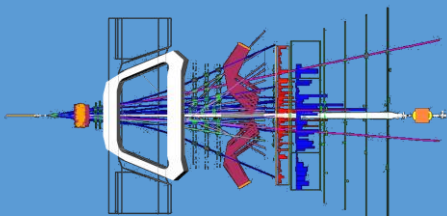
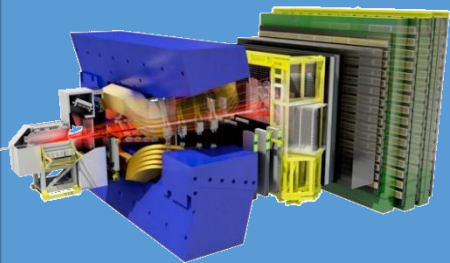


IFIC Summer Student Programme

Valencia,
Julio 2026



La física de sabor y el experimento LHCb

Arantza Oyanguren
(IFIC – CSIC/U.Valencia)

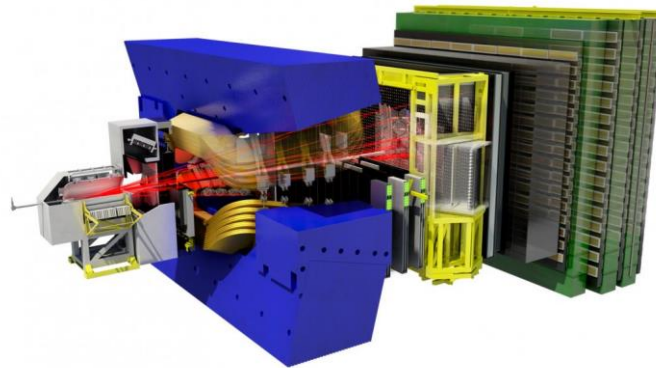


Índice

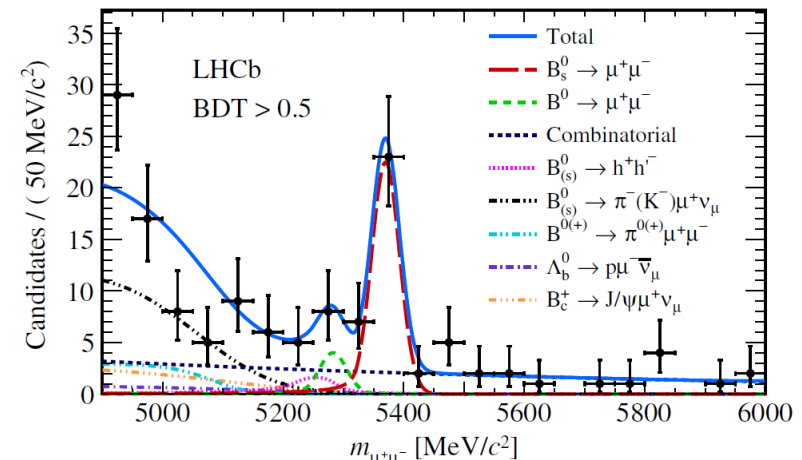
- Introducción: ¿Qué es la física de sabor?



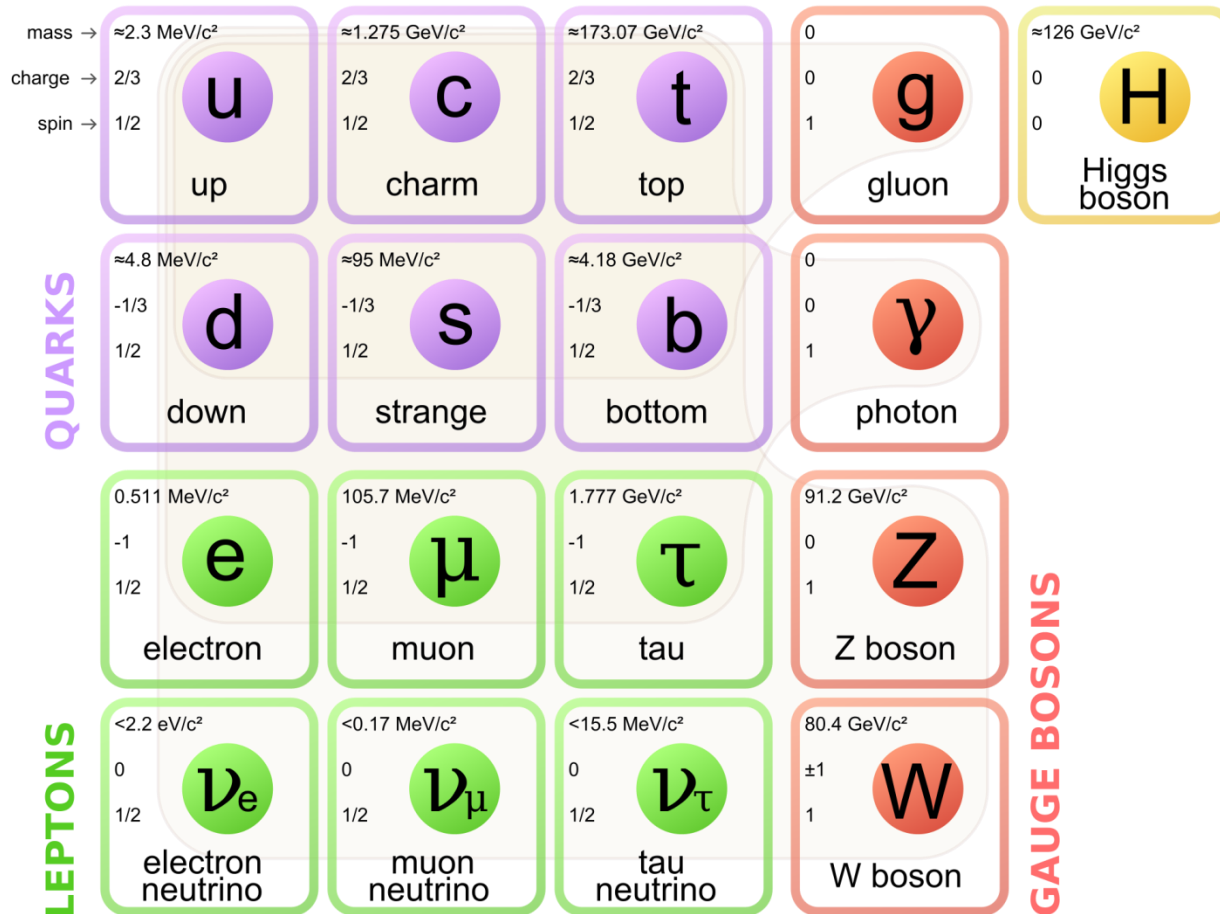
- El experimento LHCb



- ¿Qué medimos?



El Modelo Estándar de las Partículas Elementales

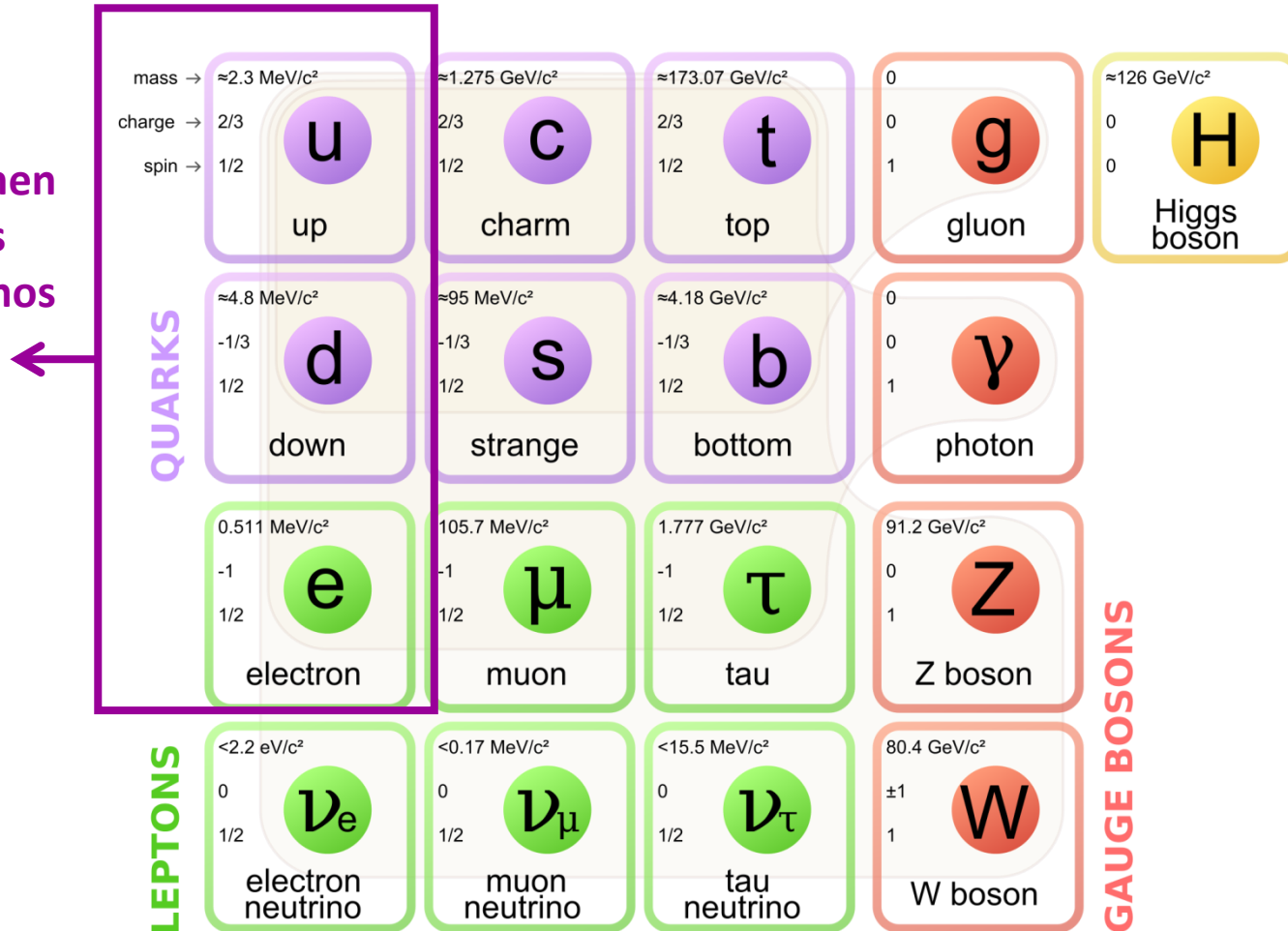


+ sus antipartículas (ej: $e^- \leftrightarrow e^+$)

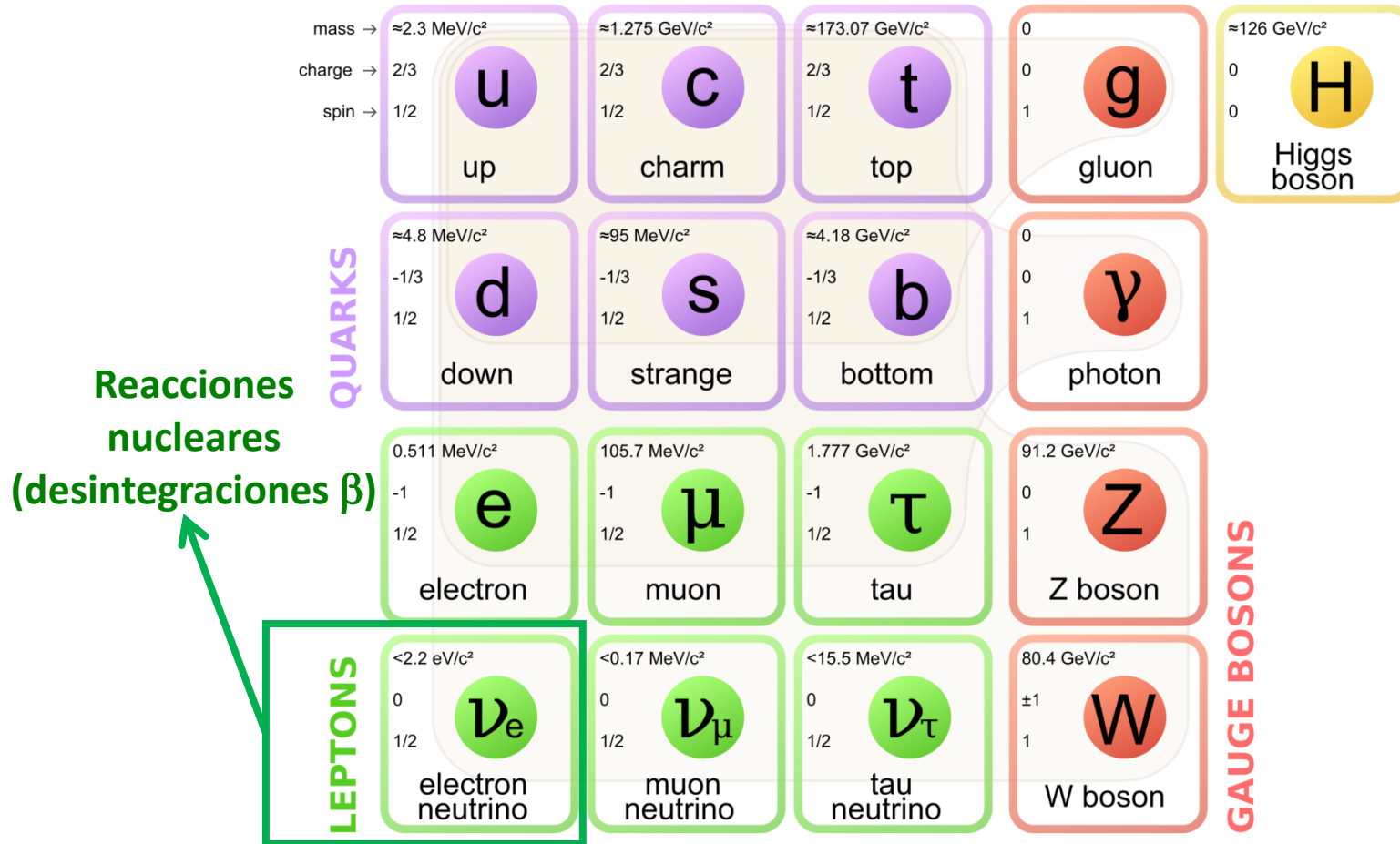
Lo explica la *Teoría Cuántica de Campos Relativista*

El Modelo Estándar de las Partículas Elementales

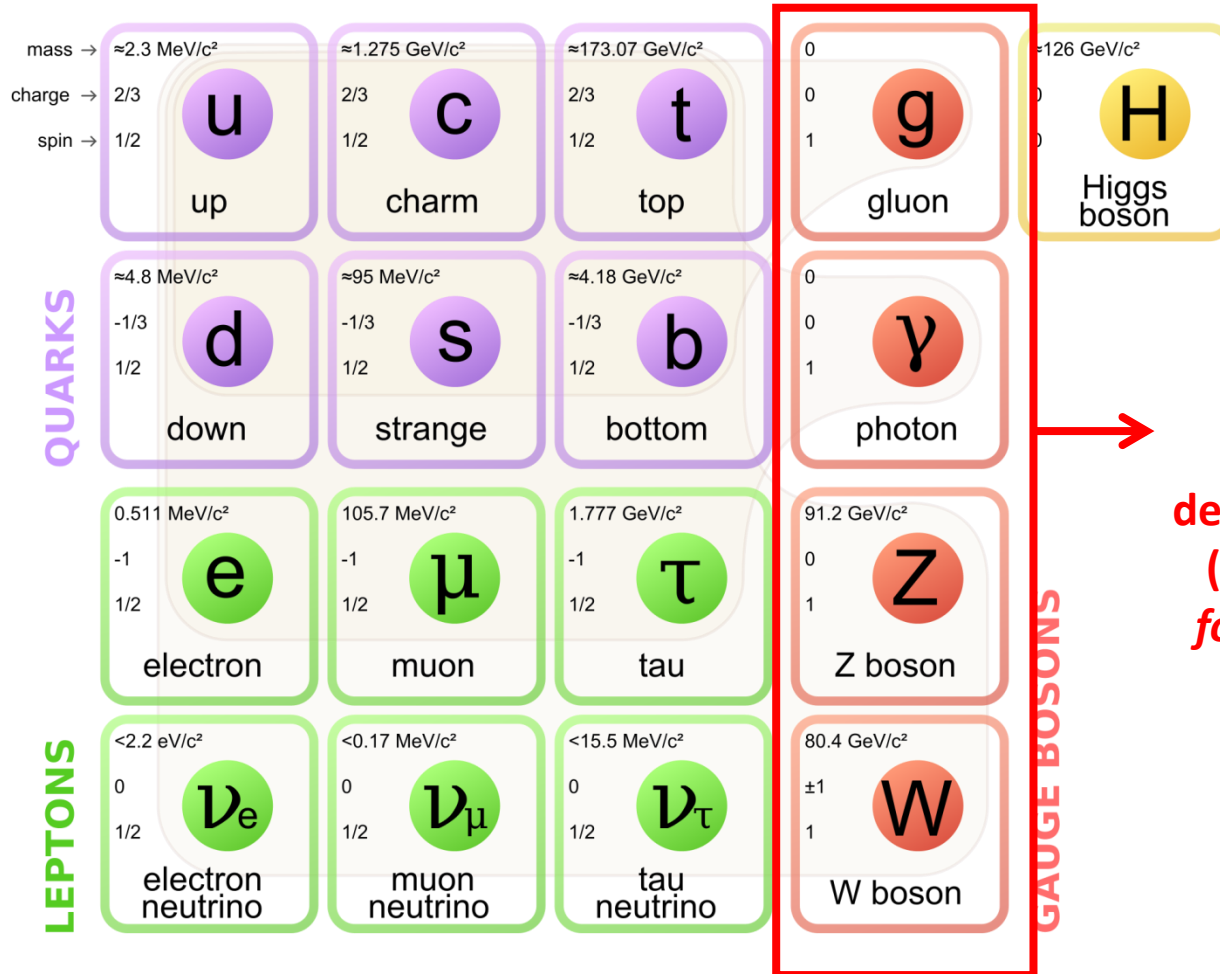
Componen
todos
los átomos



El Modelo Estándar de las Partículas Elementales

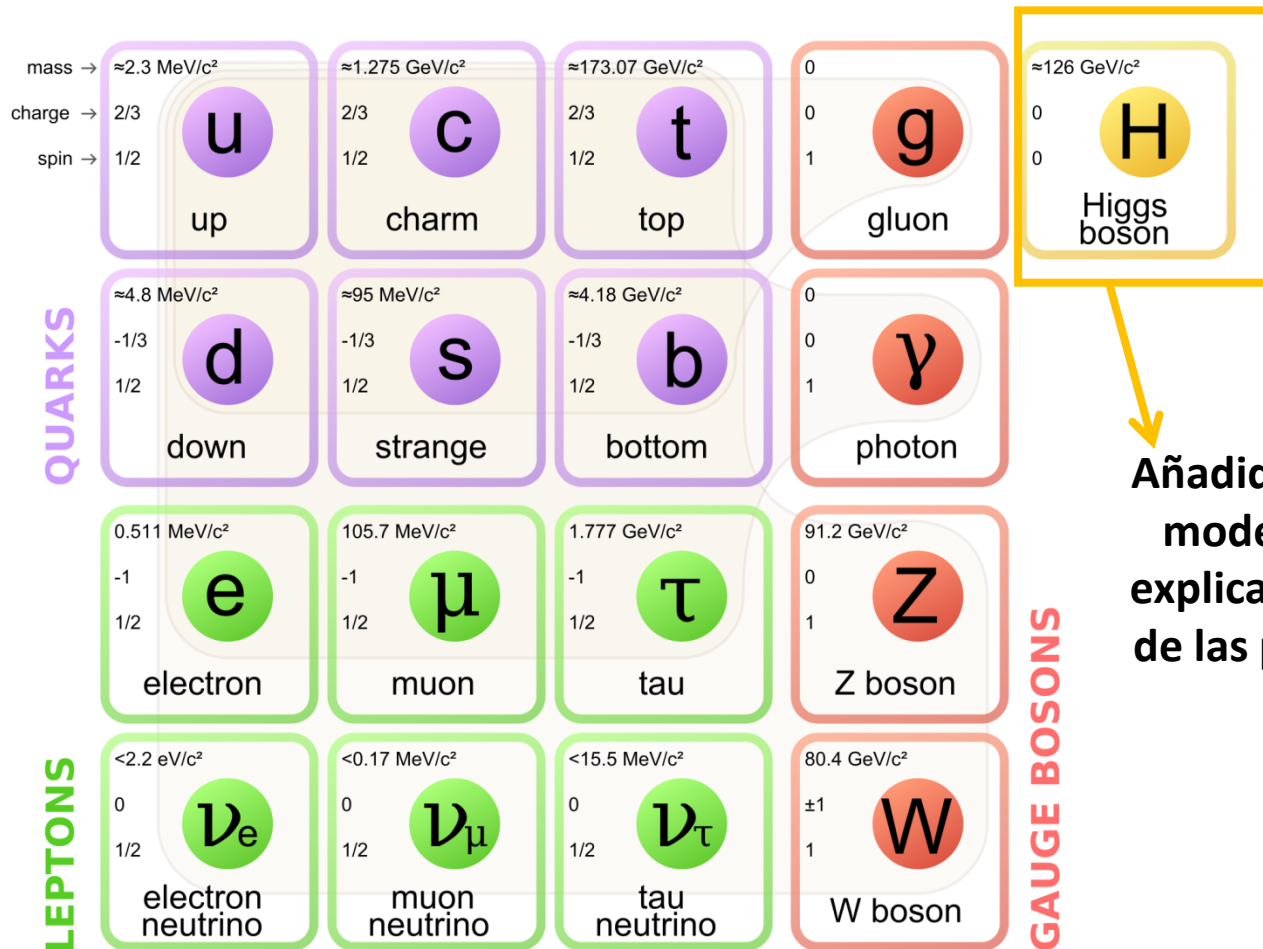


El Modelo Estándar de las Partículas Elementales



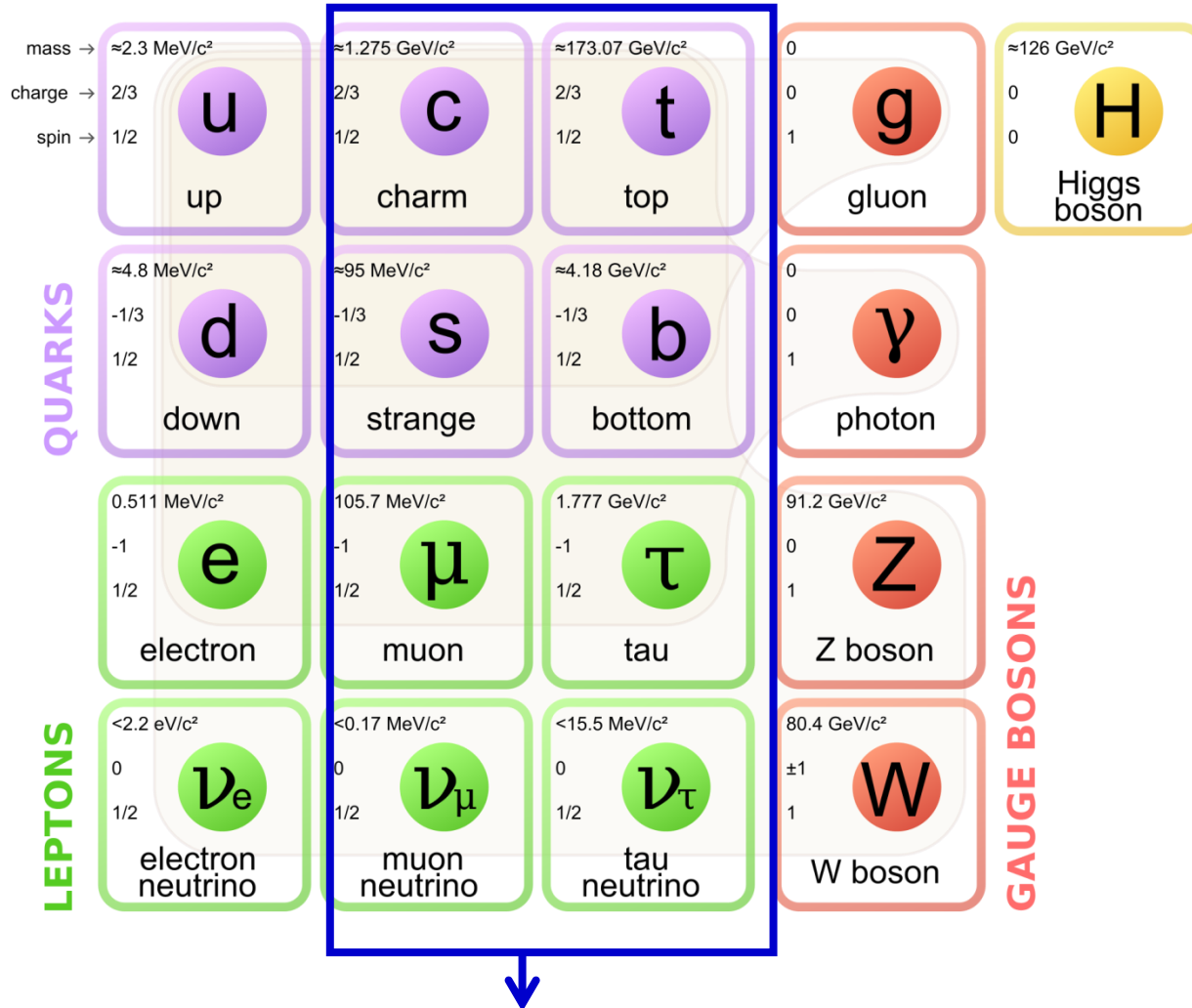
Partículas responsables de las interacciones
(*gluón* $\leftrightarrow$ fuerte
fotón $\leftrightarrow$ electro-magnética
Z, W $\leftrightarrow$ débil)

El Modelo Estándar de las Partículas Elementales



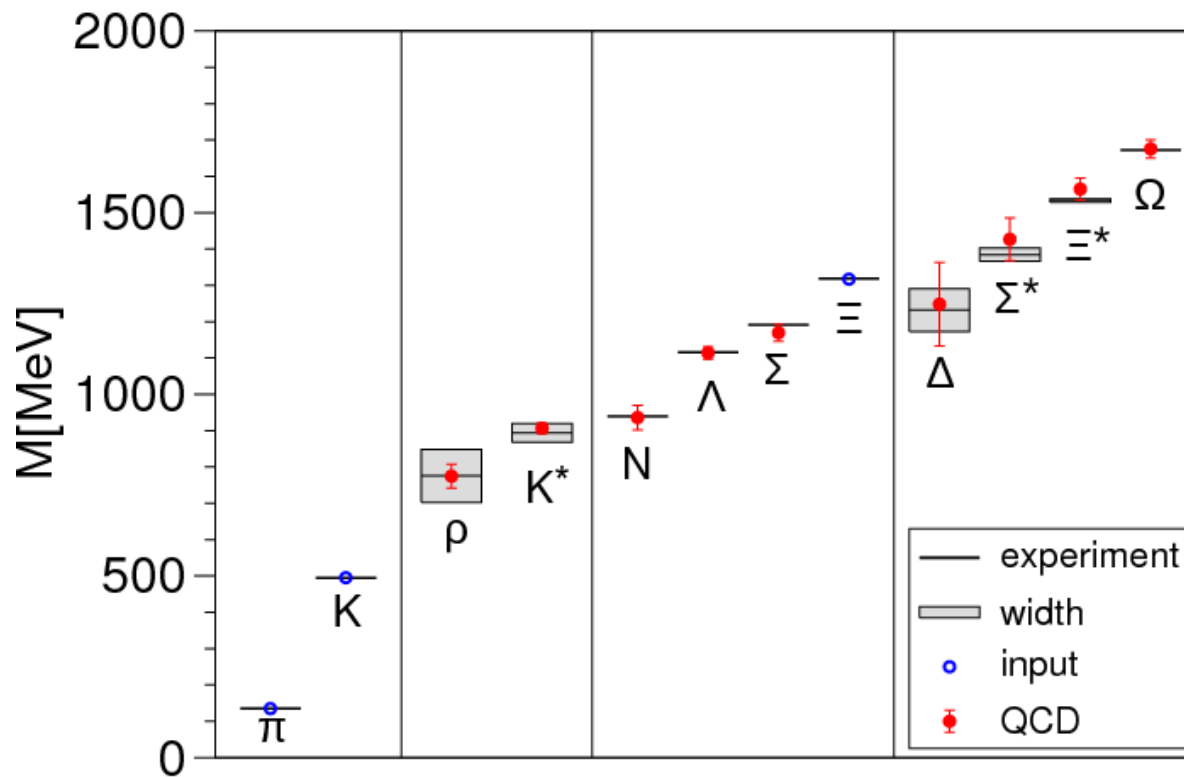
Añadido es este modelo para explicar la masa de las partículas

El Modelo Estándar de las Partículas Elementales



El Modelo Estándar de las Partículas Elementales

A partir de las partículas elementales podemos construir todas las partículas de nuestro ambiente (protones, neutrones, piones...) y las que producimos en aceleradores:

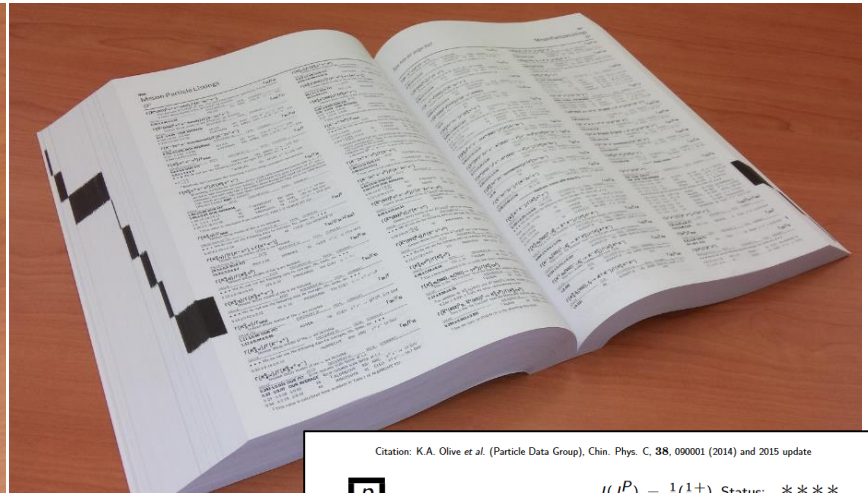
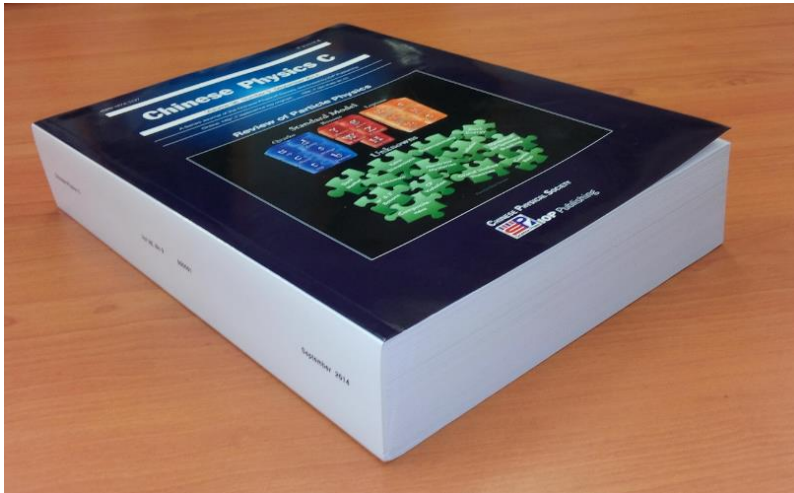


Espectro de hadrones

El Modelo Estándar de las Partículas Elementales

Particle Data Book:

<http://pdg.lbl.gov/>



1675 páginas!!

Citation: K.A. Olive *et al.* (Particle Data Group), Chin. Phys. C, **38**, 090001 (2014) and 2015 update

p	$I(J^P) = \frac{1}{2}(\frac{1}{2}^+)$	Status: ***
-----------------------	---------------------------------------	-------------

p MASS (atomic mass units u)

The mass is known much more precisely in u (atomic mass units) than in MeV. See the next data block.

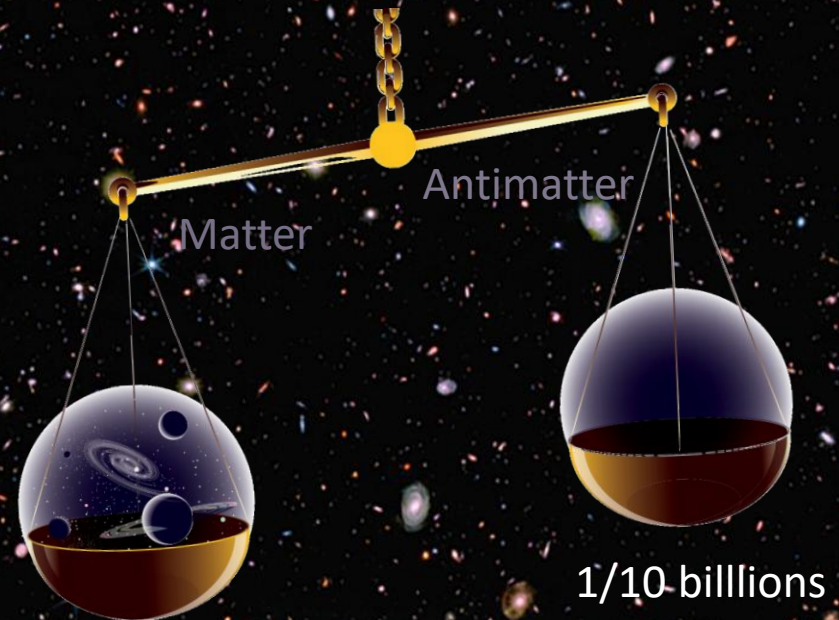
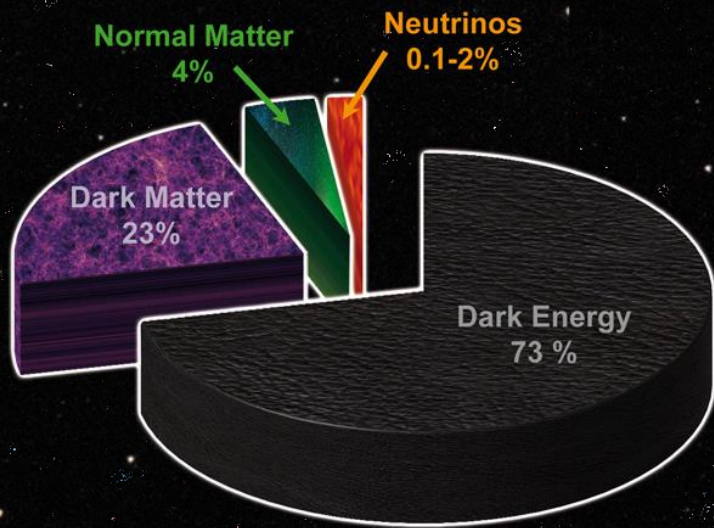
VALUE (u)	DOCUMENT ID	TECN	COMMENT
$1.007276466812 \pm 0.000000000090$	MOHR	12	RVUE 2010 CODATA value
... We do not use the following data for averages, fits, limits, etc. ...			
$1.00727646677 \pm 0.00000000010$	MOHR	08	RVUE 2006 CODATA value
$1.00727646688 \pm 0.00000000013$	MOHR	05	RVUE 2002 CODATA value
$1.00727646688 \pm 0.00000000013$	MOHR	99	RVUE 1998 CODATA value
$1.007276470 \pm 0.000000012$	COHEN	87	RVUE 1986 CODATA value

p MASS (MeV)

The mass is known much more precisely in u (atomic mass units) than in MeV. The conversion from u to MeV, $1 u = 931.494\,061(21) \text{ MeV}/c^2$ (MOHR 12, the 2010 CODATA value), involves the relatively poorly known electronic charge.

El Modelo Estándar de las Partículas Elementales

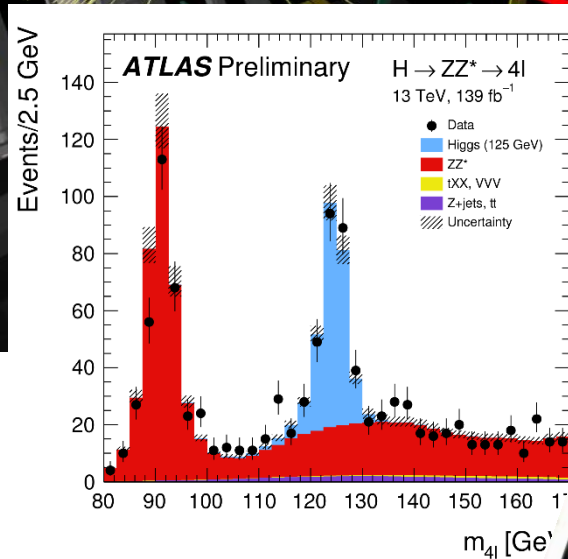
Misterios de nuestro Universo...



La última partícula elemental descubierta: **el bosón de Higgs**

El Modelo Estándar de las Partículas Elementales

El bosón de Higgs



[ATLAS-CONF-2019-025]



El Modelo Estándar de las Partículas Elementales

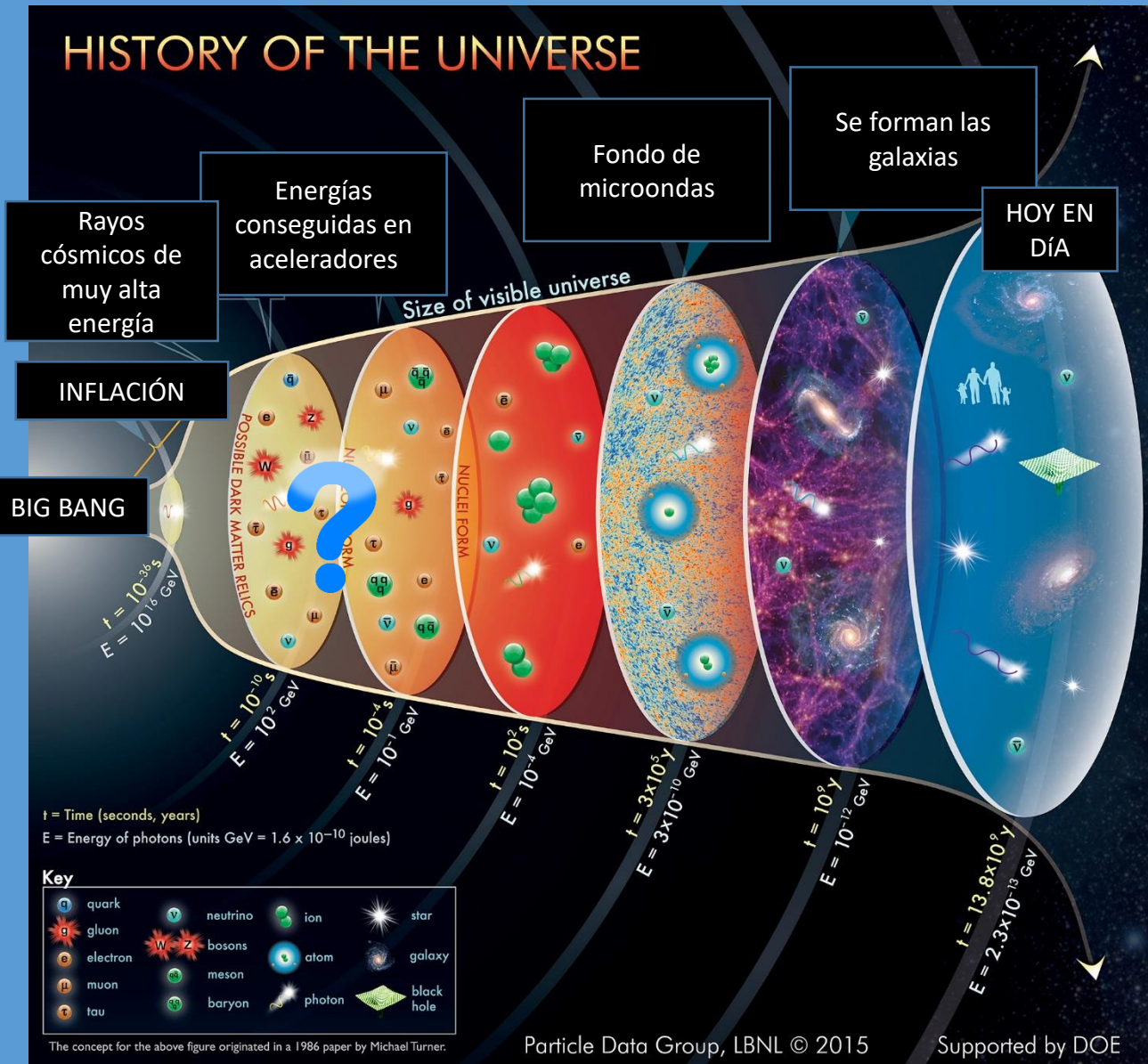
Lo que no entendemos...

- ¿Por qué hay **tantas partículas elementales**?
- ¿Son todas **las fuerzas** la misma en realidad?
- ¿El Higgs explica **el origen de la masa** completamente?
- ¿Por qué nuestro universo está formado principalmente por **materia** y no hay tanta **antimateria**?
- ¿Cómo encaja la **masa de los neutrinos**?
- ¿Qué son la **materia oscura** y la **energía oscura**?
- ¿Hay una **teoría** de la naturaleza más **fundamental** que incluya la gravedad?



¿Dónde está la antimateria?

HISTORY OF THE UNIVERSE



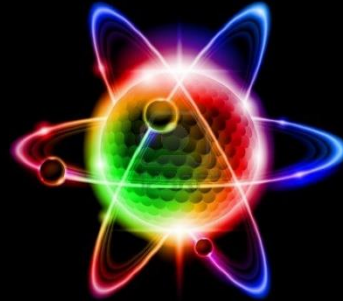
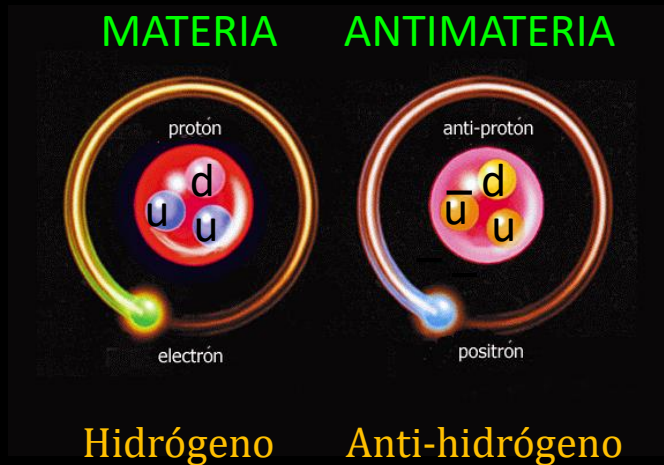
Después del Big Bang, en el Universo se crearon tantas partículas de materia como de antimateria.

Sin embargo, en algún momento y por alguna razón que aún no entendemos, las antipartículas desaparecieron.

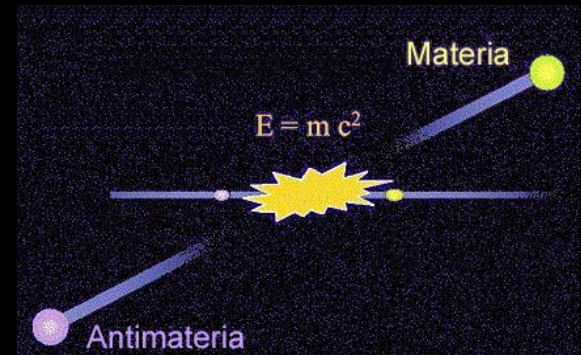
El **experimento LHCb** está diseñado para intentar entender qué pasó con esa antimateria.

El Modelo Estándar de las Partículas Elementales

La antimateria



- Tiene la misma propiedad que la materia pero con carga opuesta.
- Se aniquilan al colisionar con la materia emitiendo fotones. $e^- + e^+ \rightarrow \gamma\gamma$
- En el Big-Bang se creó tanta materia como antimateria, no se sabe qué ha pasado con ella, los colisionadores la crean y estudian los procesos que las implican



La física de sabor (el sector de quarks)



Cabibbo



Kobayashi



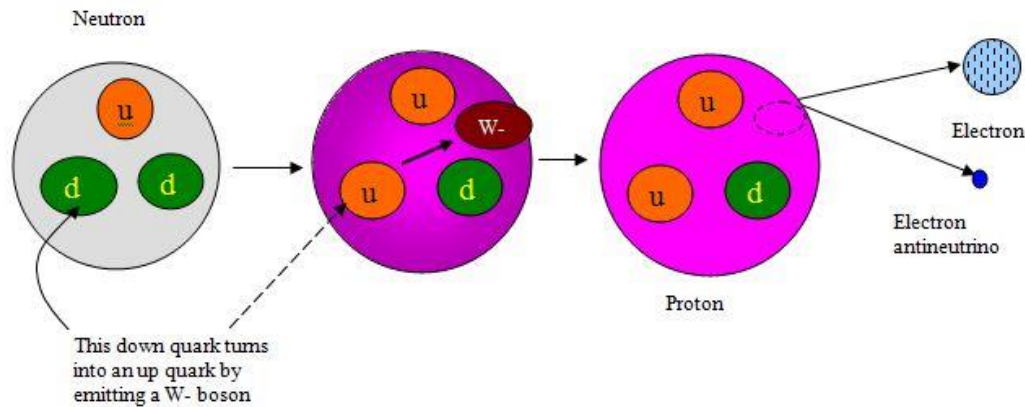
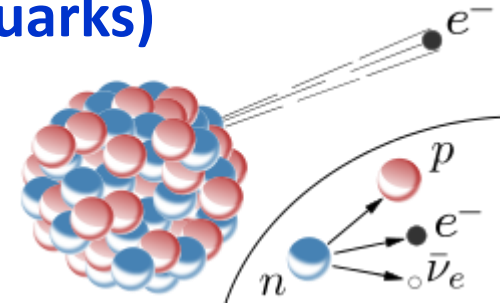
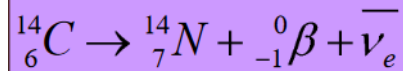
Maskawa



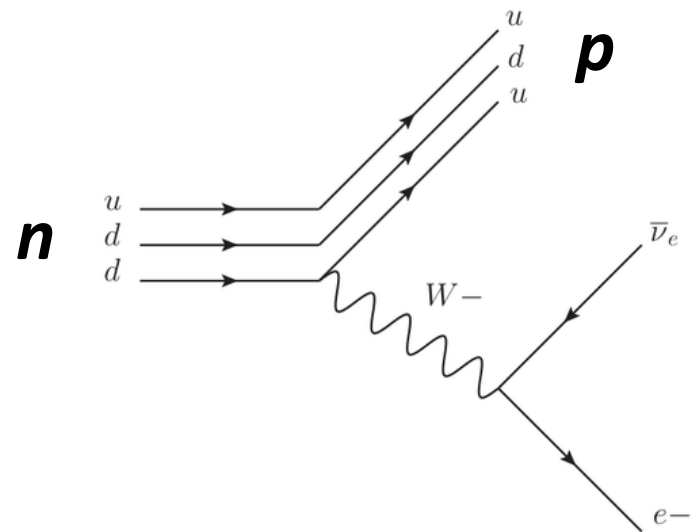
$$V_{\text{CKM}} = \begin{pmatrix} & d & s & b \\ u & \text{large blue square} & \text{small blue square} & \text{tiny red square} \\ c & \text{small blue square} & \text{large blue square} & \text{tiny blue square} \\ t & \text{tiny red square} & \text{small blue square} & \text{large blue square} \end{pmatrix}$$

La física de sabor (el sector de quarks)

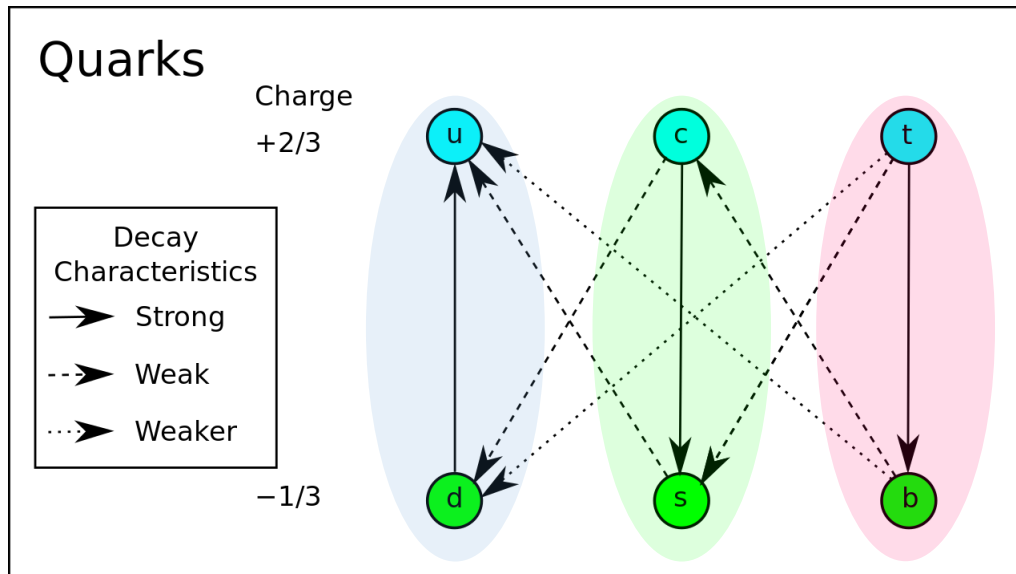
Ejemplo: desintegración β radiactiva



¿Cómo se explica a nivel fundamental?
(diagrama de Feynman)

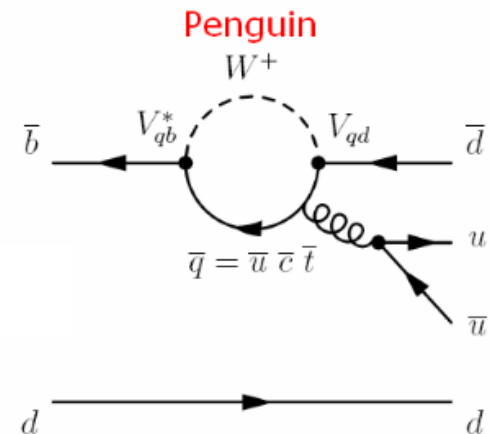
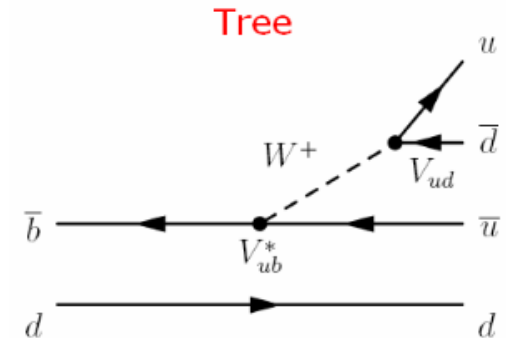


La física de sabor (el sector de quarks)



$$V_{\text{CKM}} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \approx \begin{bmatrix} 0.974 & 0.225 & 0.003 \\ 0.225 & 0.973 & 0.041 \\ 0.009 & 0.040 & 0.999 \end{bmatrix},$$

- Se favorecen transiciones entre la misma familia
- Algunas transiciones son muy raras, ej: V_{ub}
- Si no hay cambio de carga están prohibidas ($b \rightarrow d$) (pueden ocurrir vía caminos complicados (*loops*) con muchas transiciones intermedias, lo que implica probabilidades muy pequeñas)
- Si ocurren en proporciones mayores a las esperadas → **NUEVA PARTÍCULA INVOLUCRADA**



La física de sabor (el sector de quarks)

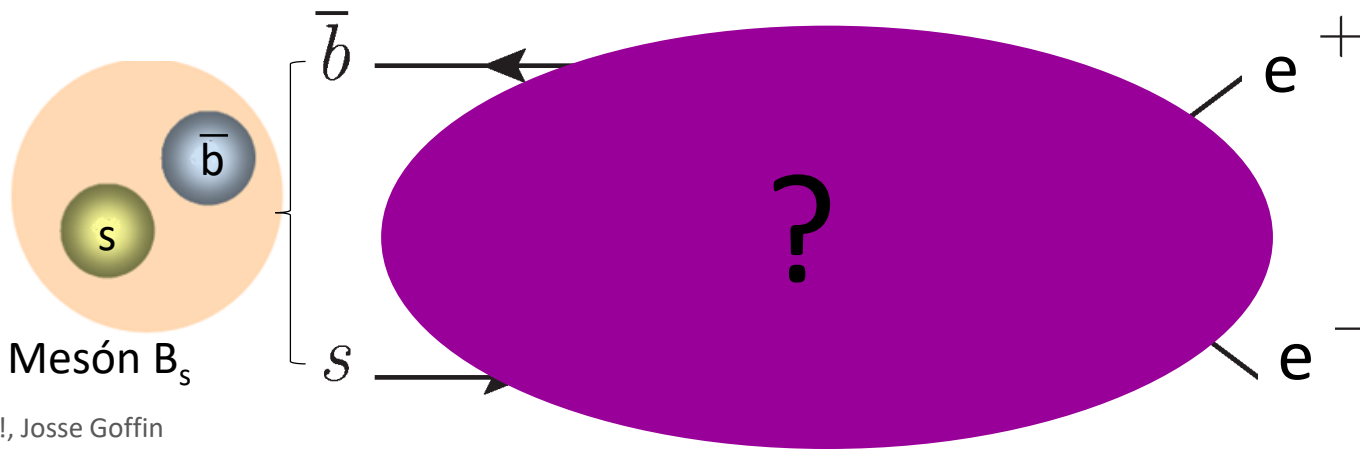


Lo que vemos

Lo qué pensamos

Lo qué es

Se puede comprobar de forma indirecta
estudiando efectos cuánticos:



Estudiando
en detalle
las partículas
que se producen

La física de sabor (el sector de quarks)

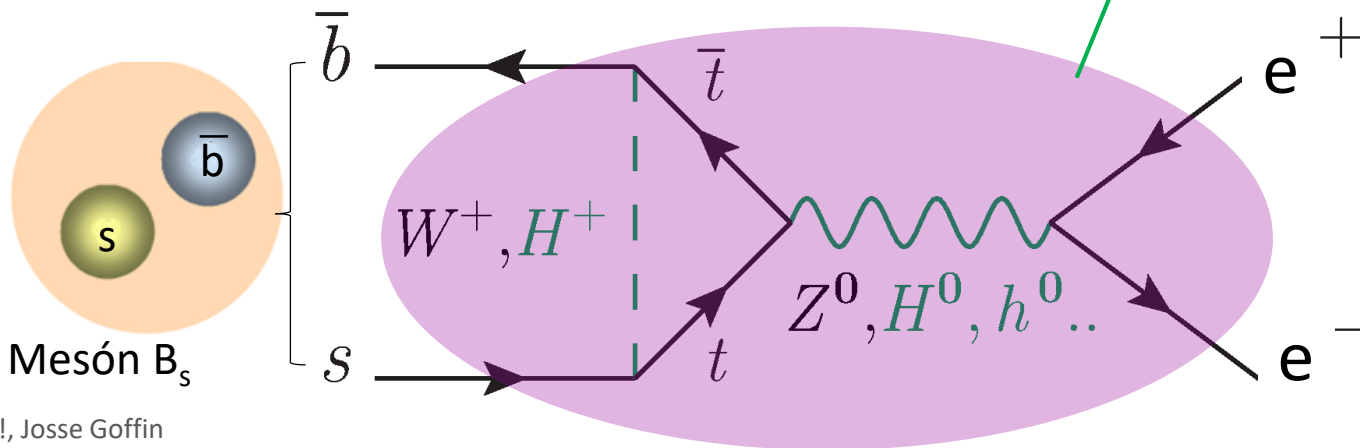


Lo que vemos

Lo qué pensamos

Lo qué es

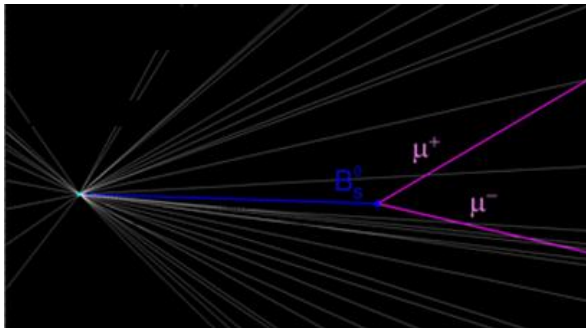
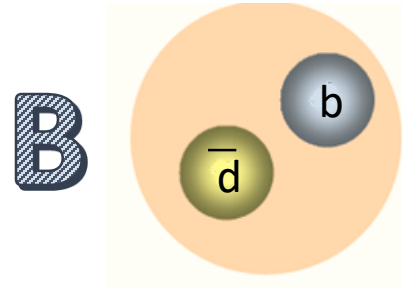
Se puede comprobar de forma indirecta
estudiando efectos cuánticos:



Estudiando
en detalle
las partículas
que se producen

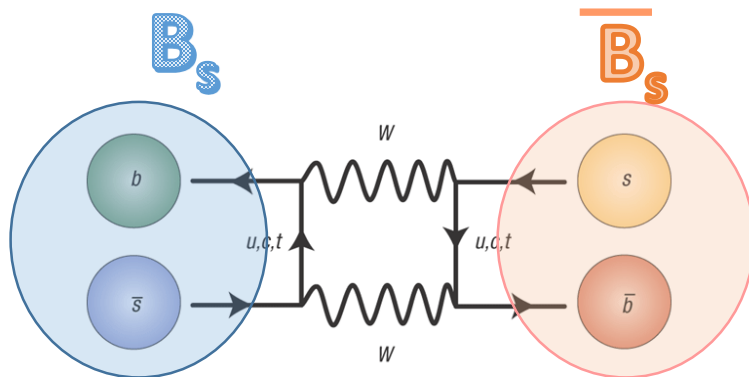
La física de sabor (el sector de quarks)

El quark b ...
(física de sabores pesados)



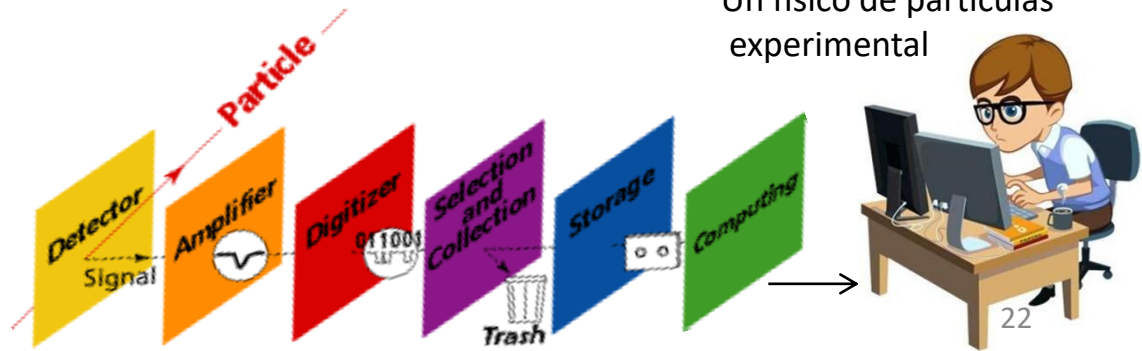
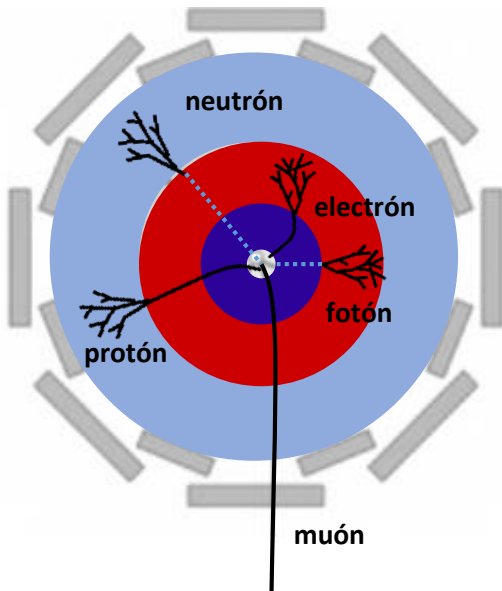
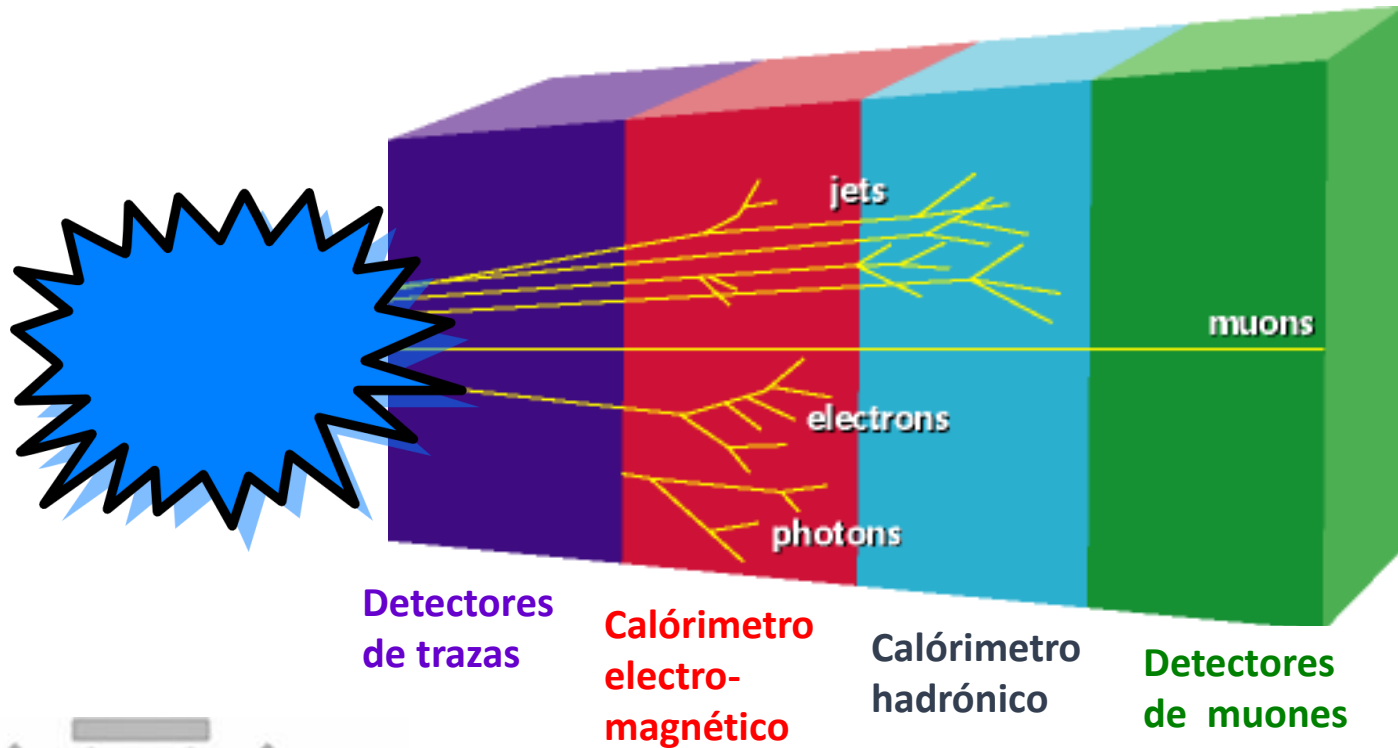
- Al ser menos pesado que el quark t está obligado a cambiar de familia, eso hace que su probabilidad de transición sea más pequeña en general

- Su tiempo de desintegración es de $t=1.5\text{ps}$ por lo que recorre una distancia que se puede medir en los detectores



- Tiene una propiedad especial, muta entre partícula y antipartícula, permitiendo el estudio de la asimetría materia-antimateria en el universo

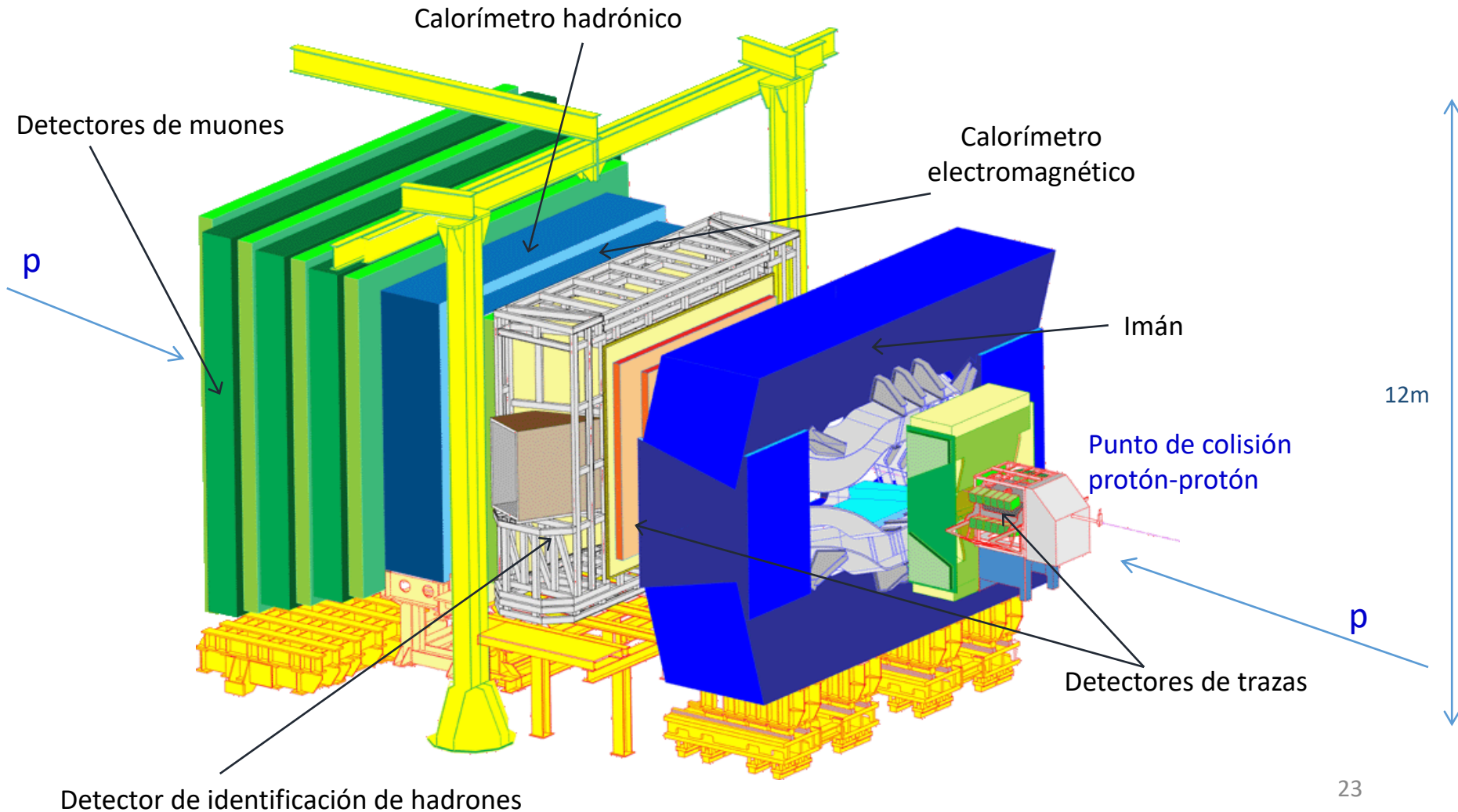
¿Cómo detectamos las partículas?



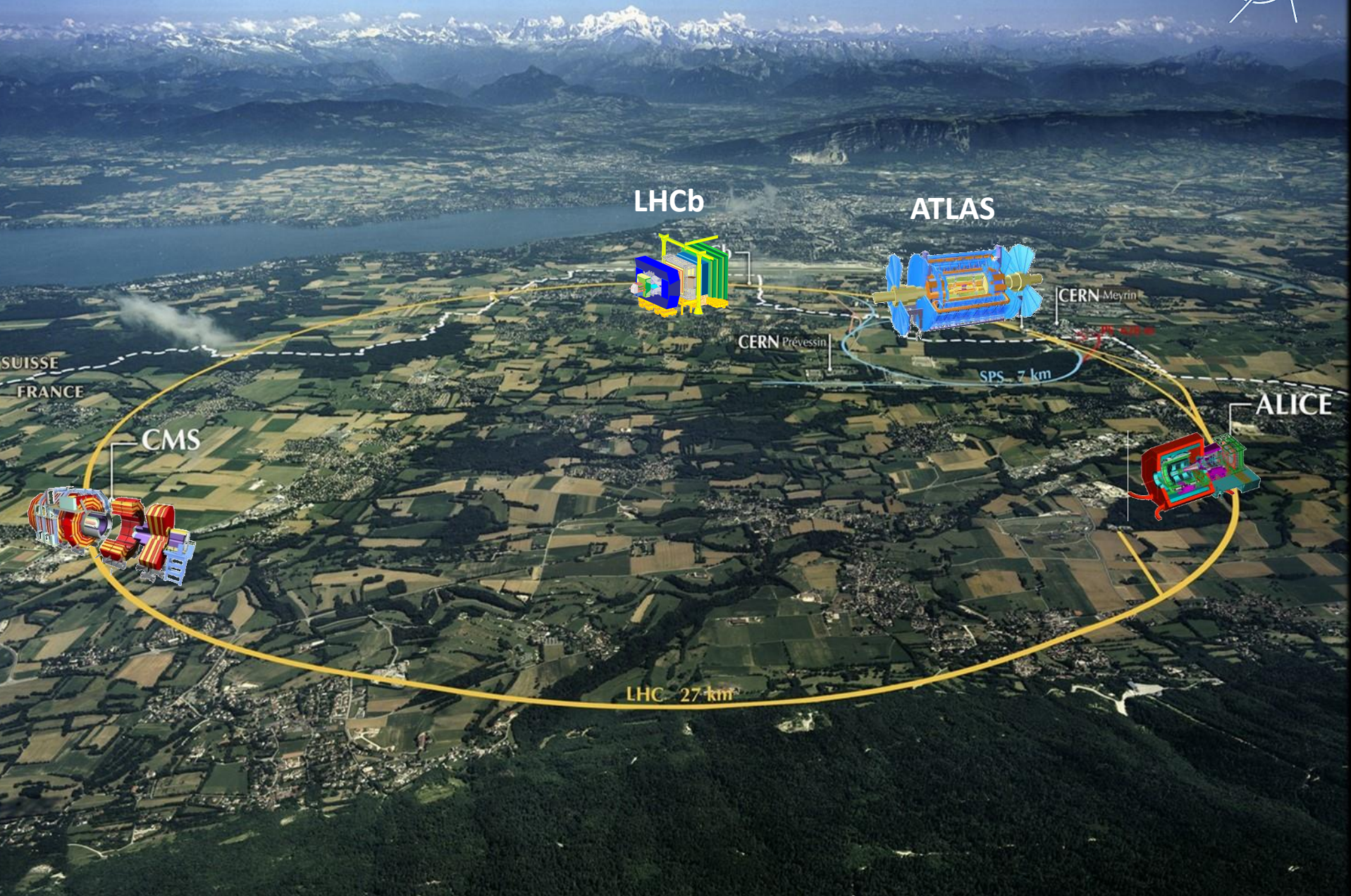
El experimento LHCb

Dedicado al estudio de las partículas compuestas por quarks *b* (bello) y *c* (encantado)

Están partículas salen disparadas hacia delante y hacia atrás: **detector de un solo "brazo"**

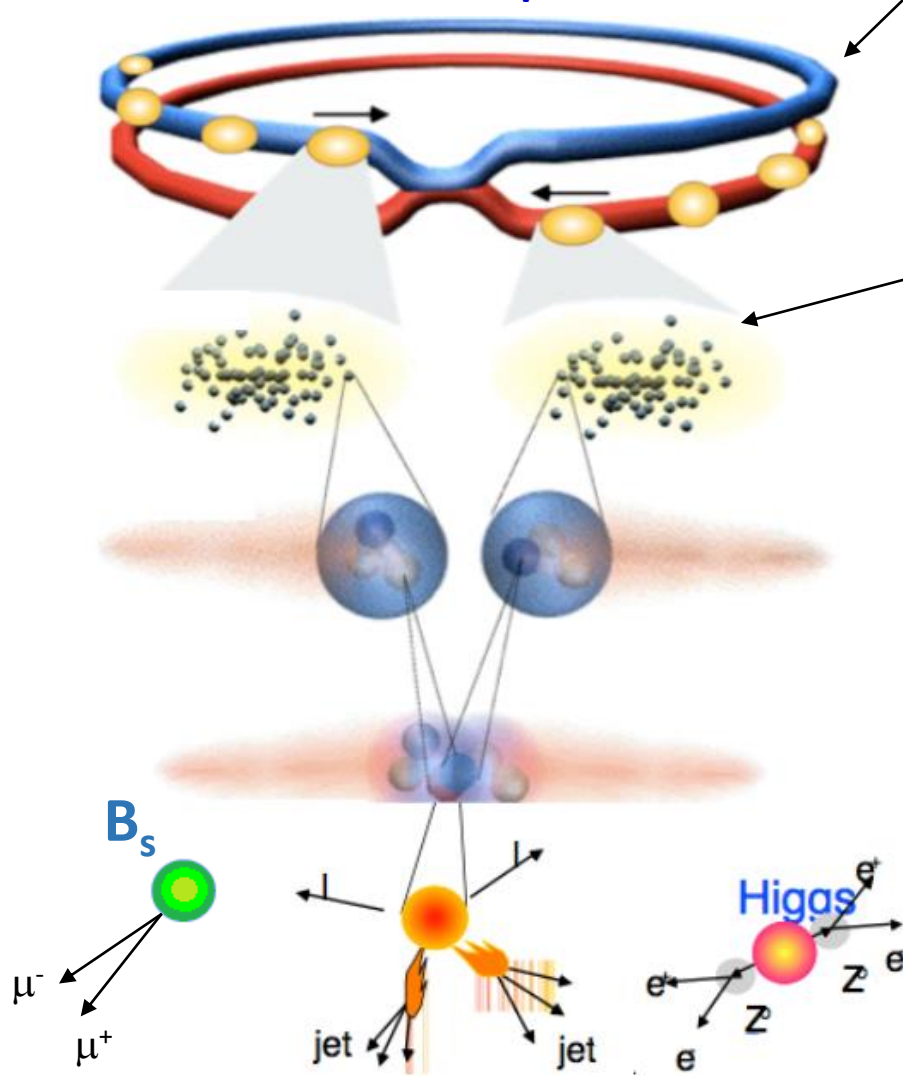


El experimento LHCb



El experimento LHCb

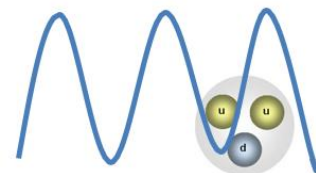
Colisión Protón-proton LHC



2028 “paquetes” de protones por haz

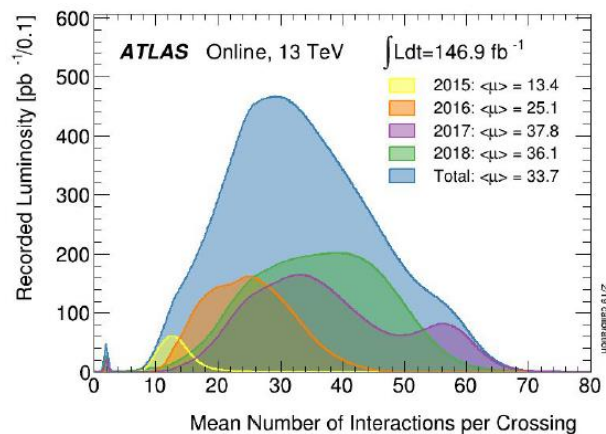
Energía ~ 7 TeV
(acceso a $\sim 10^{-16}$ cm)

$$\lambda = h/mv$$



10^{11} protones por paquete

Tasa de impacto: 40 MHz,
i.e. 40 M colisiones/s



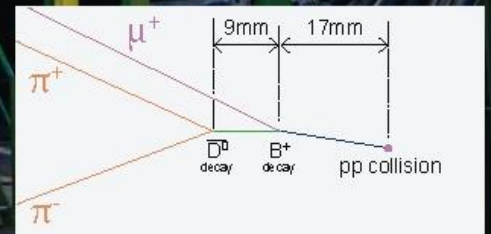
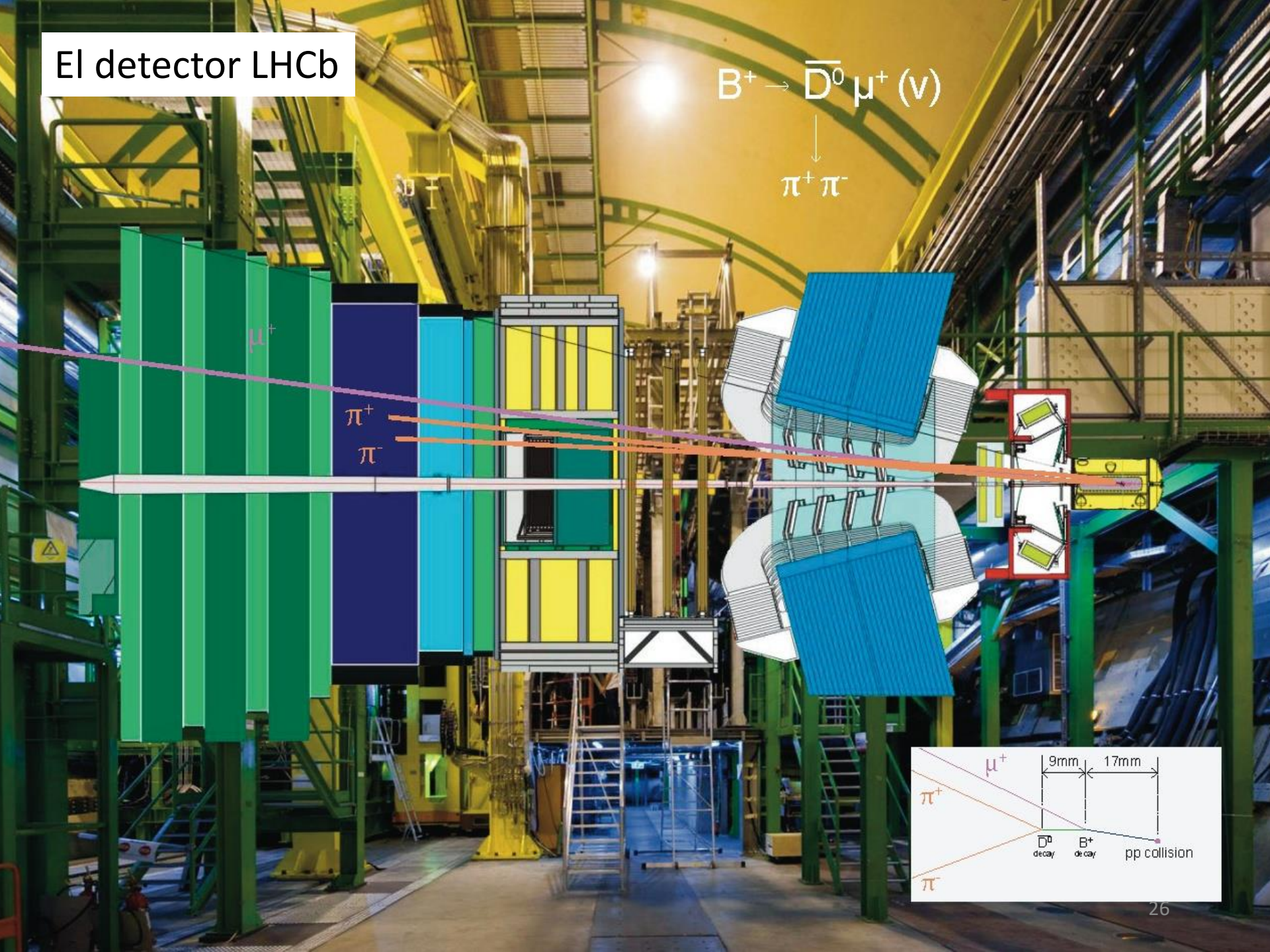
~ 1 MB de datos por colisión

$\rightarrow 40$ TB/s

El detector LHCb

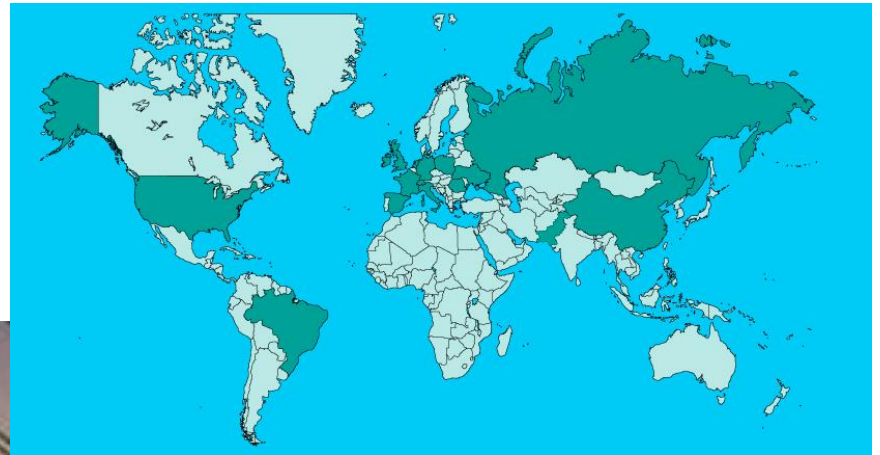
$$B^+ \rightarrow \bar{D}^0 \mu^+ (\nu)$$

$$\pi^+ \pi^-$$



El experimento LHCb

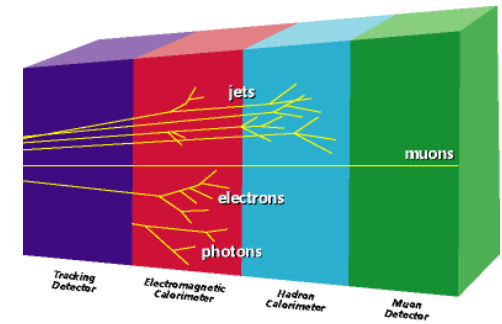
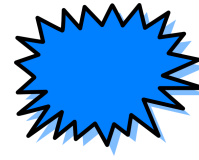
1199 personas, de 69 Institutos
en 16 paises



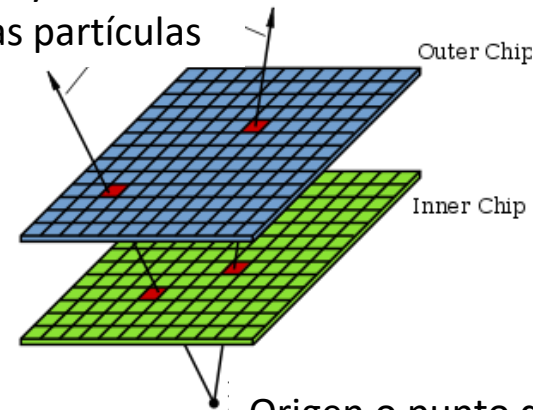
El experimento LHCb

Detectores de trazas

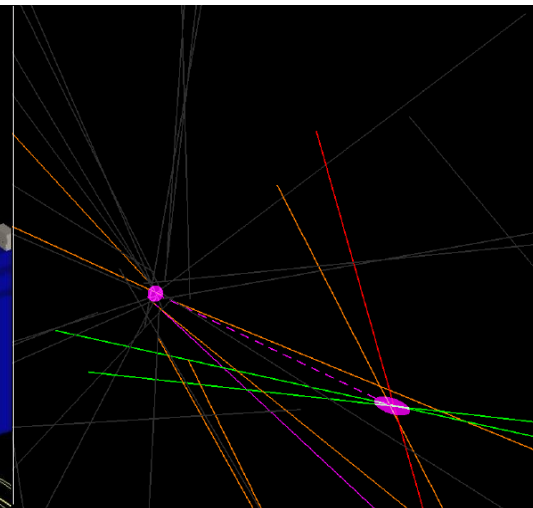
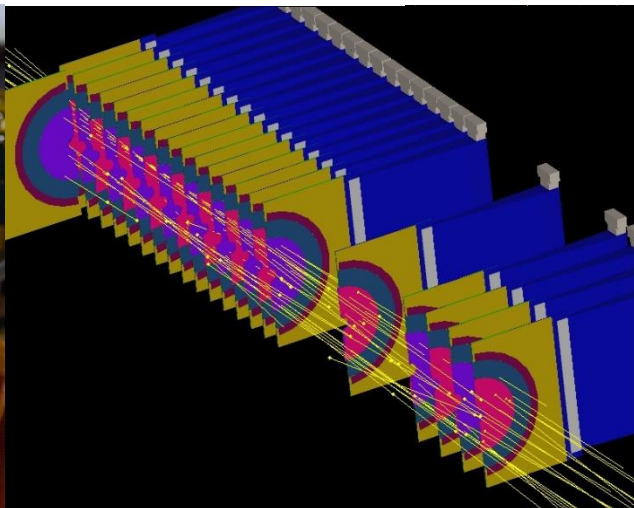
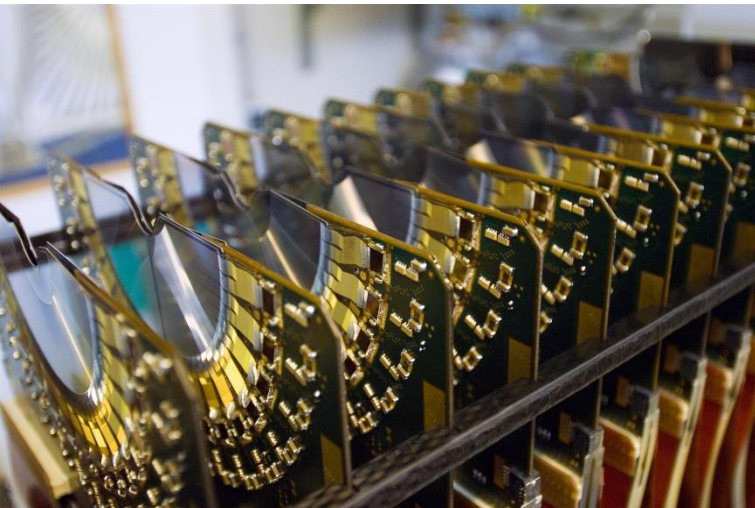
Permiten detectar las trazas que dejan las partículas, sobre todo las que se desintegran muy rápidamente en otras partículas



Trayectoria de las partículas

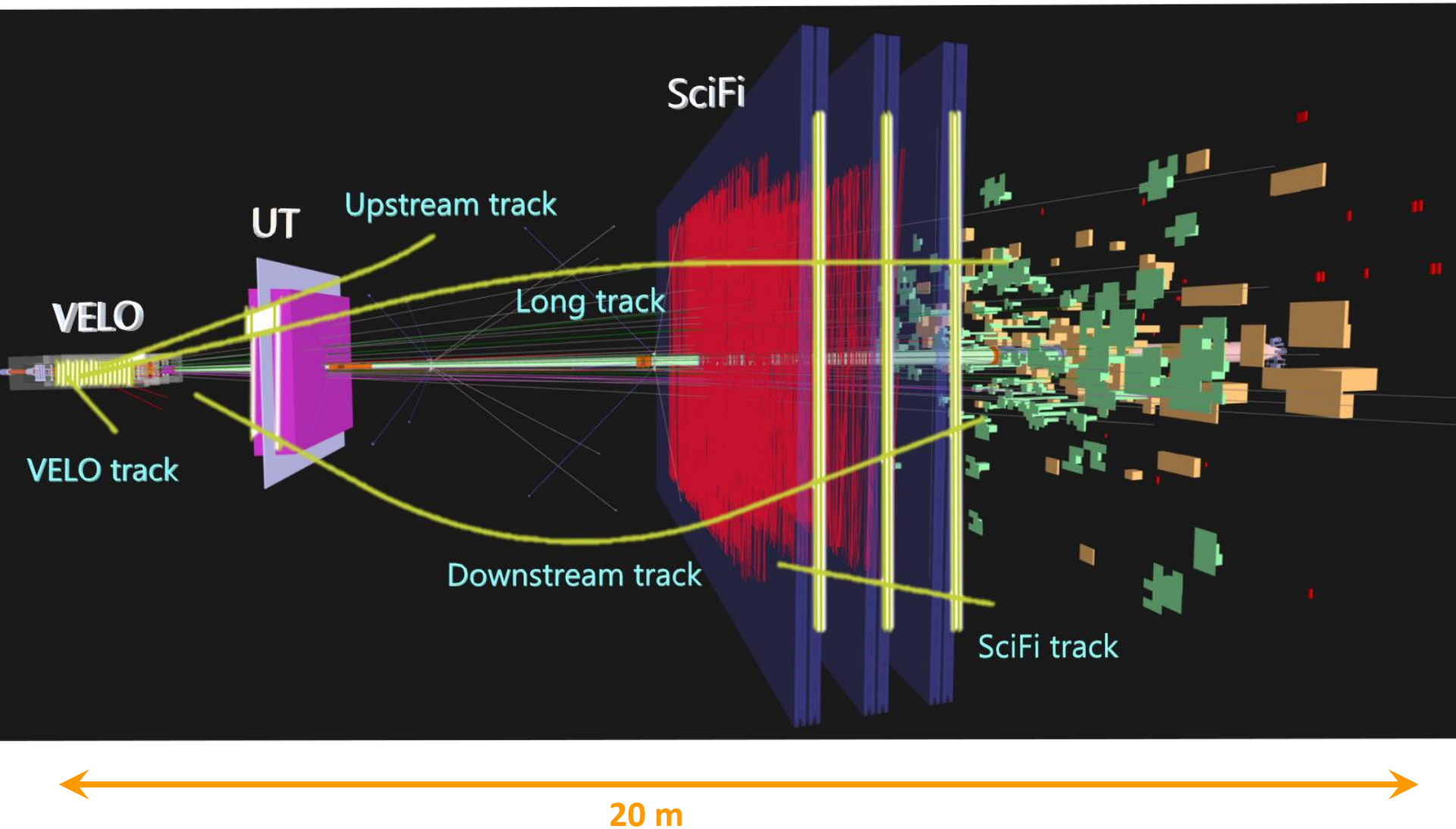


Origen o punto de desintegración de las partículas (**vértice**)

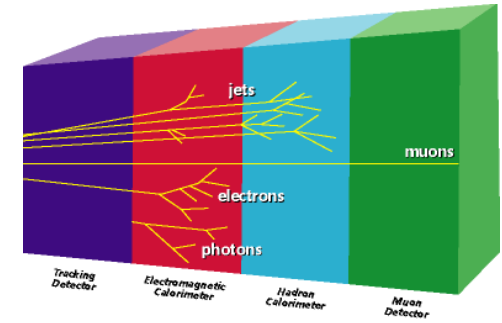
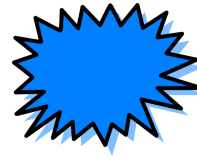


El experimento LHCb

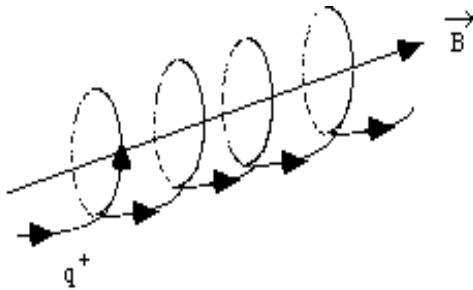
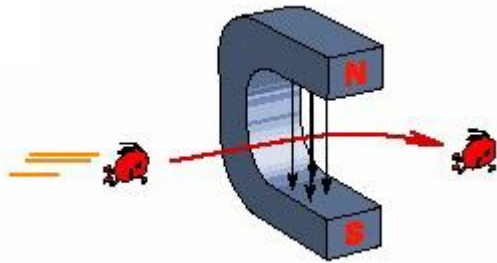
Detectores de trazas



El experimento LHCb

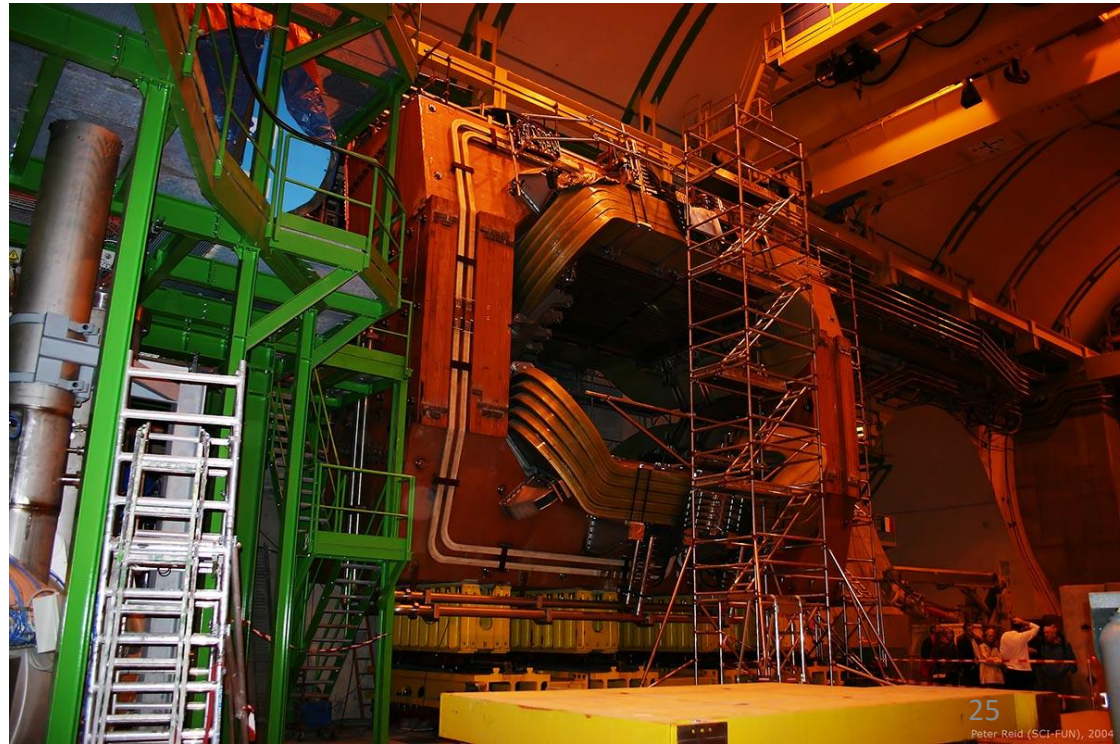


El imán (4T)



Trayectoria de una partícula con carga positiva en un campo magnético.

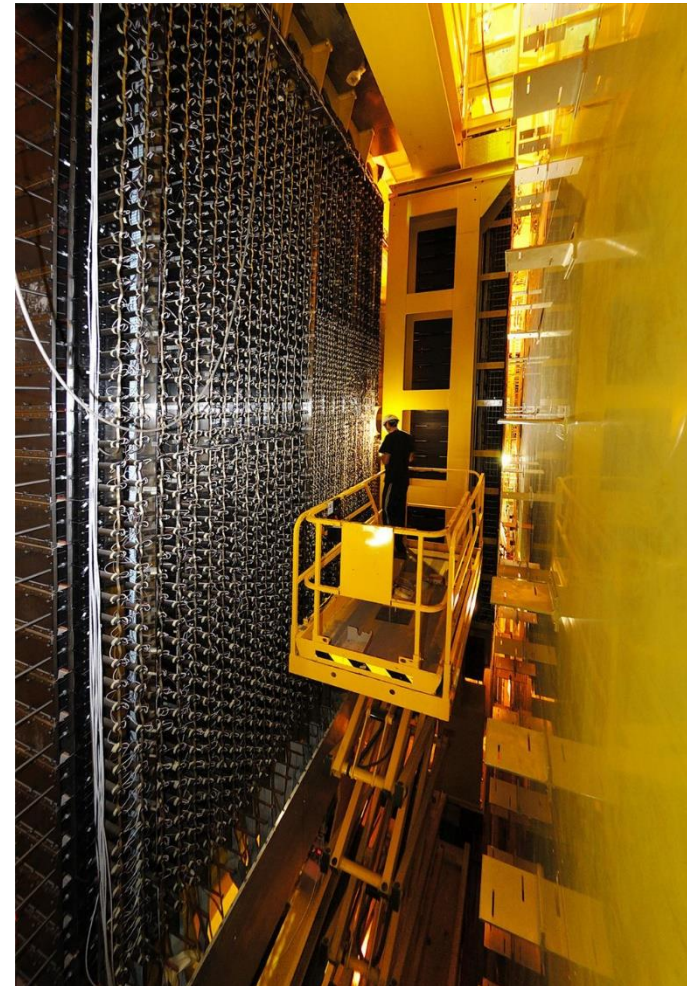
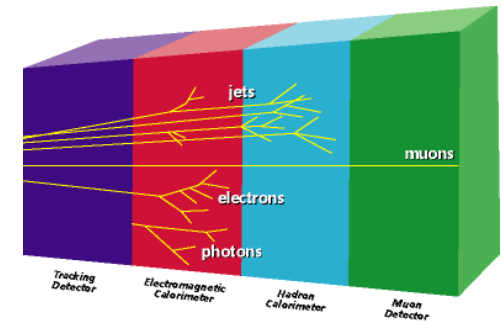
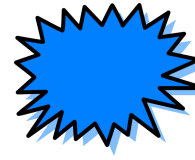
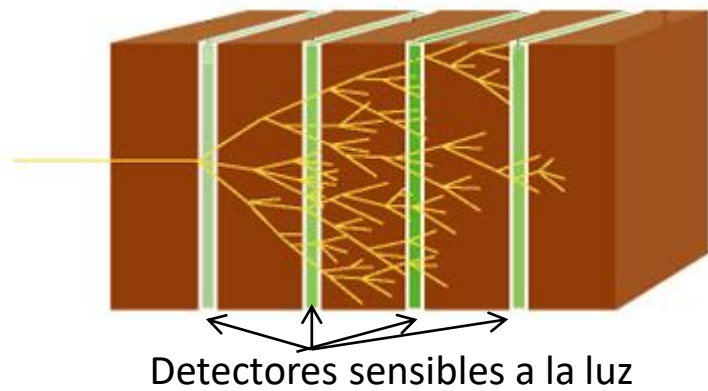
Es muy importante situar un imán que cree un campo magnético para que curve las trayectorias de las partículas con carga (diferente si son + o -)



El experimento LHCb

Calorímetro electro-magnético

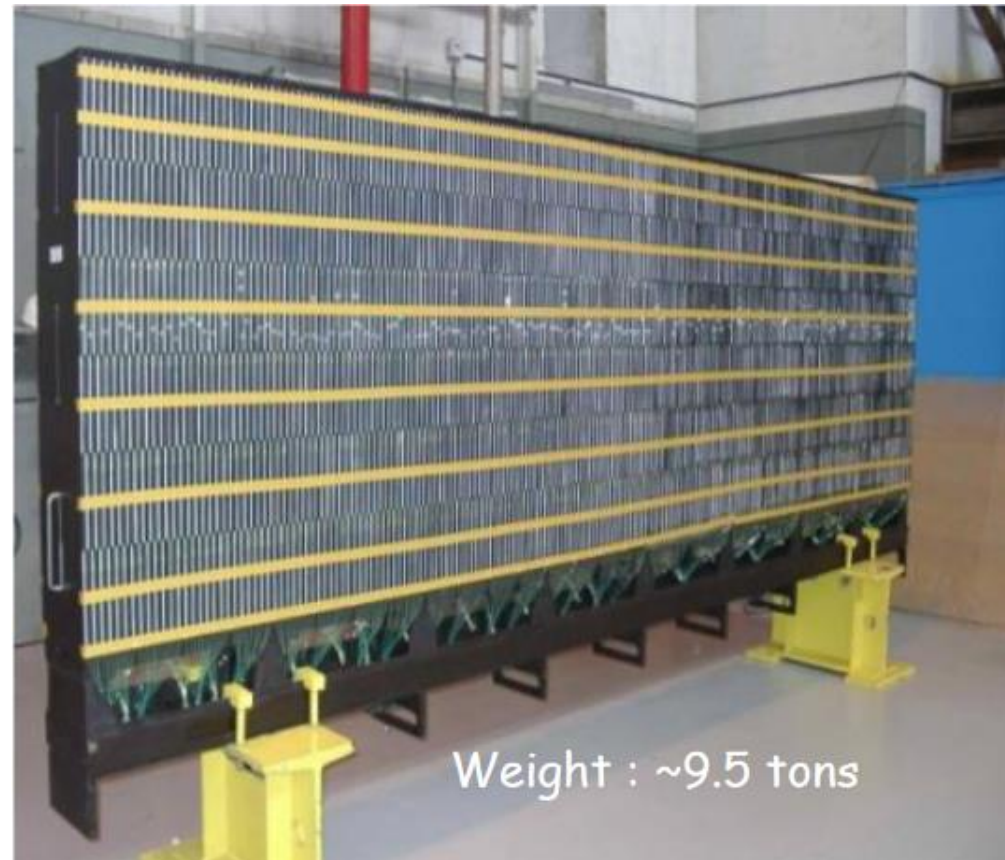
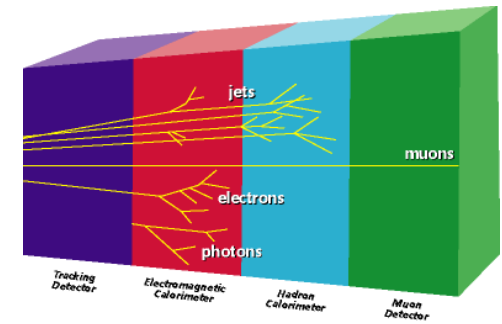
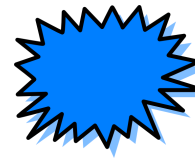
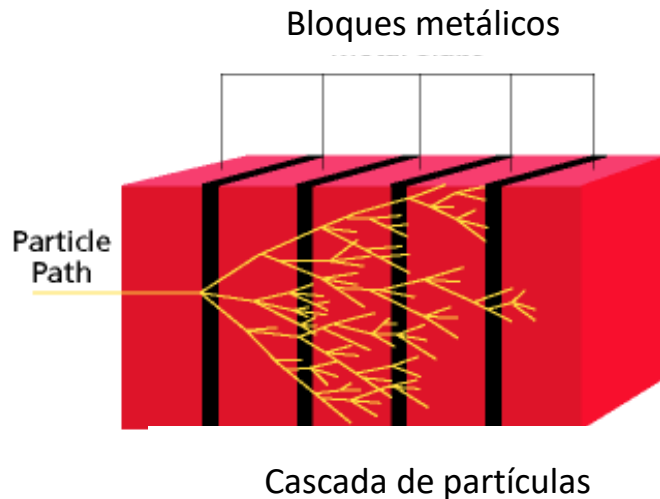
Absorben la energía de las partículas: los electrones (e^-) y los fotones (γ) chocan con el material y crean una cascada: cuanto mayor es, más energía



El experimento LHCb

Calorímetro hadrónico

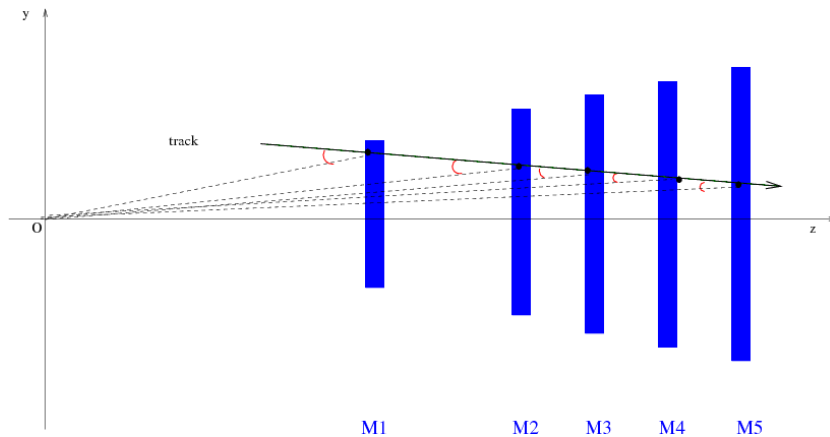
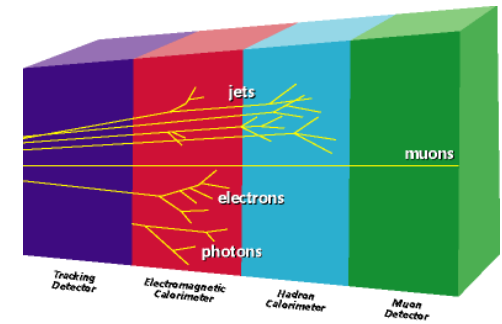
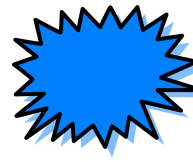
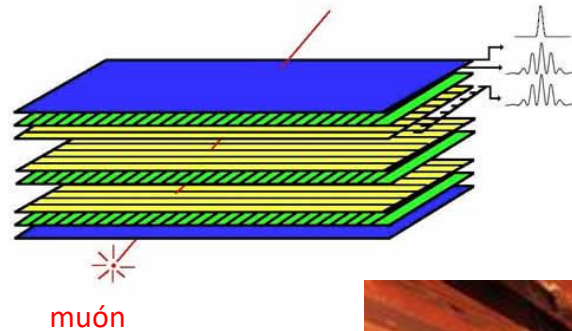
Absorben la energía
de los hadrones:
partículas que
contienen quarks:
protones, neutrones,
piones (π), kaones (K)



El experimento LHCb

Detectores de muones

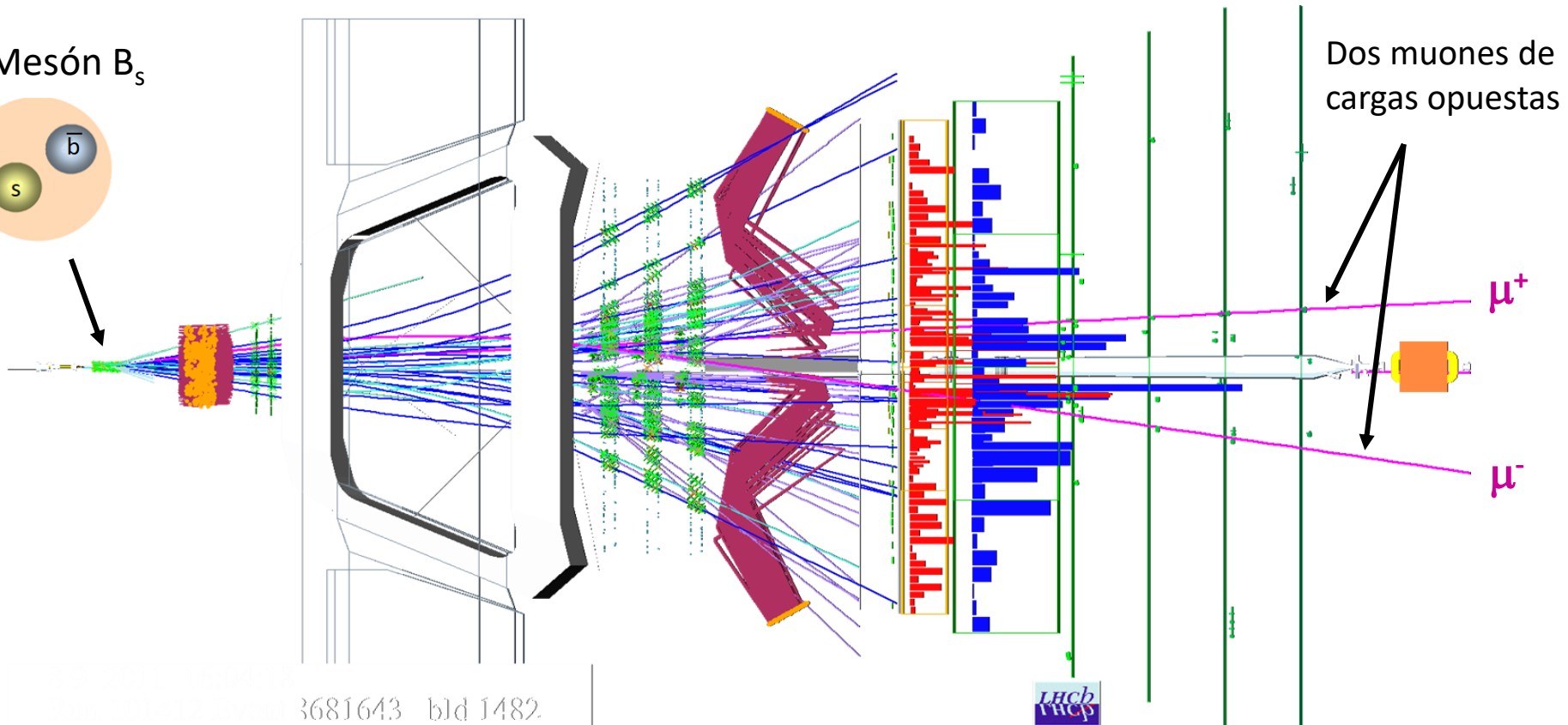
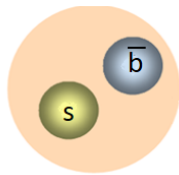
Los muones no interactúan casi con la materia y atraviesan todo el detector



El experimento LHCb

Buscamos procesos muy raros:

Mesón B_s



20 m

Medida de observables físicos

$$\text{Medida}(X') = \text{Función física } (X, P) \cdot \text{Aceptancia}(X) \times \text{Resolución } (X, X')$$

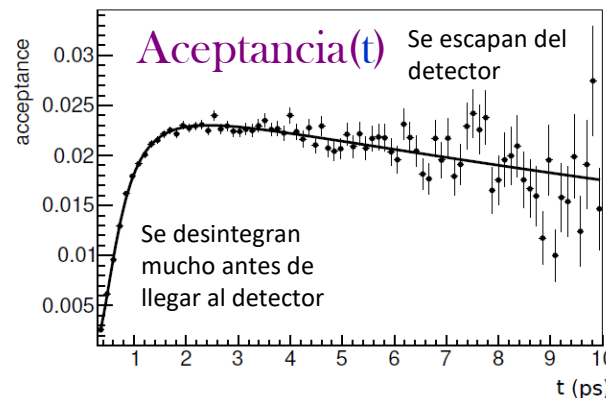
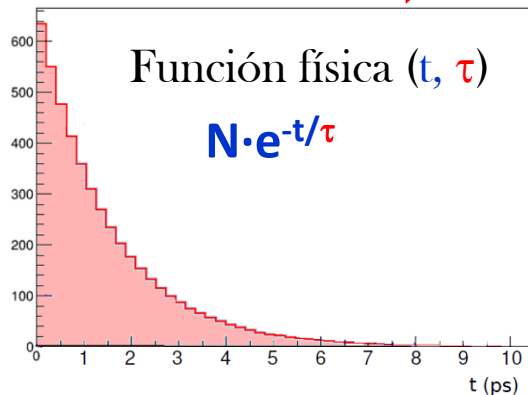
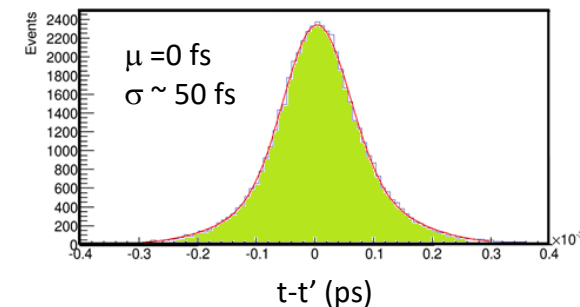
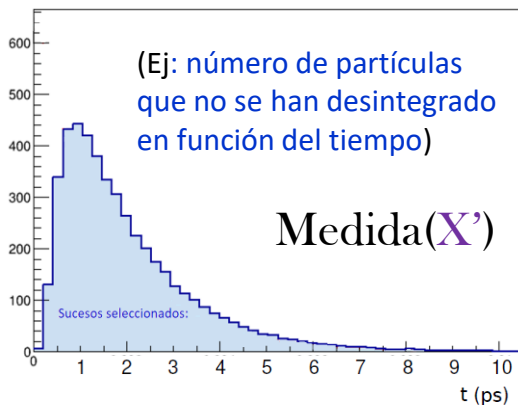
Es nuestro observable, lo que queremos medir en nuestro experimento

Es la distribución física que describe nuestro observable, y que depende de uno o más parámetros físicos P

Es el efecto que produce nuestro detector en la variable que medimos

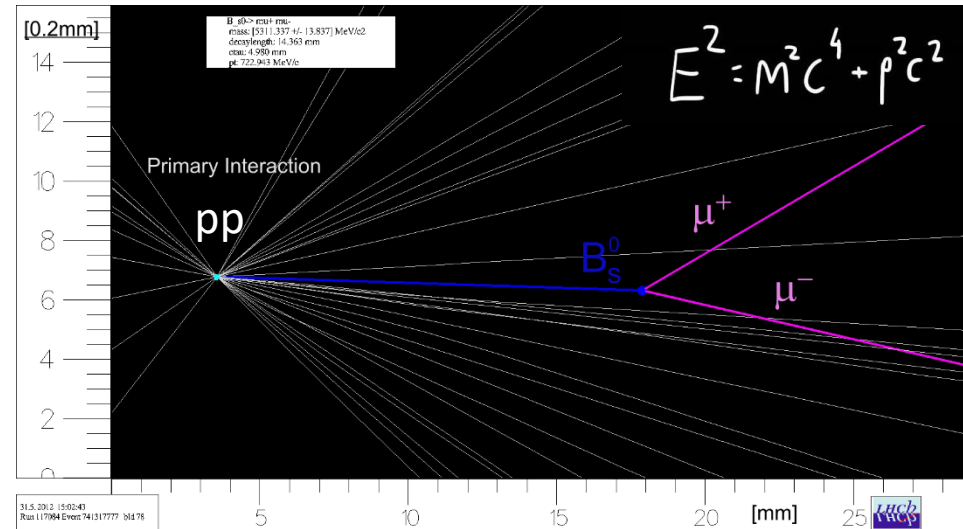
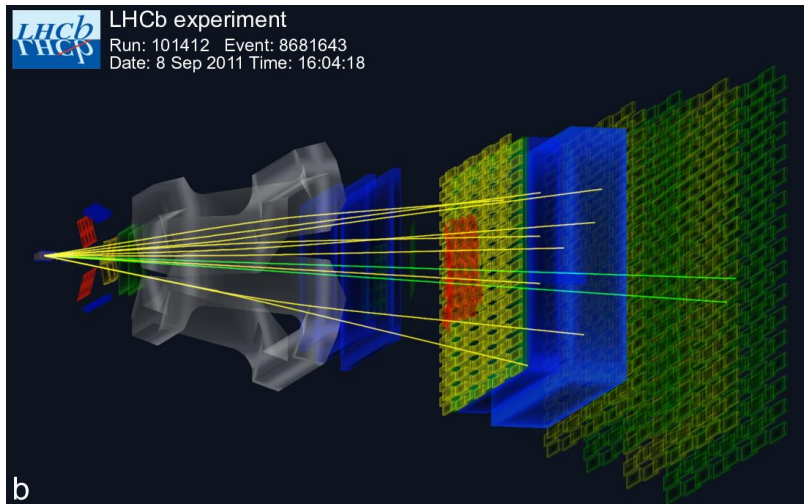
Es la eficiencia que tenemos, dependiente de la variable que estudiamos X

$$\frac{\text{Nº sucesos detectados}}{\text{Nº sucesos producidos}}$$

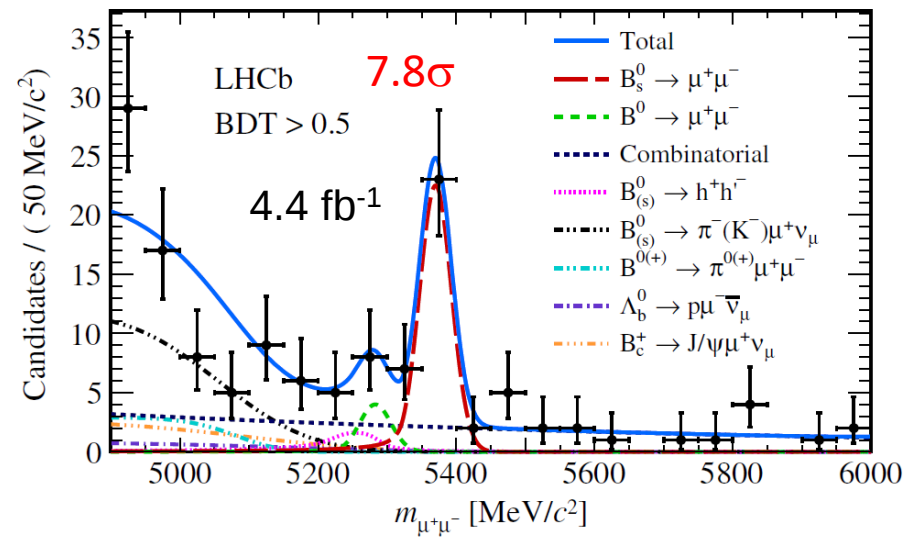
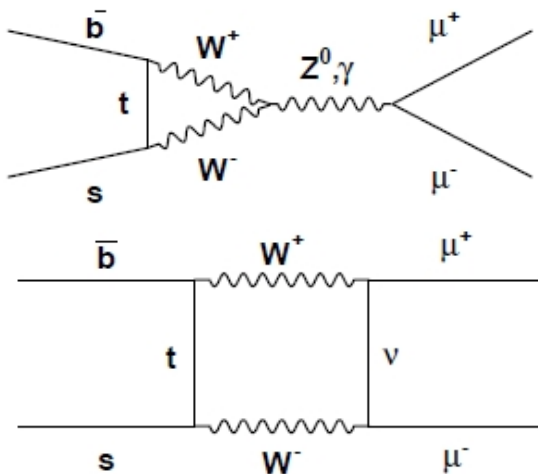


Queremos medir t , Pero medimos t' que se debió del valor real con un comportamiento gaussiano (μ, σ)

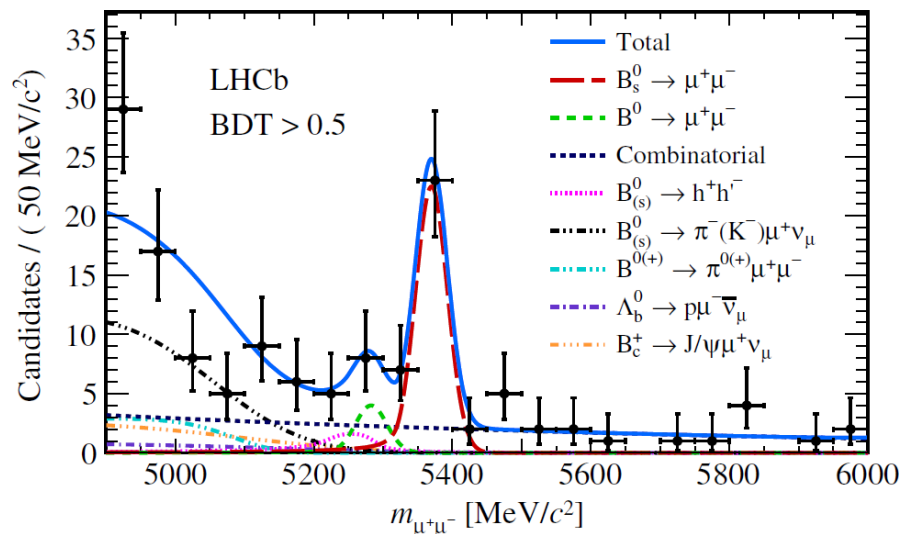
Distribuciones de masa:



Sumando la energía y momento de los dos muones obtenemos la distribución de masa del mesón B_s



Fracciones de desintegración (Branching ratios $\equiv$ BR):



Contando el número de sucesos que hay debajo del pico de la distribución de masa podemos saber cual es la probabilidad de desintegración del proceso $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$

BOTTOM, STRANGE MESONS
($B = \pm 1, S = \mp 1$)
 $B_s^0 = s\bar{b}, \bar{B}_s^0 = \bar{s}b$, similarly for $B_s^{*\pm}$ s

$I(J^P) = 0(0^-)$
 I, J, P need confirmation. Quantum numbers shown are quark-model predictions.
 Mass $m_{B_s^0} = 5366.79 \pm 0.23$ MeV
 Mean life $\tau = (1.510 \pm 0.005) \times 10^{-12}$ s

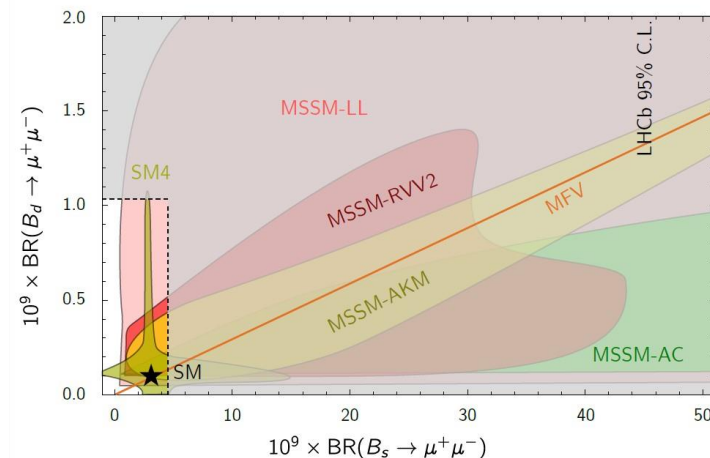
Si no está de acuerdo con la predicción teórica implicaría que existen otras partículas desconocidas que hace que este modo de desintegración fuera mas copiosa.

Predicción teórica:

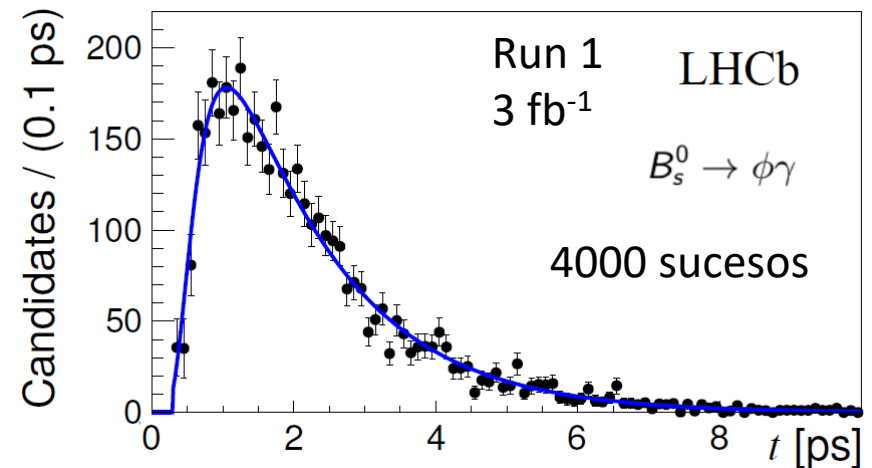
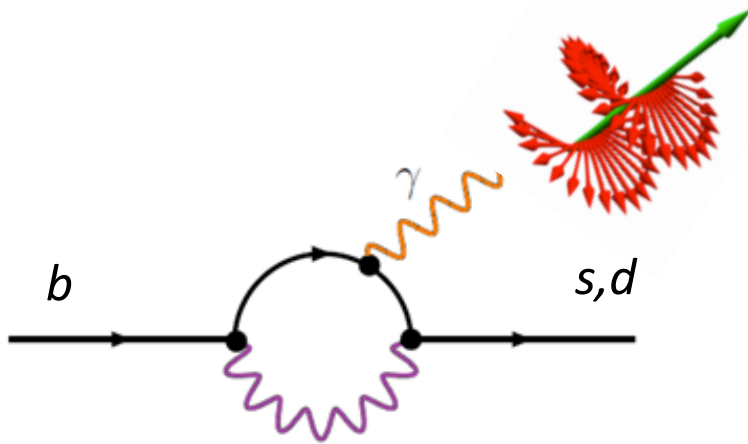
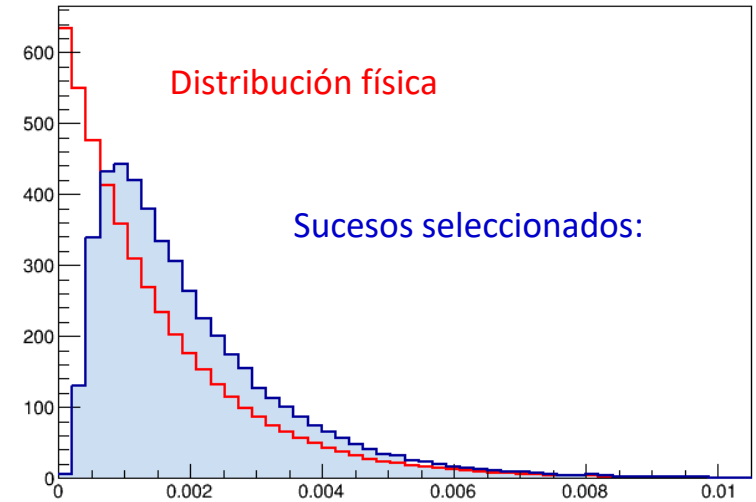
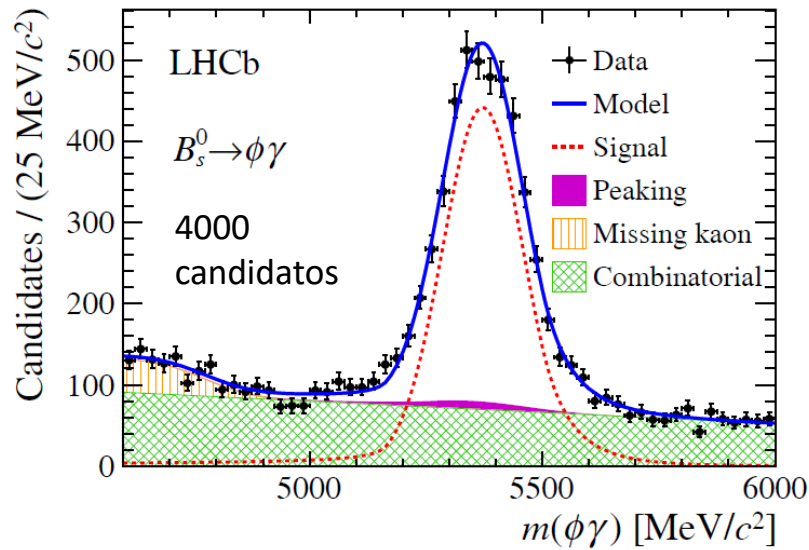
$$\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu\mu) = (3.65 \pm 0.23) \times 10^{-9}$$

$$\mathcal{B}(B^0 \rightarrow \mu\mu) = (1.06 \pm 0.09) \times 10^{-10}$$

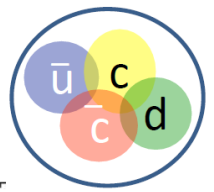
Realmente unas desintegraciones muy raras!!



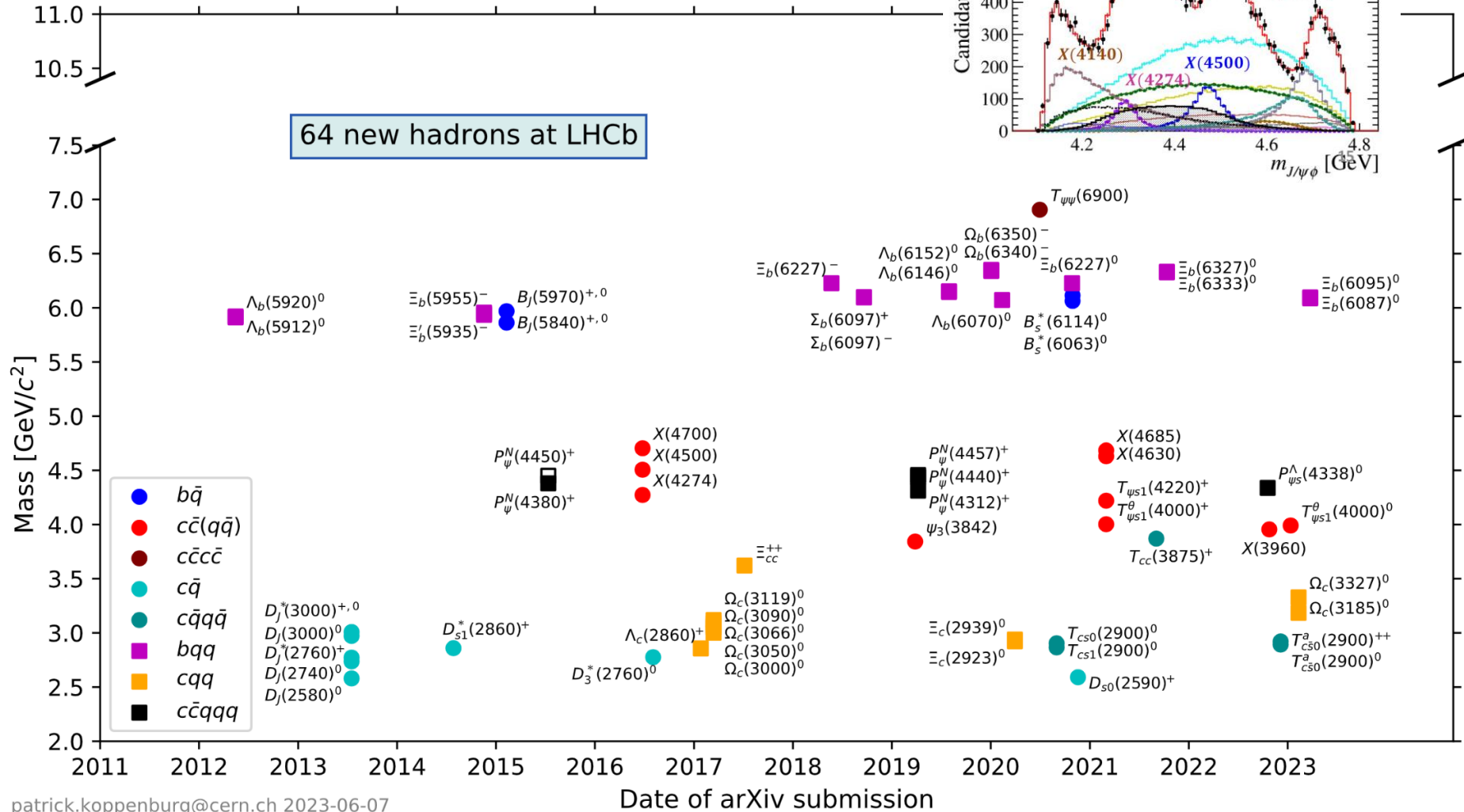
Tiempos de desintegración:



Espectroscopía en LHCb



Más de 60 nuevos estados!!



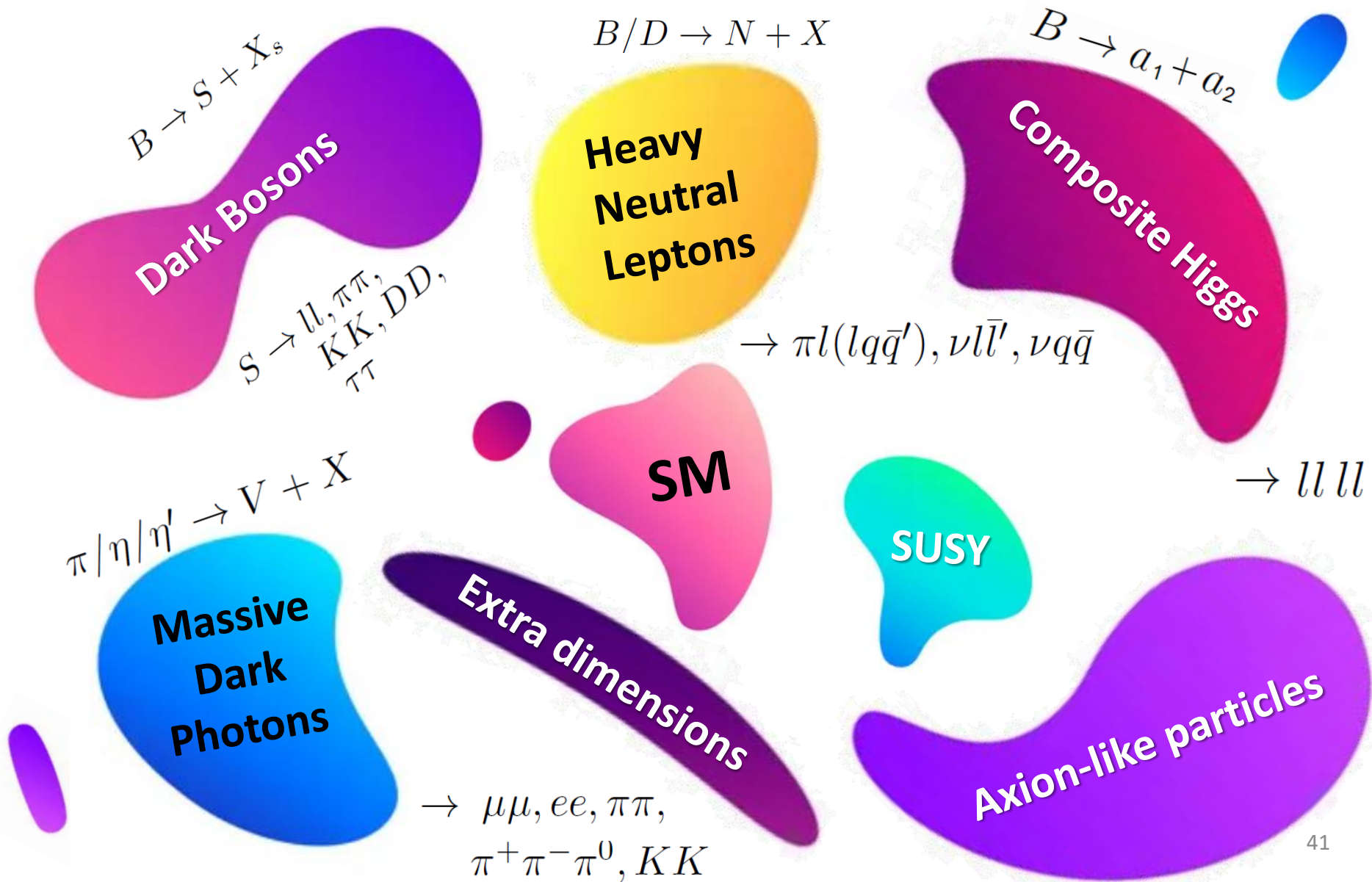
El Modelo Estándar de las Partículas Elementales

Lo que no entendemos...

- ¿Por qué hay **tantas partículas elementales**?
- ¿Son todas **las fuerzas** la misma en realidad?
- ¿El Higgs explica **el origen de la masa** completamente?
- ¿Por qué nuestro universo está formado principalmente por **materia** y no hay tanta **antimateria**?
- ¿Cómo encaja la **masa de los neutrinos**?
- ¿Qué son la **materia oscura** y la **energía oscura**?
- ¿Hay una **teoría** de la naturaleza más **fundamental** que incluya la gravedad?



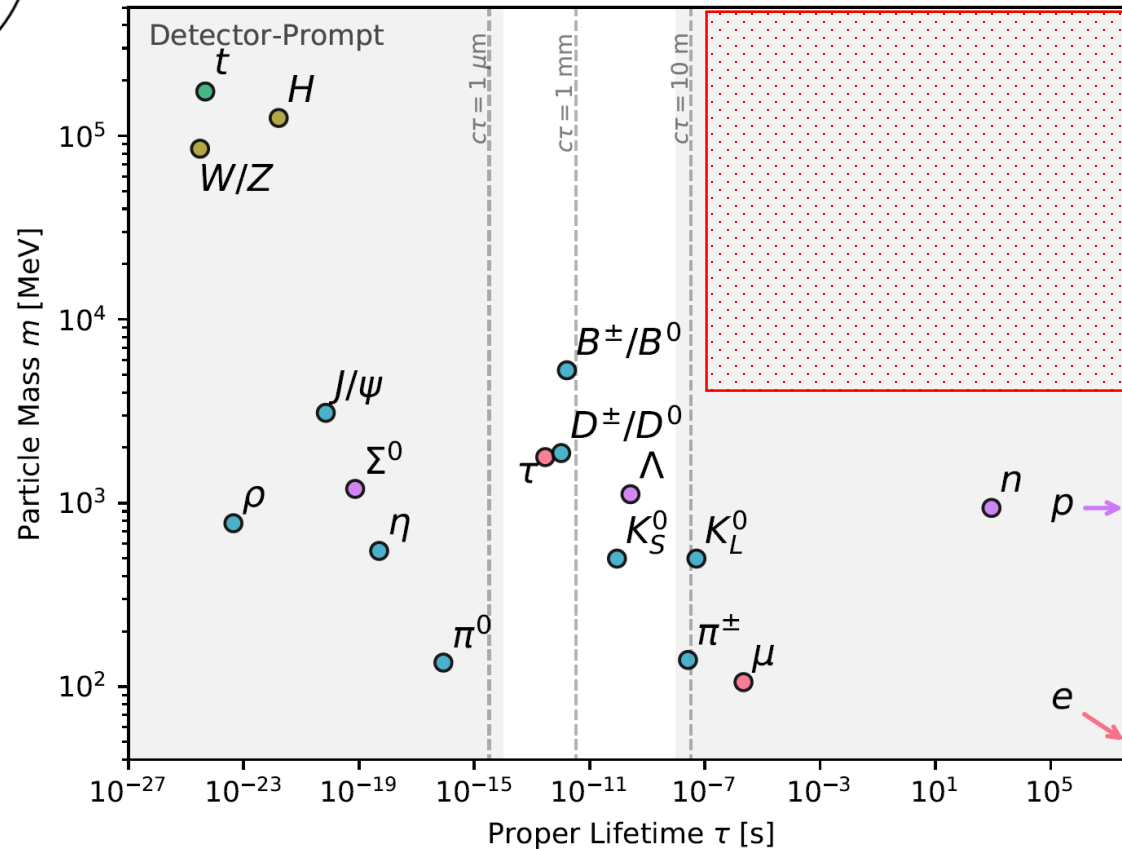
La física de sabor (el sector de quarks) BSM



Un proyecto nuevo: BuSca (Buffer Scanner)



Partículas de vida media en el SM y más allá:



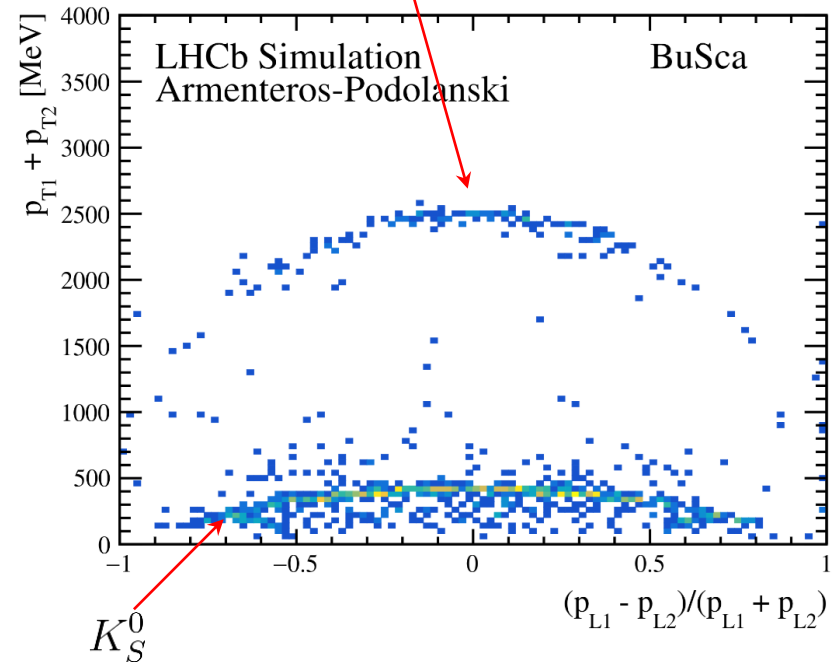
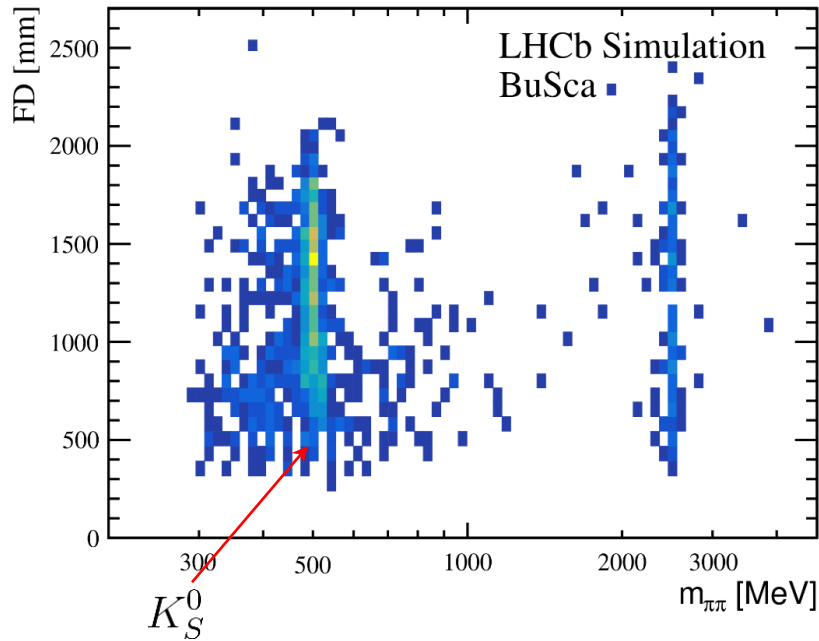
[Prog. in Part. and Nuc. Phys. 106 (19)210]



Un proyecto nuevo: BuSca (Buffer Scanner)

BuSca histograms (monitoring):

hypothetical BSM particle

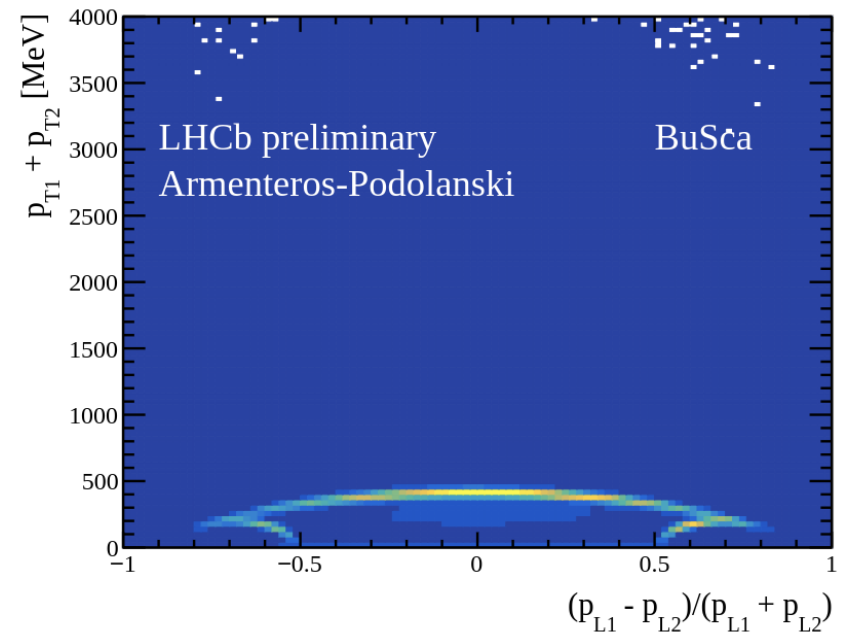
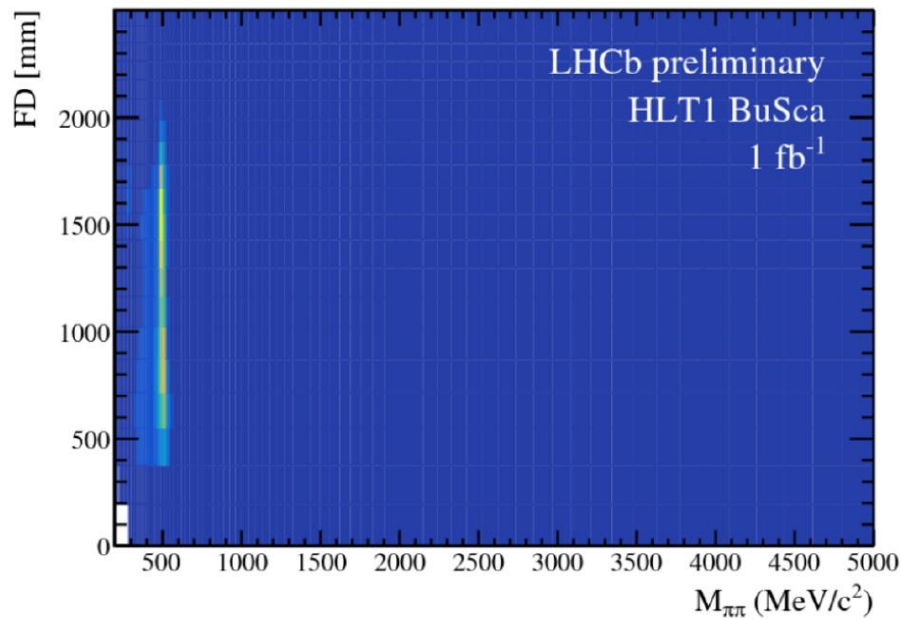




Un proyecto nuevo: BuSca (Buffer Scanner)

BuSca histograms (monitoring):

[[V. Kholoimov MSc](#)]



En este momento estamos analizando los datos tomados durante 2025 y 2026.

Conclusiones

- Necesitamos una teoría mas allá del Model Estándar para explicar nuestro Universo.
- La física de sabor y el experiment LHCb permite explorar los mecanismos de las transiciones para observar efectos de possible partículas nuevas.
- Además la nueva configuración del experiment LHCb permite explorar regiones nunca antes accesibles.
- Hemos creado un Nuevo Proyecto, BuSca, con el fin de detector partículas mas allá del Modelo Estandar en tiempo real.

Arantza.Oyanguren@ific.uv.es

comcha.es

<https://lhcb.web.cern.ch/>

IFIC: Despacho 1.2.1

Facultad: Dppto. FAMN,
Labo. Física Nuclear