

# Introducción a la Física de Partículas: El Modelo Estándar

**J. Martin Camalich**

Theoretical Physics Department, CERN

`jorge.martin.camalich@cern.ch`

Programa español del CERN para profesores

25 de Junio 2018

- 1 **Introducción**
  - Los bloques fundamentales y las fuerzas
  - Las escalas en la materia
  - Un desvío por la teoría cuántica de campos
  - El spin, la antimateria y los diagramas de Feynman
- 2 **El Modelo Estándar**
  - La materia
  - La interacción fuerte
  - La interacción electromagnética
  - La interacción débil
  - El Higgs
- 3 **Es el Modelo Estándar la Teoría última de la materia?**

# Qué es la Física de Partículas?

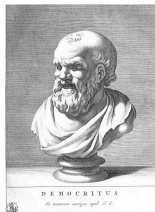
“La Física de Partículas es la disciplina que estudia los bloques fundamentales de la Naturaleza (**Materia**) y sus interacciones (**Fuerzas**)”

- **Modelo Estándar** es *la teoría* que subsume 2500 años de un binomio exitoso

- ▶ “Atomismo” y/o “Reduccionismo”

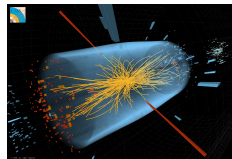
- ★ **Democritos** ca 460 - 370 A.C.
- ★ **Materialismo** vs **Teleología** (ej. Aristóteles)

“El universo está constituido por combinaciones de pequeñas partículas indivisibles”



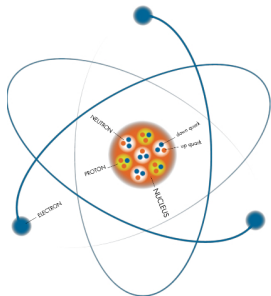
- ▶ Metodo científico

- 1 Observación sistemática, medición, experimentación  
ej.: **Large Hadron Collider**
- 2 Formulación, análisis y modificación de las hipótesis  
ej.: **Modelo Estándar**

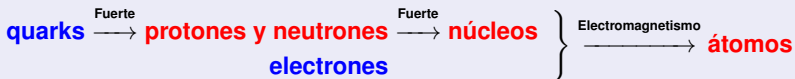


# Átomo moderno

- El **átomo** **NO** es un bloque fundamental de la **materia**!  
Compuesto de **núcleos** y **electrones**



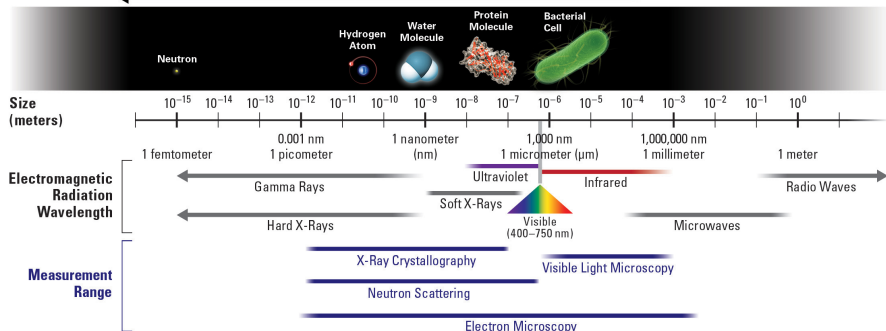
- El **núcleo** **NO** es fundamental tampoco  
Compuesto de **protones** y **neutrones**
  - ★ **Protones** y **Neutrones** **NO** son fundamentales  
Compuesto de **quarks**
- Modelo Estándar**: **Electrones** y “**up**” y “**down**” **quarks** son fundamentales
- El **Modelo Estándar** también describe las **fuerzas** para que la materia “ligue”





# La materia a diversas escalas espaciales

## Scale of Subvisible World



- Mas pequeña la escala (longitud de onda), mas alta la energía de la sonda (*luz*)

$$E_{\gamma}(\text{eV}) = \frac{1.2398}{\lambda(\mu\text{m})}$$

► **Unidades naturales:**  $\hbar = c = 1$

### Estructura del neutron

$$E \simeq 10^9 \text{ eV} = 1 \text{ GeV!!!}$$

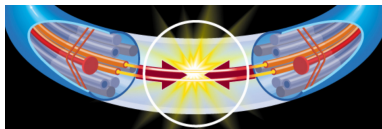
# Explorando más allá del femtómetro ( $10^{-15}$ m)

## ● Aceleradores de partículas

### ▶ Dualidad onda-corpúsculo (De Broglie)

- ★  $E_p \simeq h/\lambda_p$  para otras partículas!
- ★ **LHC** acelera protones hasta **14 TeV**

$1.4 \times 10^4$  GeV  $\Rightarrow$  **10000 veces mas pequeño que el protón**

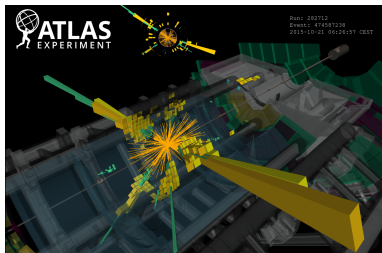


## ● Detectores de partículas

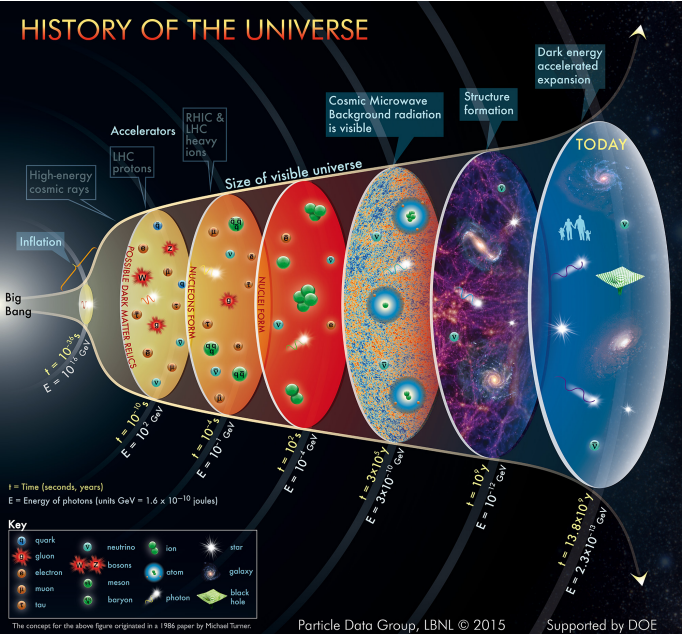
### ▶ Masa es Energía (Einstein)



- ▶ A altas Energías se producen **muchas partículas** o partículas **más pesadas**



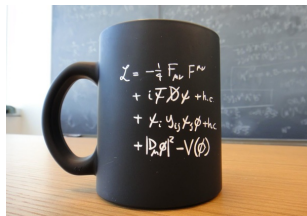
# El Universo como laboratorio de Física de Partículas



# Entonces: Qué es el Modelo Estándar?

- El Modelo Estándar es una **Teoría cuántica de campos (TCC)**

- ▶ Una TCC está definida por un **Lagrangiano** con dos ingredientes
  - ★ **Campos** aka **“Partículas de materia”**
  - ★ **Simetrías:** “Transformaciones de los campos que mantienen los resultados físicos invariantes”

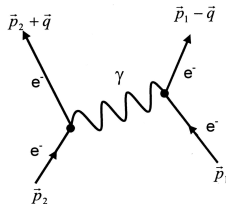


- El Modelo Estándar es una **Teoría “de Gauge”**

- ▶ Campos especiales: **“de gauge”**
  - ★ Son los **“Portadores de interacción”**

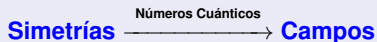
**Ejemplo:** Interacción  $e^- e^- \rightarrow e^- e^-$

Los **electrones** se comunican por medio del **fotón**



# Números cuánticos y el spin

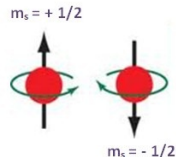
- **Números cuánticos:** Propiedades de los campos como carga eléctrica, spin ...
  - ▶ Rigen las interacciones



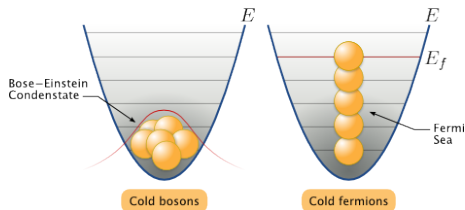
- **Spin:** Momento angular "intrínseco"

- ▶ **Clasificación de partículas**

- ★ **Fermiones:** Spin fraccional:  $1/2, 3/2, \dots$
- ★ **Bosones:** Spin entero:  $0, 1, \dots$



- **Teorema spin-estadística**

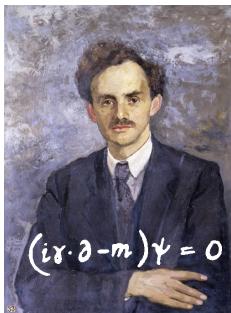


# Antimateria

- Toda **partícula** tiene su **antipartícula**

- ▶ **Misma masa!**
- ▶ **Números cuánticos opuestos!**

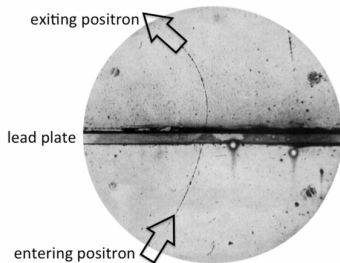
- ▶ **Ecuación de Dirac (1928)**



## Antiparticles

proton	+	-	antiproton
neutron	●	●	antineutron
electron	●	⊕	positron

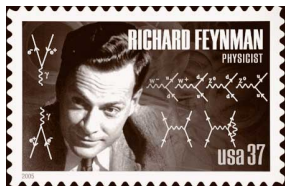
- ▶ **Descubrimiento del positrón (1932)**



# Hablando Física de partículas: Los diagramas de Feynman

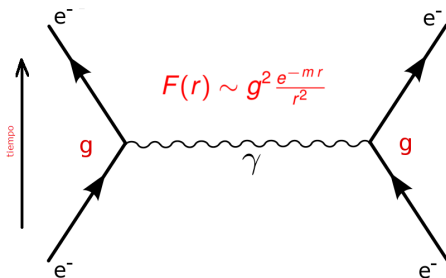
- **Diagramas de Feynman** representan procesos con partículas

- ▶ Dependেন de ...

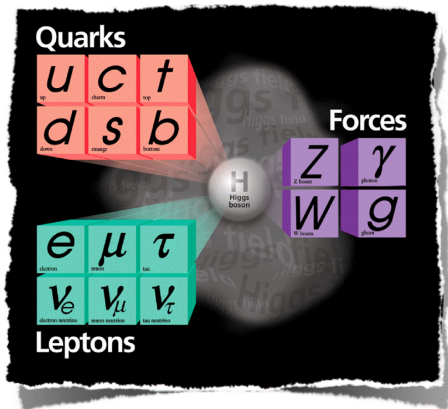


- ★ **Constantes de acoplamiento ( $g$ ):**  
Cuantifican la “**intensidad**” de la interacción
- ★ **Números cuánticos de la partículas:**  
ej. **Neutrón** no interactúa con **fotones**
- ★ **Masa del “portador de la interacción”**  
Cuantifica el “**rango**” de la interacción

- ▶ **Ejemplo:** Colisión de dos electrones



# El Modelo Estándar: La Materia



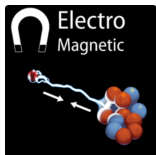
## ● La materia

- ▶ Los **quarks** y **leptones** son **fermiones** y tienen sus **antipartícula!**
- ▶ Los “**portadores de interacción**” y el **Higgs** son **bosones**
- ▶ Hay tres “**familias**” de **quarks** y **leptones**



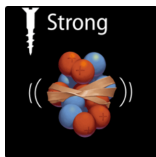
# El Modelo Estándar: Las Fuerzas

## ● Electromagnetismo



- ▶ Transportada por el **fotón**
  - ★ El fotón no tiene masa:  $m_\gamma = 0$
  - ★ Es de “**largo alcance**”
- ▶ Responsable de la **electricidad, magnetismo** y la **química**

## ● Interacción fuerte o nuclear



- ▶ Transportada por el **gluón** y solo sentida por los **quarks**
  - ★ El gluón no tiene masa:  $m_g = 0$
  - ★ Es de “**corto alcance**” (requiere más explicación)
- ▶ Mayor constituyente de la materia conocida (**núcleo atómico**)

## ● Interacción débil



- ▶ Transportada por los **bosones débiles Z y W<sup>±</sup>**
  - ★ Los bosones Z y W<sup>±</sup> tienen masa:  $m_W \simeq m_Z \sim 90 \text{ GeV}$
  - ★ Es de “**muy corto alcance**”
  - ★ **Desintegra** las partículas en **materia ordinaria**:  
Protones, neutrones y electrones

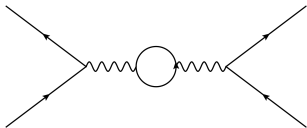
# La fuerza relativa de las Fuerzas

Property	Gravitational Interaction	Weak Interaction (Electroweak)	Electromagnetic Interaction	Strong Interaction
Acts on:	Mass – Energy	Flavor	Electric Charge	Color Charge
Particles experiencing:	All	Quarks, Leptons	Electrically Charged	Quarks, Gluons
Particles mediating:	Graviton (not yet observed)	$W^+$ $W^-$ $Z^0$	$\gamma$	Gluons
Strength at $\begin{cases} 10^{-18} \text{ m} \\ 3 \times 10^{-17} \text{ m} \end{cases}$	$10^{-41}$ $10^{-41}$	0.8 $10^{-4}$	1 1	25 60

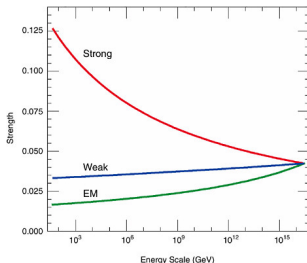
© 2016 Contemporary Physics Education Project  
CPEPphysics.org

## Las constantes de acoplamiento no son constantes!

- ▶ EL **vacío cuántico** actúa como dieléctrico

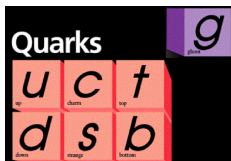


- ▶ **Recordar:** Distancia  $\sim 1/\text{Energía}$



# La interacción fuerte

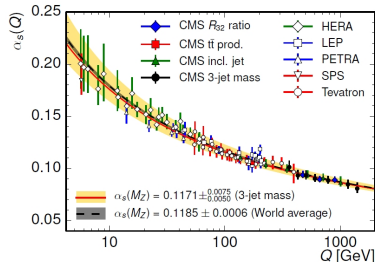
- La subteoría responsable se llama **cromodinámica cuántica (QCD)**



- Los **gluones** son los **bosones de gauge de QCD**
- Sólo los **quarks** y **gluones** tienen carga de **QCD (color)**
- Leptones NO** tienen color (no interactúan con gluones)

- Constante de acoplo de QCD  $g_s(E)$  depende de Energía interesantemente ...

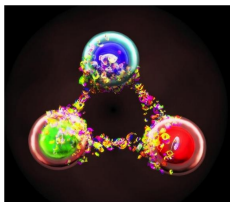
- “Fuerza” de QCD **disminuye** con la energía:  
**Libertad asintótica!**
- “Fuerza” de QCD **aumenta** con la distancia:  
**Confinamiento!**



- Predicción de QCD y del SM muy bien verificada por experimento!

# Confinamiento

- Los quarks y gluones sólo existen dentro de bolsas llamadas **hadrones**

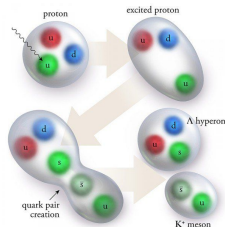


- **Mesones:** Combinaciones de **quark-antiquark**
  - ★ Son **bosones** (Spin=0, 1, ...)
  - ★ **Ejemplo:** Piones ( $\pi^\pm$ ,  $\pi^0$ , Kaones, ...)
- **Bariones:** Combinaciones de **tres quarks**
  - ★ Son **fermiones** (Spin=1/2, 3/2, ...)
  - ★ **Ejemplo:** Protón, neutrón, hiperones, ...

- Los gluones son como un **muelle**: Más lo estiras, más fuerte responde ...  
... Hasta que se rompe!

- **Creación par quark-antiquark!**

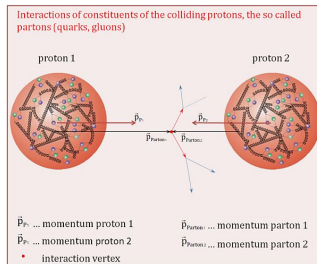
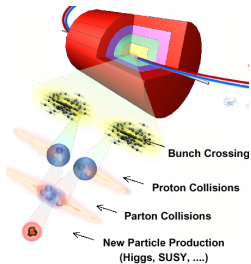
Materia generada de la energía de los gluones



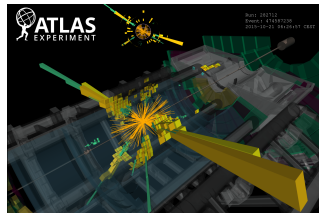
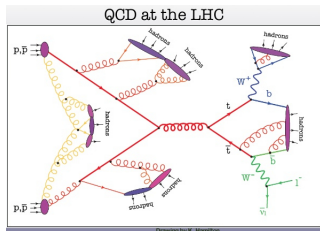
# QCD a altas energías

- LHC= Large **H**adron collider

- ▶ Los protones se ven el uno a otro con gran “resolución”: **Partons**

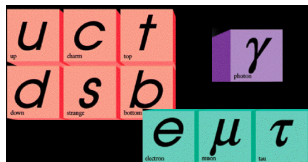


- La física del LHC requiere cálculos de precisión en QCD



# La interacción electromagnética

- La subteoría responsable se llama **Electrodinámica cuántica (QED)**



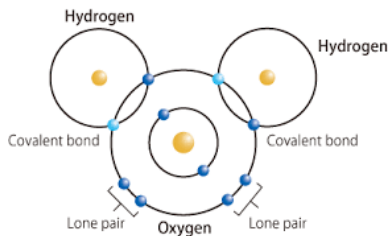
- ▶ Los **Fotones** son los **bosones de gauge de QED**
- ▶ **Quarks** y **Leptones cargados** tienen **carga eléctrica**
- ▶ **Neutrinos** **NO** tienen carga eléctrica

- ▶ **QED** no es más que la versión cuántica del *good ol'* electromagnetismo

## ★ Corrientes eléctricas

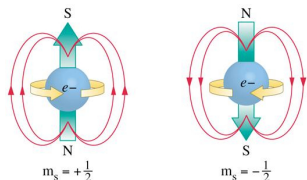


## ★ Enlaces químicos



# El momento magnético del electrón

- **QED** proporciona una de los resultados más espectaculares de la **ciencia**

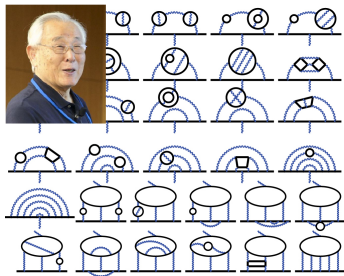


**Momento dipolar magnético = Spin  $\times$  Carga**

- ▶ Ha sido **calculado** y **medido** con muchos dígitos de precisión

★ **Toichiro Kinoshita:** 60 años de dedicación a QED

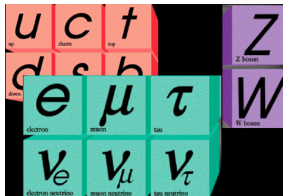
★ Acuerdo entre **teoría** y **experimento**



$$a_e^{\text{calculado}} = 0.001\,159\,652\,181\,643(764)$$
$$a_e^{\text{experim.}} = 0.001\,159\,652\,180\,73(28)$$

# La interacción débil

- La subteoría responsable se llama **teoría electrodébil**

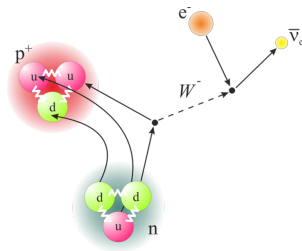


- Los **bosones  $W$  y  $Z$**  son los **bosones débiles**
- Afecta a todas las partículas incluido los **neutrinos**
- La interacción débil acopla a **sabor**:  
“up particles”  $\leftrightarrow$  “down particles”
- Débil**: es de muy corto alcance  $m_{W,Z} \sim 90 \text{ GeV}$

- Becquerel y Marie Curie** (1890's)



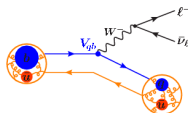
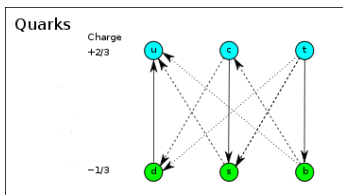
- Produce la **radiación  $\beta$**





# El sabor del Modelo Estándar

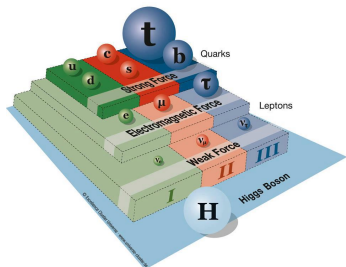
- Interacción débil mezcla familias: **Dinámica de sabor**
- ▶ Desintegración de los **quarks pesados!**



No hay materia **estable exótica**

**Núcleos:** Sólo protones y neutrones

- El puzzle de sabor del Modelo Estándar



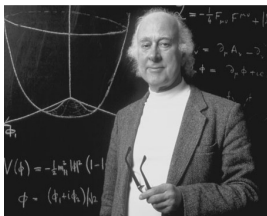
- ▶ **Tres familias** idénticas salvo por la **masa**
- ▶ Las interacciones débiles rompen **simetría partícula-antipartícula**: **Violación de CP**

Origen de las masas de las partículas?

De las interacciones del **bosón de Higgs**

# El campo de Higgs

- Existe un campo que se llama **campo de Higgs**

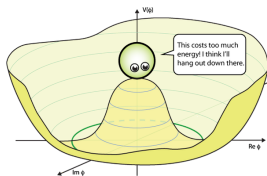


- ▶ Tiene interacciones con los **quarks y leptones**

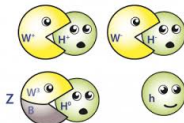
- ★ La **carga** de la interacción produce **masa** de las partículas
- ★ **Por qué al Higgs da mas masa a unas partículas que a otras?**



- El campo de Higgs tiene un potencial especial ...



- ▶ Da la masa a los **bosones W y Z!**



- ▶ Y tiene una partícula: **el bosón de Higgs**

# EL MECANISMO DE HIGGS

1 PARA ENTENDER EL MECANISMO DE HIGGS, IMAGÍNALE EL ESPACIO OCUPADO TAN SOLO POR EL CAMPO DE HIGGS COMO UNA SALA LLENA DE FÍSICOS CHARLANDO TRANQUILAMENTE



2



UN FAMOSO CIENTÍFICO, ALBERT EINSTEIN, ENTRA Y CREA UNA PERTURBACIÓN AL PASAR POR LA HABITACIÓN ATRAYENDO A UN GRUPO DE ADMIRADORES A CADA PASO QUE DA

LO QUE INCREMENTA SU RESISTENCIA AL MOVIMIENTO; EN OTRAS PALABRAS, LE HACE ADQUIRIR MASA, JUSTO COMO LE PASA A UNA PARTÍCULA AL MOVERSE EN EL CAMPO DE HIGGS

3



4

SI UN RUMOR ATRAVIESA LA SALA...



5

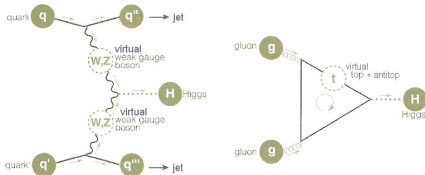


SE PRODUCE EL MISMO AGRUPAMIENTO, AUNQUE ESTA VEZ ENTRE LOS PROPIOS CIENTÍFICOS. EN ESTA ANALOGÍA, LOS GRUPOS SON LAS PARTÍCULAS DE HIGGS

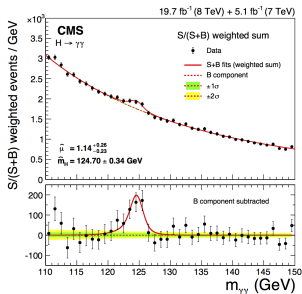
IMÁGENES Y TEXTO CERN / JORDI BOIXADER

# El bosón de Higgs

- El bosón de Higgs fue descubierto en 2013 aquí, en el CERN



- Existencia bien establecida



**H<sup>0</sup>**

$J = 0$

Mass  $m = 125.09 \pm 0.24 \text{ GeV}$   
Full width  $\Gamma < 0.013 \text{ GeV}$ , CL = 95%

### H<sup>0</sup> Signal Strengths in Different Channels

See Listings for the latest unpublished results.

Combined Final States =  $1.10 \pm 0.11$

$W W^* = 1.08^{+0.18}_{-0.16}$

$Z Z^* = 1.29^{+0.26}_{-0.23}$

$\gamma\gamma = 1.16 \pm 0.18$

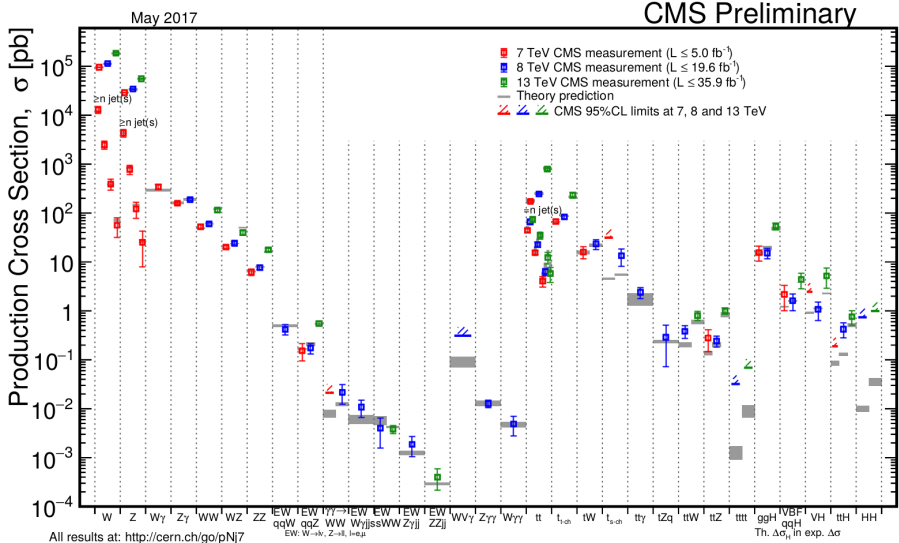
$b\bar{b} = 0.82 \pm 0.30$  (S = 1.1)

$\mu^+ \mu^- = 0.1 \pm 2.5$

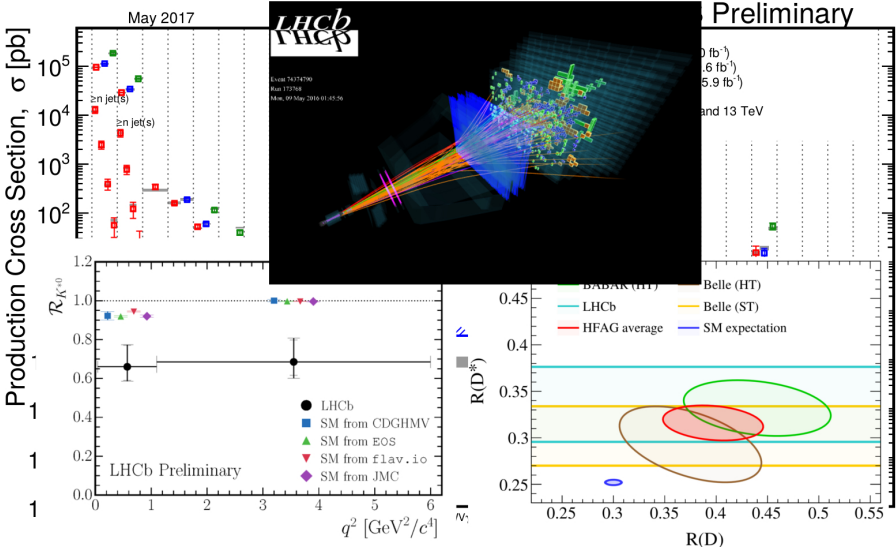
$\tau^+ \tau^- = 1.12 \pm 0.23$



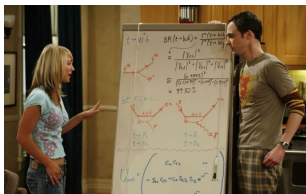
# El Modelo Estándar funciona muy bien. . . salvo alguna anomalía



# El Modelo Estándar funciona muy bien. . . salvo alguna anomalía



## Más referencias



- “**Introduction to Elementary Particles**”, David Griffiths  
Texto introductorio a nivel de carrera de física
- “**The Inward Bound**”, Abraham Pais  
Gran libro sobre el desarrollo histórico y conceptual de la Física de Partículas desde el s. XIX

- **The Particle adventure:** <http://www.particleadventure.org/>
- **The scale of the Universe:** <http://htwins.net/>
- **Wikipedia:** [https://en.wikipedia.org/wiki/Main\\_Page](https://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page)
- **The Particle Data Group:** <http://pdg.lbl.gov/>
- “**La Brújula de la Ciencia**” Onda Cero
  - ▶ Conducida por **Alberto Aparici** del Instituto de Física Corpuscular de Valencia

**Muchas gracias por su atención**