

# Física experimental de partículas con el LHC en el IFIC: ATLAS y LHCb

Carmen García

IFIC

(CSIC-Universitat de Valencia)

# Física de partículas

Cosmología

Astrofísica

Astronomía

Geofísica

Física Nuclear

Física del estado sólido

Química-Biología

Mecánica



fm pm nm μm mm m Km Mm Gm Tm Pm Em



> 40 órdenes de magnitud

# Constituyentes de la materia e interacciones fundamentales

## LEPTONES

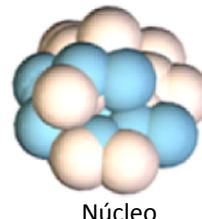
	Carga eléctrica		
Tau	-1	0	Neutrino Taónico
Muón	-1	0	Neutrino Muónico
Electrón	-1	0	Neutrino Electrónico

## FUERTE

### Gluones (8)



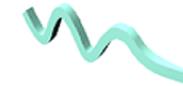
### Mesones Bariones



### Núcleo

## ELECTROMAGNÉTICA

### Fotón



Átomos  
Luz  
Elementos  
químicos

## QUARKS

	Carga eléctrica		
Bottom	-1/3	2/3	Top
Strange	-1/3	2/3	Charm
Down	-1/3	2/3	Up

Cada quark: R A V

## GRAVITATORIA

### Gravitón (?)

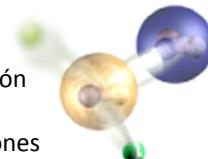
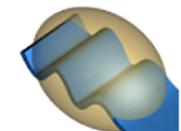


Sistema solar  
Galaxias  
Agujeros Negros



## DÉBIL

### Bosones W y Z



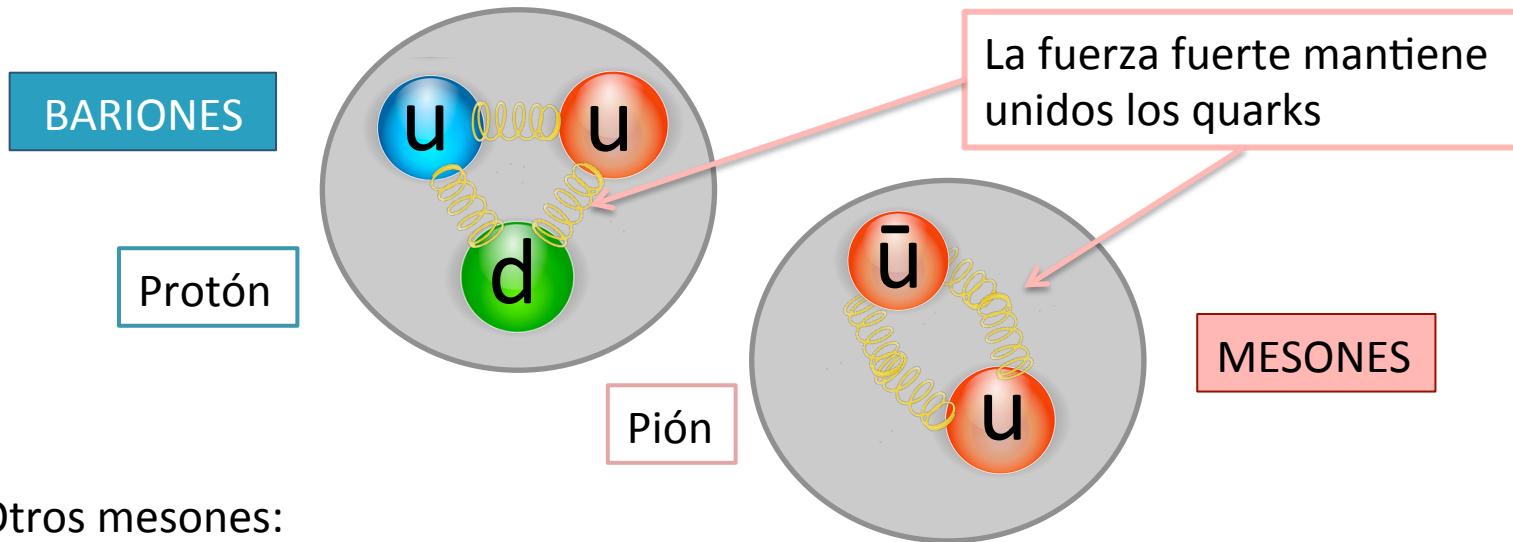
Desintegración del neutrón  
Radiactividad  $\beta$   
Interacción de los neutrones  
Procesos solares

## Necesitamos:

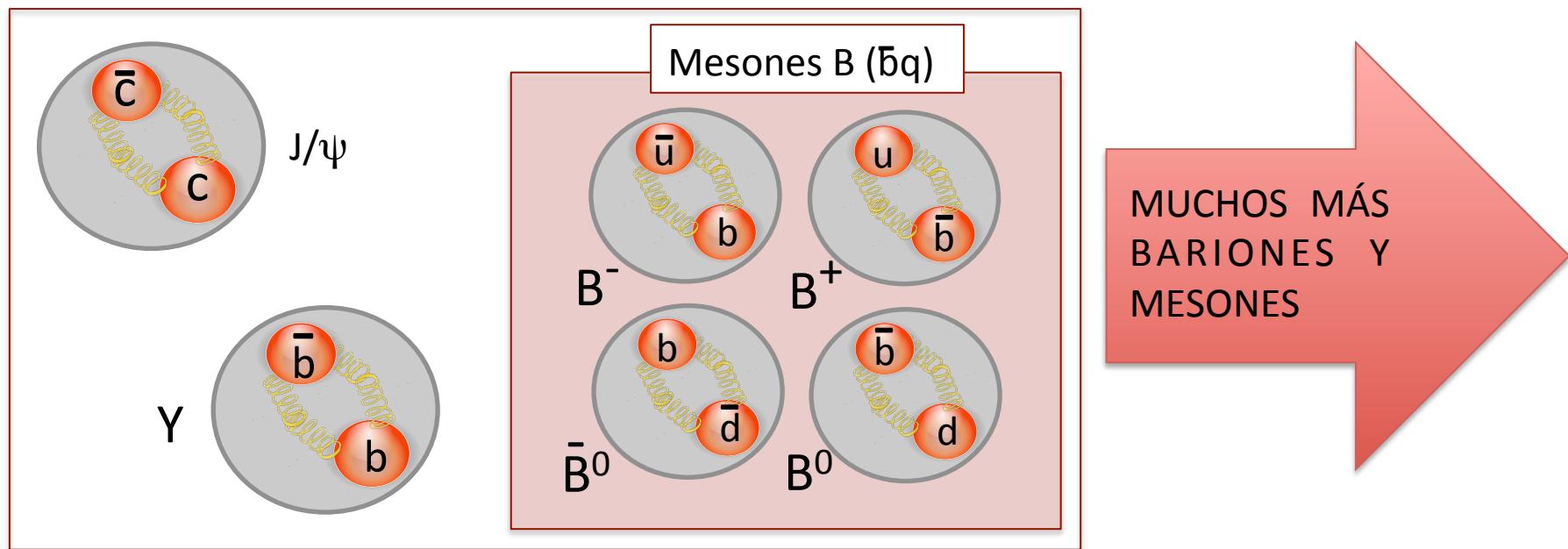
- Suficiente energía para producir nuevas partícula, al menos igual que su masa ( $E=mc^2$ ).
- Suficiente intensidad (suficientes interacciones) para producir suficientes partículas.

## Bariones y Mesones

Los quarks no existen aislado sino que están “confinados” formando:



Otros mesones:



# La biblia de las partículas: PDG (“Particle Data Book”)

STRANGE MESONS				
$K_L^0$	130	$D^+$	411	
$K_S^0$	310	$D^0$	421	
$K^0$	311	$D_0^*(2400)^+$	10411	
$K^+$				
$K_0^*(800)^0$				
$K_0^*(800)^+$				
$K_0^*(1430)^0$				
$K_0^*(1430)^+$				
$K(1460)^0$				
$K(1460)^+$				
$K(1830)^0$				
$K(1830)^+$				
$K_0^*(1950)^0$				
$K_0^*(1950)^+$				
$K^*(892)^0$				
$K^*(892)^+$	323	$D_{s1}(2536)^+$	10433	
$K_1(1270)^0$	10313	$D_{s1}(2460)^+$	20433	
$K_1(1270)^+$	10323	$D_{s2}^*(2573)^+$	435	
$K_1(1400)^0$	20313			
$K_1(1400)^+$	20323			
$K^*(1410)^0$	100313	$B^0$	511	
$K^*(1410)^+$	100323	$B^+$	521	



## CHARMED MESONS

$D^+$	411
$D^0$	421
$D_0^*(2400)^+$	10411

## $c\bar{c}$ MESONS

$\eta_c(1S)$	441
$\chi_{c0}(1P)$	445

## LIGHT BARYONS

$p$	2212
$\Lambda$	3122

## BOTTOM BARYONS

$\Lambda_b^0$	5122
$\Sigma_b^-$	5112

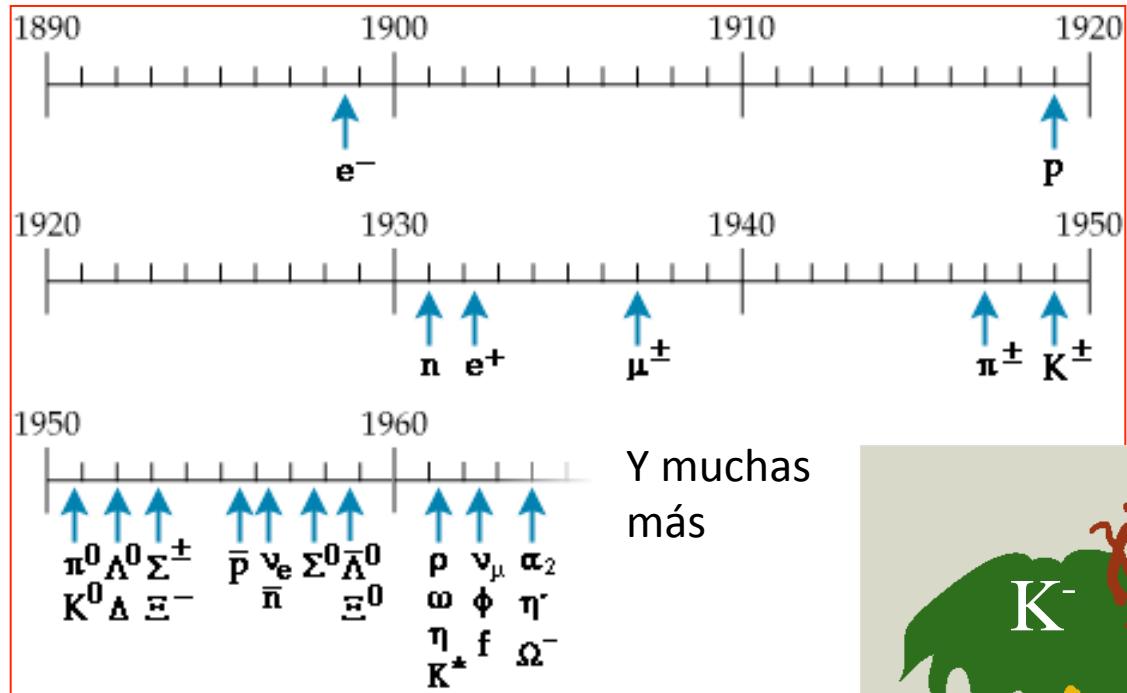
“Joven, si pudiera recordar el nombre de todas estas partículas habría sido botánico”

		BARYONS	
$\psi(3770)$	30443	$\Lambda$	3122

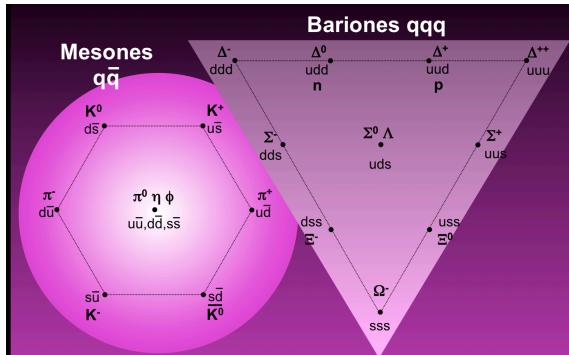
E. Fermi a su estudiante de doctorado  
L. Lederman (ambos Premios Nobel)

$\chi_{c2}(1P)$	445	$\Sigma^{*0}$	3214 <sup>d</sup>
$\chi_{c2}(2P)$	100445*	$\Sigma^{*-}$	3114 <sup>d</sup>
		$\Xi^0$	3322
		$\Xi^-$	3312
		$\Xi^{*0}$	3324 <sup>d</sup>
		$\Xi^{*-}$	3314 <sup>d</sup>
$b\bar{b}$ MESONS		$\Omega_b^-$	5332
$\eta_b(1S)$	551	$\Xi_b^0$	5324
$\chi_{b0}(1P)$	10551	$\Xi_b^-$	5324
$\eta_b(2S)$	100551	$\Omega^-$	3334
$\chi_{b0}(2P)$	110551		
		CHARMED BARYONS	
$\eta_b(3S)$	200551	$\Lambda_c^+$	4122
$\chi_{b0}(3P)$	210551	$\Sigma_c^{++}$	4222
$\Upsilon(1S)$	553	$\Sigma_c^+$	4212

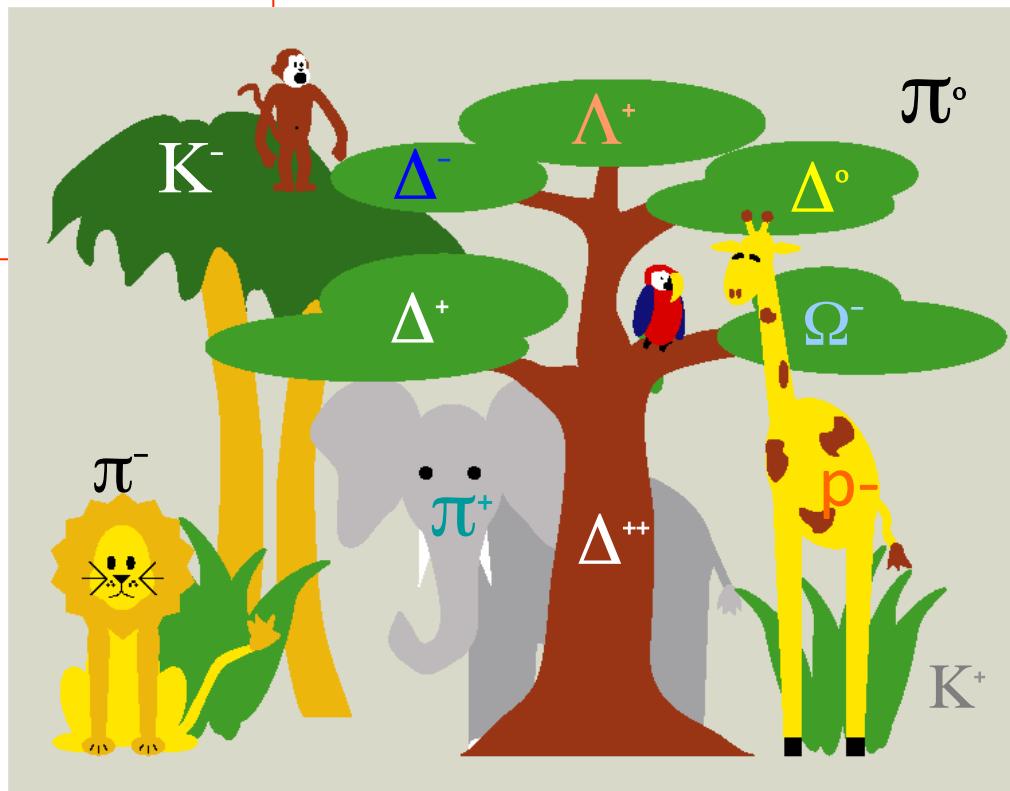
- Actualmente se conoce > 200 partículas
- Muchas de estas partículas son inestables y se desintegran en partículas más ligeras

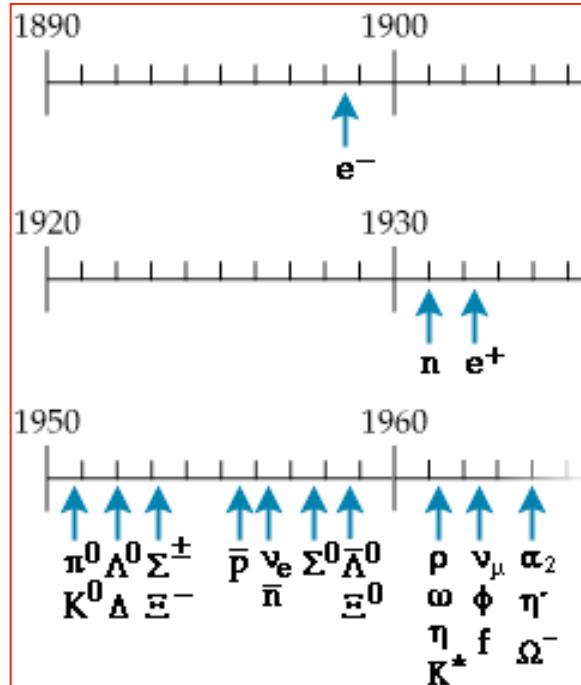


Y muchas  
más

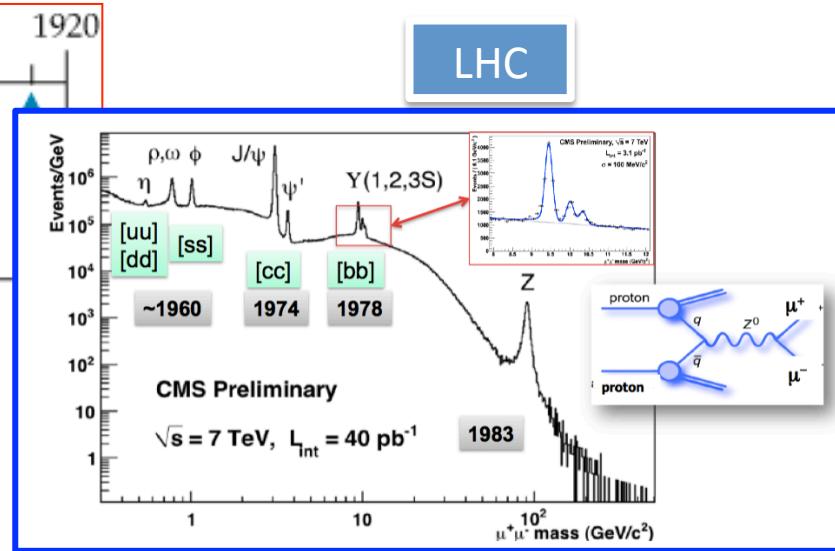


# Menuda jungla

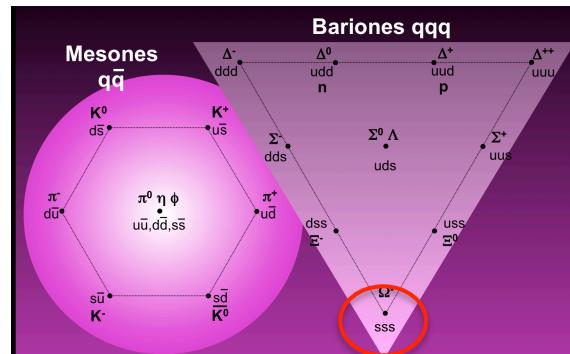
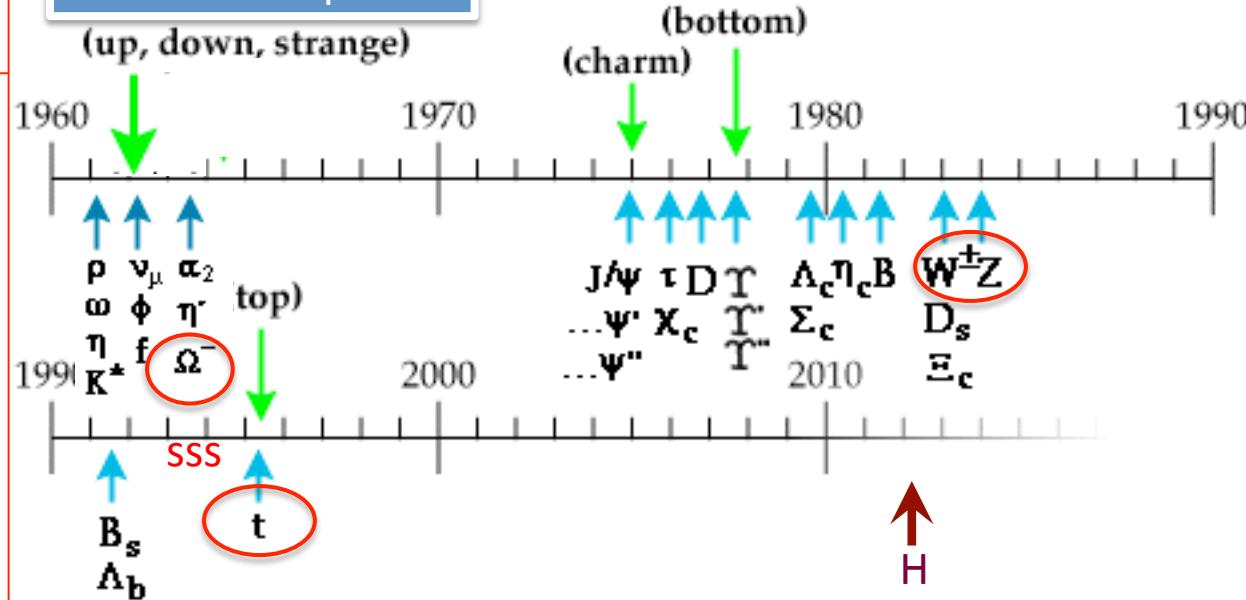




Y muchas más



Modelo de quarks  
(up, down, strange)



Durante el último siglo se han construido muchas generaciones de aceleradores para proporcionar **partículas cada vez más energéticas**, que nos han permitido realizar experimentos encaminados a **entender la estructura última de la materia y sus interacciones**.



70 años  
después



Lawrence con el primer  
Ciclotrón

Cada salto en energía, nos permite adentrarnos más en la estructura subatómica , mostrándonos detalles nunca vistos antes, produciendo nuevas partículas que confirman las teorías que unifican las fuerzas de la naturaleza y nos han llevado cada vez mas cerca del inicio de la creación de universo.

# Las unidades que utilizamos:

## Energía en **eV**:

Energía que adquiere un electrón al moverse en una diferencia de potencial de 1 voltio

$$1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19} \text{ J}$$

## Masa en **eV/c<sup>2</sup>**:

A partir de  $E=m c^2$ .

$$m_e = 0,5 \text{ MeV}/c^2$$

$$m_p = 938 \text{ MeV}/c^2$$

## Momento en **eV/c**:

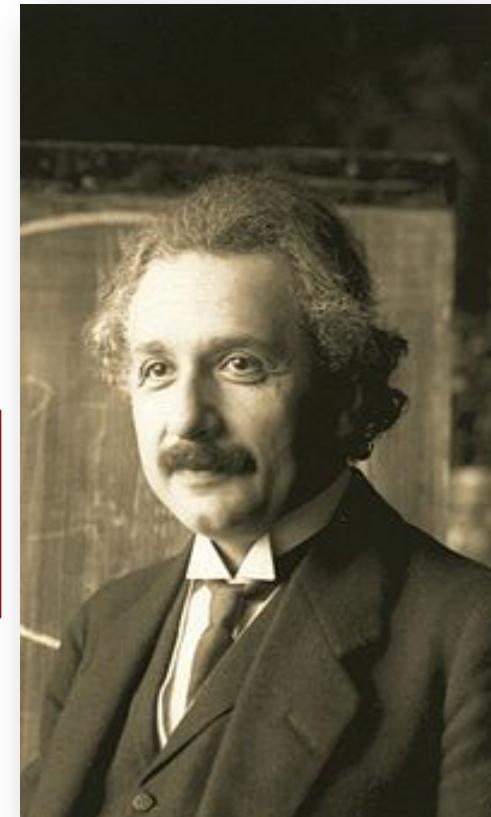
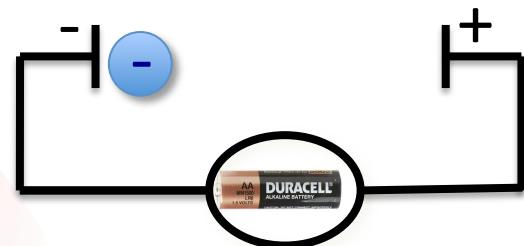
A partir de  $E^2 = (m c^2)^2 + p^2 c^2$

$$\begin{aligned} 1 \text{ keV} &= 10^3 \text{ eV} \\ 1 \text{ MeV} &= 10^6 \text{ eV} \\ 1 \text{ GeV} &= 10^9 \text{ eV} \\ 1 \text{ TeV} &= 10^{12} \text{ eV} \end{aligned}$$

En unidades naturales  $c=1$ :

Energía en **eV**, Masa en **eV** y Momento en **eV**

$$E=q V$$



# Las grandes cuestiones del LHC

# El bosón de Higgs

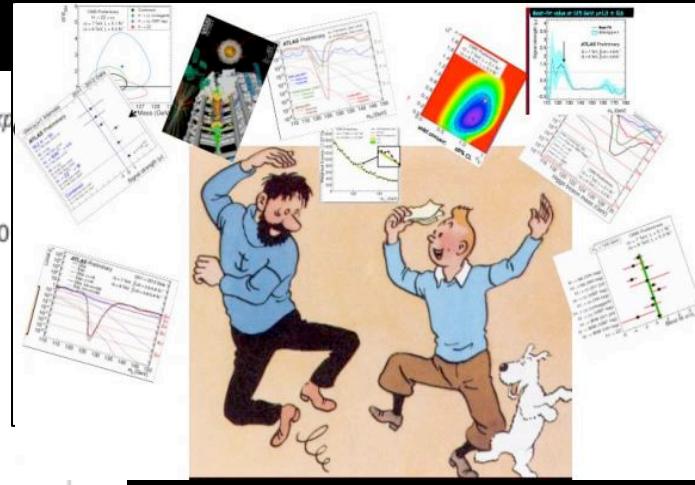
# La búsqueda del bosón de Higgs



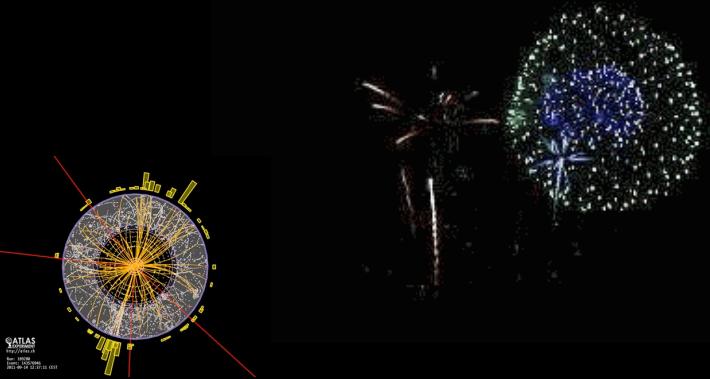
Tevatrón (1992): 6,3Km, 980GeV



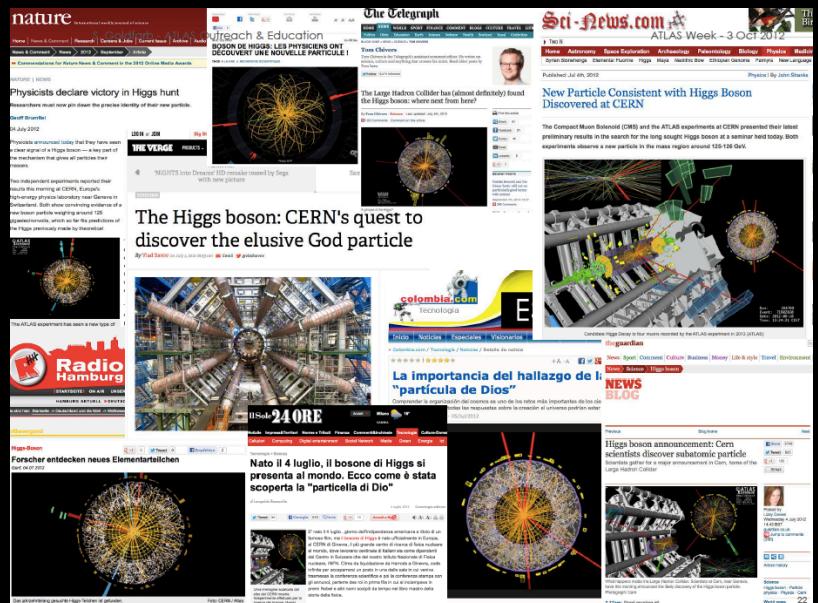
27 Km, 50 → 204GeV  
LHC (2009): 27 Km, 7-8 → 13,5-14TeV



# El descubrimiento del bosón de Higgs



4 de julio de 2012



# Premio Nobel de Física 2013



François Englert y Peter W. Higgs

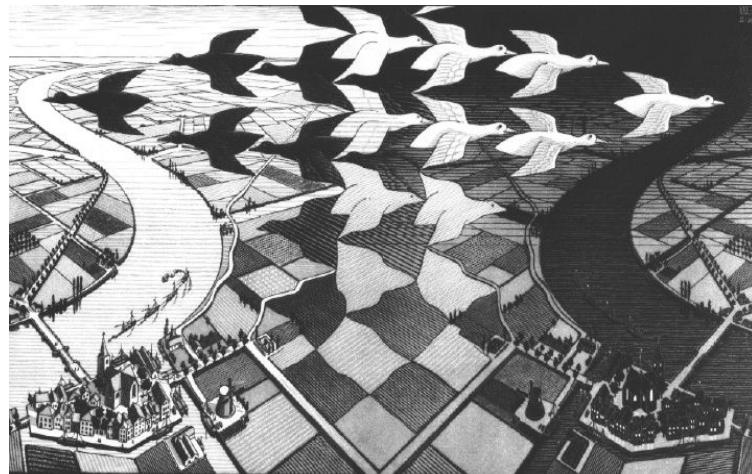
Premio Príncipe de  
Asturias 2013



François Englert , Peter W. Higgs y CERN

La asimetría  
materia-antimateria

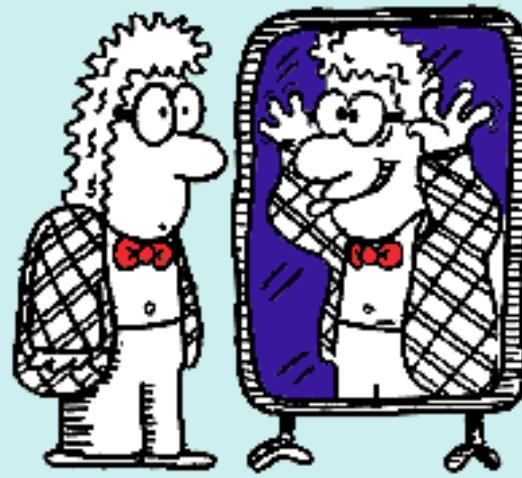
# ¿Dónde ha ido toda la antimateria?



¿La materia y la antimateria se crearon en iguales cantidades?

Particle Data Group

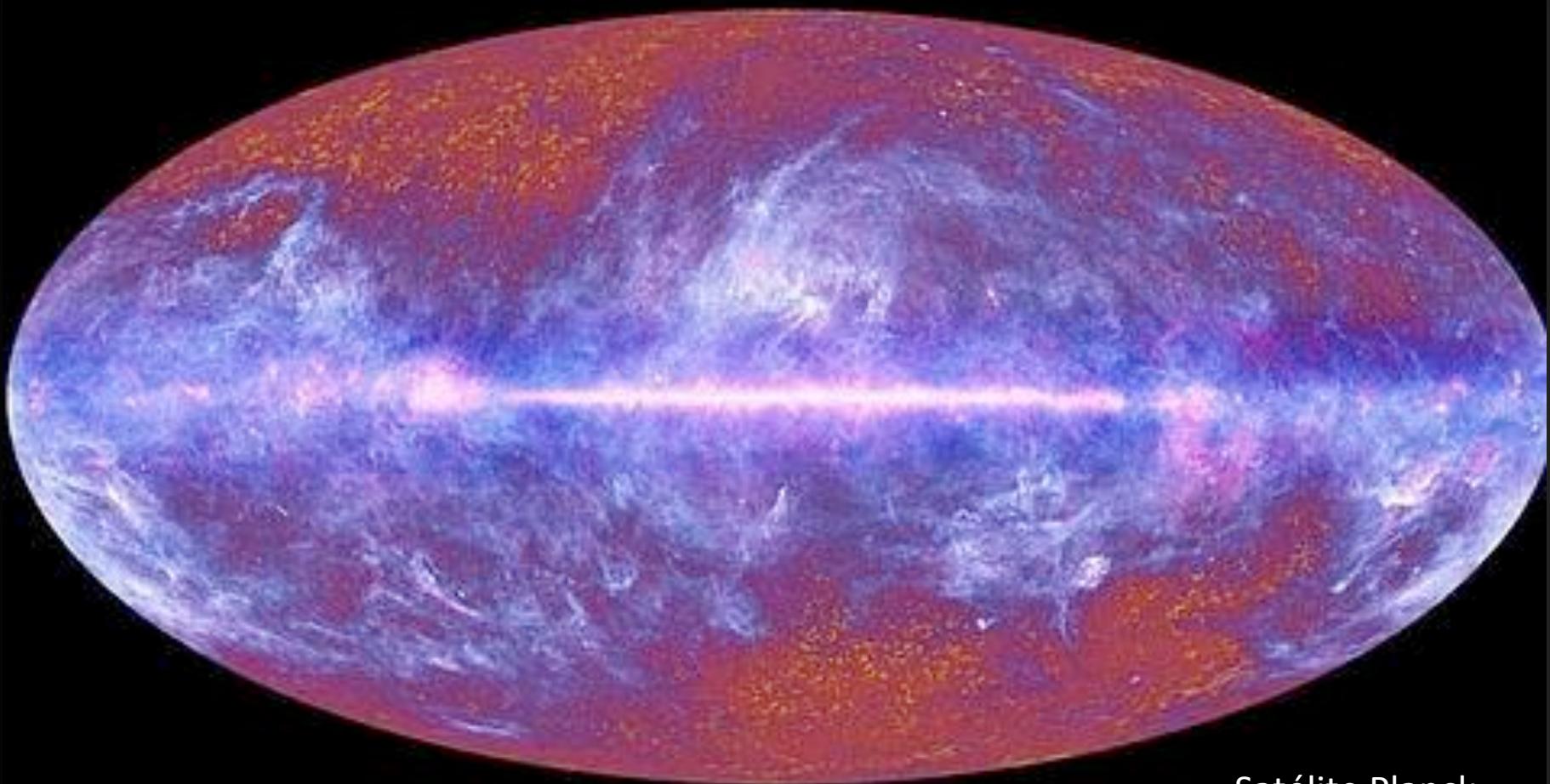
THE MIRROR DID NOT SEEM TO BE OPERATING PROPERLY.



¿Son la materia y la antimateria exactamente simétricas?

# La búsqueda de materia oscura

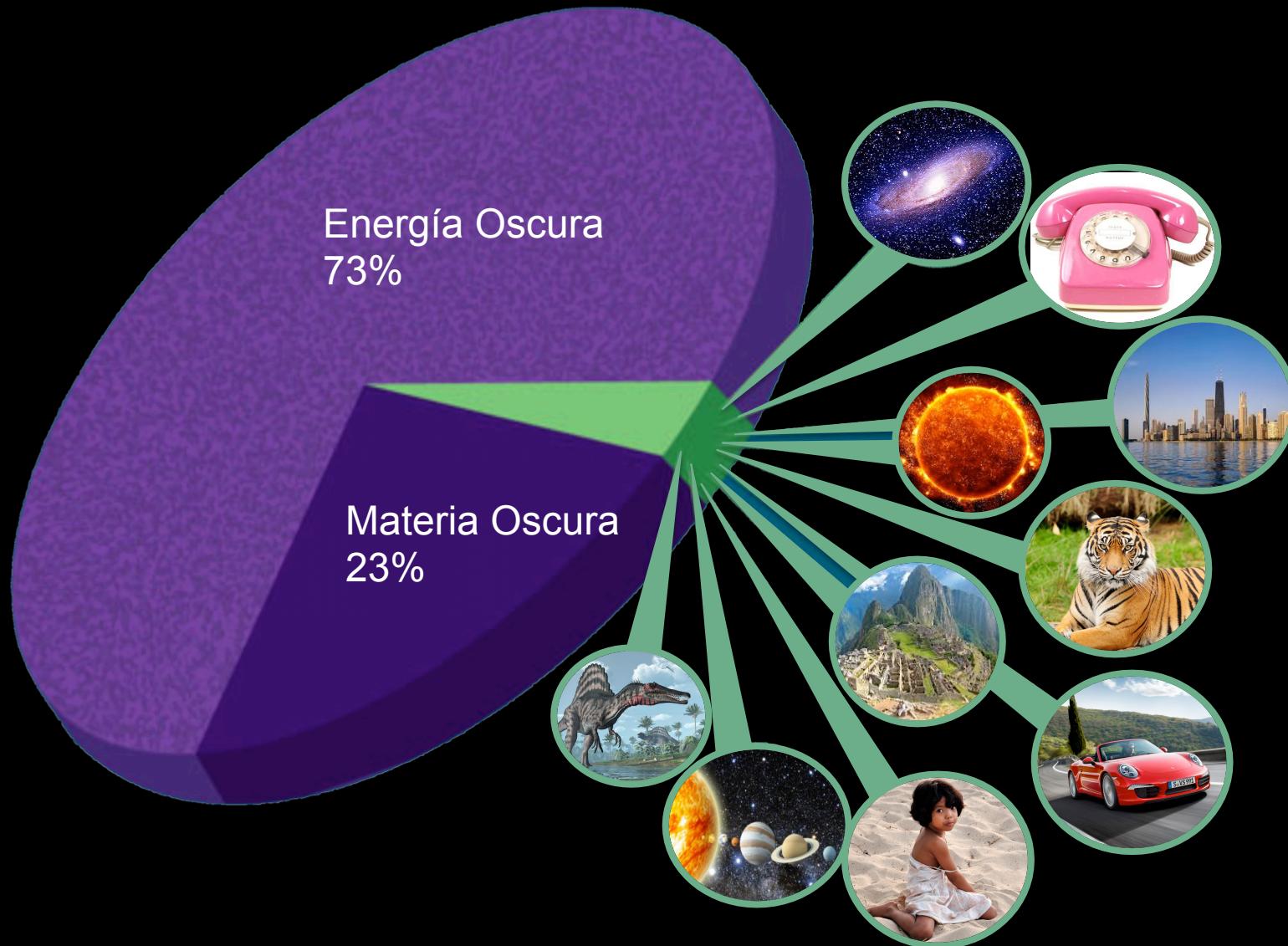
# ¿De qué está hecho el Universo?



Satélite Planck

El Universo cuando sólo tenía 380000 años ...

# ¿De qué está hecho el Universo?



# WANTED

## DEAD OR ALIVE

Oscuro  
Estable  
Frio  
Neutro

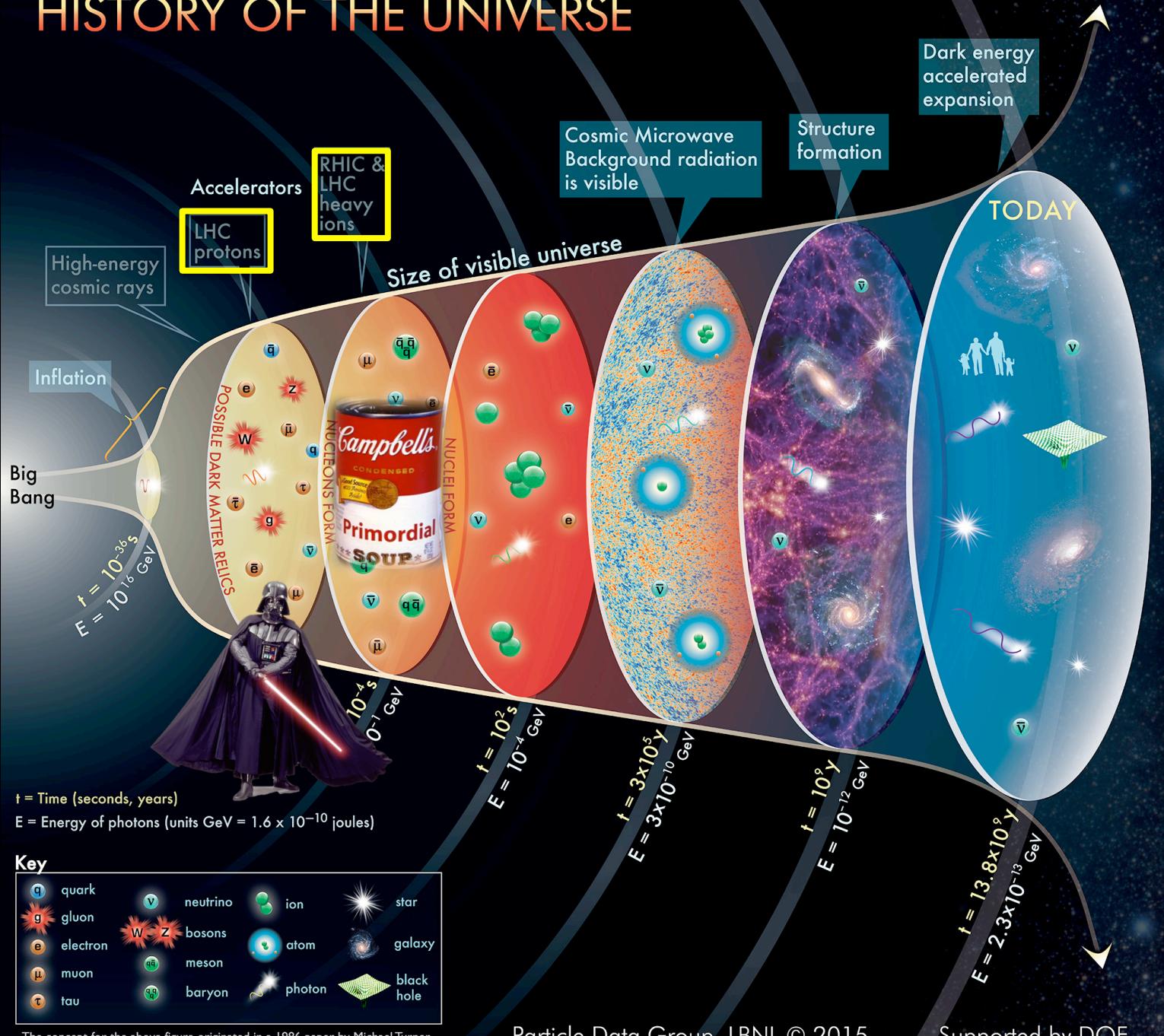
(no absorbe ni emite luz)  
(no se desintegra)  
(no relativista)  
(no cargado)

**REWARD \$4200**

in gold coin for the capture.

# El plasma de quark-gluones

# HISTORY OF THE UNIVERSE



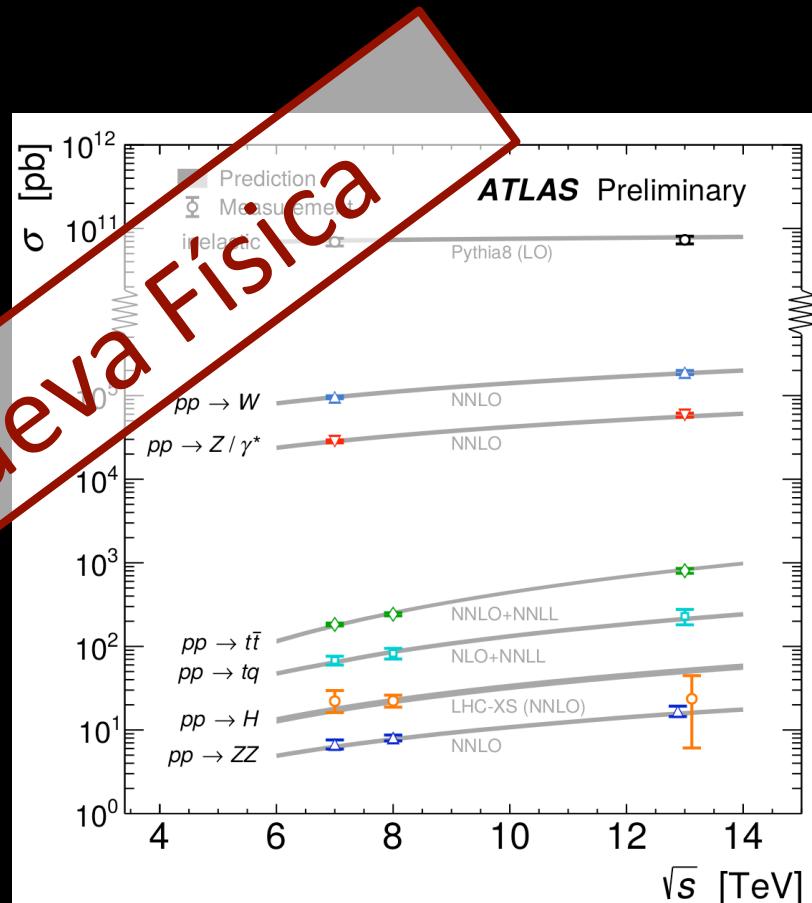
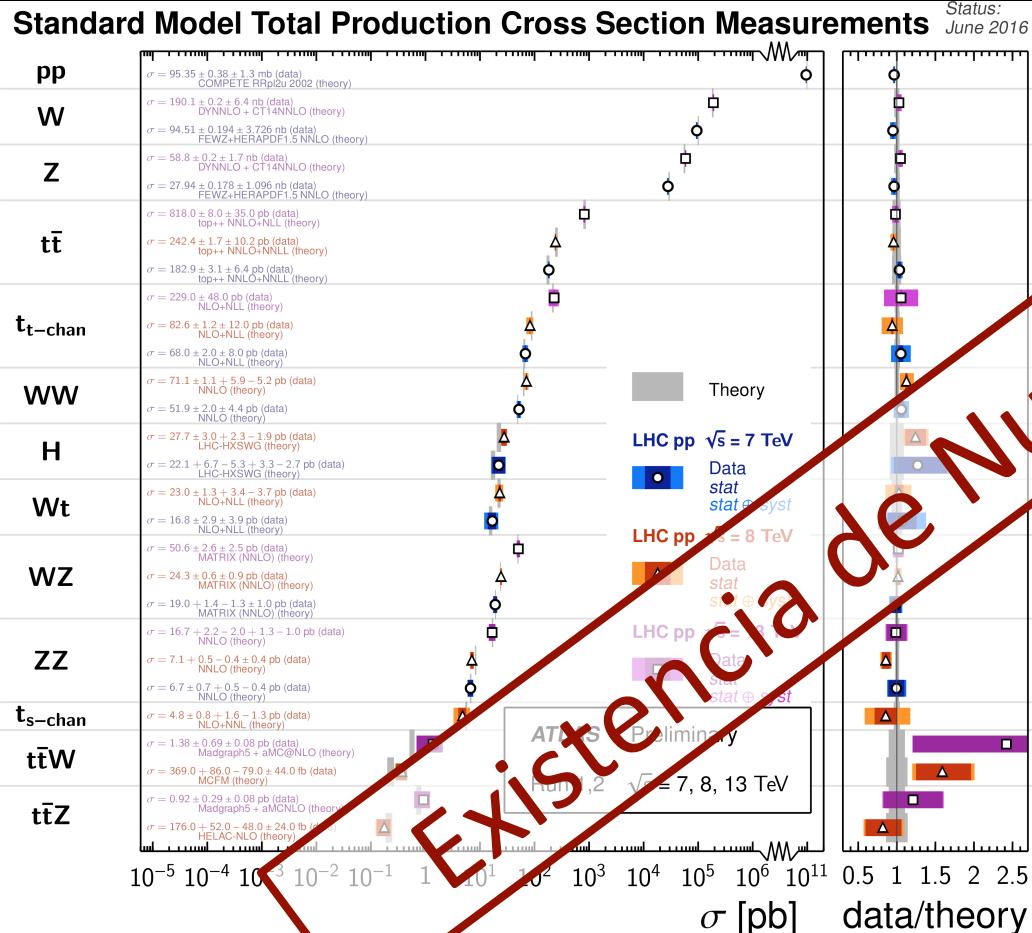
The concept for the above figure originated in a 1986 paper by Michael Turner.

Particle Data Group, LBNL © 2015

Supported by DOE

Verificar el Modelo  
Estándar a alta  
energías

# Verificar el Modelo Estándar



Existencia de Nueva Física

LHC



TO DO LIST:

- Encontrar el Bosón de Higgs*
- Medir sus propiedades*
- Hay más Bosones de Higgs*
- ¿Son simétricas materia y antimateria?*
- Encontrar la Materia Oscura*
- ¿Cómo surgieron las partículas elementales?*
- ¿Son las partículas elementales?*
- Cómo encajar la gravedad*

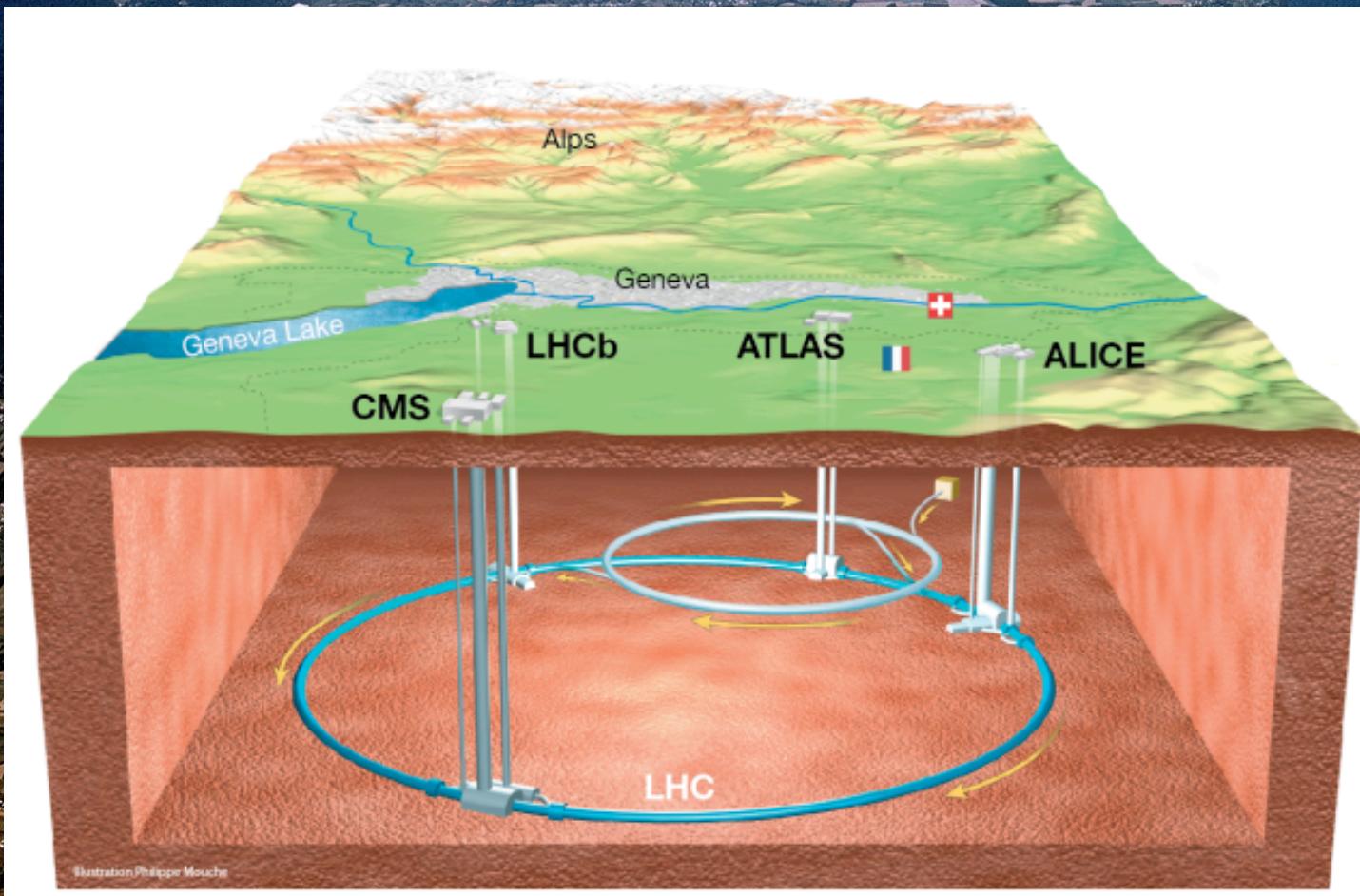


# LHC

# LHC (Large Hadron collider)

Instalado en el tunel de 27 km de LEP  
a una profundidad de 70-140 m

Lago de Leman



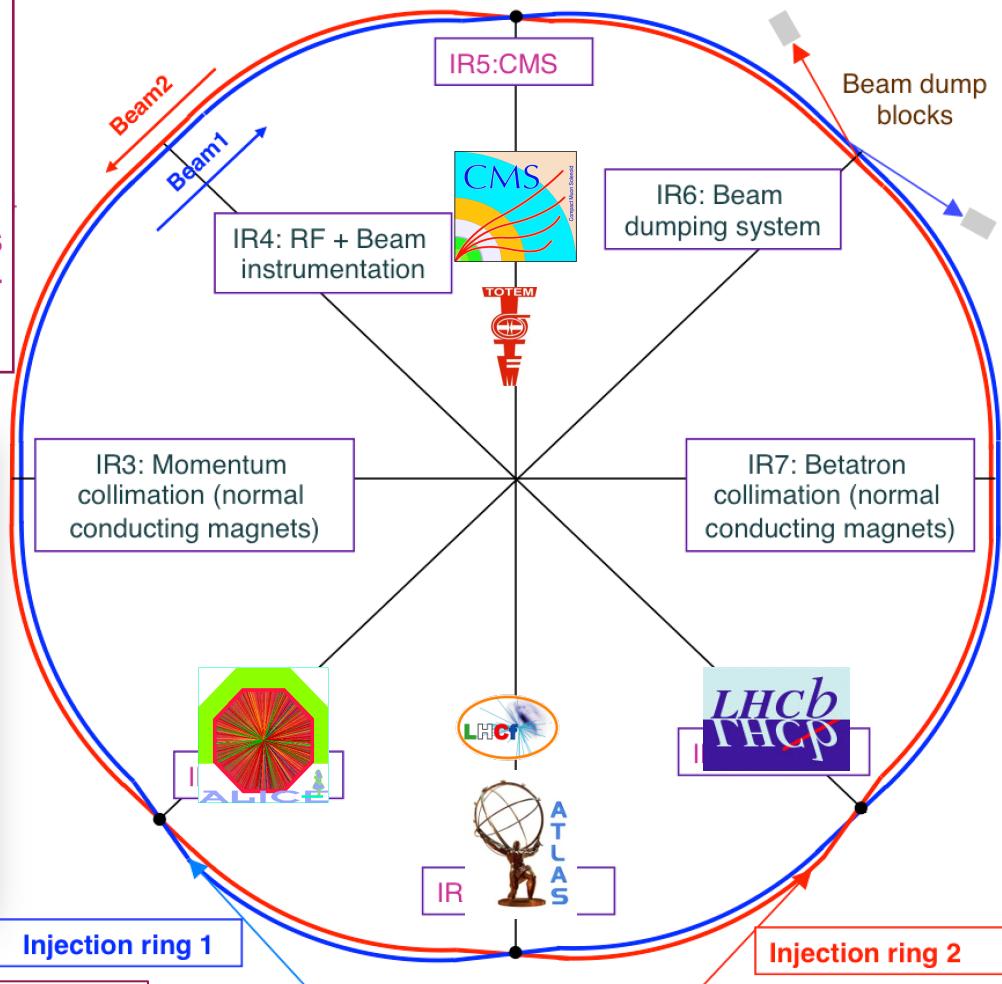
# Acelerador típicode partículas



# LHC (Large Hadron collider)

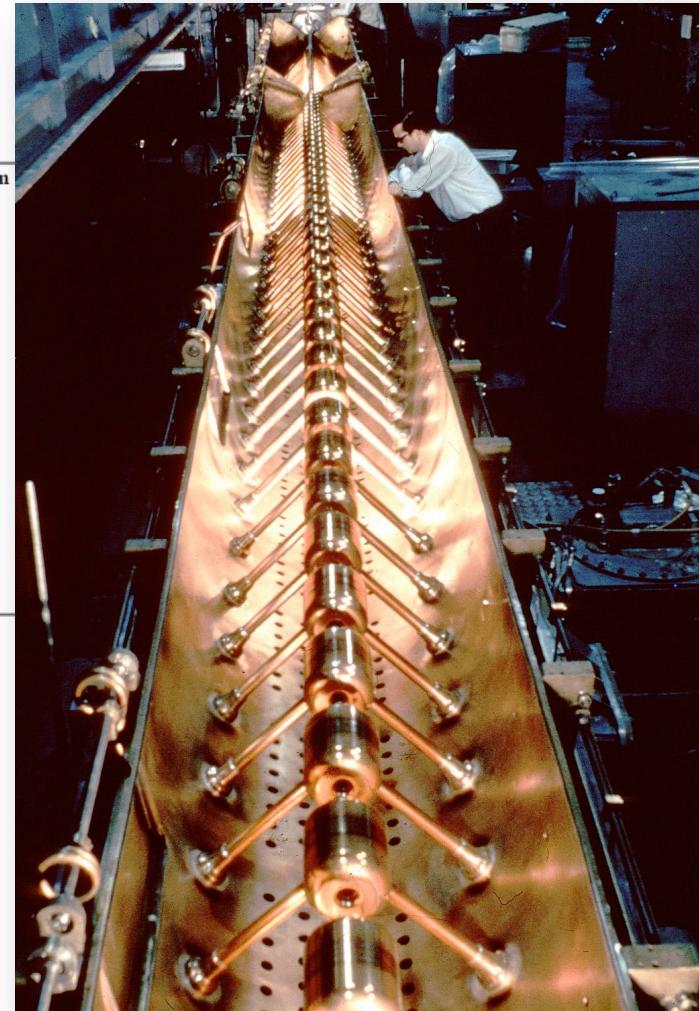
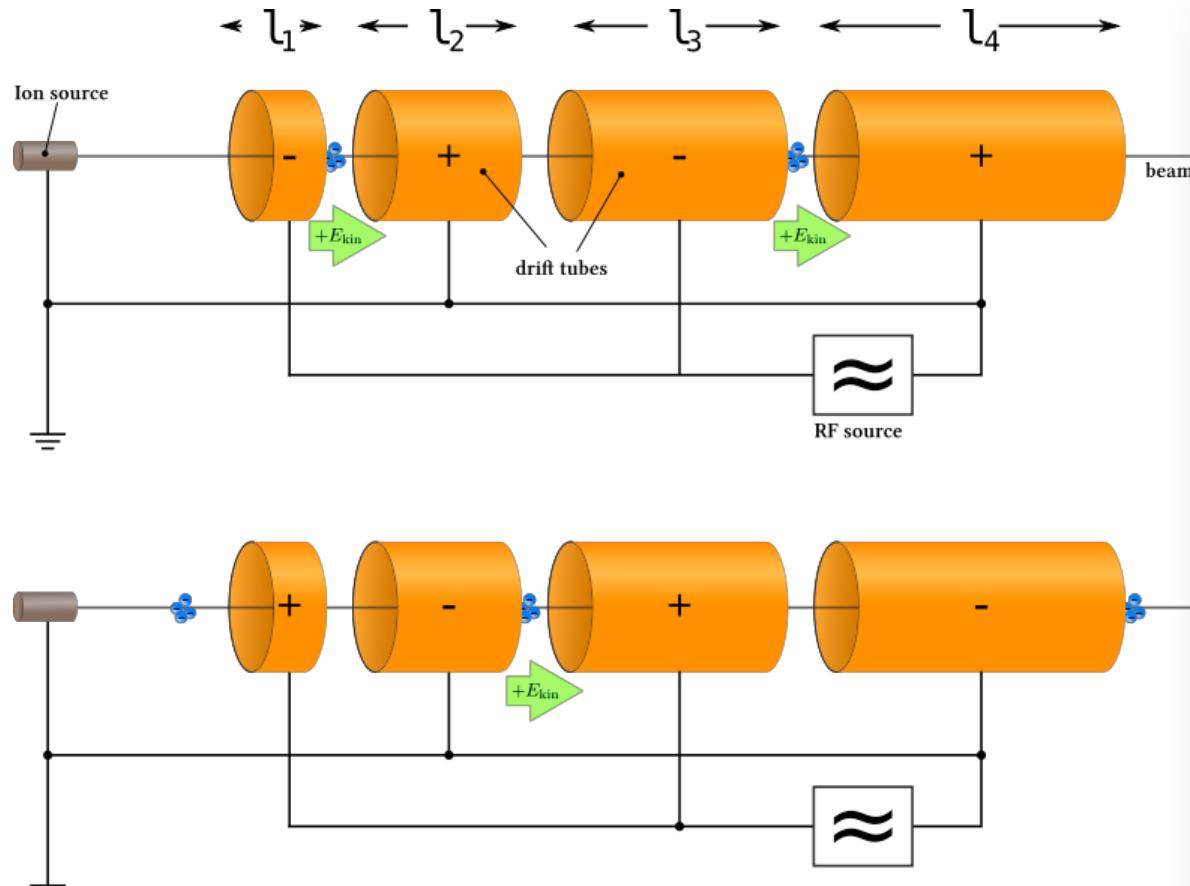
## Diseño del LHC

- 8 arcos
- 8 regiones rectas (LSS),  
~ 700 m de largo.
- Los haces intercambian sus posiciones  
(dentro/fuera) en 4 puntos para asegurar  
las mismas circunferencias

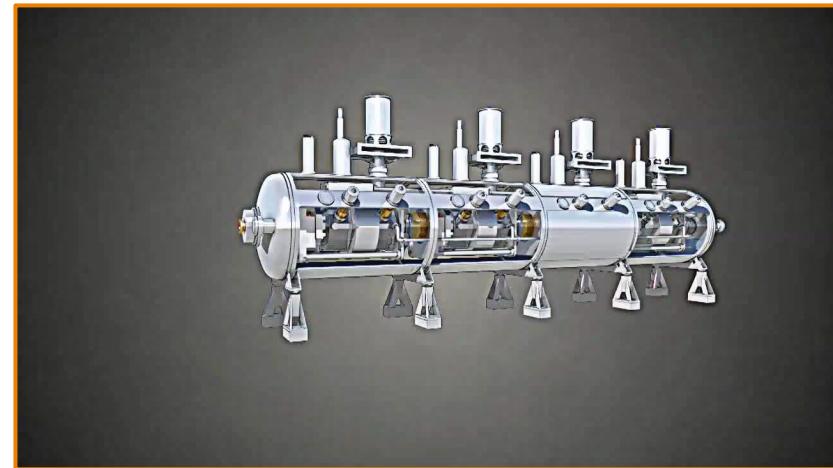
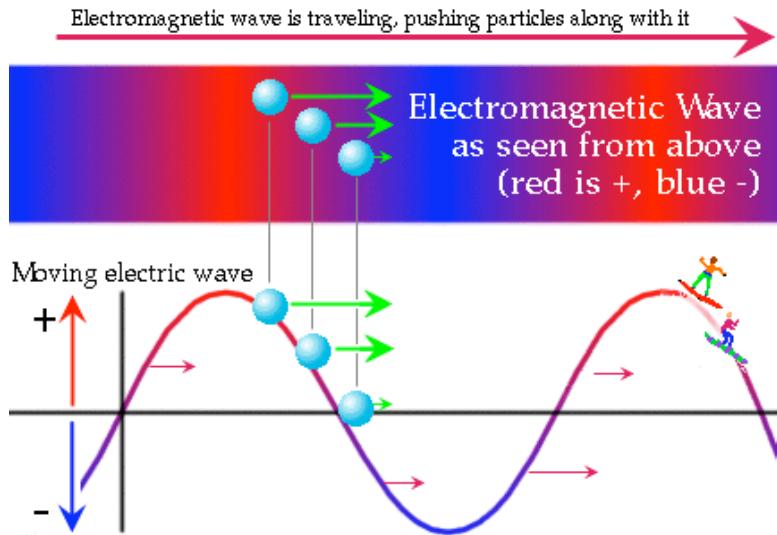


- 16 cavidades de RF de 2 MV (8 por haz), a 400 MHz con 16 MV/haz → **7TeV/haz**.
- El haz gana 0.5 MeV por vuelta, tarda ~ 20 minutos en alcanzar 7 TeV.

# Cavidades de radiofrecuencia

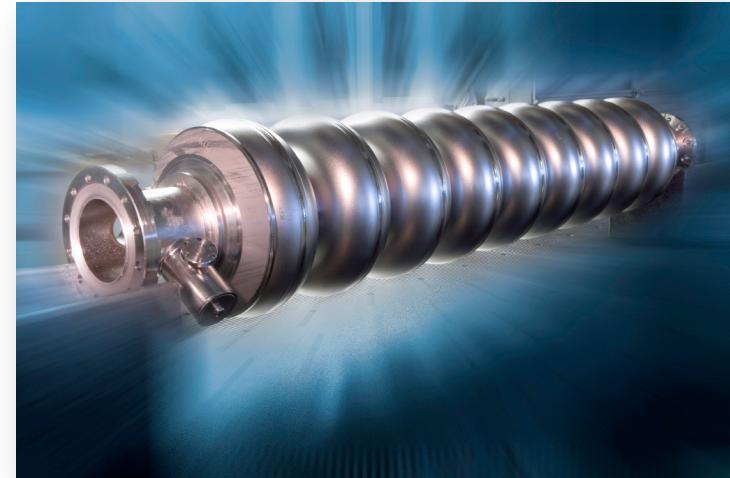
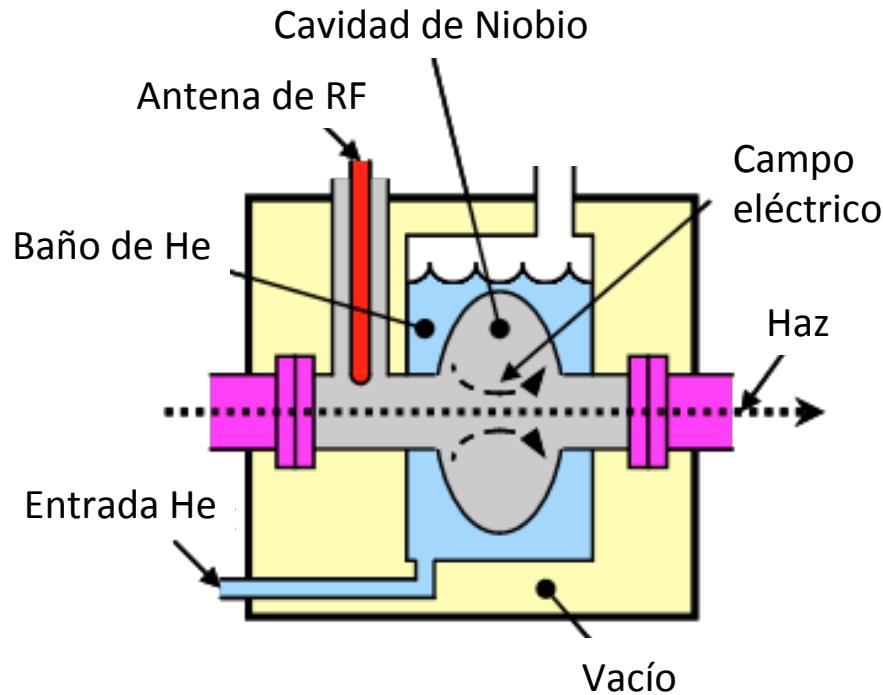


# Como actúan las cavidades de RF



Las partícula cercanas a la cresta de la onda experimentan mayor aceleración que las cercanas al centro. Como resultado las partículas se van agrupando en **paquetes**.

# Cavidades de RF superconductoras



**Superconductividad** → algunos materiales a temperaturas cerca de 0 K tienen una resistencia eléctrica nula.



12.500 A

Cobre

Niobio

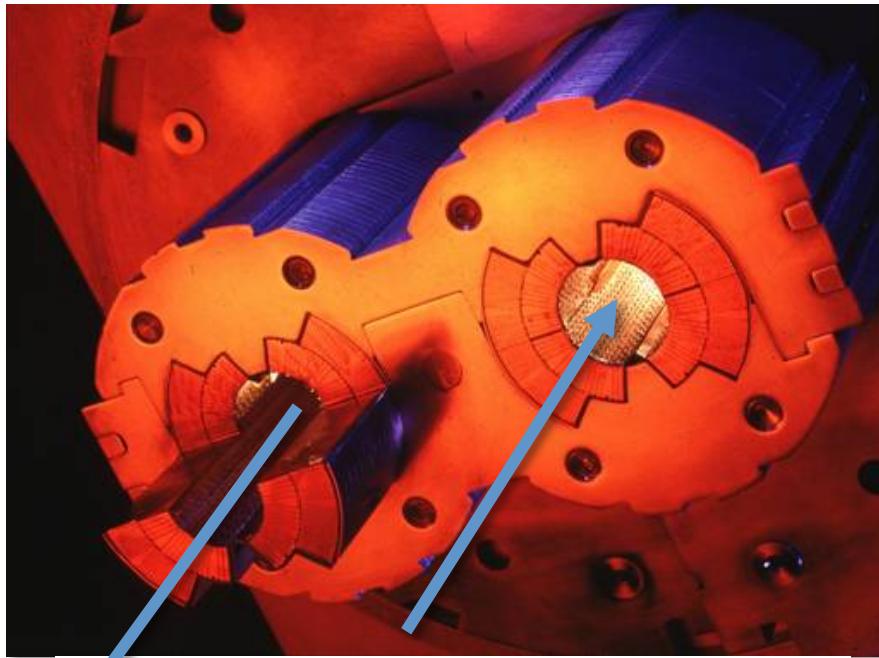
Misma resistencia

# Los imanes del LHC



LHC utiliza alrededor de 9300

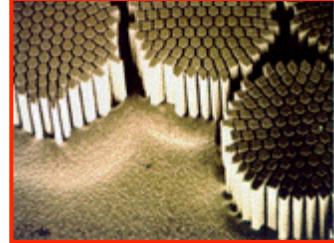
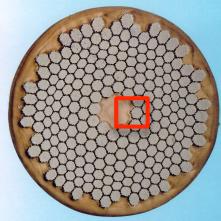
1232 dipolos, 392 cuadrupolos, sextupolos, octupolos.....



Presión a 1000 Km de altura, 10 veces menos atmósfera que en la Luna

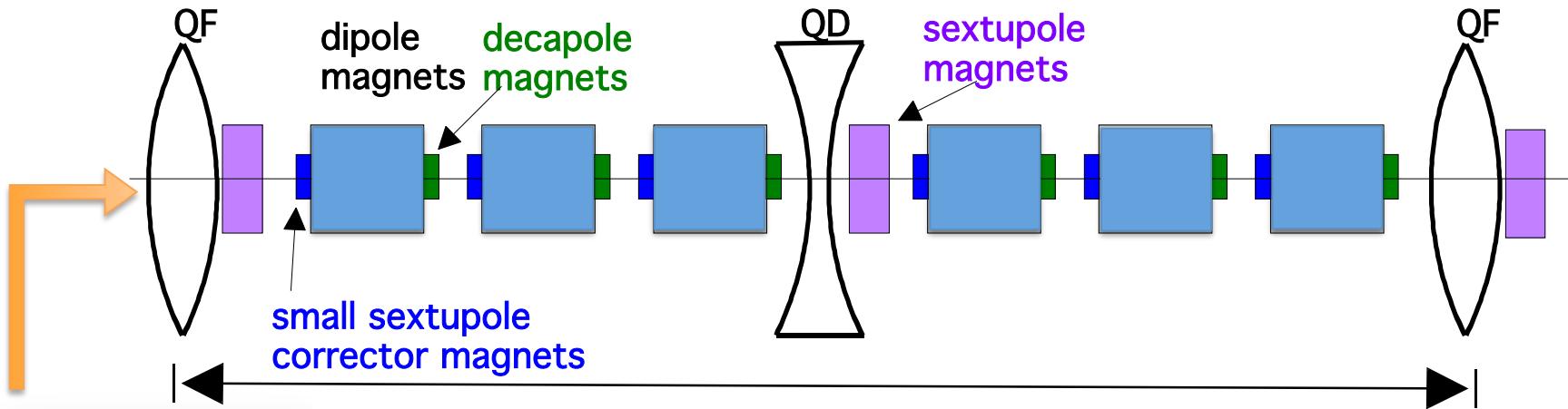
El mayor reto tecnológico del LHC son los **dipolos SUPER-CONDUCTORES**

Los imanes están sumergidos en un baño de Helio SUPERFLUIDO a -271 °C (1.9ºK).

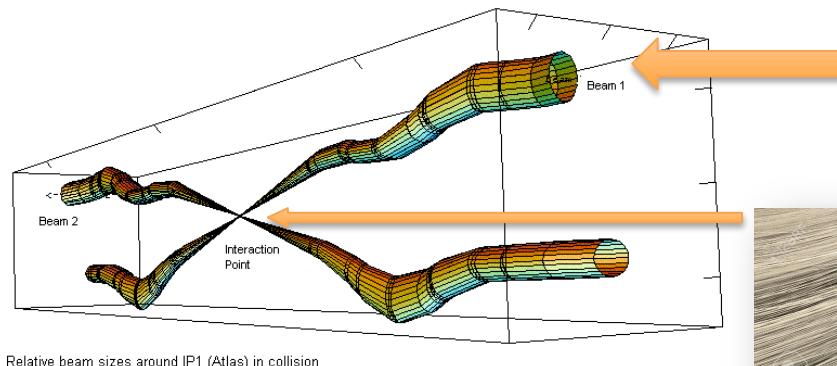
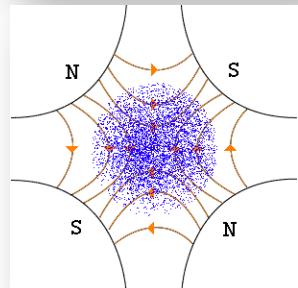
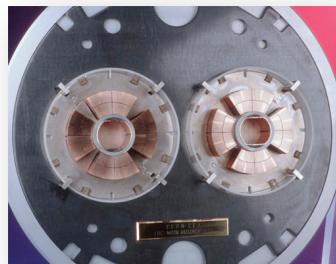


- Los dipolos utilizan un total de 250.000 Km de cable: suficiente para dar 6,8 veces la vuelta a la tierra por el ecuador.
- Los cables consisten en 6300 filamentos de niobio-titanio, envueltos en cobre. El diámetro de cada filamento 10 veces menor que la de un cabello humano

# Los haces del LHC



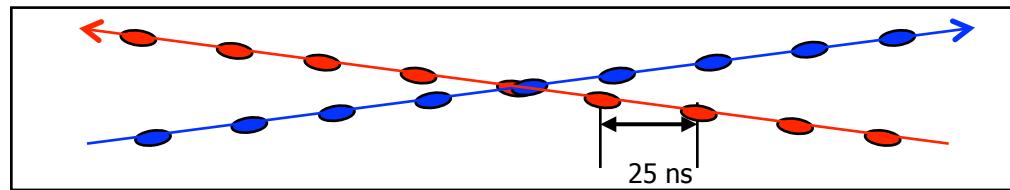
Celda FODO del LHC: 110 m de longitud (vista esquemática)



La dimensión del haz es del orden de 1,6 mm → los paquetes de partículas se comprimen a 16µm en el punto de colisión

# La energía del LHC: 7TeV + 7TeV

**1 TeV** = energía cinética de un mosquito volando lentamente



2802 paquetes \* 115.000.000.000 prot.

El LHC almacenará una energía en sus haces de 360 MJ/haz

Lo importante no es sólo la cantidad de energía almacenada en los imanes sino cómo se libera

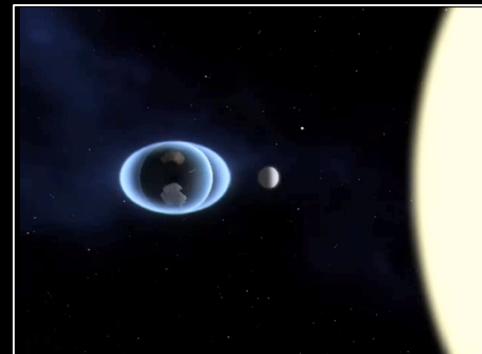


**7 MJ** almacenados en un imán liberados en un punto

# Instalación de los imanes



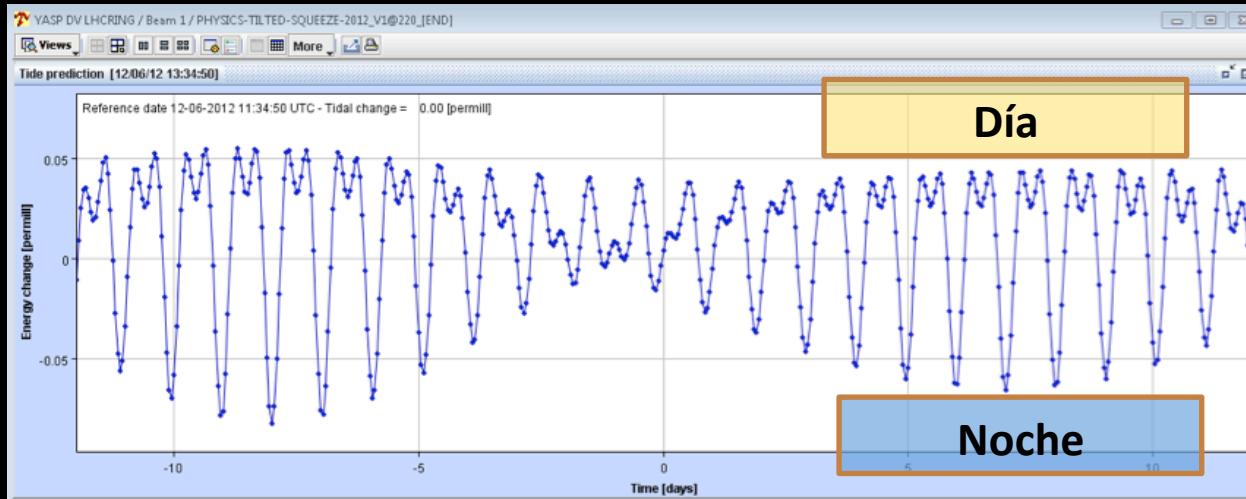
# LHC: calendario y reloj lunar



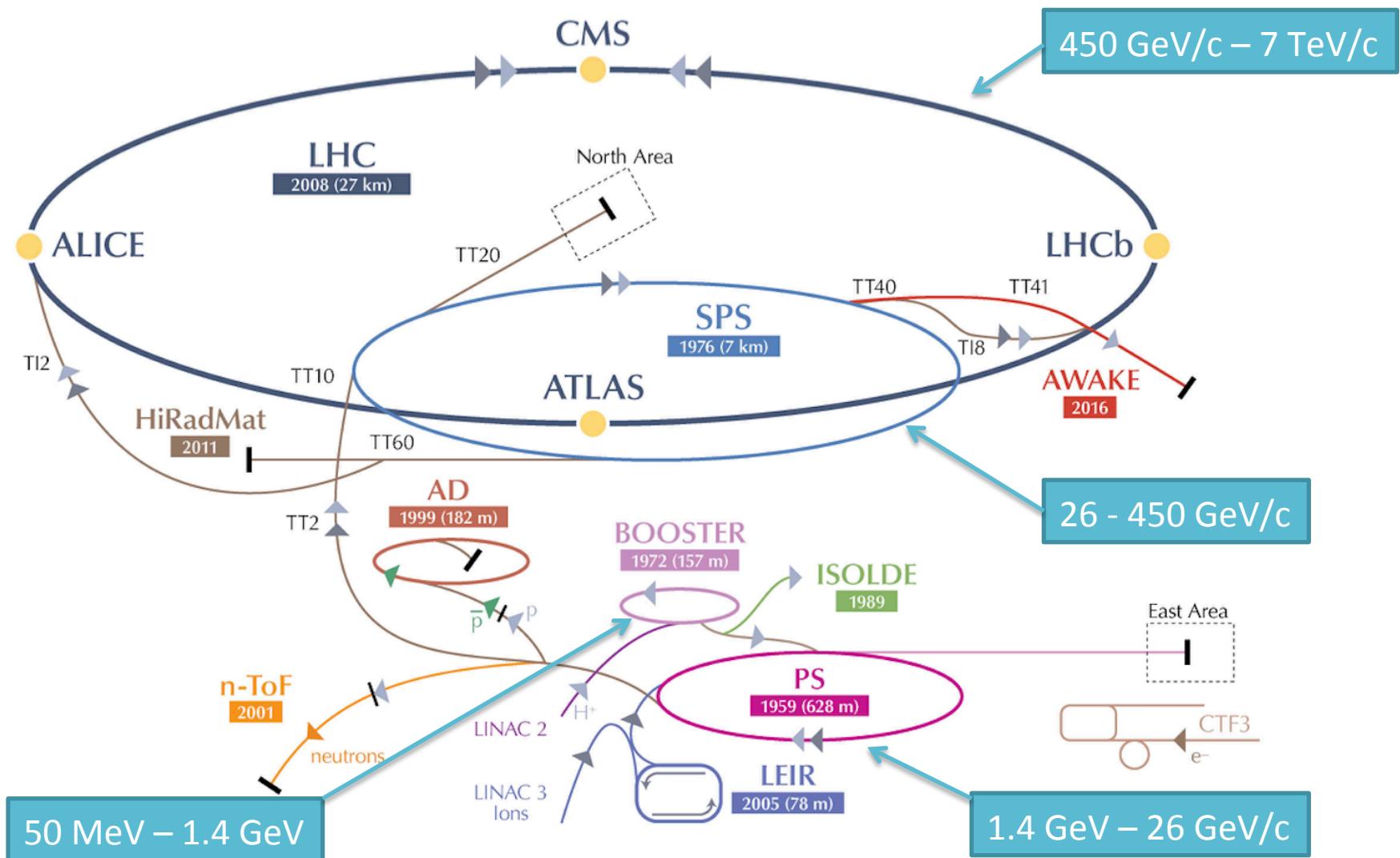
Luna  
Llena



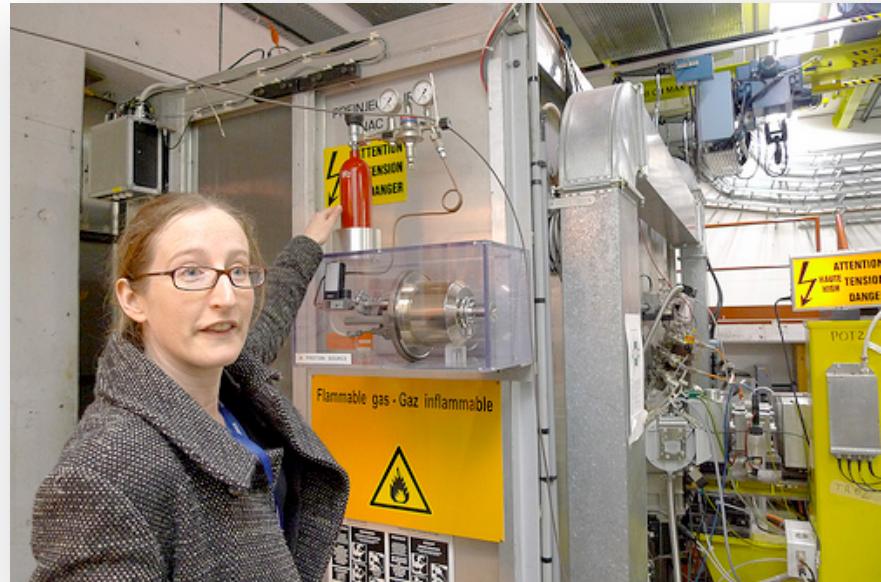
Luna  
nueva



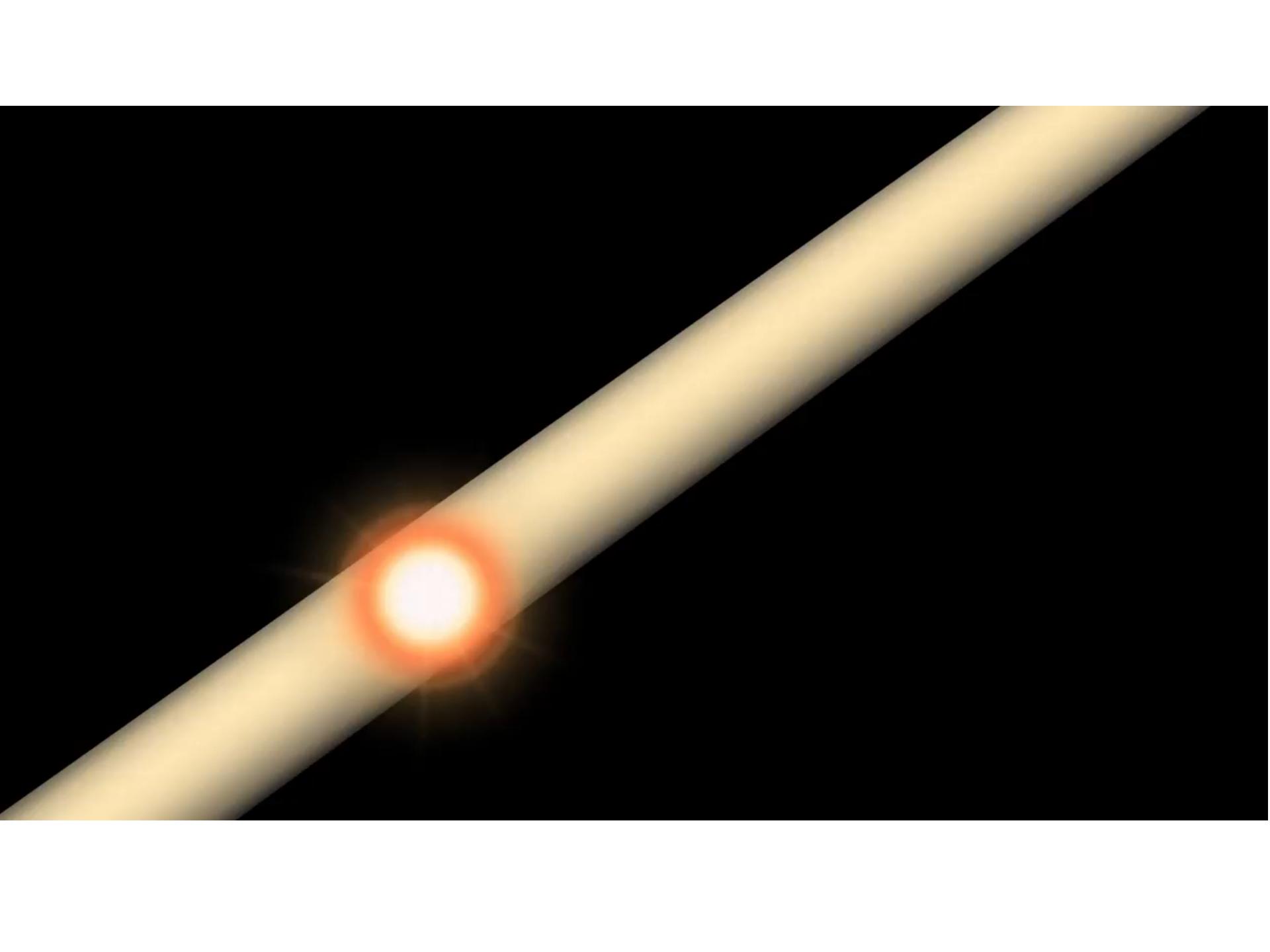
# CERN's Accelerator Complex



# Todo comienza con 2Kg de H<sub>2</sub>

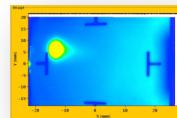


Suficiente para 2  
años de funcionamiento

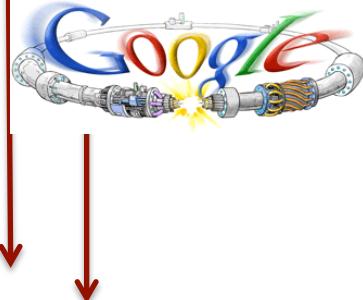




Agosto-2008  
Primeros tests de inyección



10-Septiembre-2008  
Circulan los primeros haces



2008

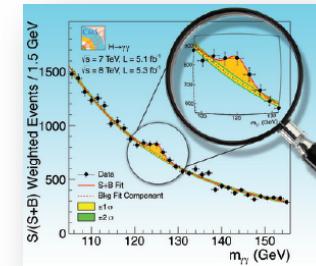
2009

2010

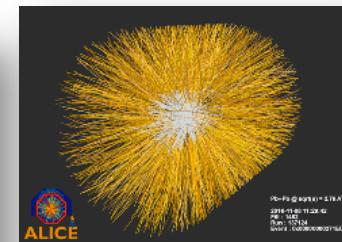
2012

2013

19-Septiembre-2008  
Incidente



Diciembre-2009  
Primera colisión de iones



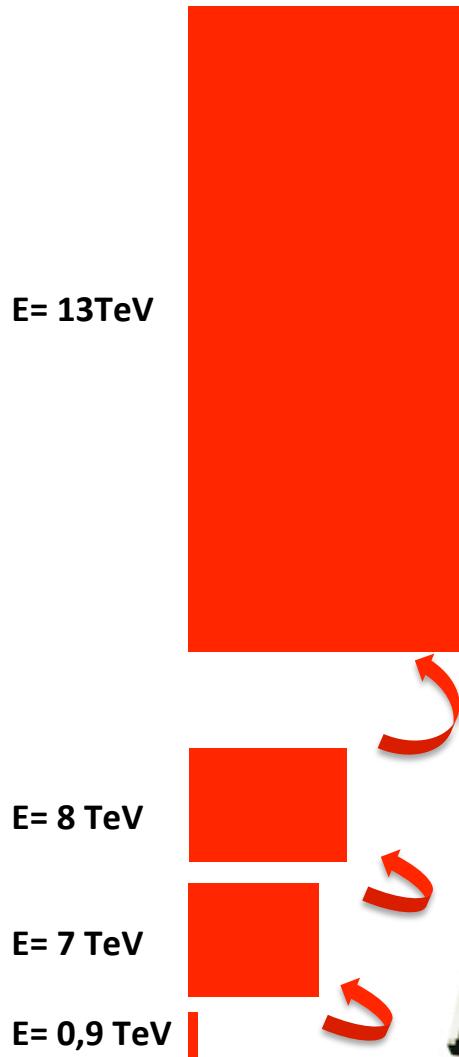
Marzo-2009  
Primera colisión en ATLAS

Comments (21-Feb-2013 09:05:25)  
Phone:77600

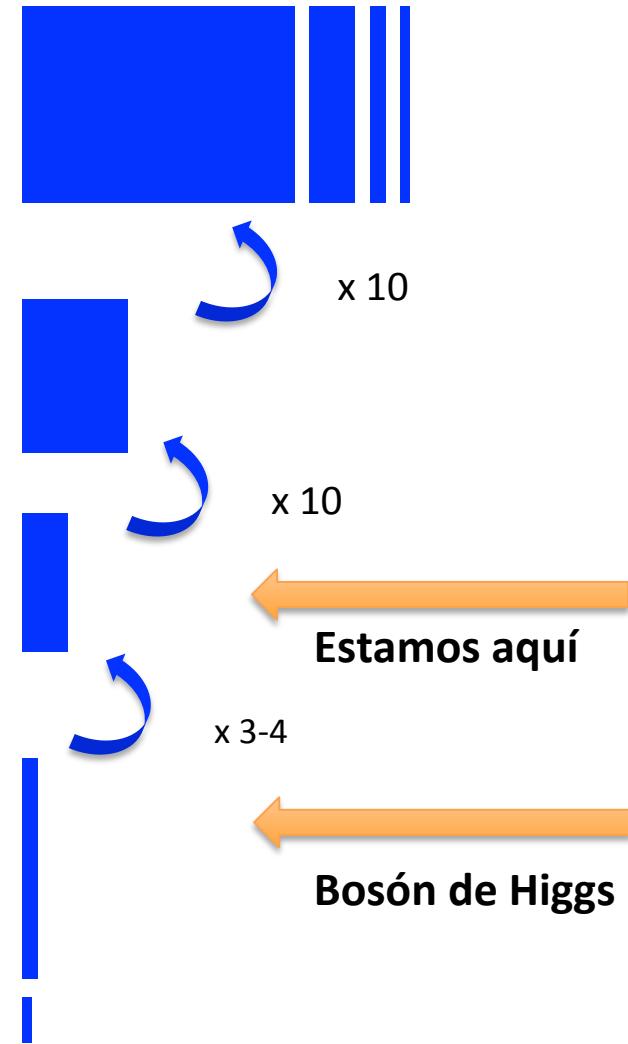
\*\*\* END OF RUN 1 \*\*\*  
No beam for a while. Access required  
time estimate: ~2 years

# Los próximos años del LHC

## ENERGÍA



## INTENSIDAD



Introducción a los  
detectores de  
partículas en  
5 transparencias

# DETECCIÓN DE PARTÍCULAS

Las partículas pueden “**VERSE**” como resultado de su interacción con la materia (**DETECTORES**)

Estas interacciones con la materia también pueden dificultar su detección.

Finalmente todo se convierte en :

- **IMÁGENES**
- **SEÑALES ELECTRÍCAS**  
(voltajes/corrientes)

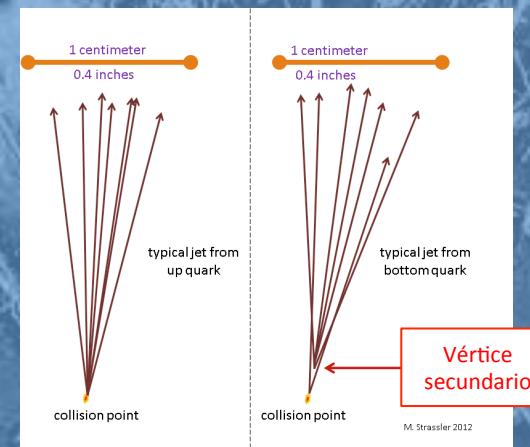
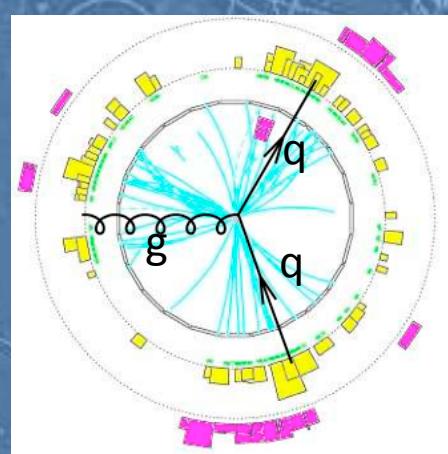
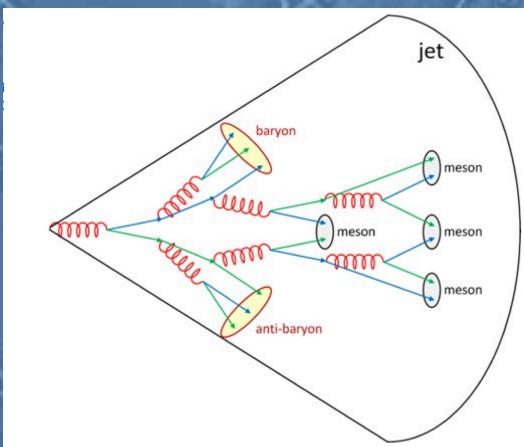
# ¿Qué podemos detectar?

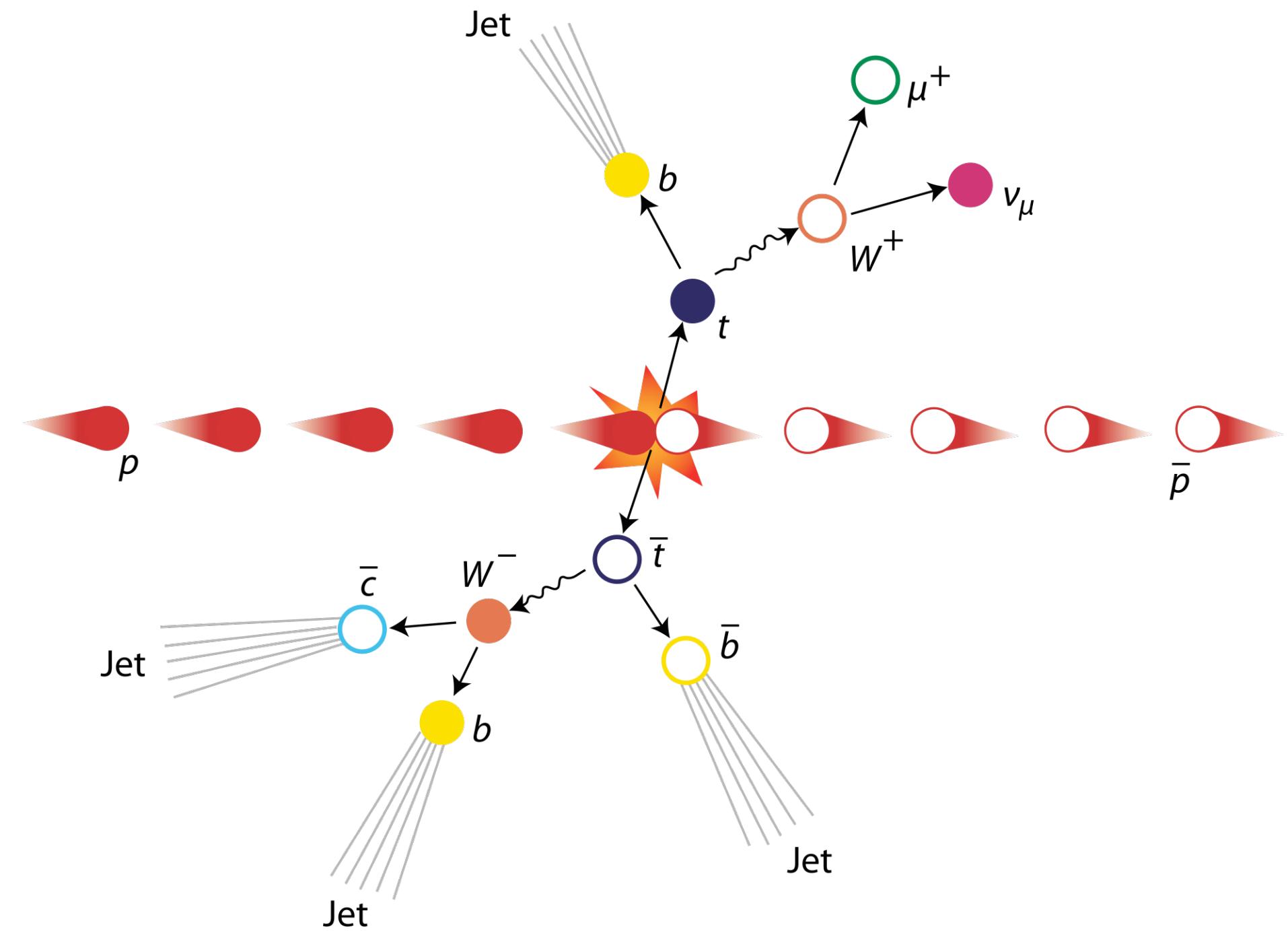
Si queremos observar directamente las partículas, necesitamos:

- Que interactúen con la materia (interacción fuerte o electromagnética).
- Que su vida sea suficientemente larga para atravesar el detector.

¿Qué podemos observar directamente?:

- Electrones, muones, fotones.
- Hadrones neutros y cargados: piones, protones, kaones, neutrones.....
- Analizar chorros de trazas procedente de la hadronización de los quarks y gluones (no pueden existir aislados).
- Vértices desplazados dentro de los chorros de partículas para identificar el quark b.



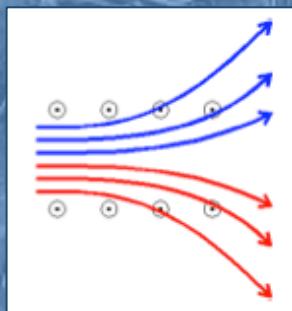


Sólo podemos “ver” los productos de la reacción, no la reacción en sí, para “reconstruir” el proceso → **MÁXIMA INFORMACIÓN**

### Propiedades de las partículas:

- Energía (CALORIMETROS).
- Momento (DETECTORES DE TRAZAS +IMANES).
- Carga (DETECTORES DE TRAZAS + IMANES).
- Vidas Medias (DETECTORES DE TRAZAS)
- Masa.

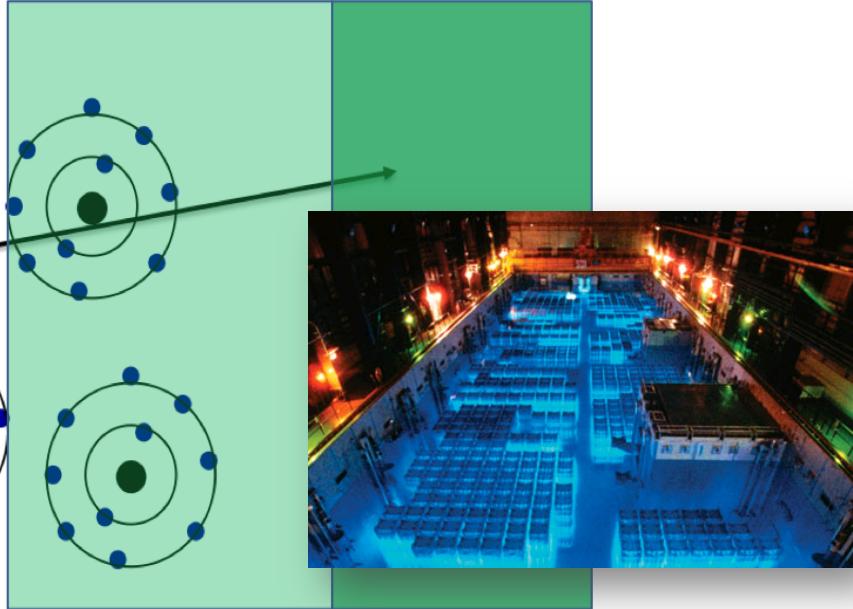
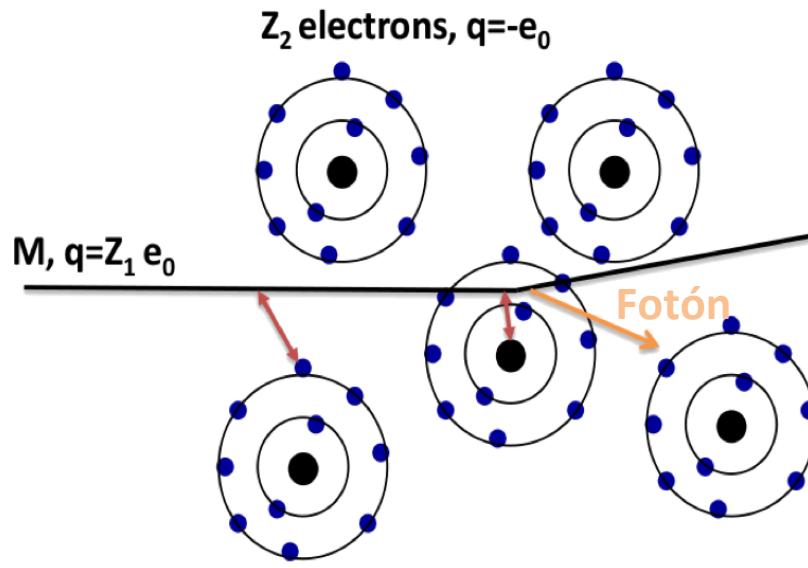
$$\vec{p} = \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{pmatrix} \quad \left. \begin{pmatrix} E \\ \vec{p} \end{pmatrix} \right\} (E, \vec{p})$$



$$\begin{aligned} F &= q \cdot v \cdot B = m \cdot \frac{v^2}{R} \\ \Rightarrow q \cdot B \cdot R &= m \cdot v = |\vec{p}| \end{aligned}$$

$$E^2 = m^2 \cdot c^4 + \vec{p}^2 c^2 \Rightarrow m = \frac{\sqrt{E^2 - \vec{p}^2 c^2}}{c^2}$$

# Interacción de las partículas con la materia: Partículas cargadas



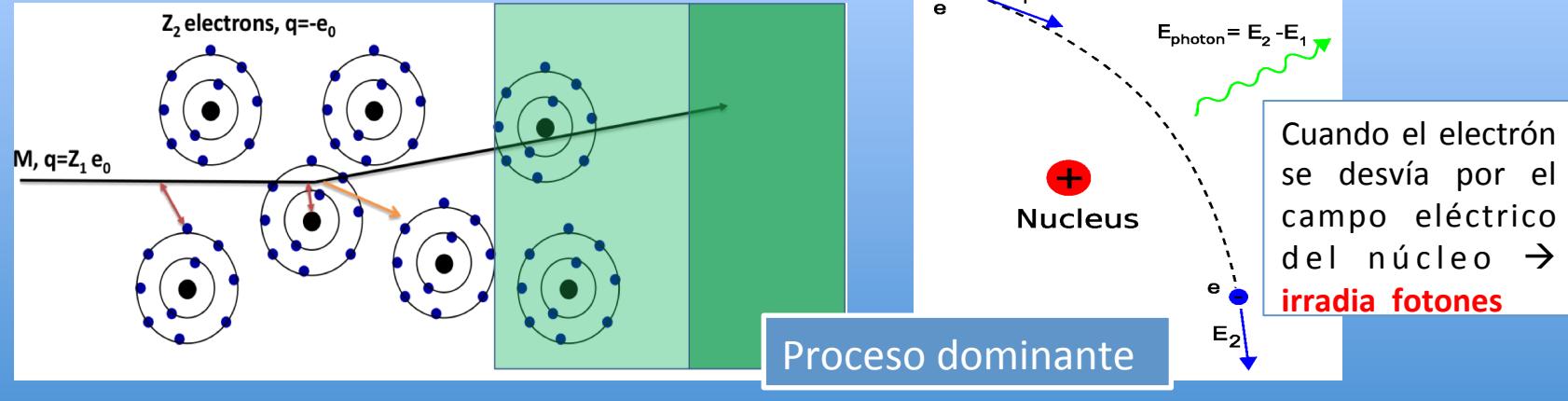
**Interacciones con los electrones de los átomos:** la partícula incidente pierde energía por ionización y los átomos se ionizan o excitan.

**Interacciones con los núcleos de los átomos:** la partícula incidente es desviada. Se pueden emitir fotones.  
(Bremstrahlung)

**Si la velocidad de la partícula supera la velocidad de la luz en el medio, se produce un cono de radiación (radiación de Čerenkov).** Cuando la partícula cruza la región entre dos medios produce rayos X (Radiación de transición).

# Interacción de las partículas con la materia: electrones, positrones y fotones

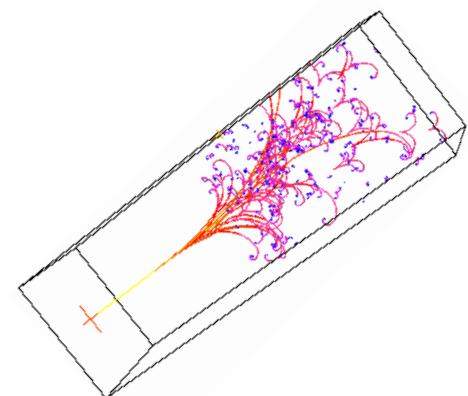
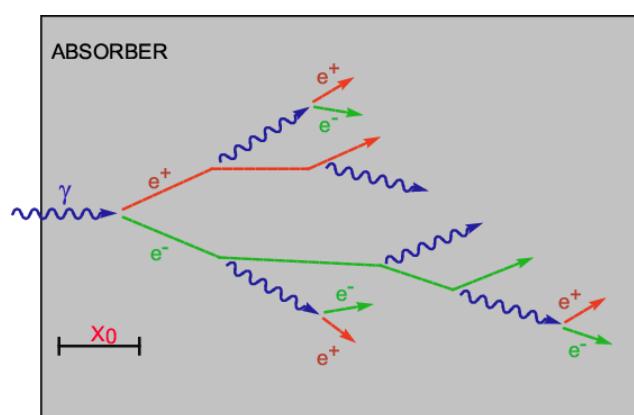
## Electrones y positrones



## Fotones

Los fotones interactúan de forma muy diferente:

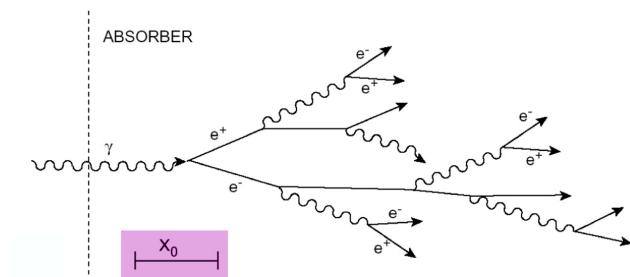
A diferencia de las partículas cargadas que depositan energía de forma continua, los fotones generalmente realizan una única interacción.



# Medida de la energía

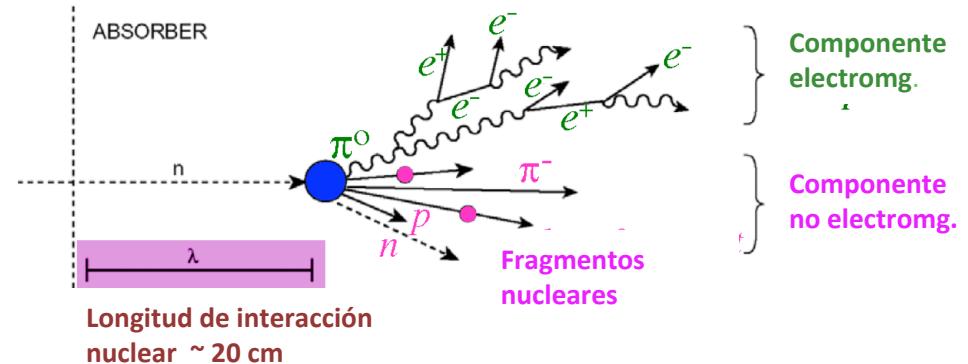
Medimos la energía por absorción total de las partículas.

## Cascada Electromagnéticas

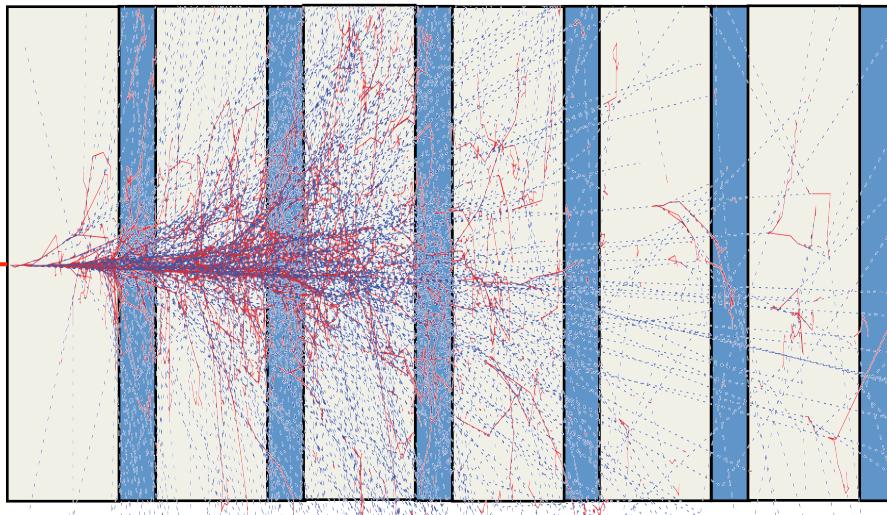


Longitud de radiación

## Cascadas Hadrónicas



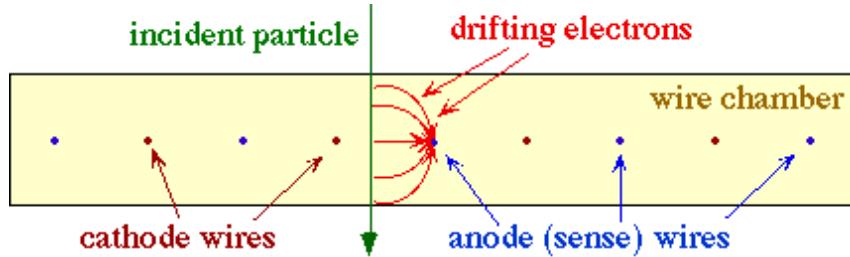
Longitud de interacción nuclear  $\sim 20$  cm



- El número total de partículas es proporcional a la energía de la partícula incidente.
- La señal en el material sensible es proporcional al número de partículas que lo atraviesan.

# Medida de la posición

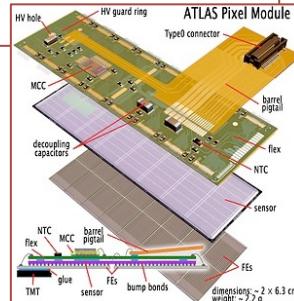
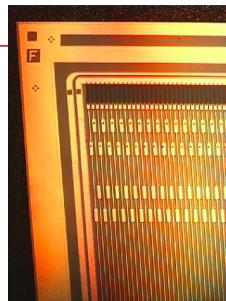
## Cámaras de deriva



Se mide el tiempo de deriva, es decir el tiempo entre el paso de la partícula y el tiempo de llegada de la ionización al hilo del ánodo. Haciendo de éste un **dispositivo de alta precisión**

## Detectores de silicio

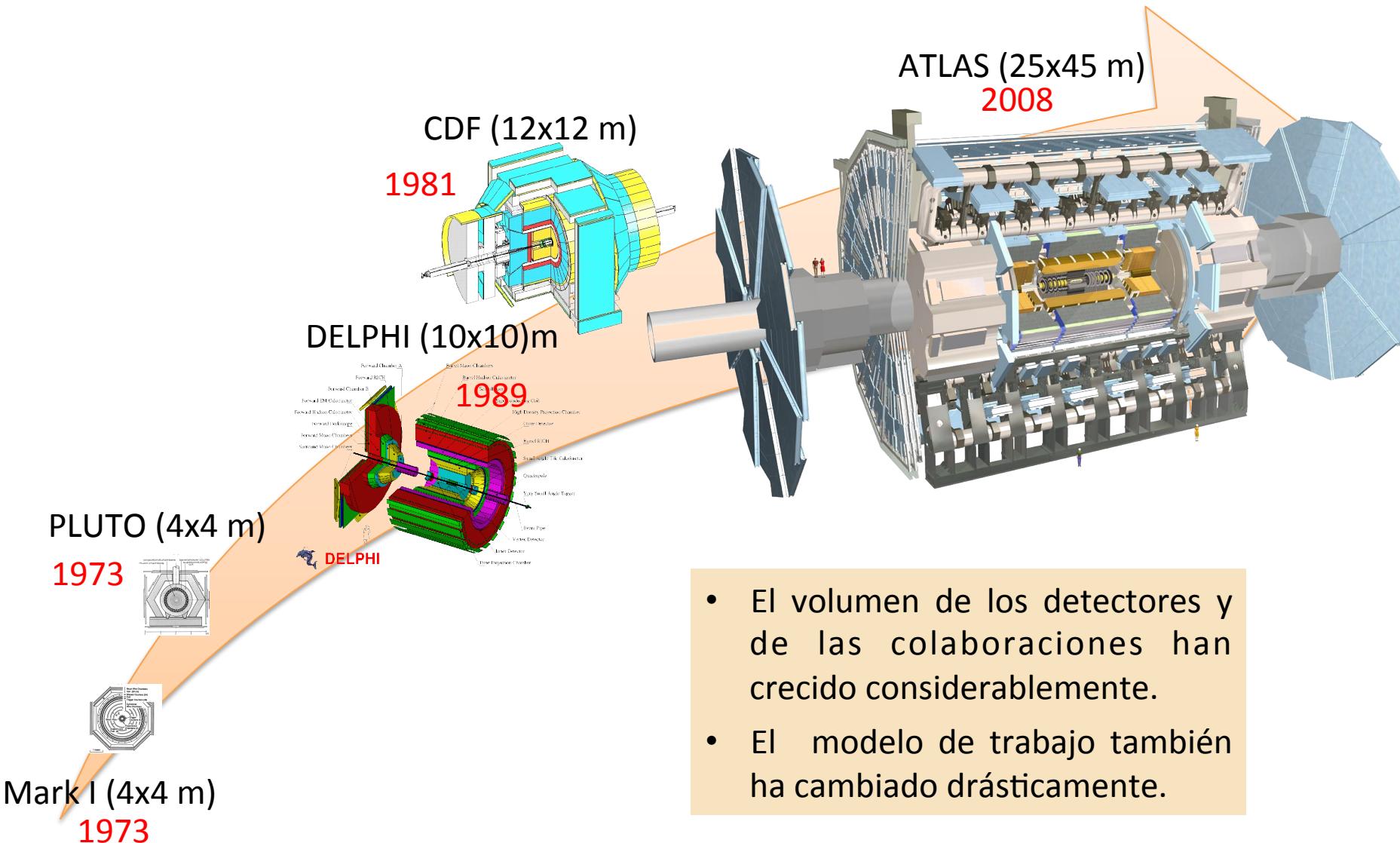
Tenemos un volumen en el que la ionización produce portadores de carga que se desplazan bajo el efecto de un campo eléctrico. Mientras se mueven inducen corrientes eléctricas que podemos medir.



A photograph showing two scientists in white lab coats and headlamps examining a large, cylindrical detector component of the ATLAS experiment. The detector is a complex assembly of blue and grey structural elements and internal components. The scientists are focused on a bundle of yellow and orange cables. The background is a bright, clean laboratory or workshop environment.

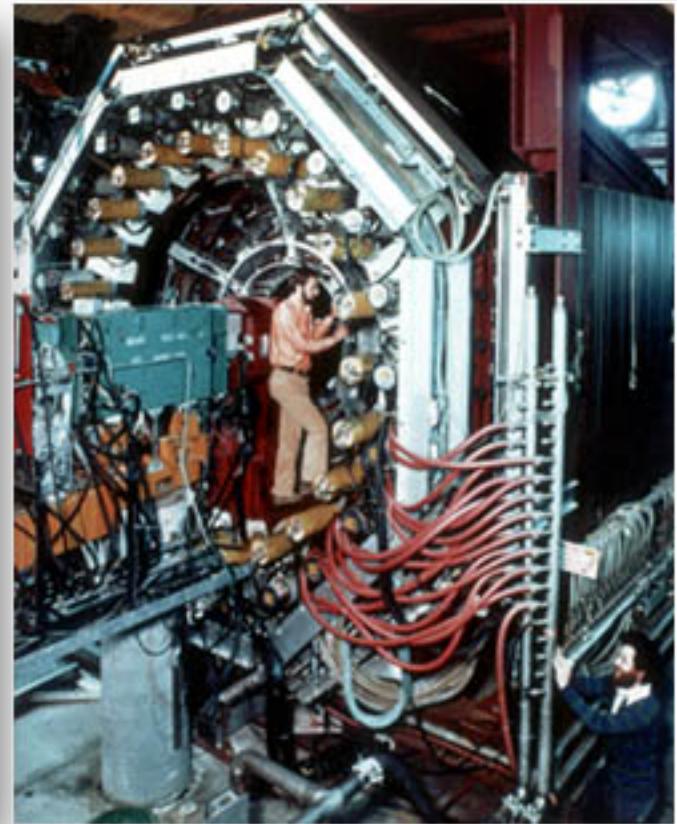
# ATLAS

# DETECTORES PARA COLISIONADORES

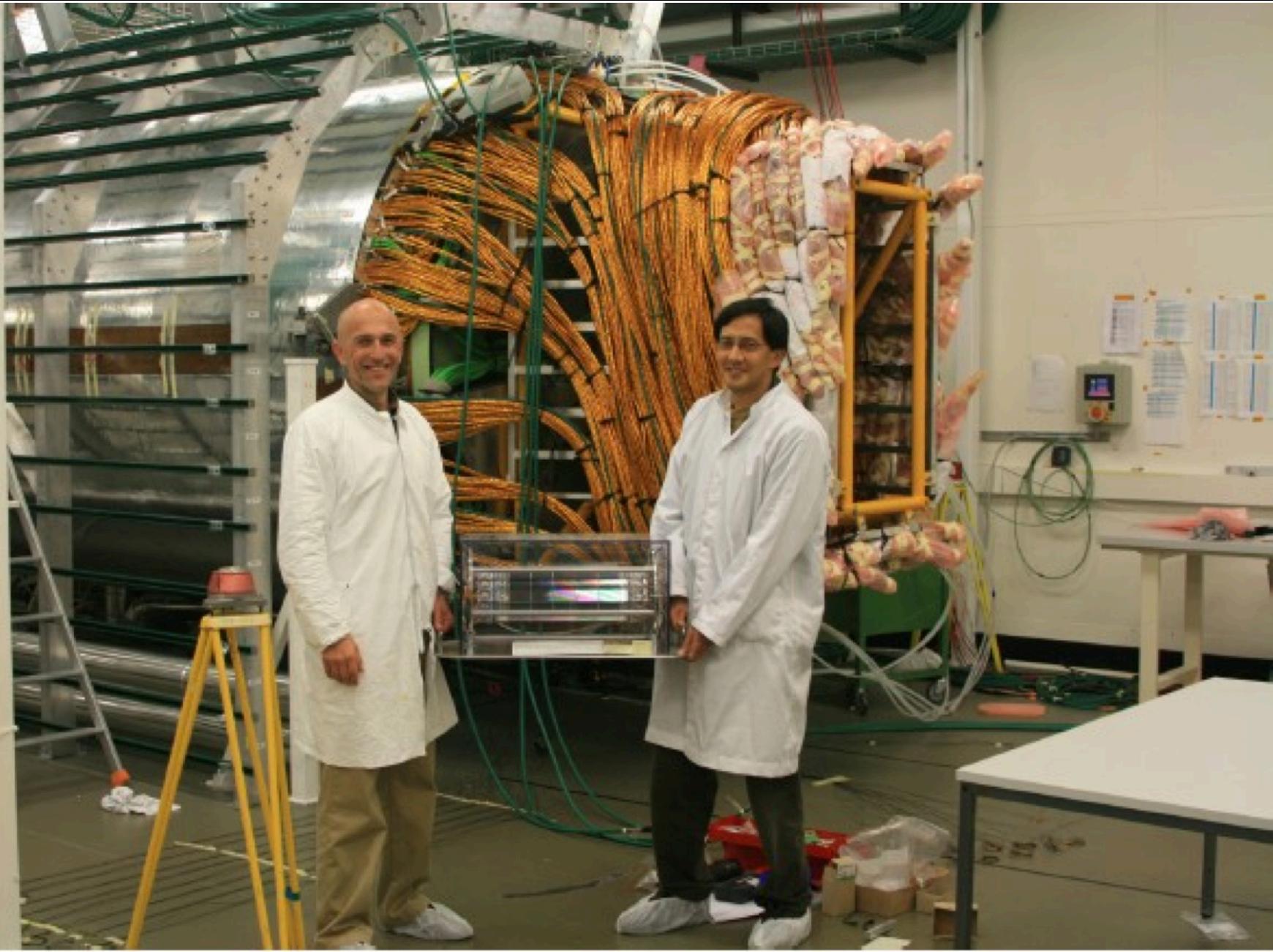


- El volumen de los detectores y de las colaboraciones han crecido considerablemente.
- El modelo de trabajo también ha cambiado drásticamente.

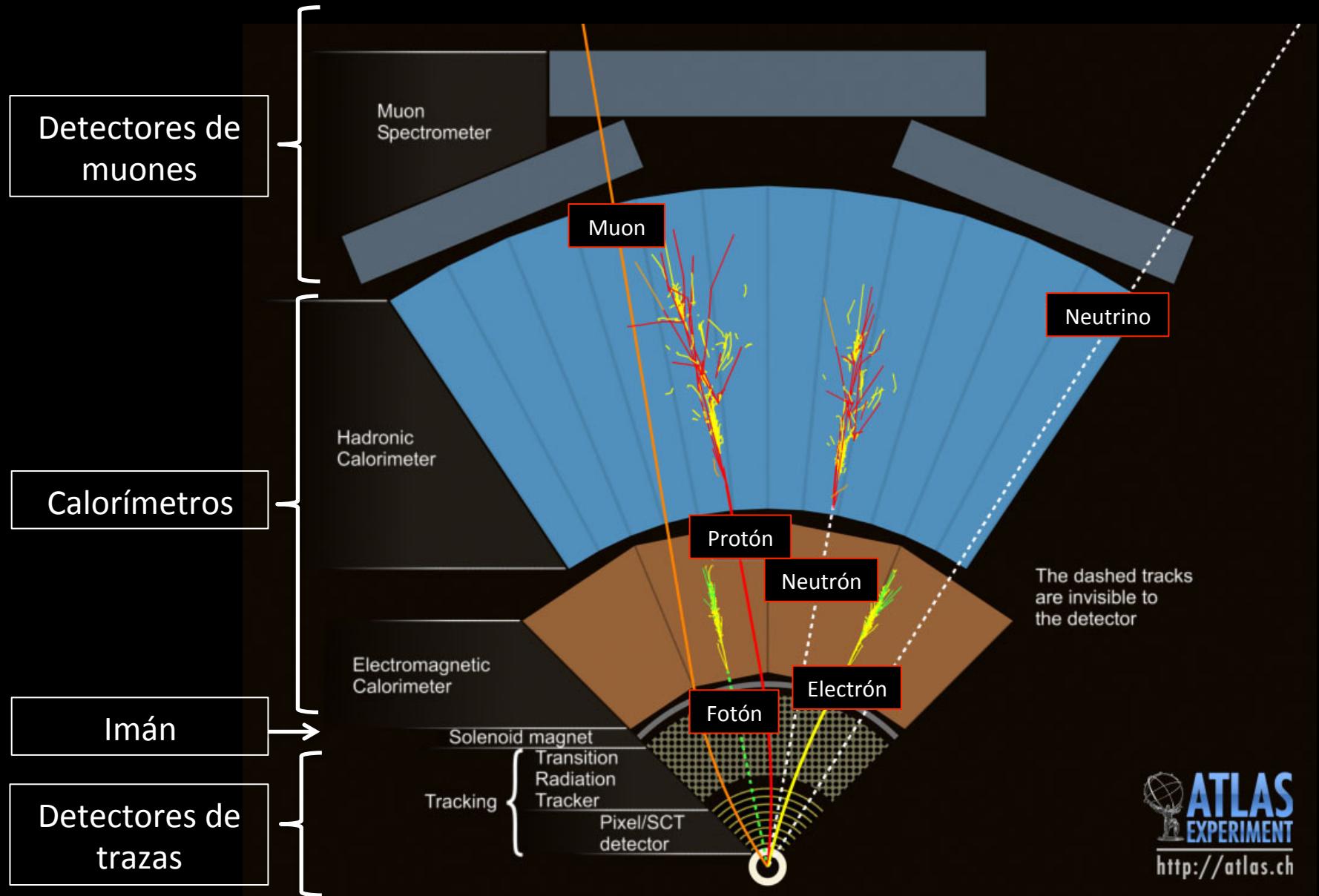
# ATLAS vs. MARK I

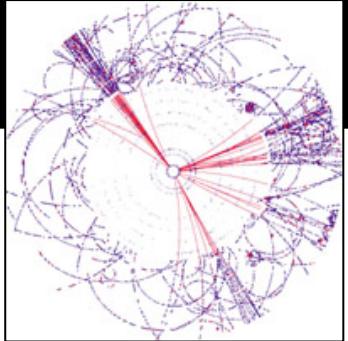


# Detector de trazas de CMS-microvértice de DELPHI

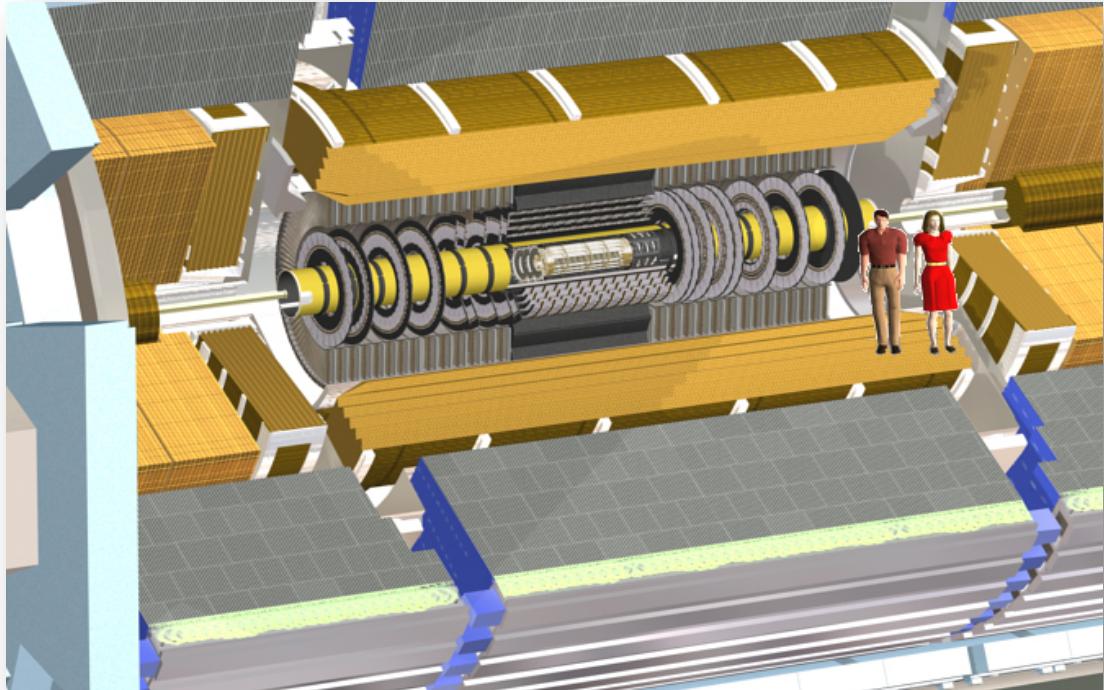


# ATLAS en un vistazo

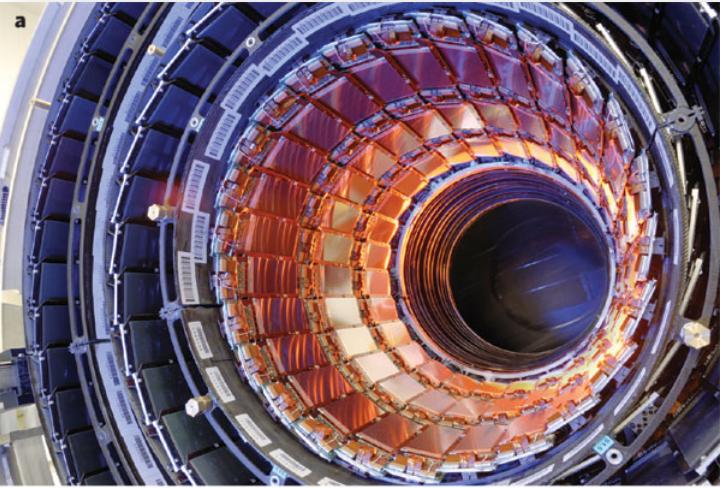




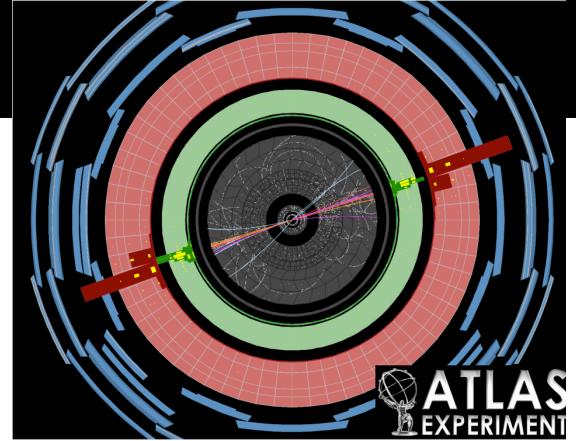
# Detector de trazas



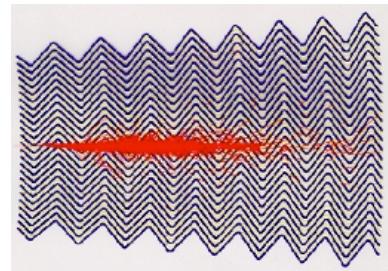
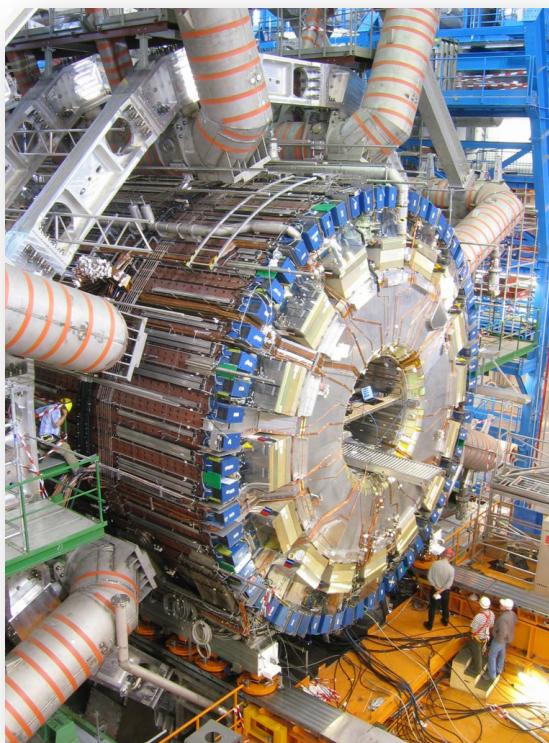
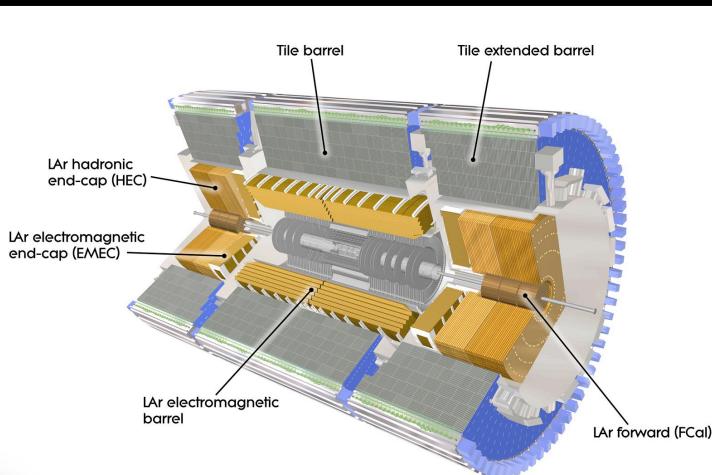
Cilindro de 6 m de largo y 2,1 m de diámetro que mide la trayectoria de las partículas con precisión de  $\sim \mu\text{m}$ , utilizando principalmente silicio.



# Calorímetro



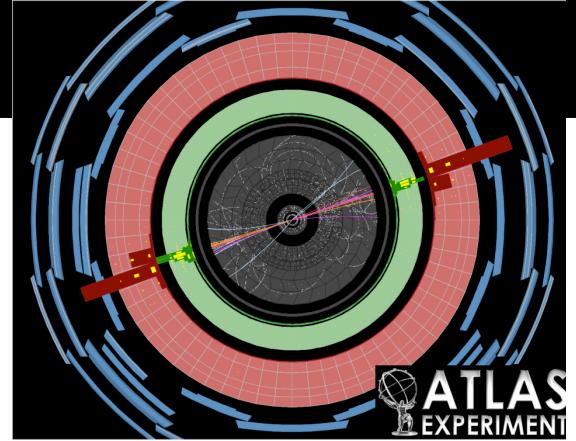
Hadrónico



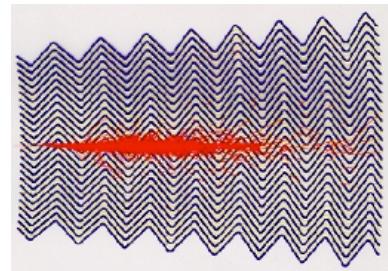
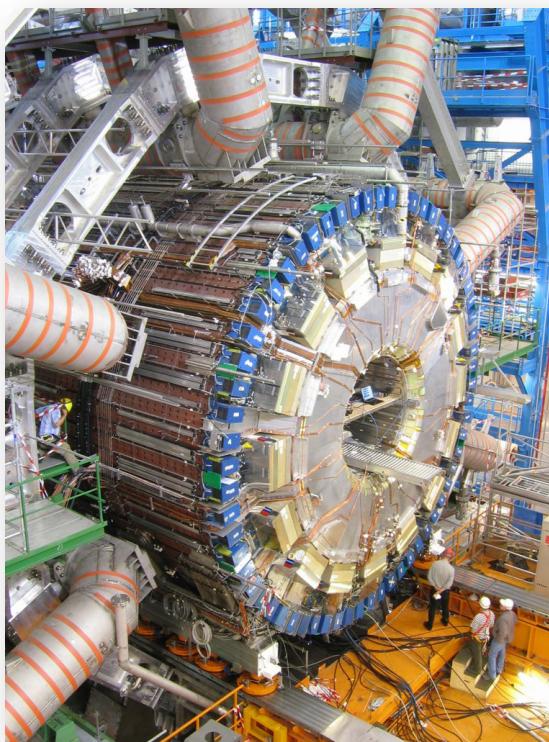
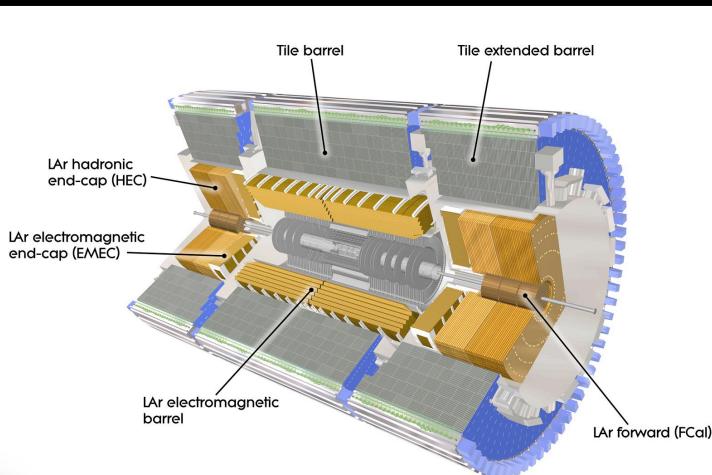
Electromagnético



# Calorímetro



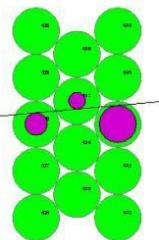
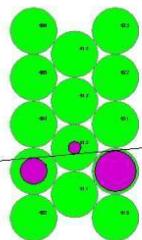
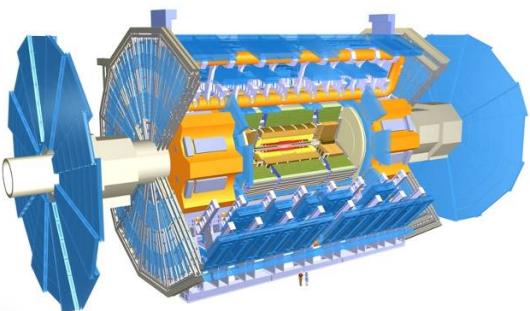
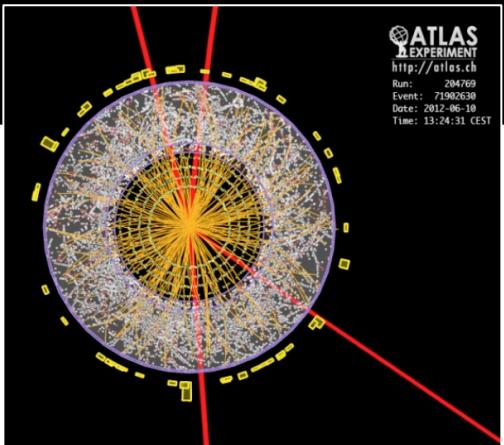
Hadrónico



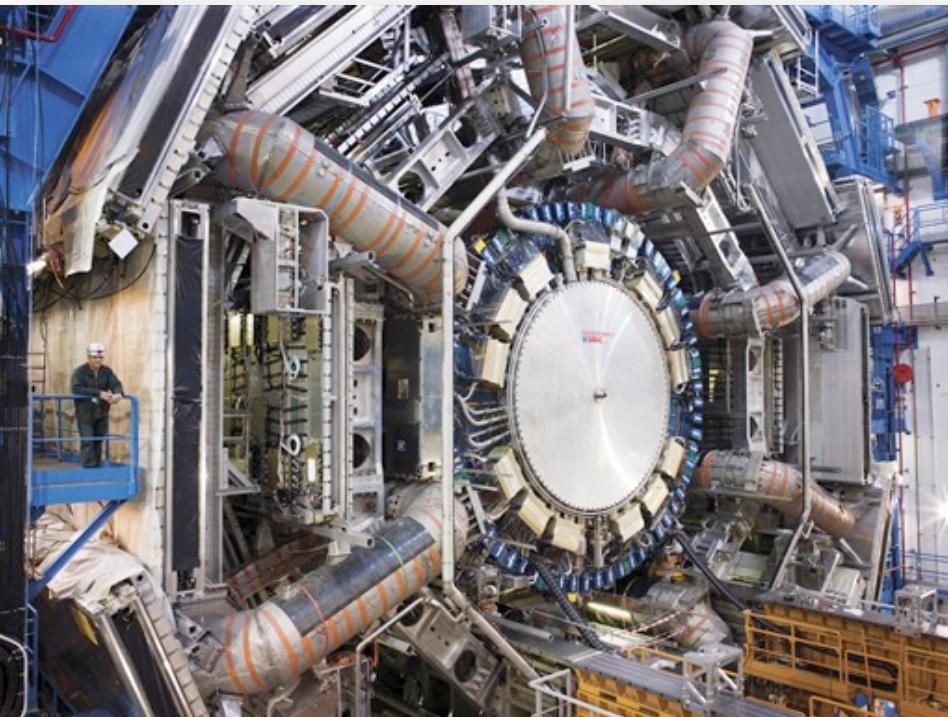
Electromagnético



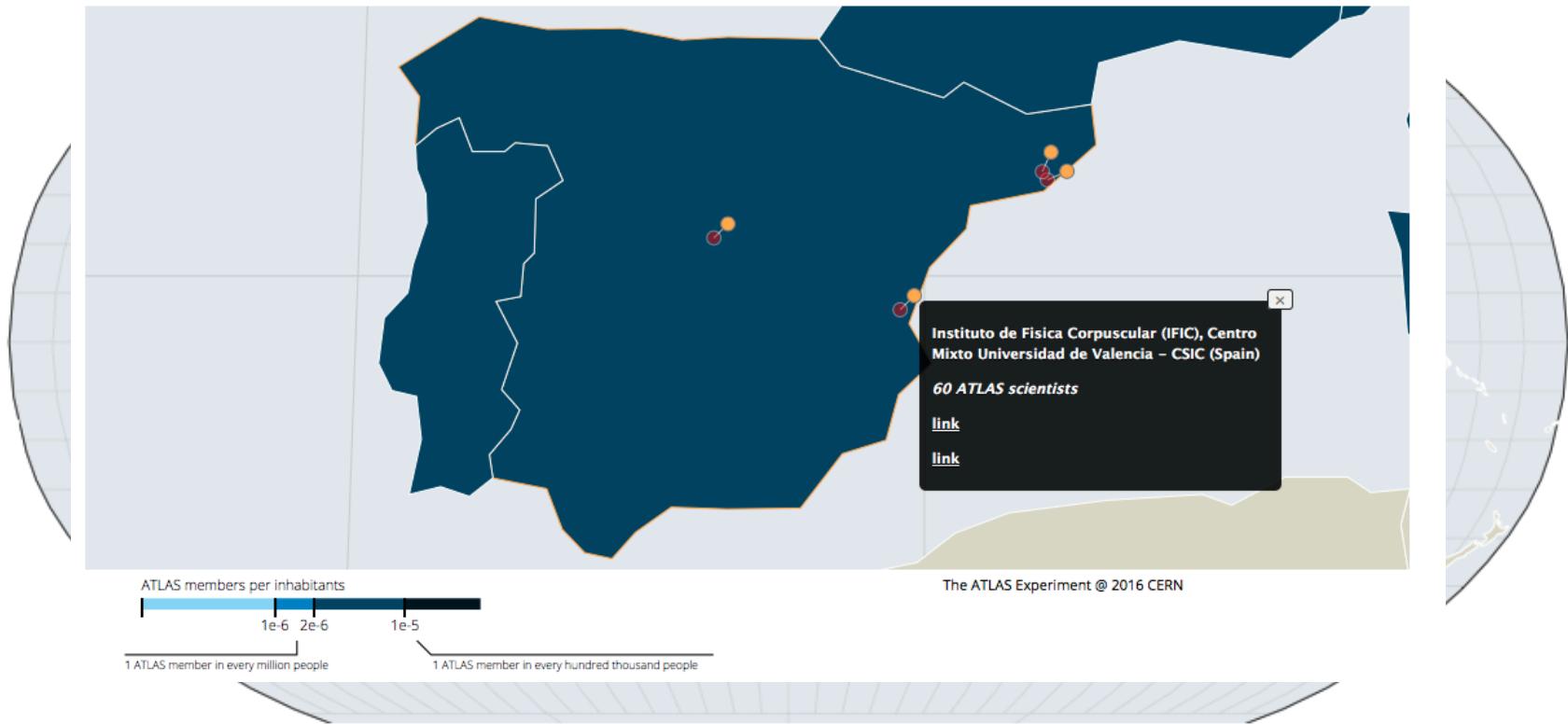
# Las cámaras de muones



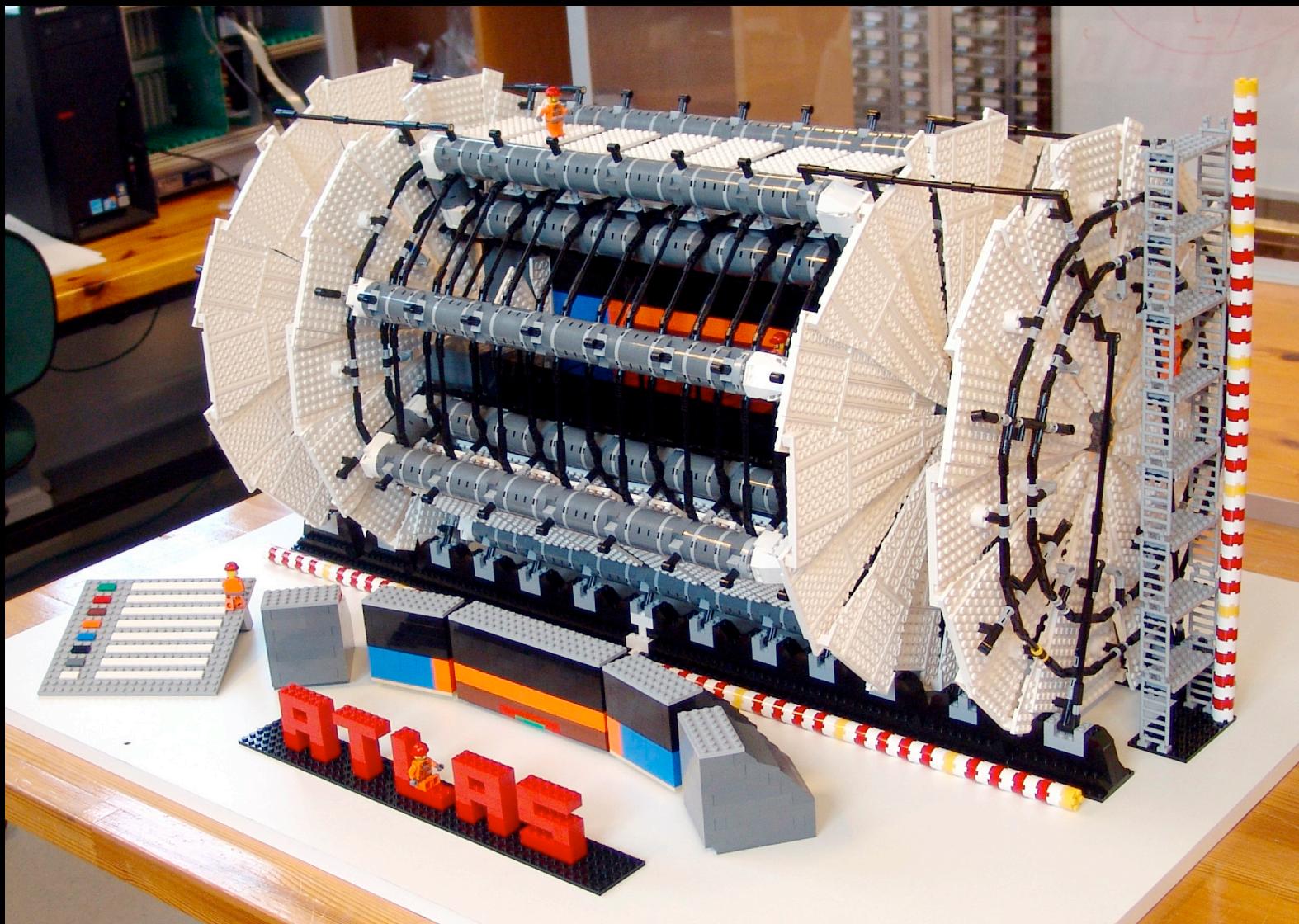
ATLAS MDTs, 80 $\mu$ m por tubos



# La colaboración ATLAS



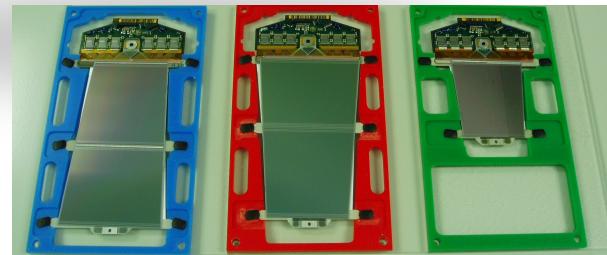
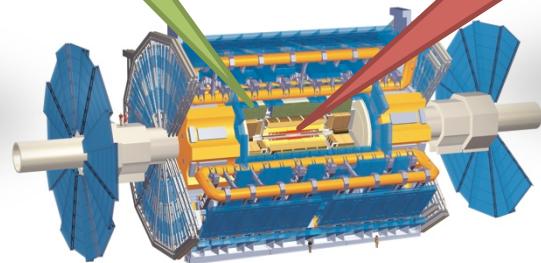
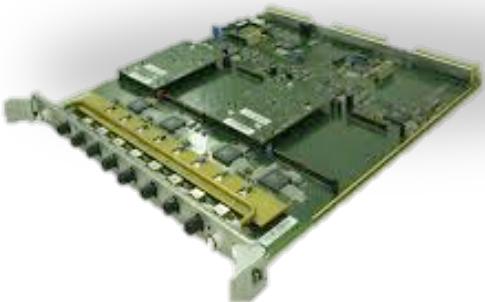
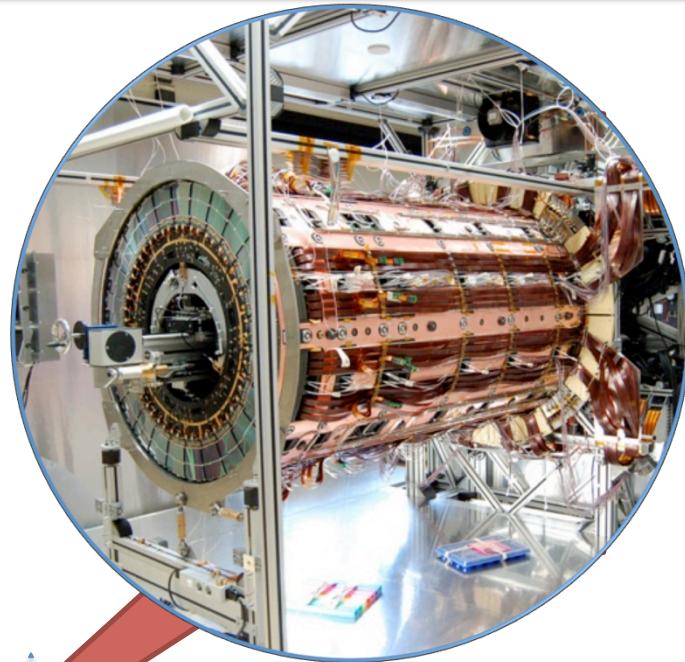
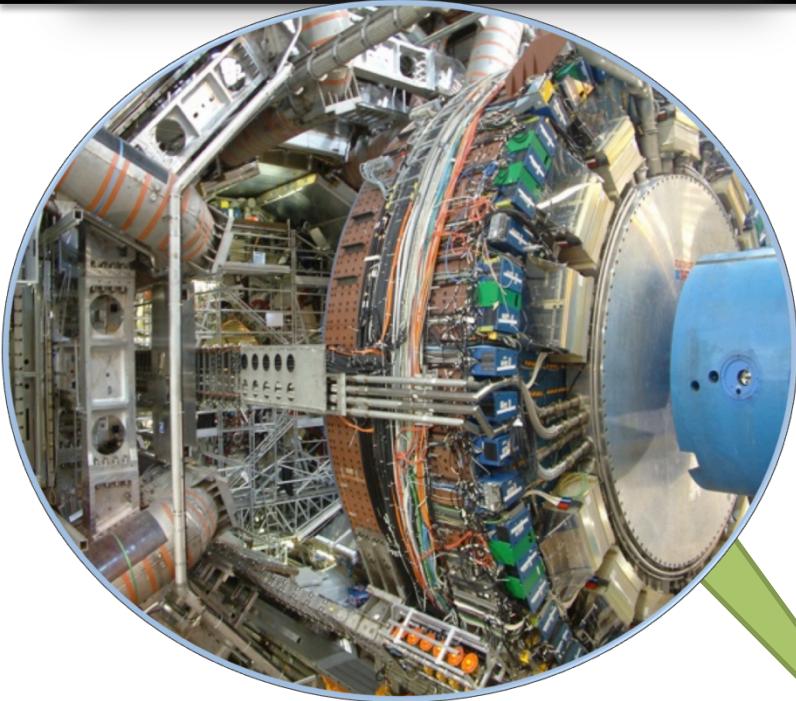
- ATLAS está formado por mas de **3000 científicos** de **180 instituciones** en **38 países** alrededor del mundo. Es una de los mayores esfuerzos científicos jamás realizados.
- Alrededor de **1200 son estudiantes de doctorado** participando en el desarrollo de detectores, la toma de datos y análisis de los mismos.
- La colaboración depende de los esfuerzos de un sinnúmero de **ingenieros, técnicos y personal administrativo**.



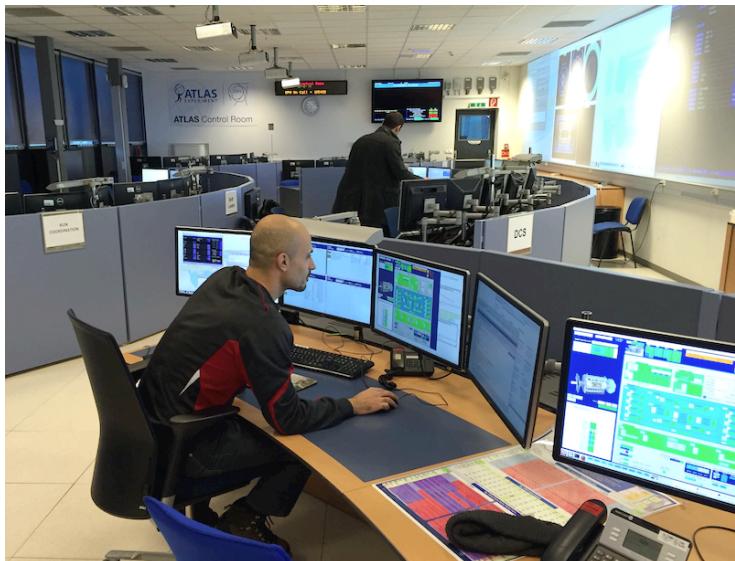
5 años resumidos en 1 minuto



# ATLAS EN EL IFIC



# La sala de control de ATLAS

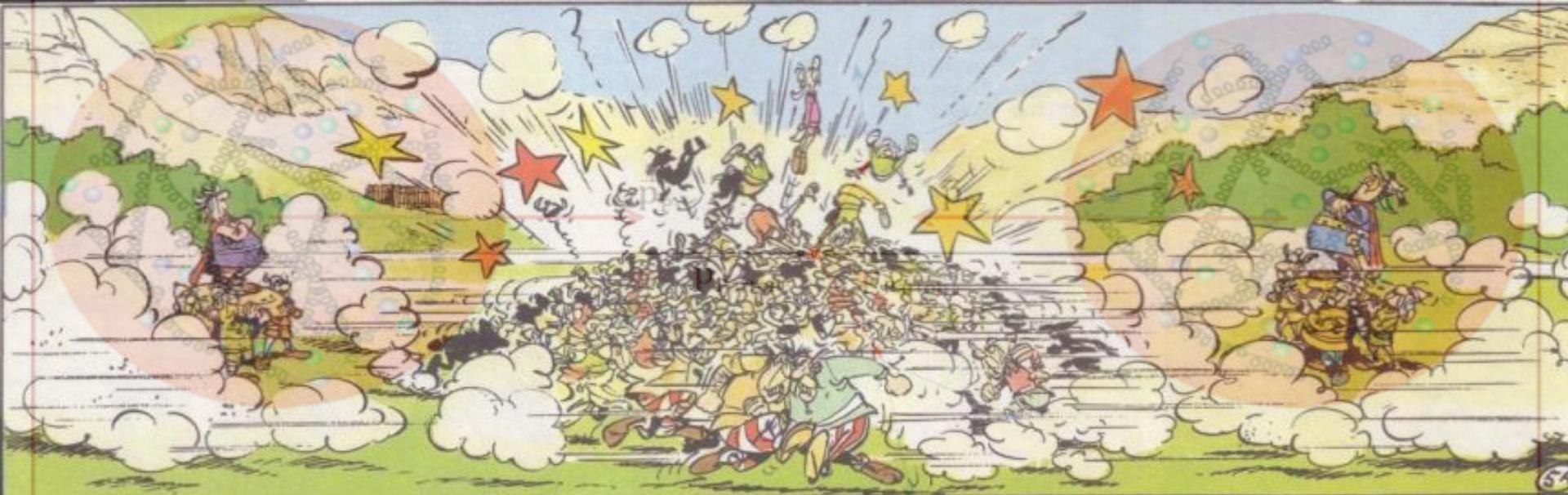


# Los DATOS

## Interactions of constituents of the colliding protons, the so called partons (quarks, gluons)

proton 1

proton 2



$\vec{p}_{p_1}$  ... momentum proton 1

$\vec{p}_{p_2}$  ... momentum proton 2

- interaction vertex

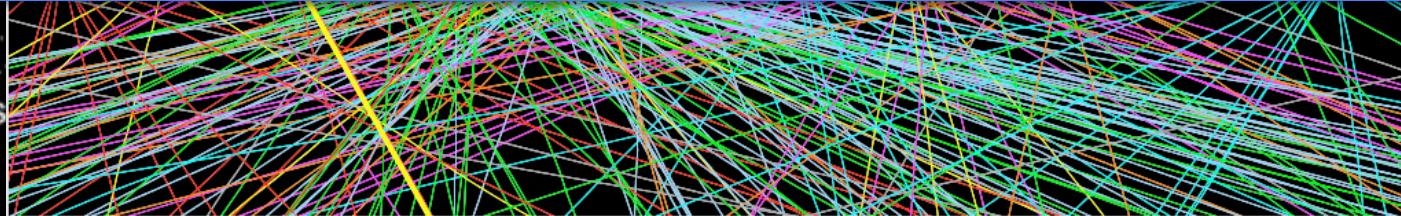
$\vec{p}_{\text{Parton}_1}$  ... momentum parton 1

$\vec{p}_{\text{Parton}_2}$  ... momentum parton 2

- Se producen 600 millones colisiones de protones en el centro del detector cada segundo.
- Cada colisión produce grandes cantidades de datos, suficientes para llenar 100.000 CDs por segundo

!!!! NO TODOS LOS SUCESOS SON  
INERESANTES !!!!

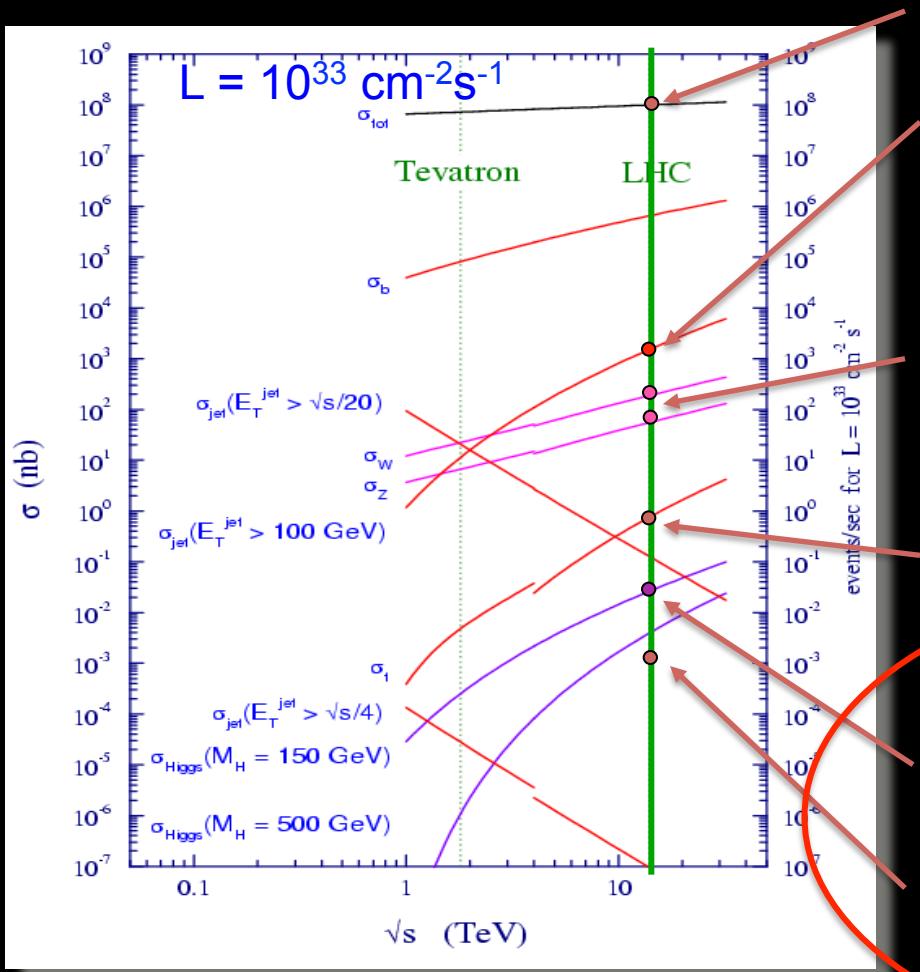
Sólo 1 de cada 500.000 sucesos se guarda



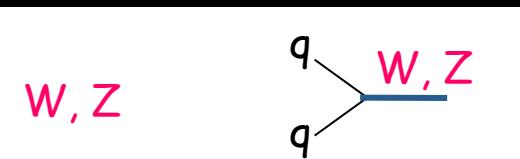
# Número de sucesos esperados

Interacciones inelásticas "soft"

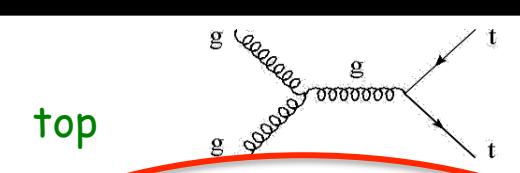
100.000.000 por segundo  
(20-30 / cruce de haz)



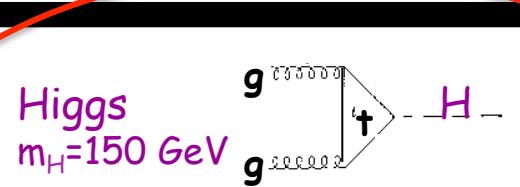
Miles por segundo



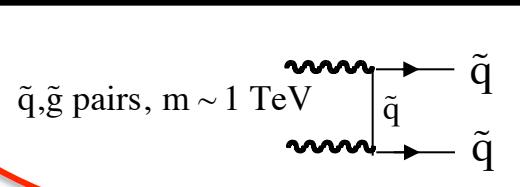
Cientos por segundo



~ 1 /segundo



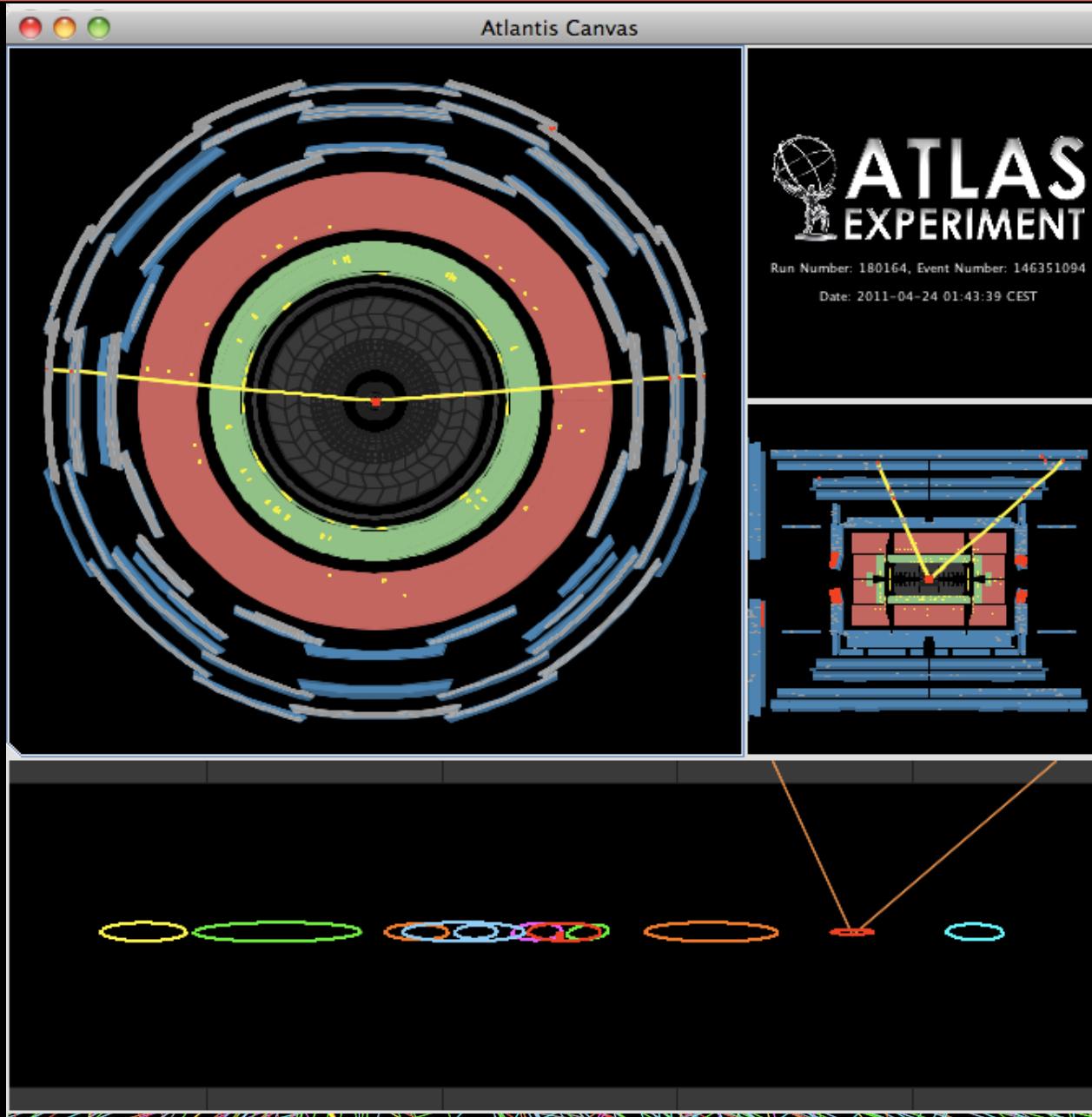
~2 /minuto



~5 /hora

# El trigger

# $Z \rightarrow \mu\mu$



¿cómo podemos analizar tantas colisiones superpuestas?

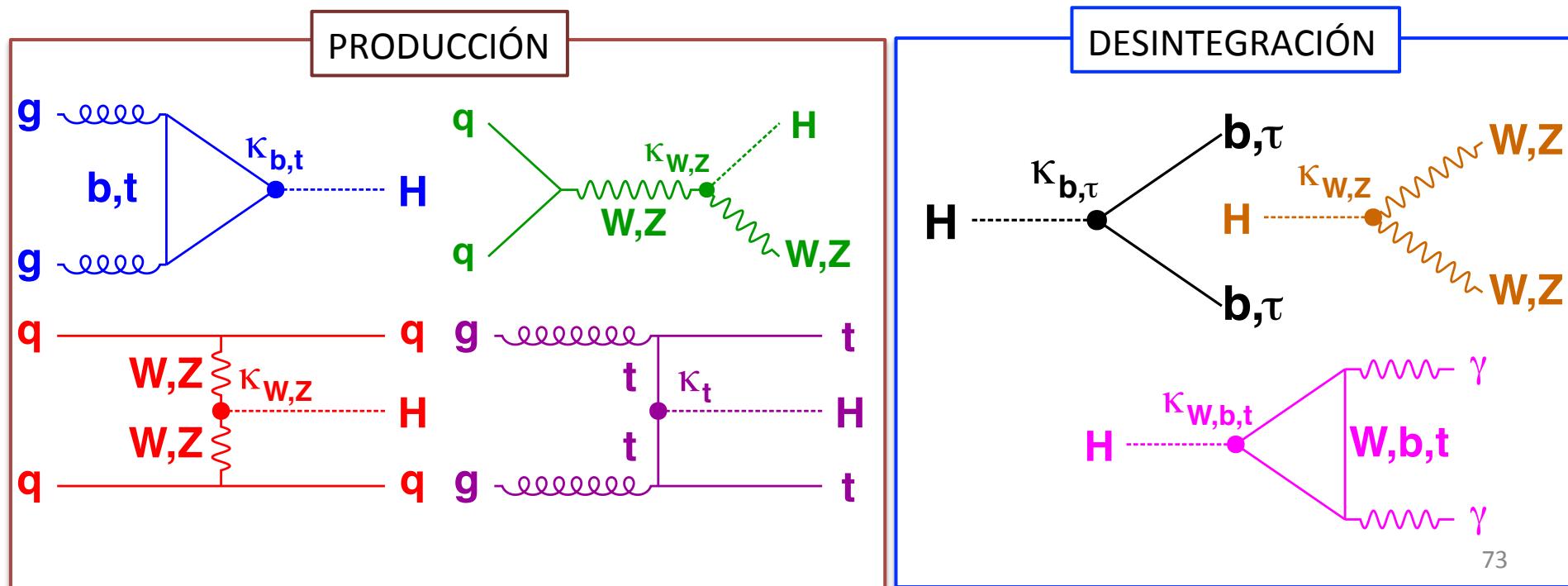
11 colisiones  
Superpuestas

Consideramos  
trazas con más  
de 0,5 MeV de  
momento

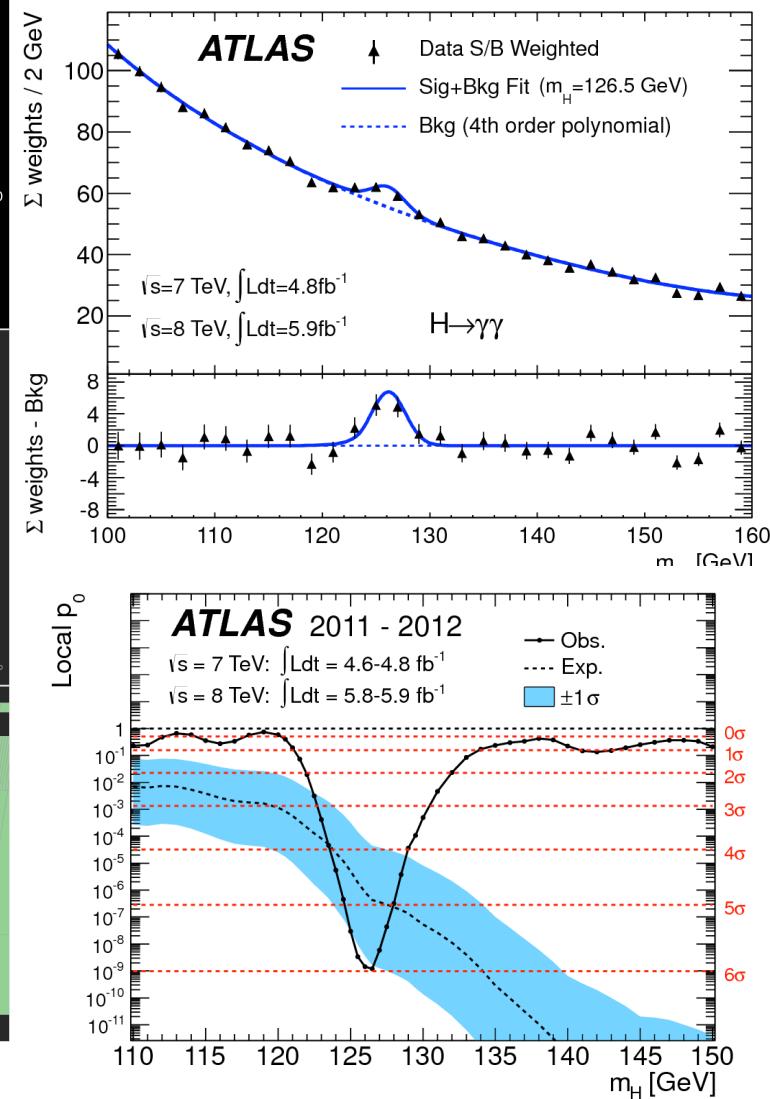
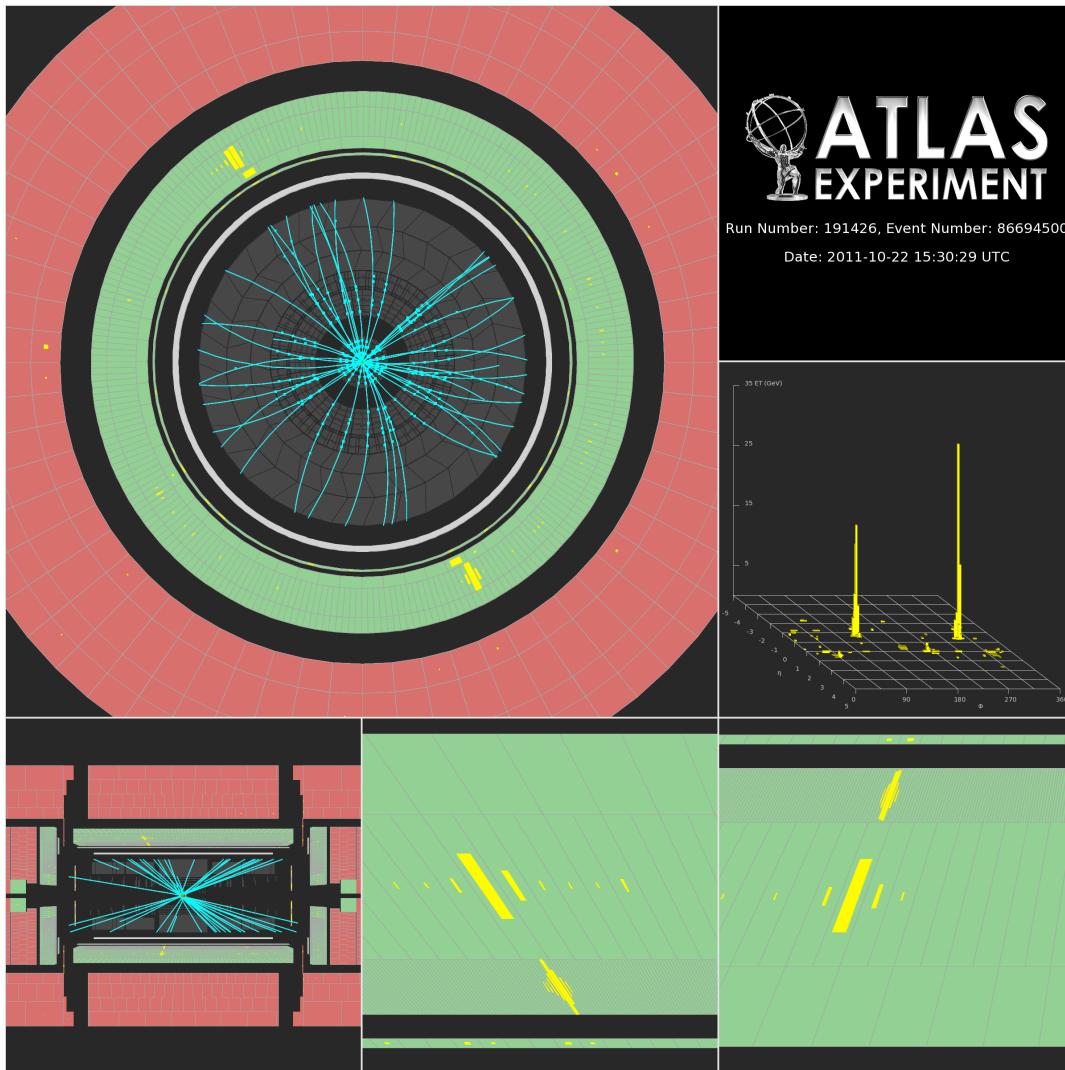
Consideramos  
trazas con más  
de 10 GeV de  
momento  
transverso

# ¿Cómo diseñar una búsqueda?: El bosón de Higgs

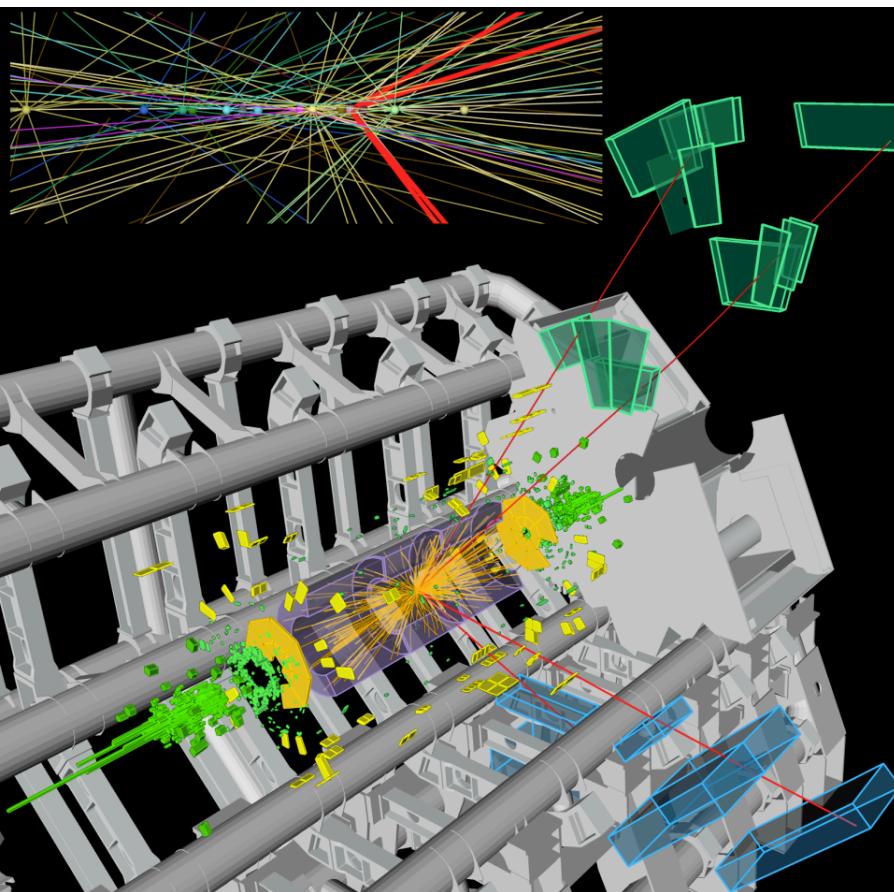
No conocíamos su masa y las técnicas para detectarlo dependen de su masa



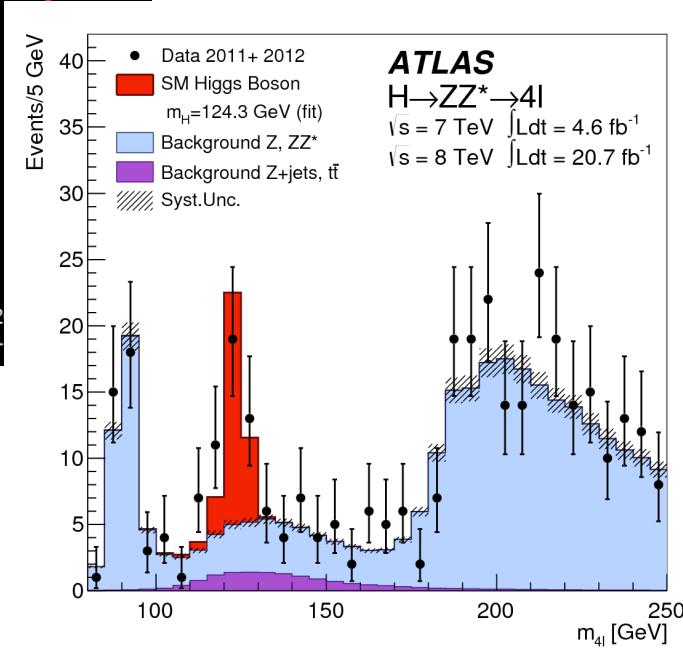
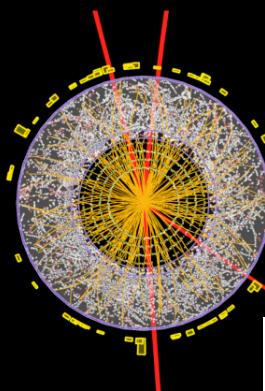
# H $\rightarrow$ 2 $\gamma$



# $H \rightarrow 4\mu$



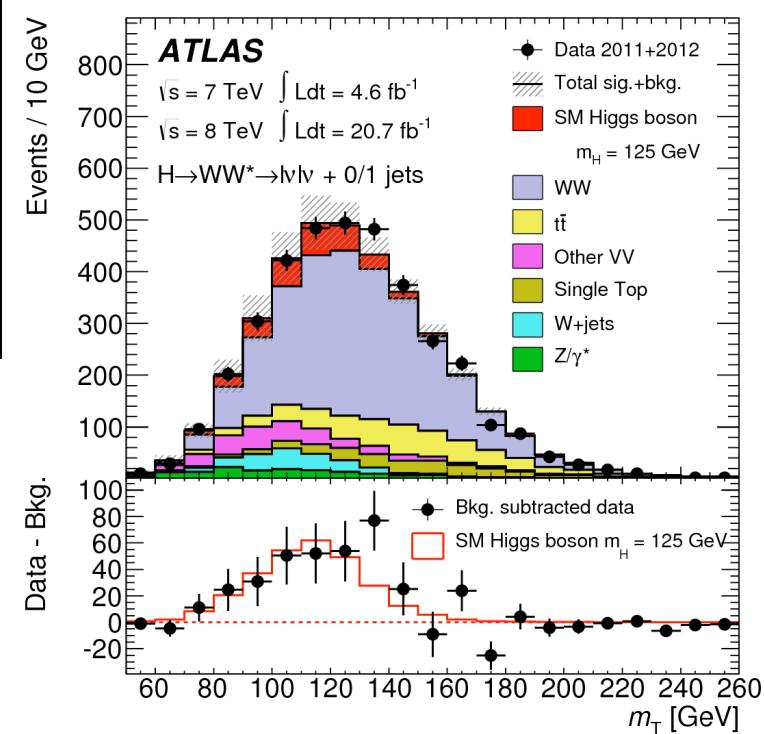
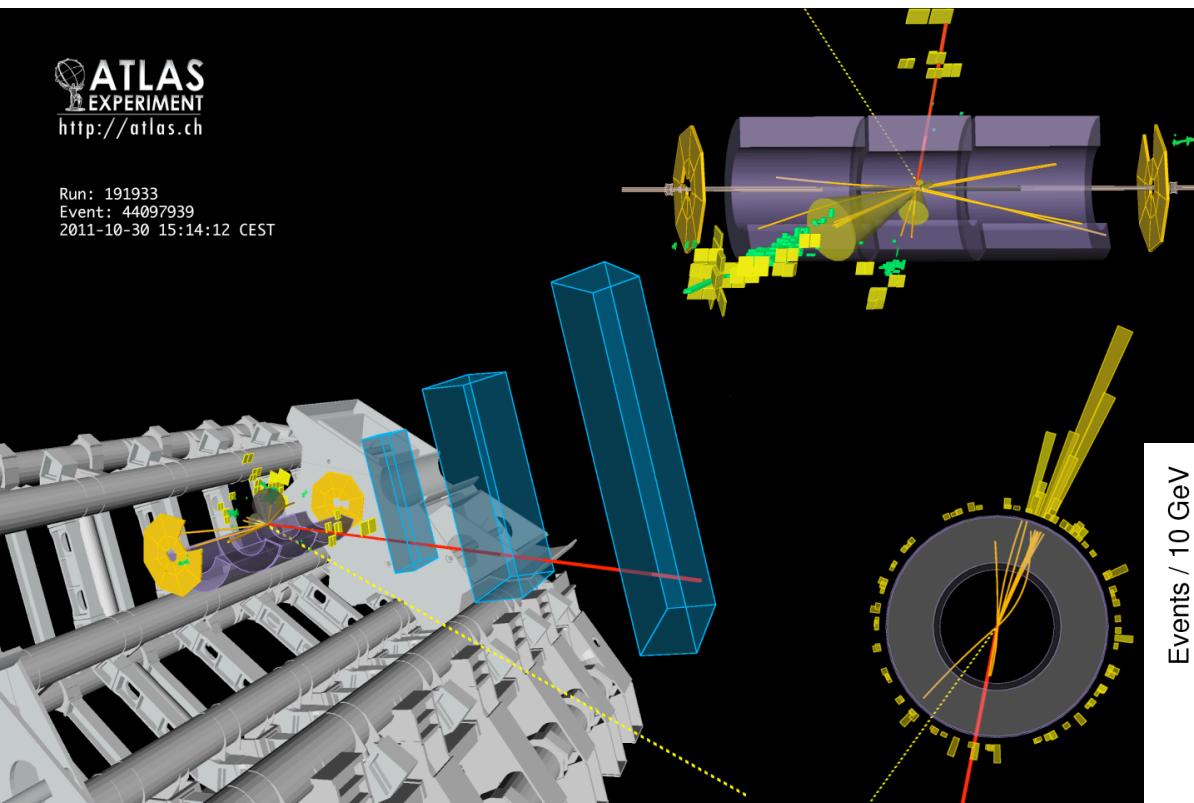
**ATLAS**  
EXPERIMENT  
<http://atlas.ch>



# H $\rightarrow$ WW

**ATLAS**  
EXPERIMENT  
<http://atlas.ch>

Run: 191933  
Event: 44097939  
2011-10-30 15:14:12 CEST



# Materia Oscura: un nuevo tipo de materia

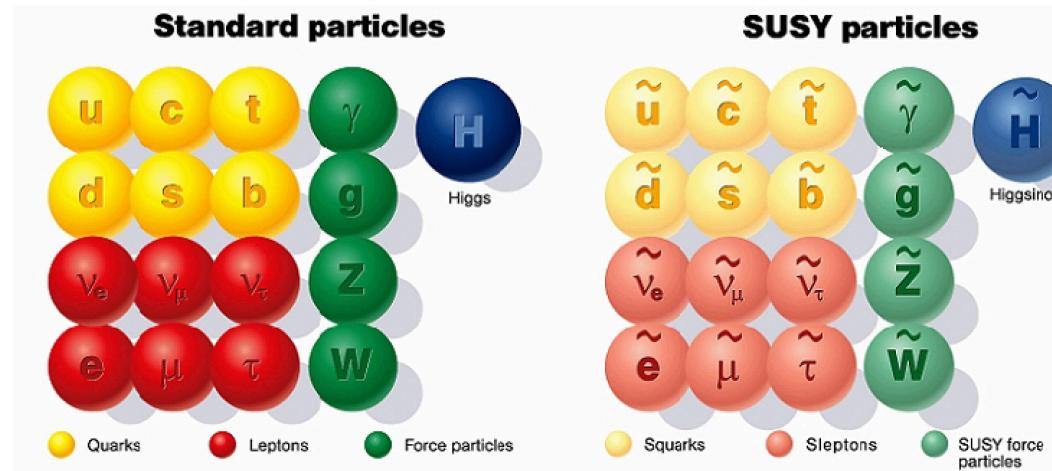
Necesitamos **NUEVA FÍSICA** más allá del Modelo Estándar de Partículas elementales para explicar la naturaleza de la materia oscura.

Muchas posibilidades teóricas: **Axiones, Dimensiones Extra, Supersimetría, etc**  
(Algunas de estas teorías podrían estudiarse con aceleradores de partículas como el LHC (Large Hadron Collider)



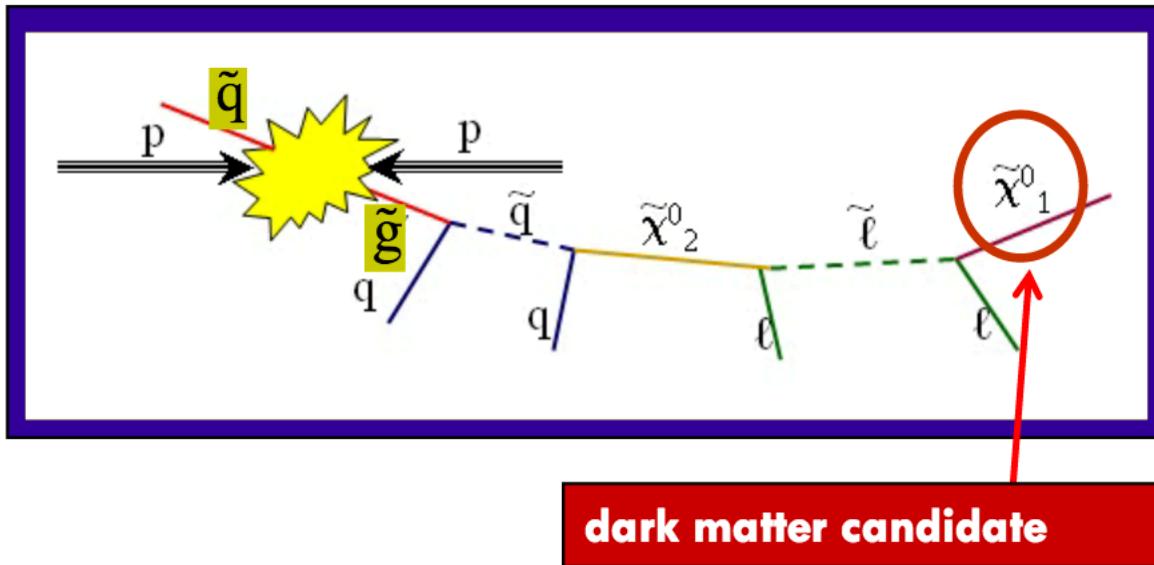
## Supersimetría:

Una nueva simetría que asigna a cada fermión (bosón) un bosón (fermión)  
Postula la existencia de nuevas partículas más masivas

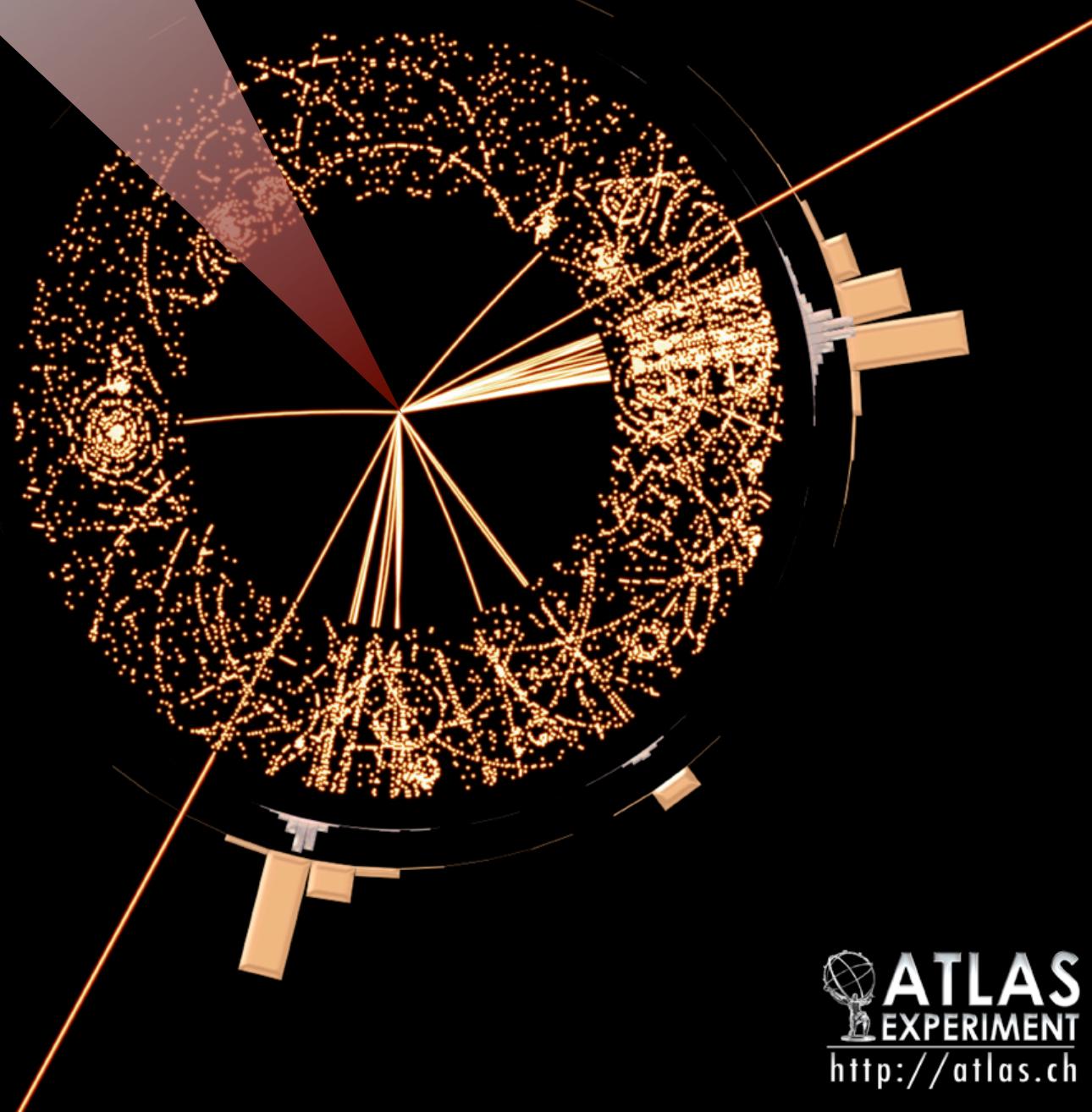


La partícula supersimétrica más ligera puede ser estable y candidato a materia oscura

# Puede ser aun más complicado con Supersimetría

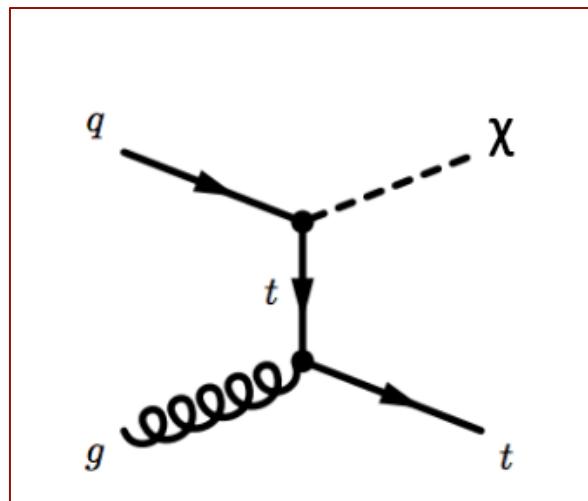
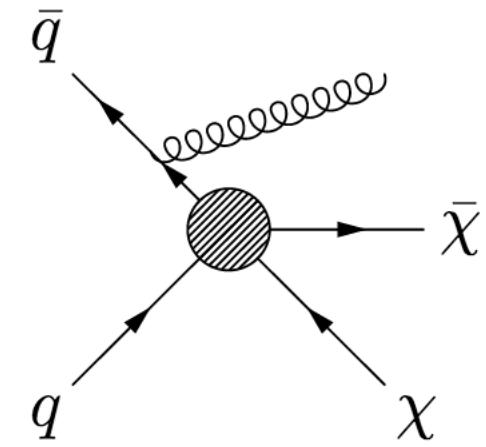
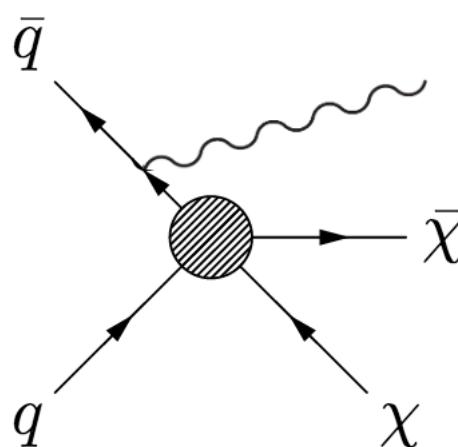
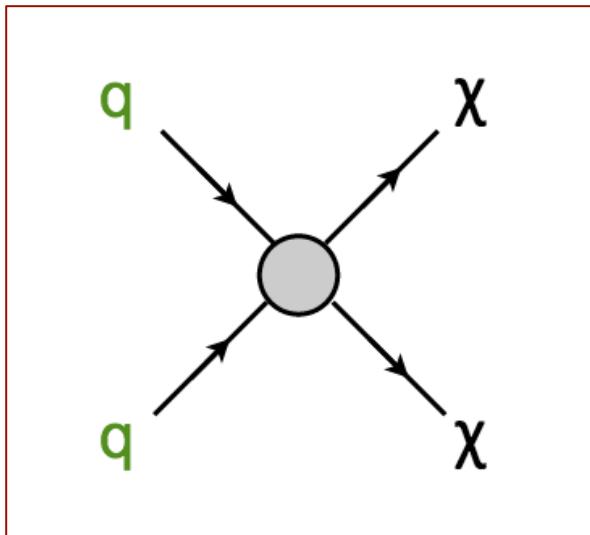


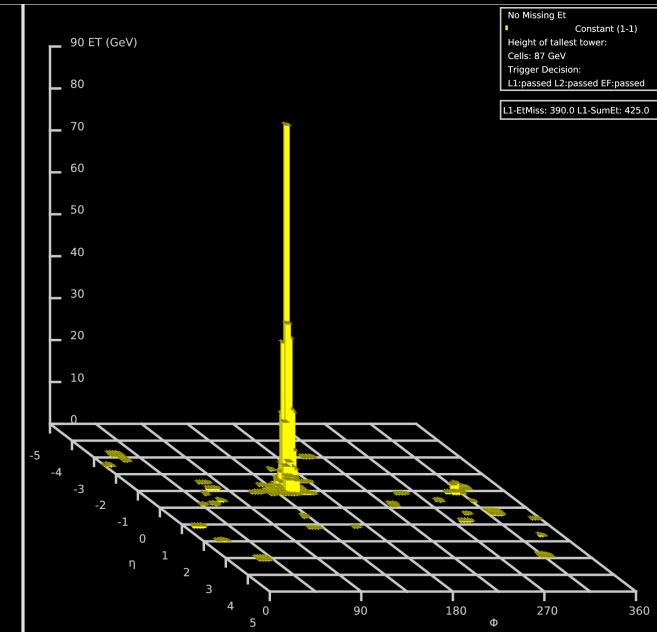
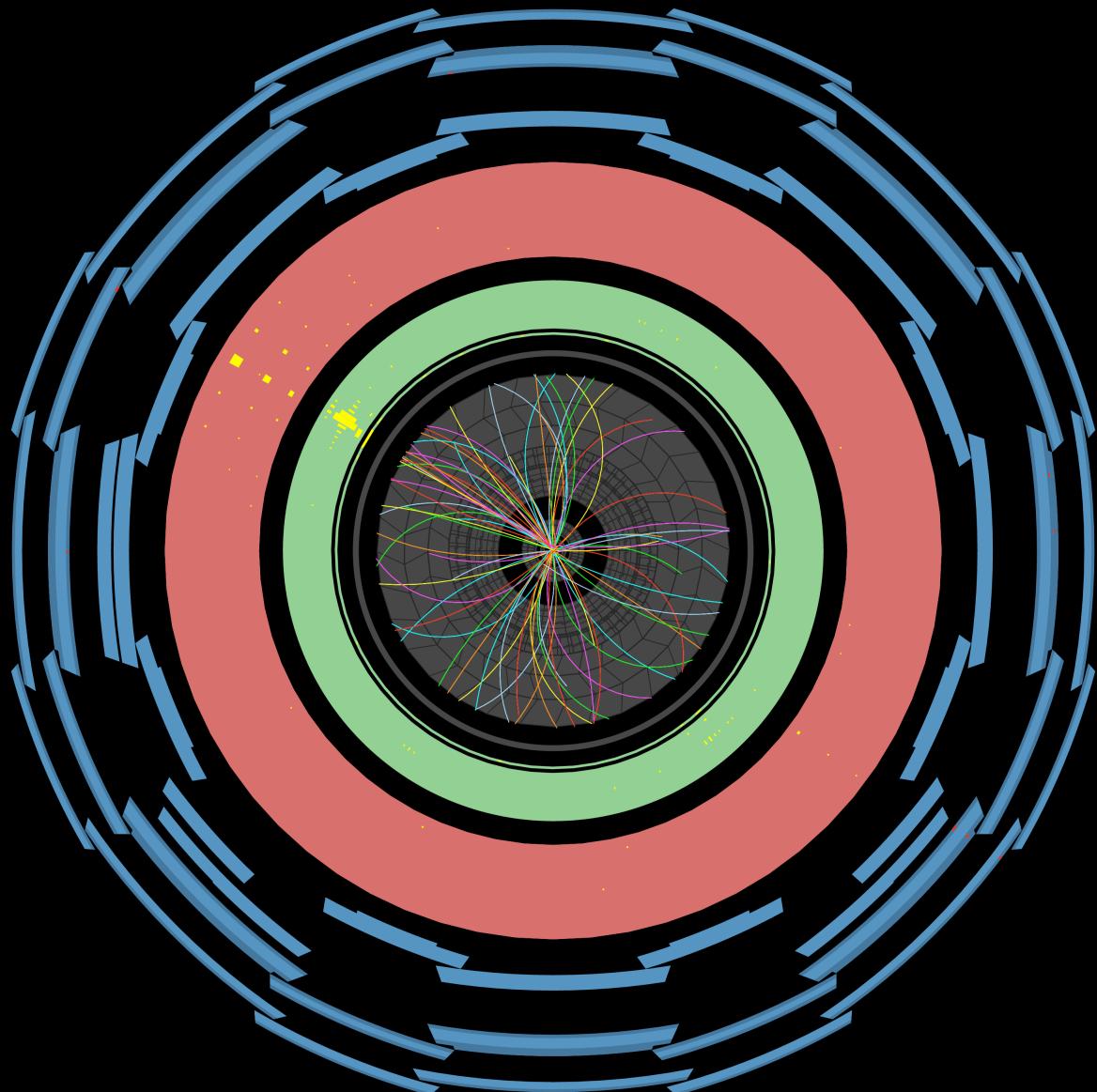
- Los sucesos pueden ser muy complicados:
  - largas cadenas de desintegración y
  - gran variedad de señales.
- La partícula más ligera no se puede detectar.
- La señal característica se basa en la **falta de energía** en el suceso.



 **ATLAS**  
EXPERIMENT  
<http://atlas.ch>

# Materia Oscura: mono- $\chi$





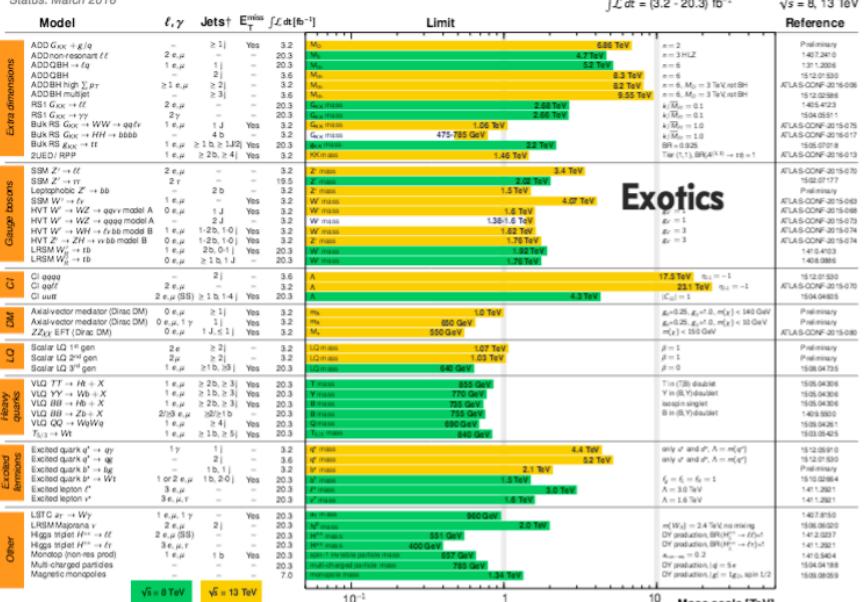
Run Number: 180309, Event Number: 36060682

Date: 2011-04-27 02:33:15 CEST

## Searches for New Physics at ATLAS

ATLAS Exotics Searches\* - 95% CL Exclusion

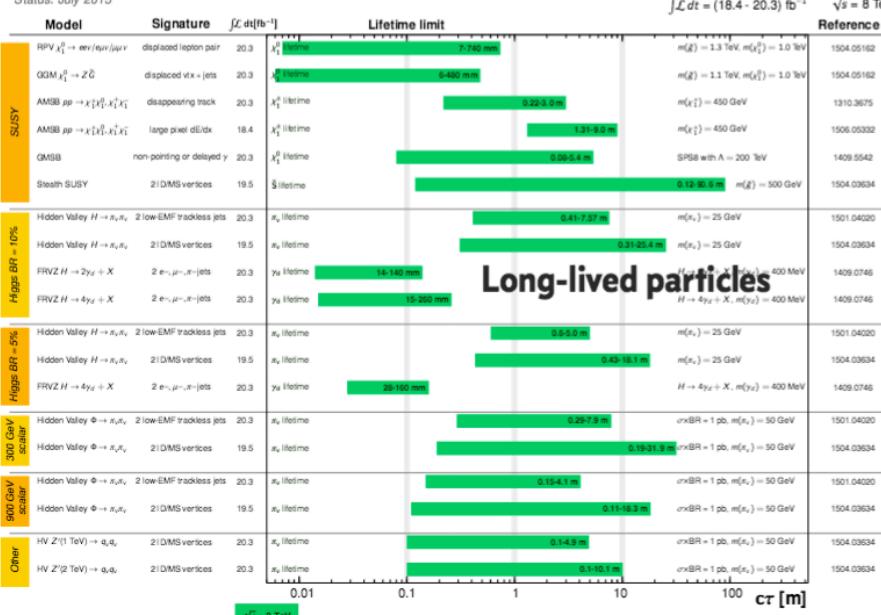
ATLAS EXOIC  
Status: March 2016



*\*Only a selection of the available mass limits on new states or phenomena is shown. Lower bounds are specified only when explicitly not excluded.*

ATLAS Long-lived Particle Searches\* - 95% CL Exclusion

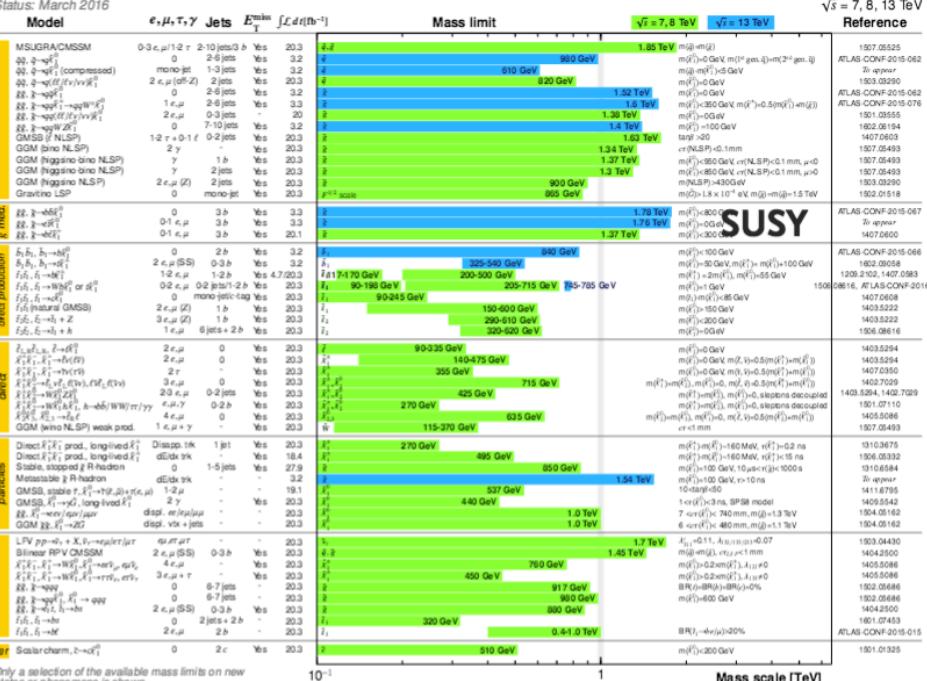
## ATLAS Long Status: July 2015



<https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic>

ATLAS SUSY Searches\* - 95% CL Lower Limits

ATLAS SUSY 3



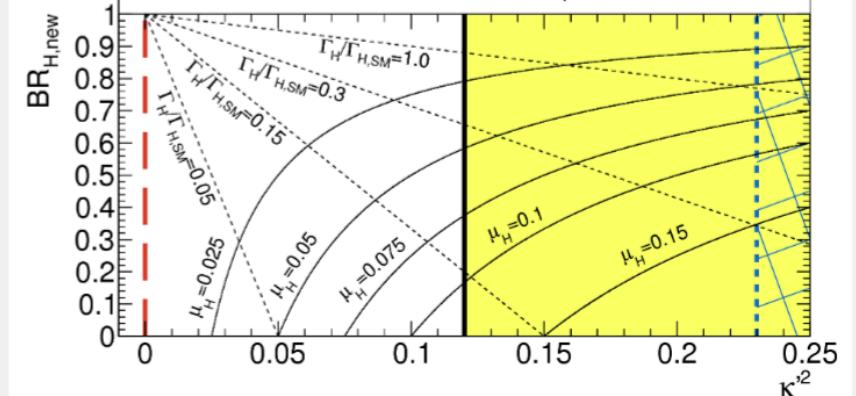
Only a selection of the available mass units of the states or phenomena is shown.

## ATLAS

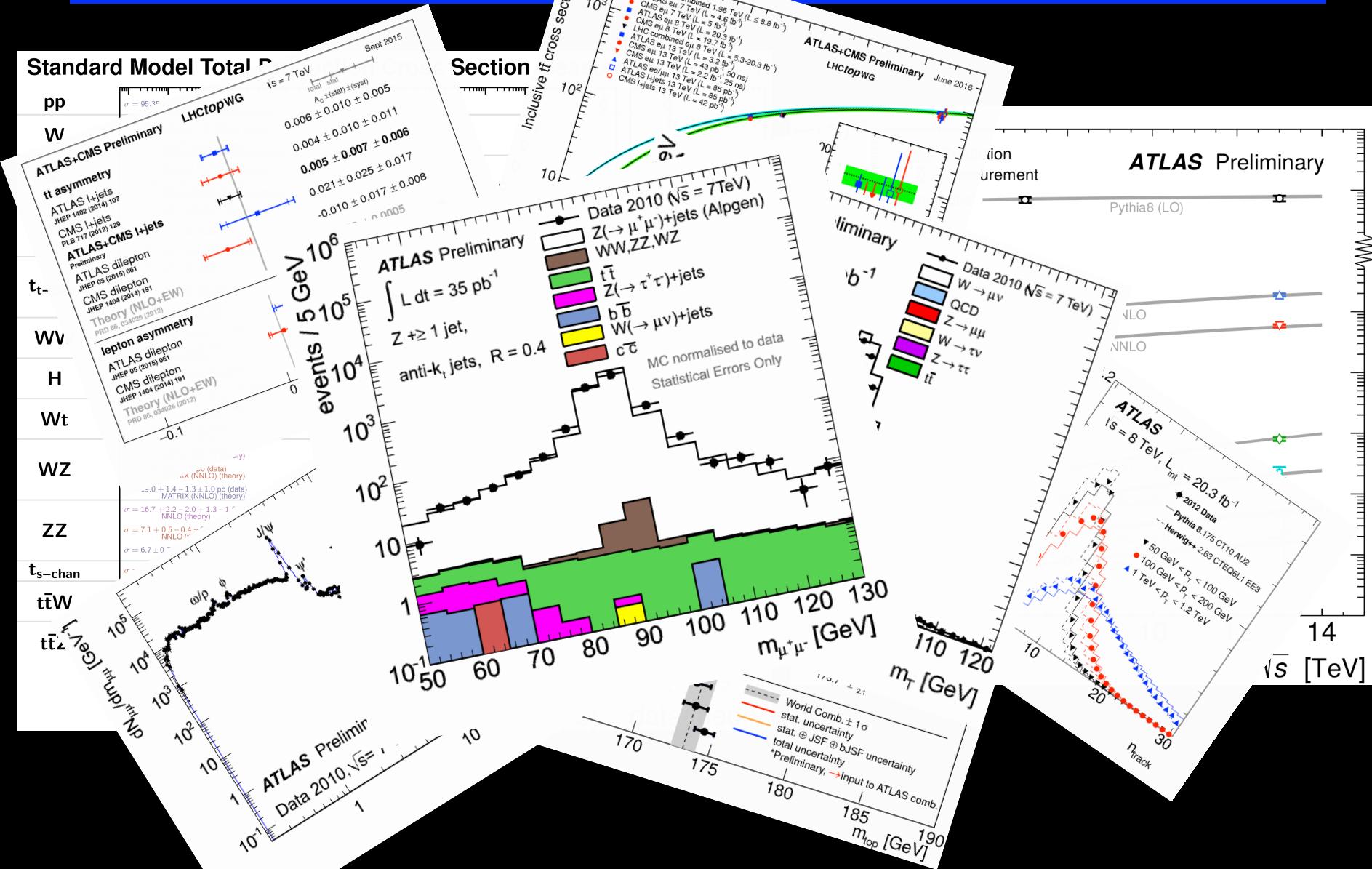
$\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}, 4.5-4.7 \text{ fb}^{-1}$

$\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}, 20.3 \text{ fb}^{-1}$

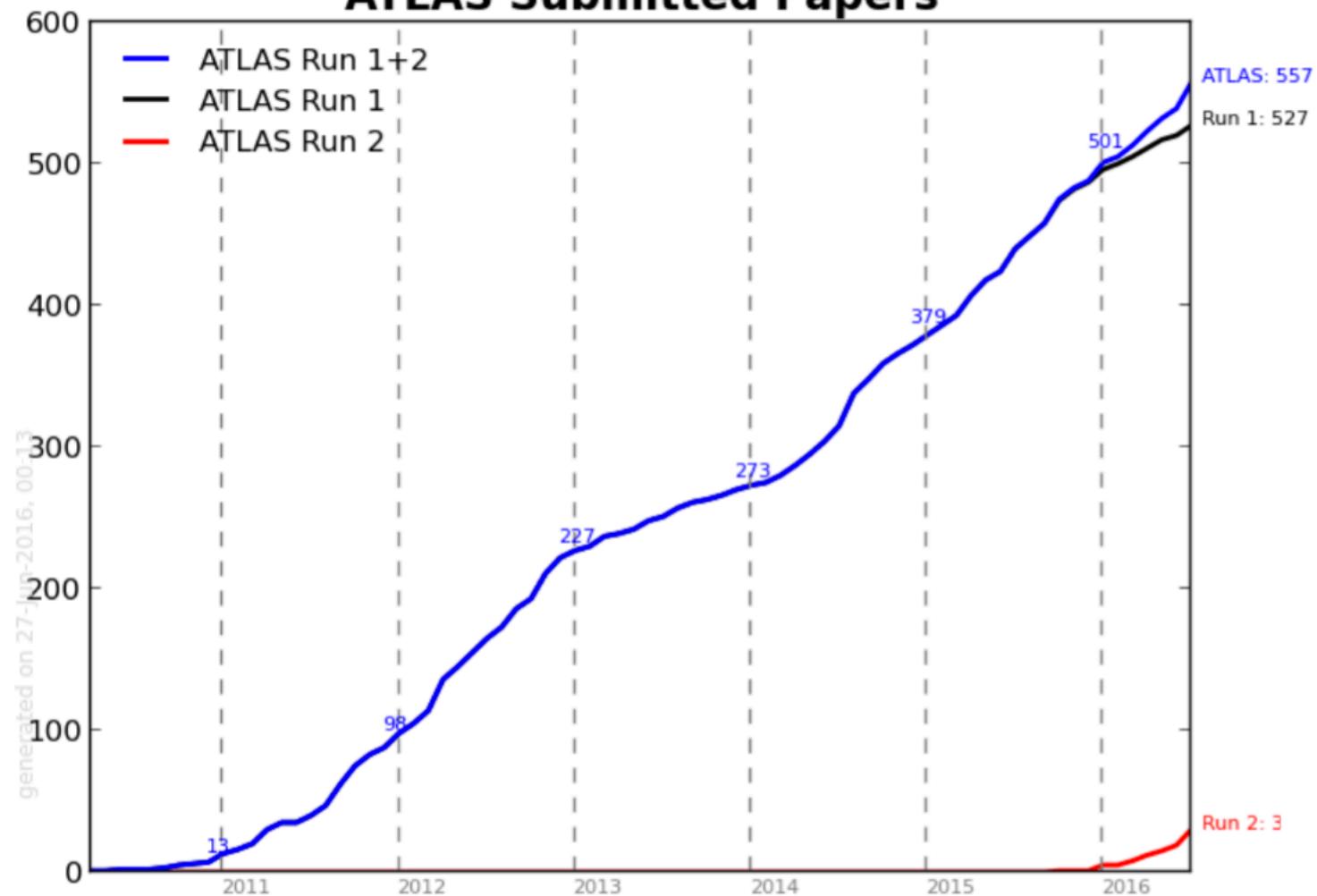
----- Exp. 95% CL:  $\kappa^2 < 0.23$



# Verificar el Modelo Estándar



## ATLAS Submitted Papers



GRACIAS POR VUESTRA ATENCIÓN

