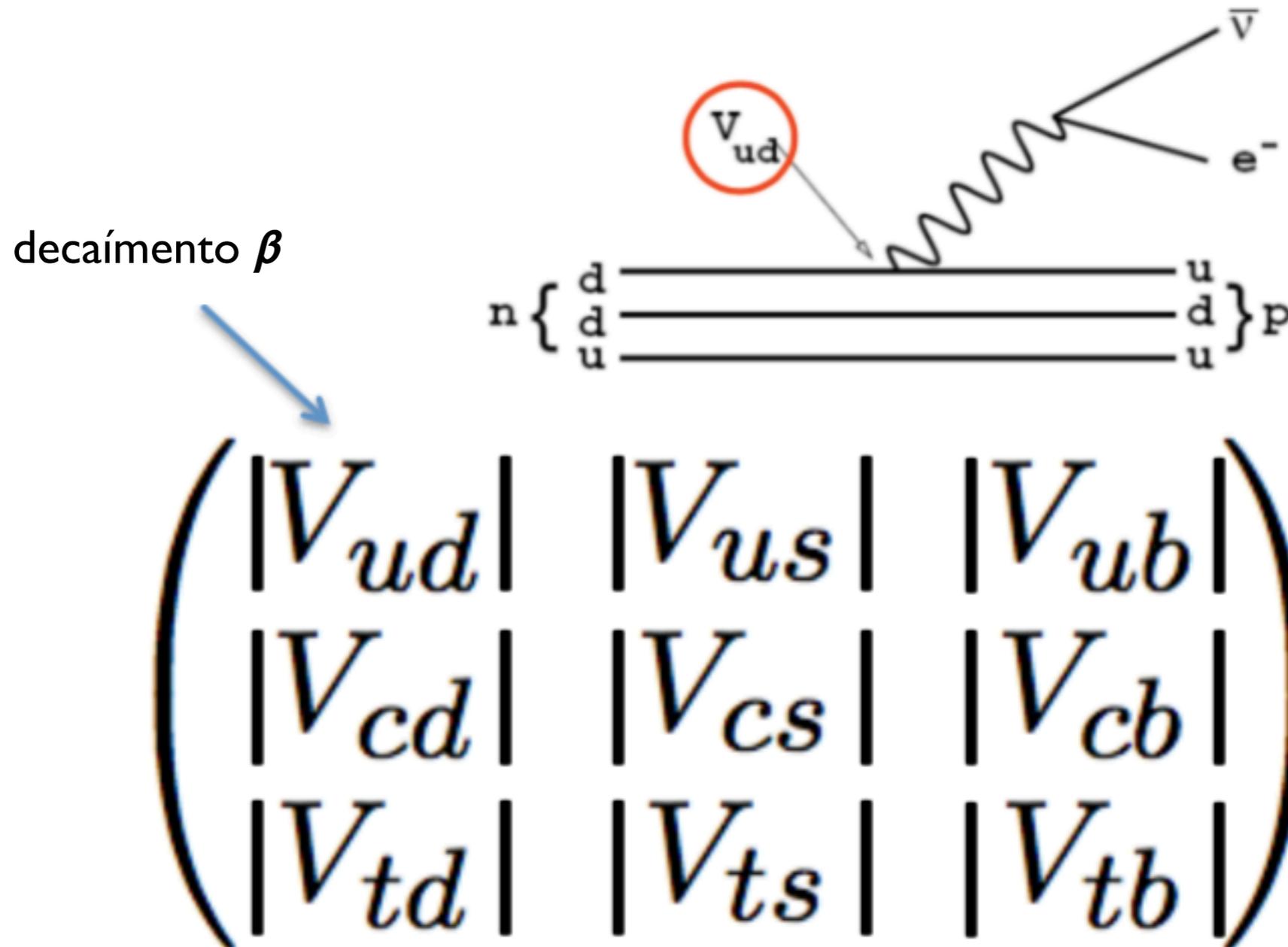
⇒ Razão das taxas de **decaimentos** é proporcional à **|amplitude|²**

Para V_{ud} , veja o nêutron (decaimento β)

$$\begin{pmatrix} |V_{ud}| & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}$$



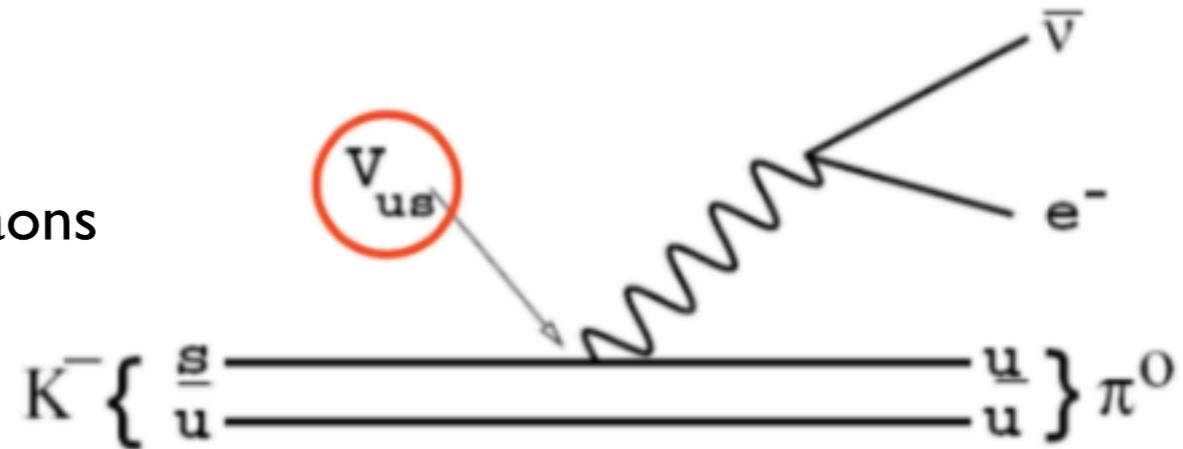
A Matriz de mistura dos quarks



A Matriz de mistura dos quarks

decaimento β

decaimentos do Káons
semileptônico
(ou leptônico)

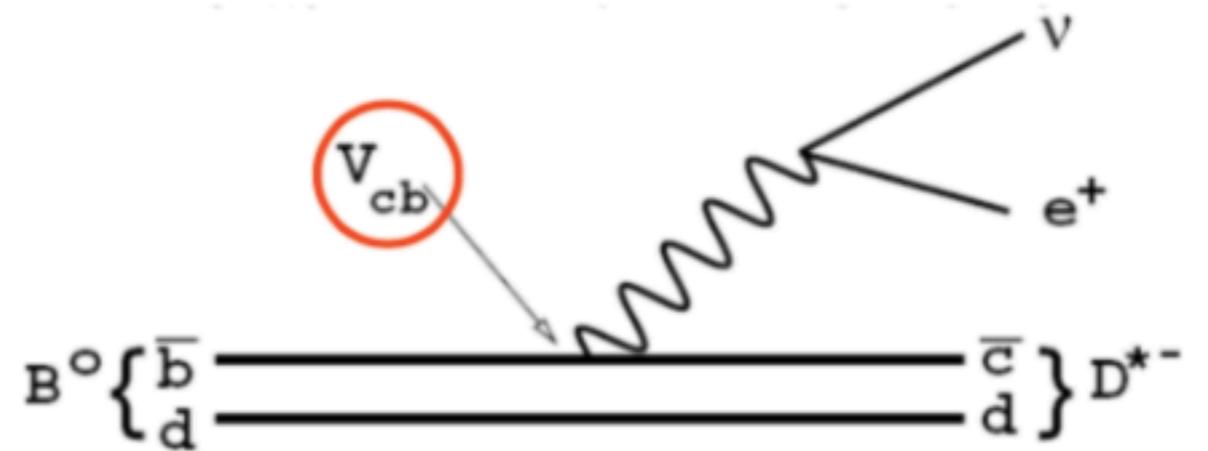


$$\begin{pmatrix} |V_{ud}| & |V_{us}| & |V_{ub}| \\ |V_{cd}| & |V_{cs}| & |V_{cb}| \\ |V_{td}| & |V_{ts}| & |V_{tb}| \end{pmatrix}$$

A Matriz de mistura dos quarks

decaimento β

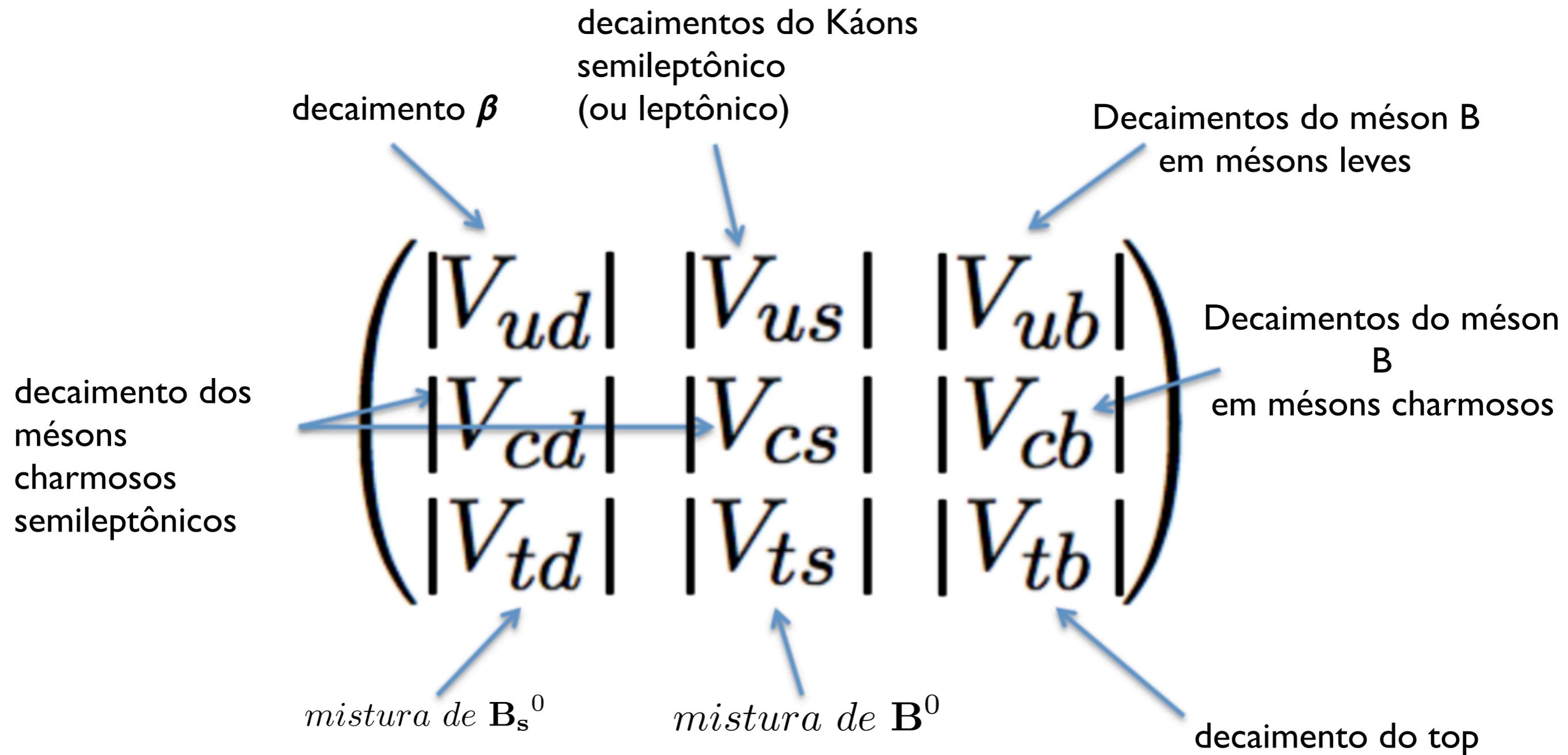
decaimentos do Káons
semileptônico
(ou leptônico)



$$\begin{pmatrix} |V_{ud}| & |V_{us}| & |V_{ub}| \\ |V_{cd}| & |V_{cs}| & |V_{cb}| \\ |V_{td}| & |V_{ts}| & |V_{tb}| \end{pmatrix}$$

Decaimentos do méson B
em mésons charmosos

A Matriz de mistura dos quarks



$$\begin{bmatrix} |V_{ud}| & |V_{us}| & |V_{ub}| \\ |V_{cd}| & |V_{cs}| & |V_{cb}| \\ |V_{td}| & |V_{ts}| & |V_{tb}| \end{bmatrix}$$

A unitariedade

$$VV^+ = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = 1$$

$$|V_{ud}|^2 + |V_{us}|^2 + |V_{ub}|^2 = 1$$

$$|V_{cd}|^2 + |V_{cs}|^2 + |V_{cb}|^2 = 1$$

$$|V_{td}|^2 + |V_{ts}|^2 + |V_{tb}|^2 = 1$$

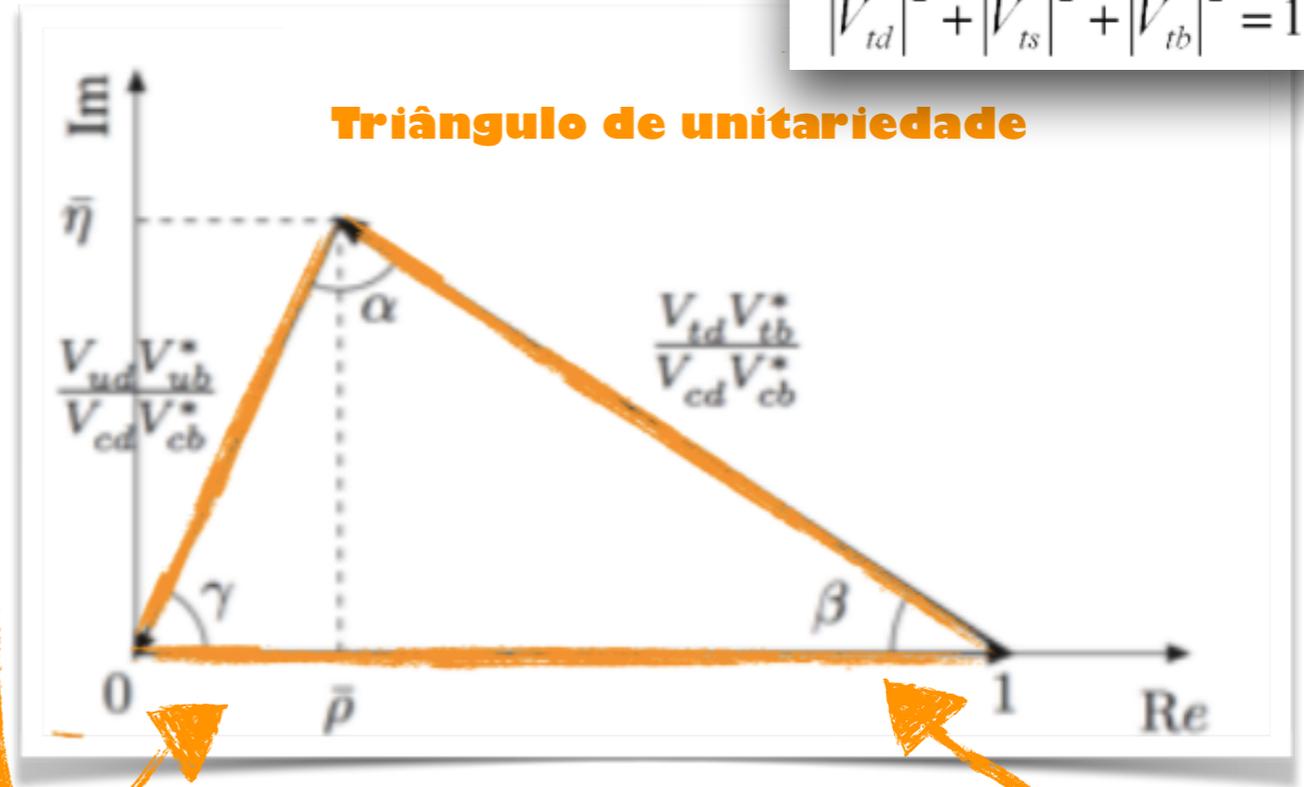
A unitariedade da matriz CKM: $V_{CKM} V_{CKM}^\dagger = 1$

$$\sum_i V_{ij} V_{ik}^* = \delta_{jk} = \sum_i V_{ji} V_{ki}^*$$

Ex.: multiplicando a 1ª e a 3ª colunas

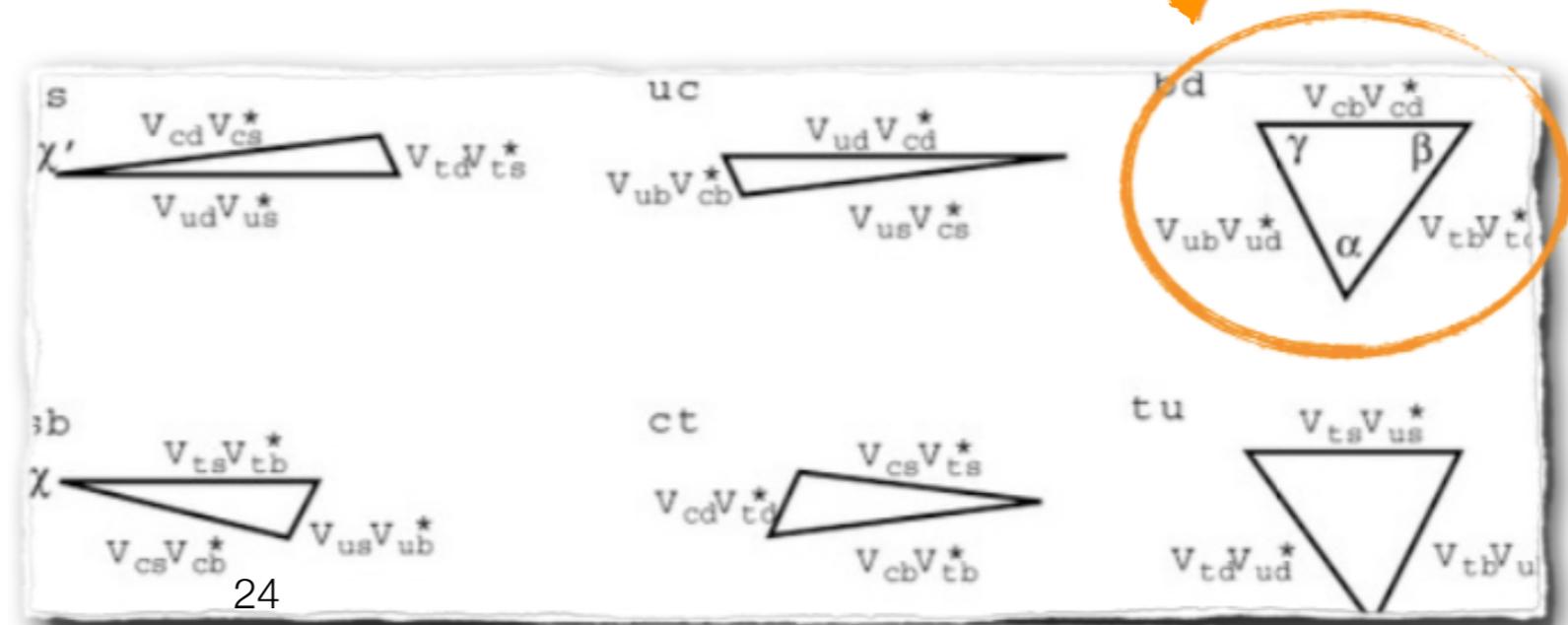
$$V_{ud}V_{ub}^* + V_{cd}V_{cb}^* + V_{td}V_{tb}^* = 0$$

é representado pelo triângulo no plano (ρ, η)



A violação CP é proporcional à area dos triângulos

Existem 6 triângulos, um para cada par de quark

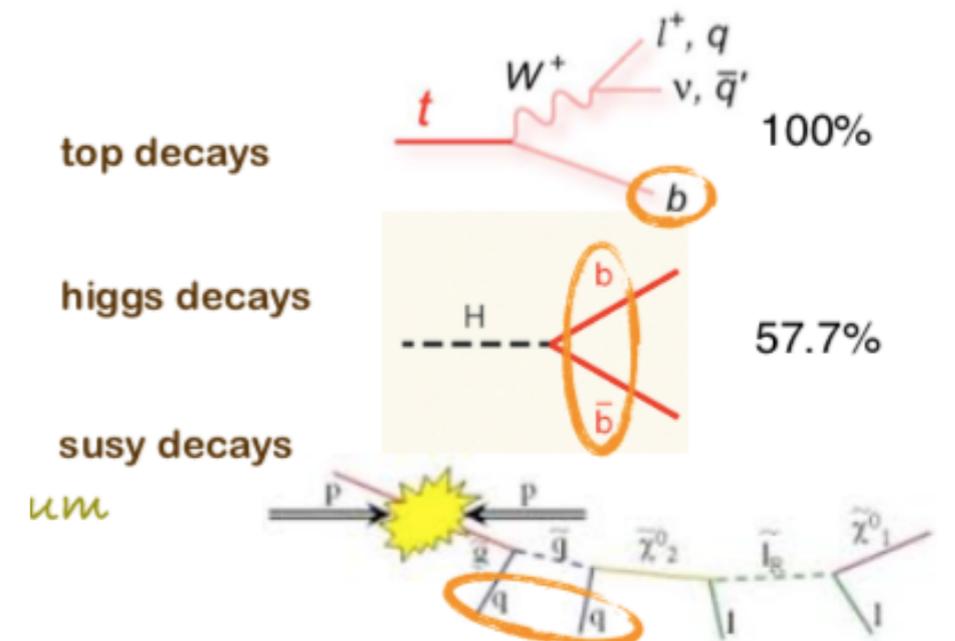
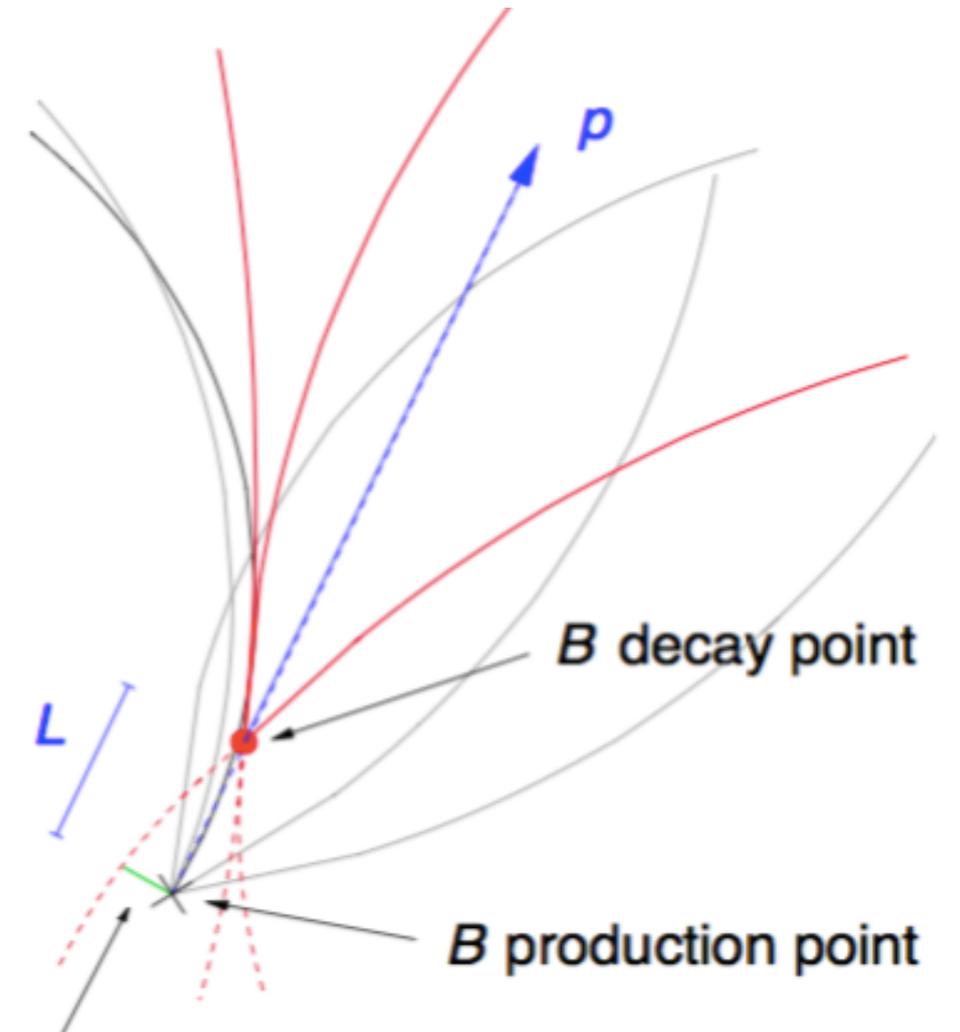


A determinação dos ângulos γ, α e β e checar que somam 180° é um teste fundamental sobre o mecanismo de CP predito pelo MP

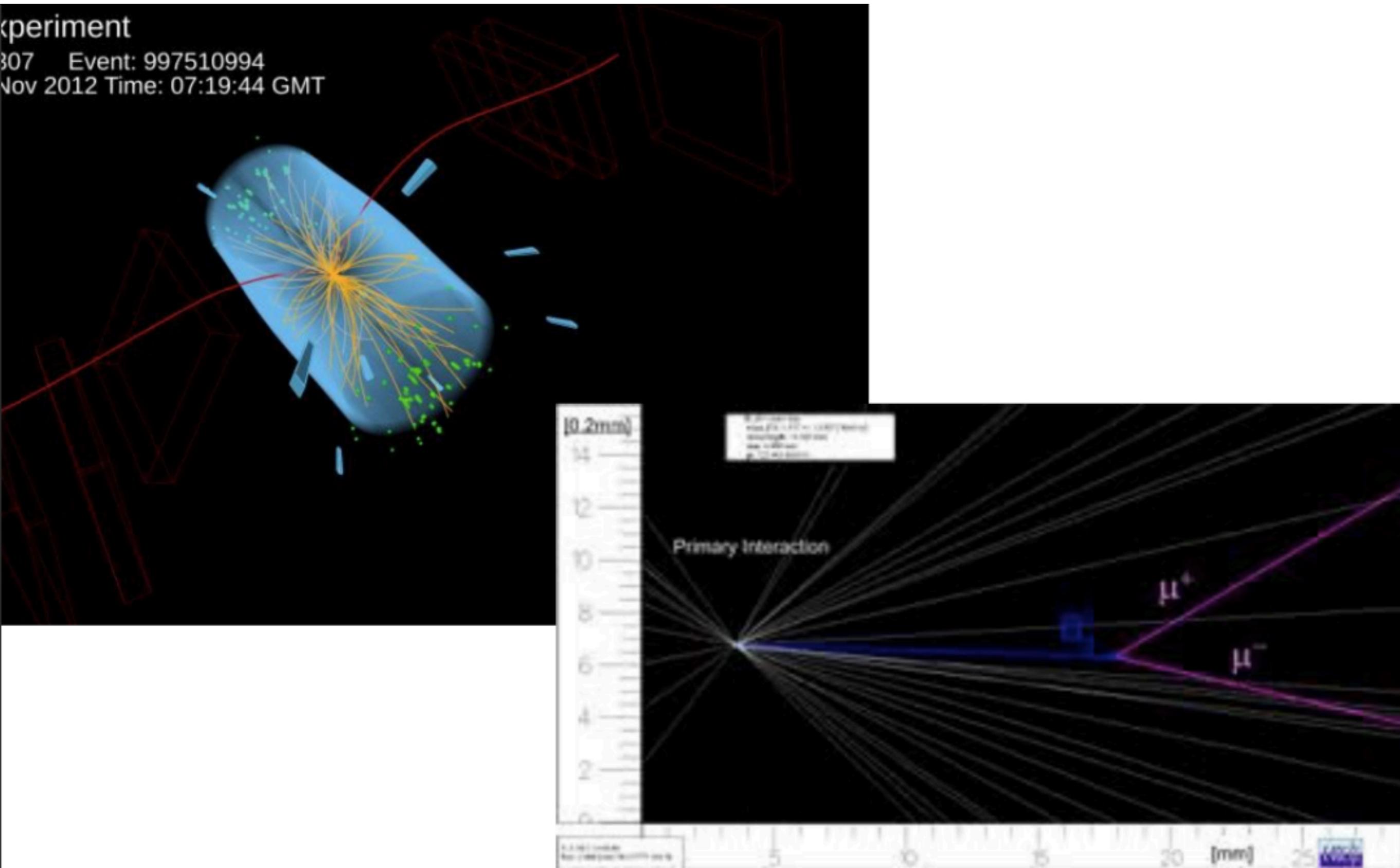
Detecção

Assinatura experimental

- Hádrons charmosos e bottom vivem mais do que as outras partículas instáveis
 - $\tau(D) \sim 0.5-1 \text{ ps}$, $\tau(B) \sim 1.5 \text{ ps}$
 - elas percorrem distâncias (mensuráveis) no detector antes de decair, produzindo uma topologia deslocada
- Amplamente explorado
 - Em análises de sabores pesados
 - b-jet tagging: discriminar b-jets de jatos de quarks leves
 - Em medidas do MP e buscas por AMP: para detectar componentes de sinal SP ($t \rightarrow Wb$, $H \rightarrow bb$, ...)

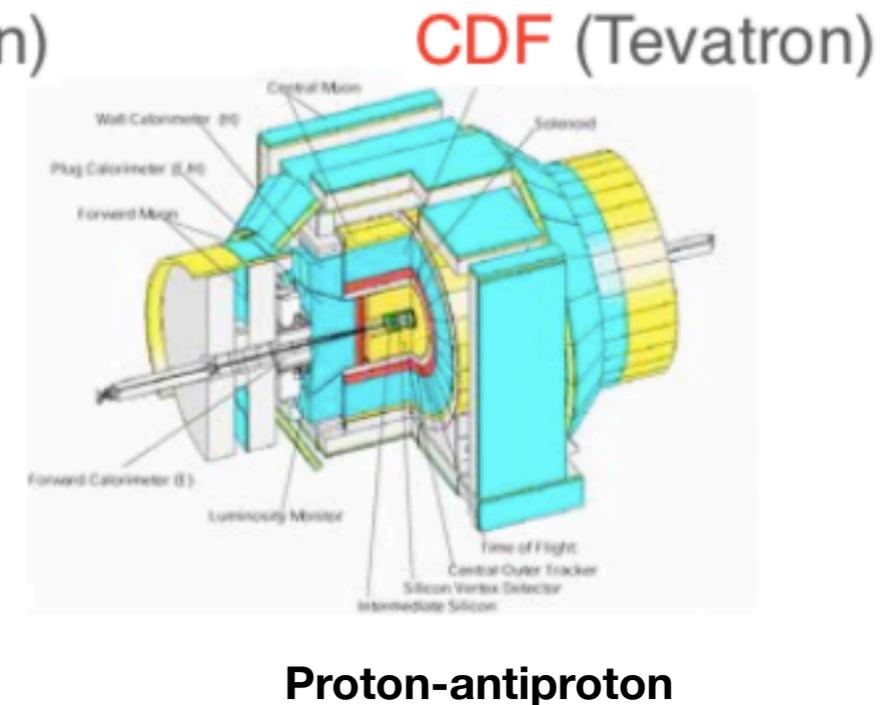
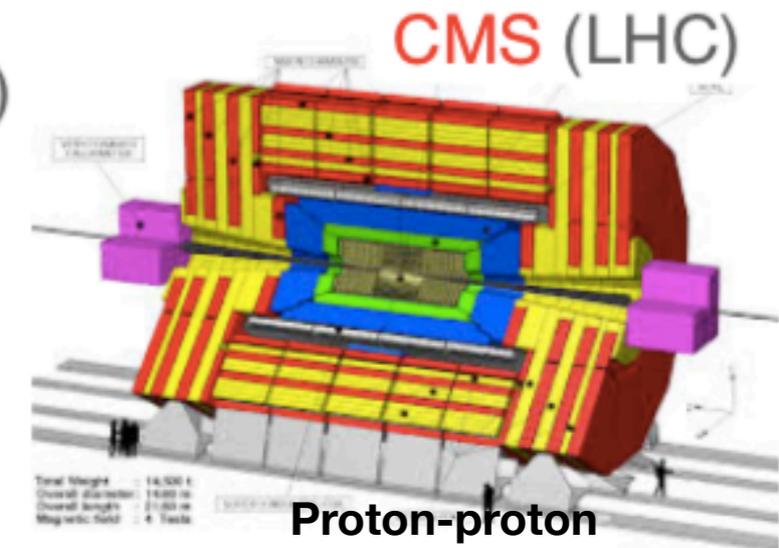
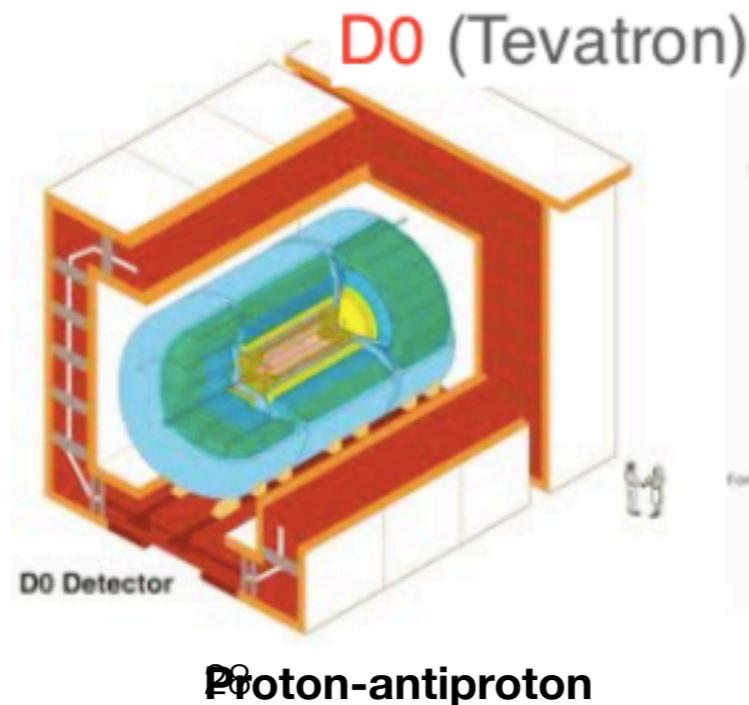
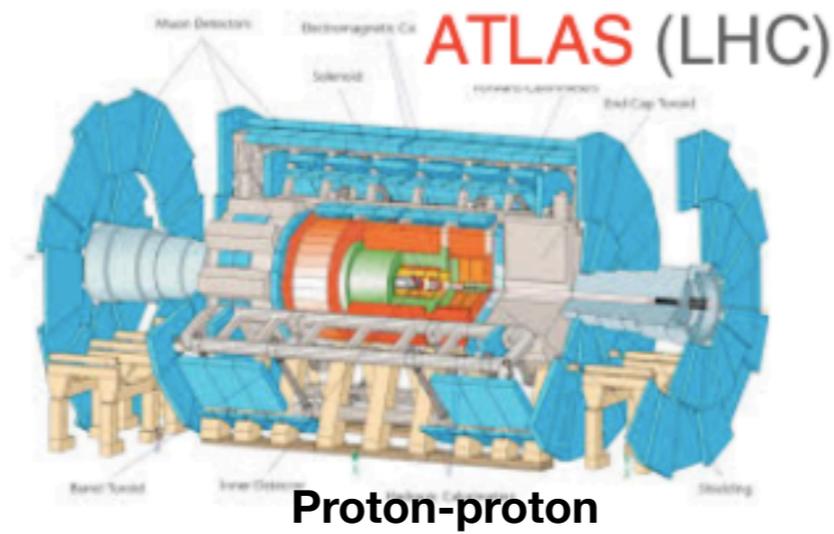
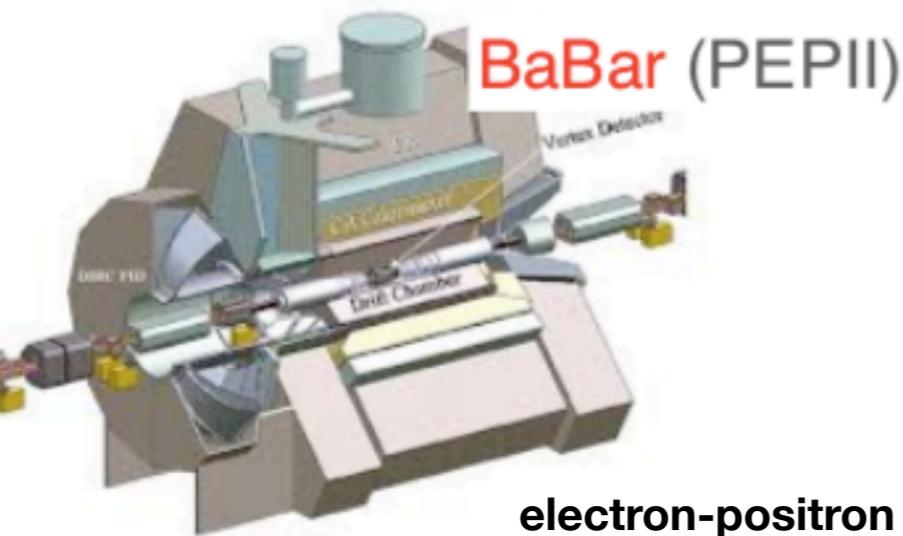
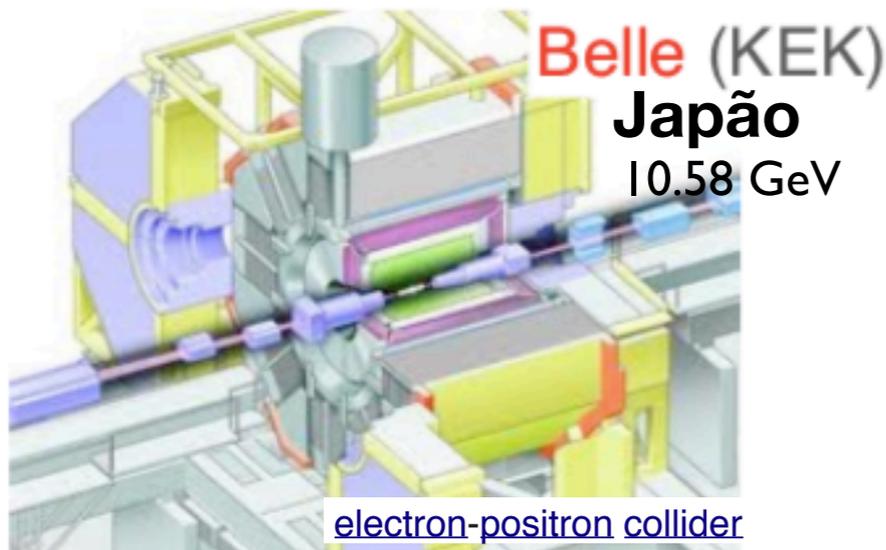
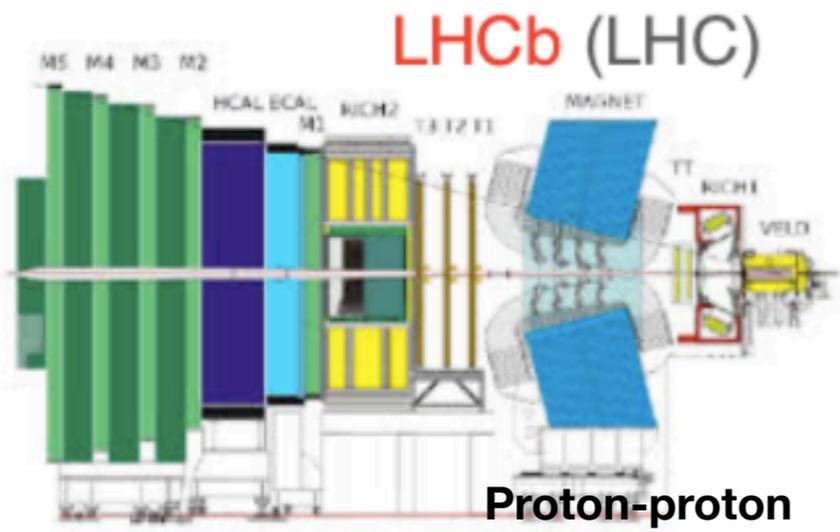


Visualização do evento

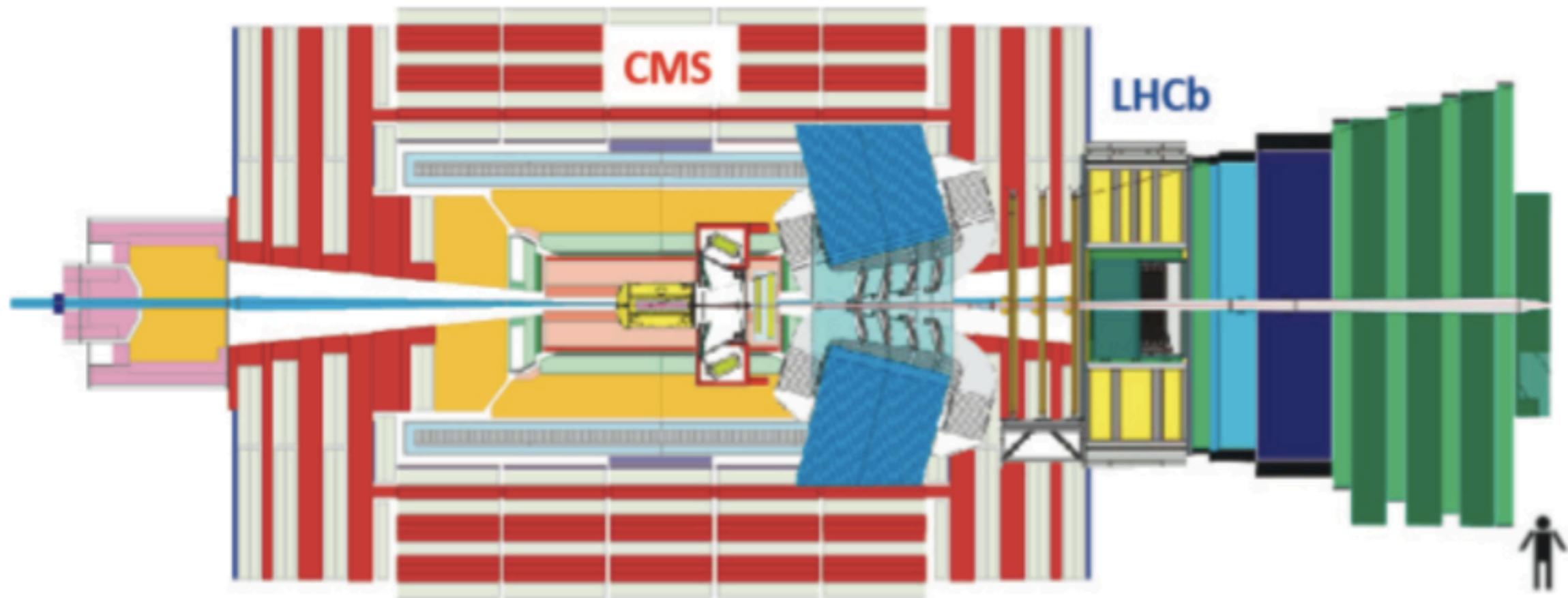


Especializados

Propósitos Gerais



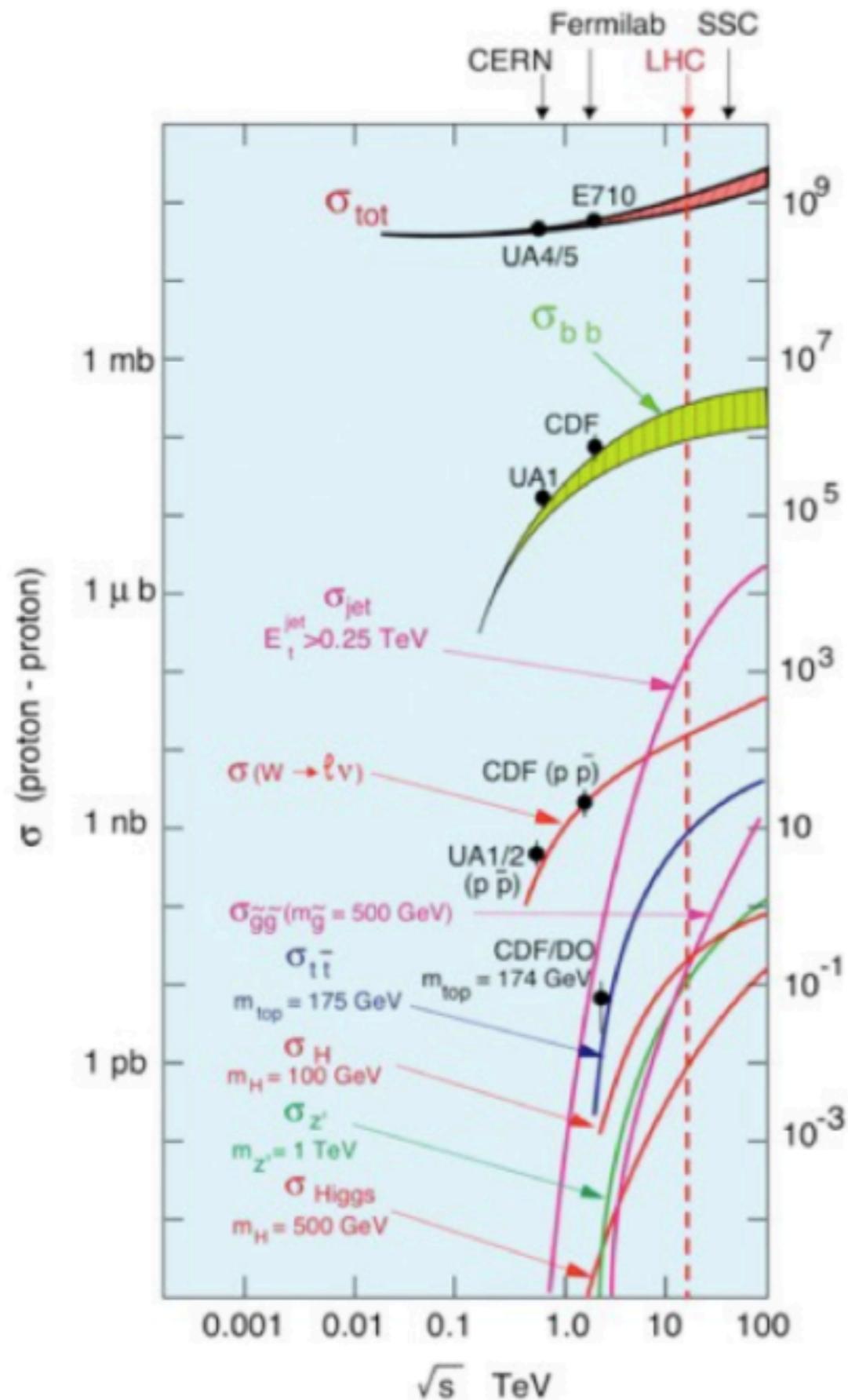
O detector ideal para sabor pesado



Aviso: isso é um (layout do detector combinado) e não existe

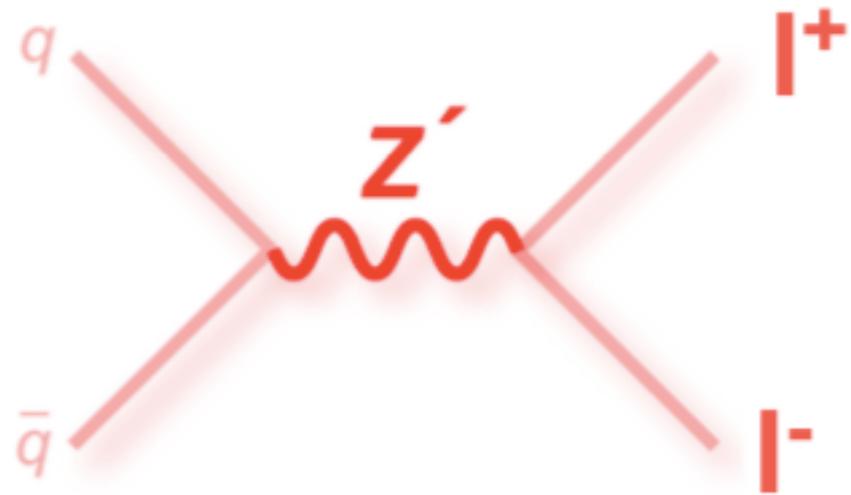
Produção

Produção de sabor pesado



- ampla taxa de produção de SP no LHC
 - ➔ produção seção de choque (σ)
(probabilidade desse evento ocorrer)
 - ➔ Luminosidade (L) acumulada
(número de eventos por segundos por unidade de área)
- LHC: “fábrica” de SP ($N=L.\sigma$)
 - ➔ Medições de precisões e busca por decaimentos raros
- Background para muitos processos físicos explorados no LHC
- Precisa ser completamente compreendido

Objetivos do LHC : encontrar **Física Nova** além do Modelo Padrão



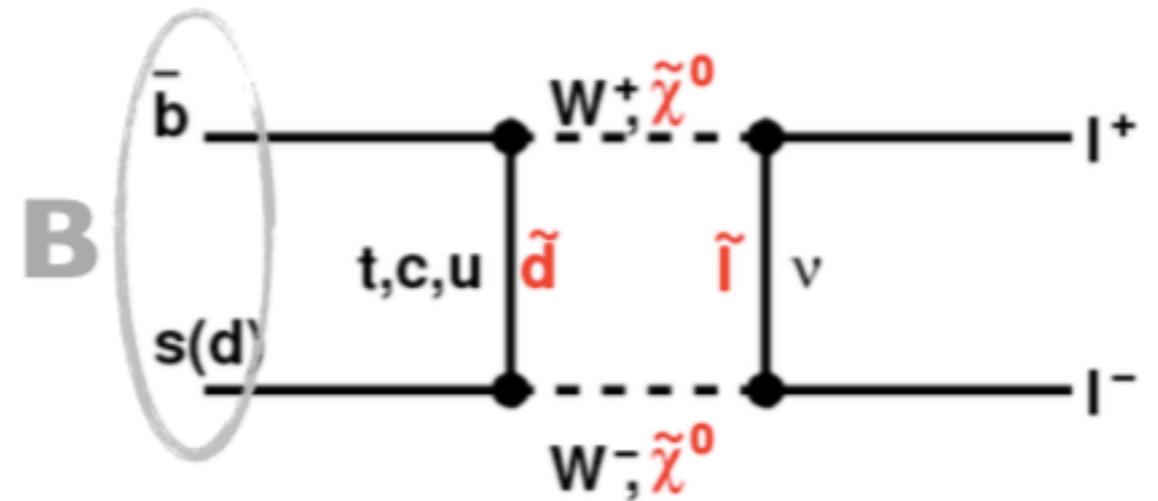
partículas AMP produzidas diretamente em colisão (escala de FN \sim TeV)

maneira direta

Fronteira da Energia



procura por SUSY, dimensões extras, Z' , outras partículas exóticas



partículas AMP modificam processos MP via efeitos da MQ

maneira indireta

Fronteira da Luminosidade



sabor!!

medida do H, Z, W, top, propriedades do hádron b, Busca por decaimentos raros

sabor: limitação da teoria

MODELO PADRÃO

& ALÉM DO MP

SU(3) ⊗

SU(2) ⊗ **U(1)**

⊗ ...



setor forte

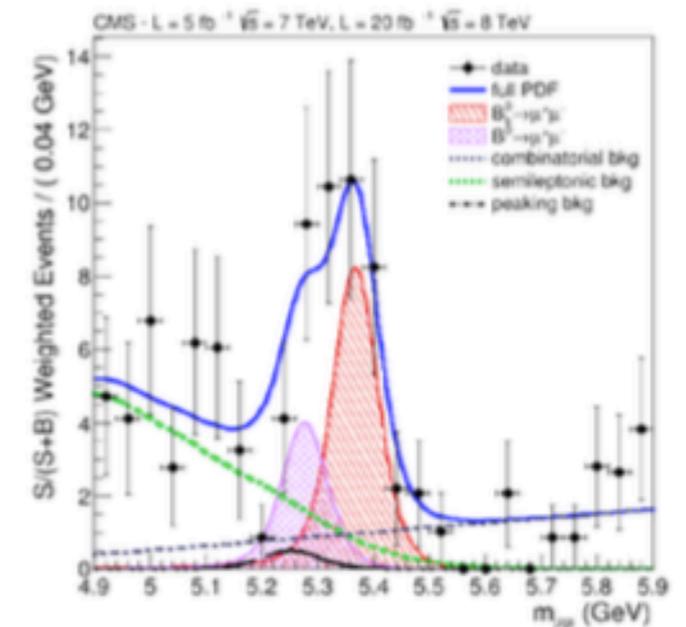
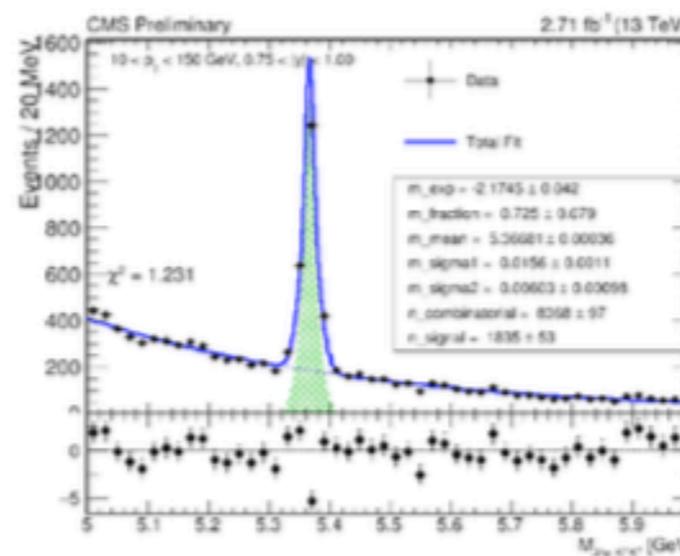
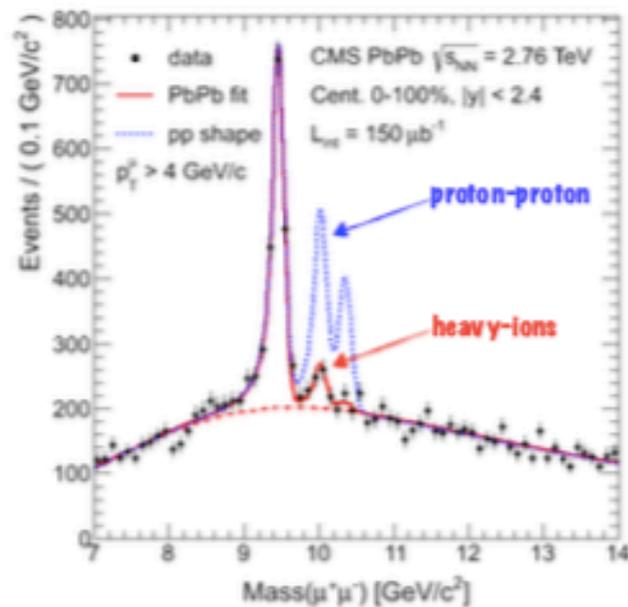
setor eletrofraco

setor novo

Produção de SP & supressão

Decaimento de SP (mixing, cpv, ..)

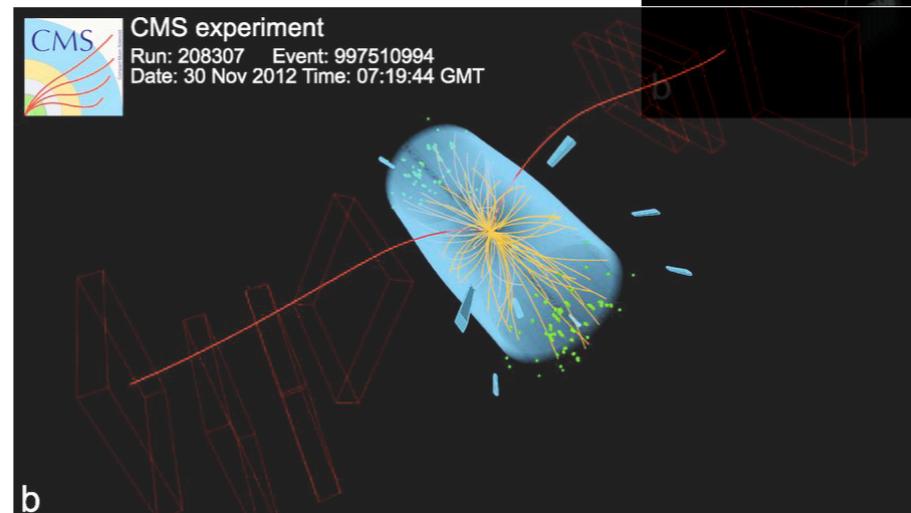
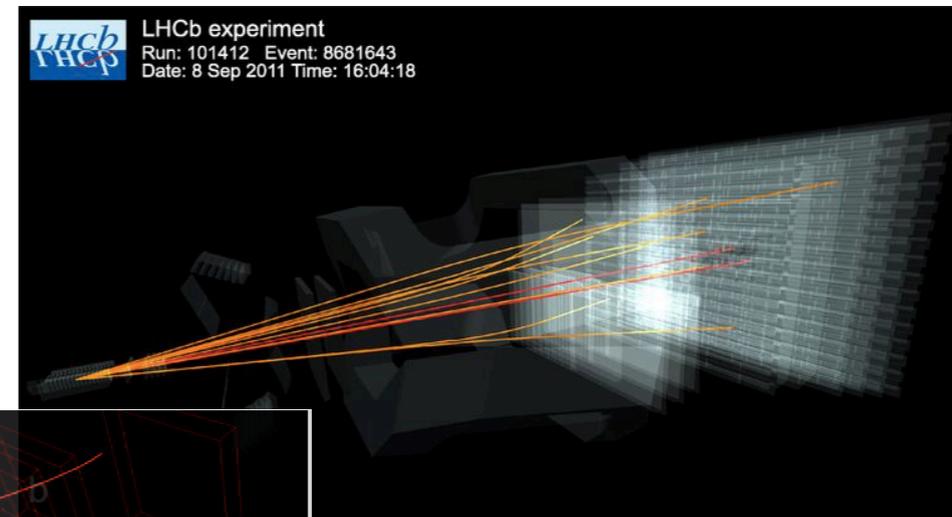
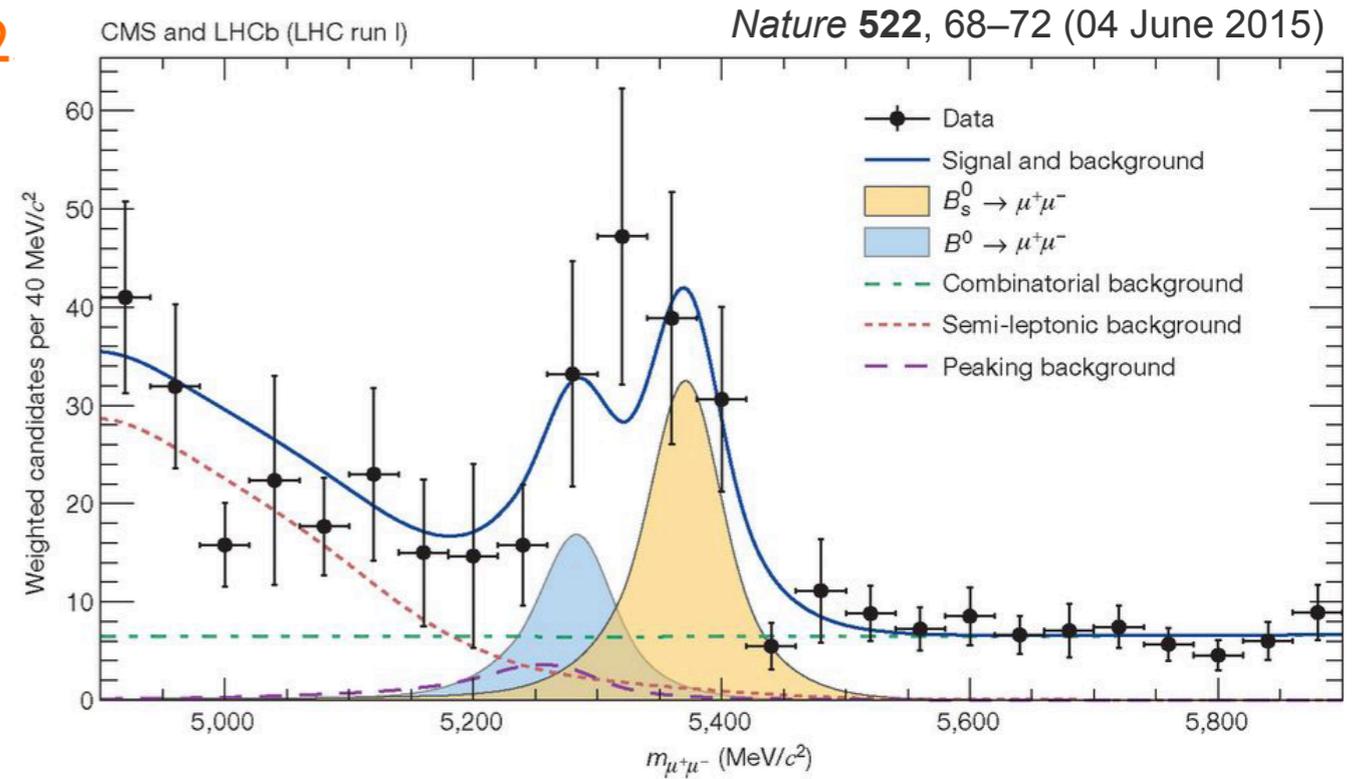
Decaimentos raros



Descobertas do LHC

4-décadas, o esforço da busca... terminou em 2012

Higgs por ATLAS & CMS



Volume 7 16, Issue 1, 17 September 2012 ISSN 0370-2693

ELSEVIER

PHYSICS LETTERS B

Available online at www.sciencedirect.com
SciVerse ScienceDirect

S/(S+B) Weighted Events / 1.5 GeV

m_{TT} (GeV)

CMS

- Data
- S+B Fit
- Rig Fit (Component)
- $\pm 1\sigma$
- $\pm 2\sigma$

$\sqrt{s} = 7$ TeV, L = 5.1 fb⁻¹
 $\sqrt{s} = 8$ TeV, L = 5.3 fb⁻¹

ATLAS 2011-12 $\sqrt{s} = 7-8$ TeV

Local p_0

m_{TT} [GeV]

— Observed — Expected Signal = 1 σ

2 σ
3 σ
4 σ
5 σ
6 σ

<http://www.elsevier.com/locate/physletb>

Extra

