Bienvenidos al CERN
El Laboratorio Europeo de Física de Partículas

El laboratorio europeo de física de partículas

La física de partículas, también conocida como física de altas energías y como física subnuclear, intenta conocer el origen de la materia, su estructura mas profunda y los lazos que la mantienen unida.

Nacimiento del CERN:
La primera propuesta (De Broglie, 1949)

" ...un laboratorio o institución donde sería posible llevar a cabo trabajos científicos pero, de alguna forma, mas allá del marco de las diferentes naciones participantes.

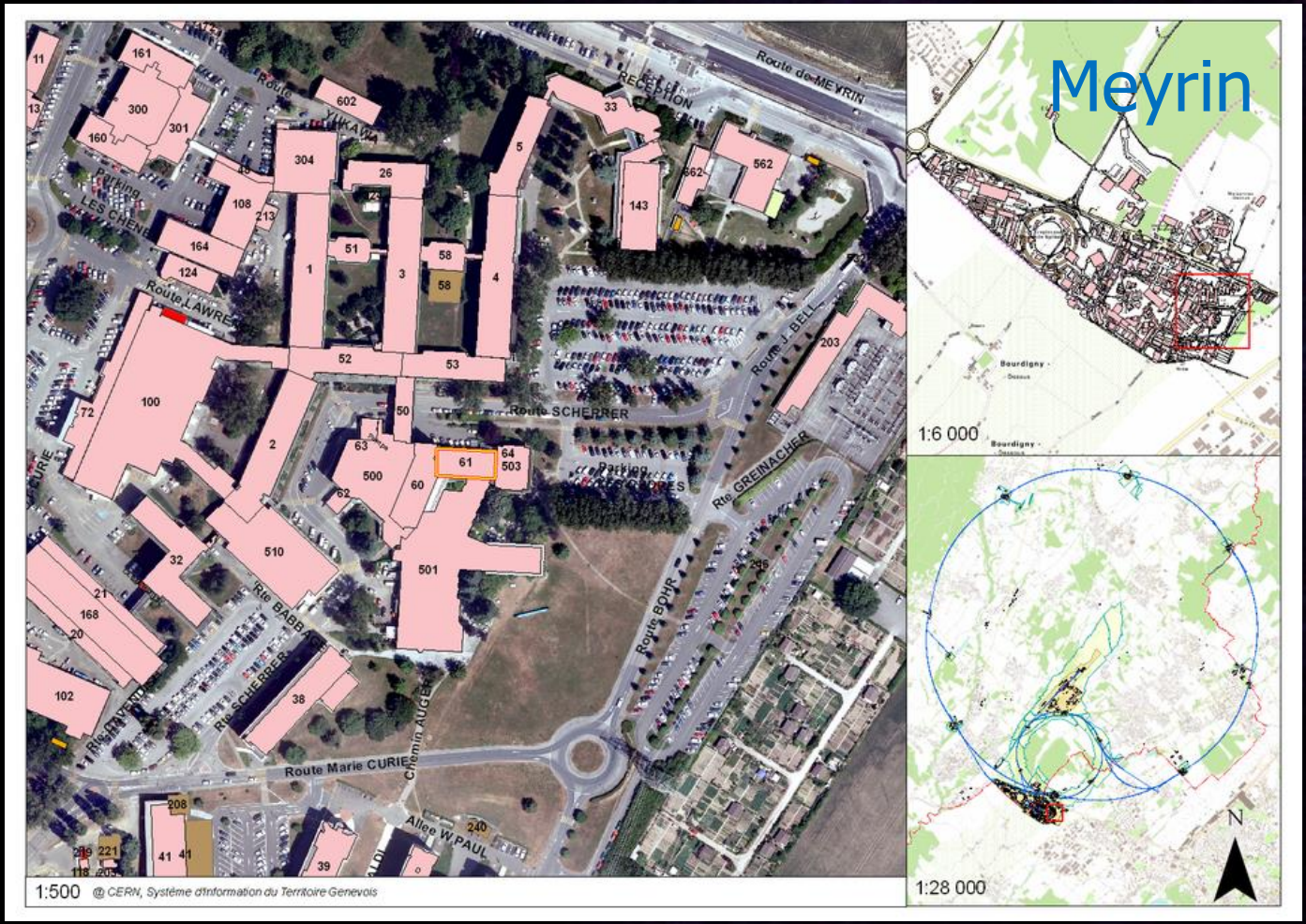
…esta entidad podría esta dotada con mas recursos que los laboratorios nacionales y podría, por tanto, emprender tareas...mas allá de su ámbito..."

La colaboración podría ser mas fácil debido a la "naturaleza verdadera de la ciencia"
Este tipo de cooperación serviría también otras disciplinas

CERN - Ciudad del Conocimiento

2 laboratorios (Meyrin & Prevessin) con varios servicios:

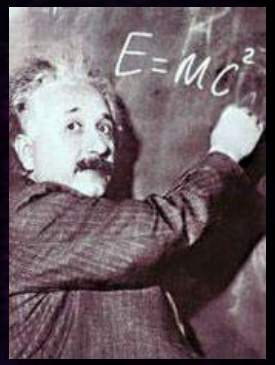
3 restaurantes, 3 hoteles, 2 oficinas de correos, 2 bancos, servicio medico, etc.



Introducción al CERN

- Misiones
- Estructura y números
- La física de partículas
- Facilidades experimentales (aceleradores)
- Los experimentos (detectores)
- I+D (aceleradores, detectores, computación)
- Educación y entrenamiento
- España en el CERN

Las Misiones del CERN



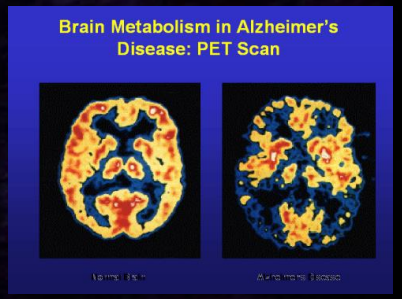
- **Empujar** las fronteras del conocimiento

  Ej.: los secretos del Big Bang …¿como era la materia durante los primeros momentos de existencia del Universo?

- **Desarrollar** nuevas tecnologías en aceleradores y detectores

  Tecnología de la Información - la Web y la GRID

  Medicina - diagnosis y terapia



- **Entrenar** los científicos e ingenieros del mañana

- **Unir** gentes de países y culturas diferentes

El CERN se fundó en 1954: 12 Naciones Europeas

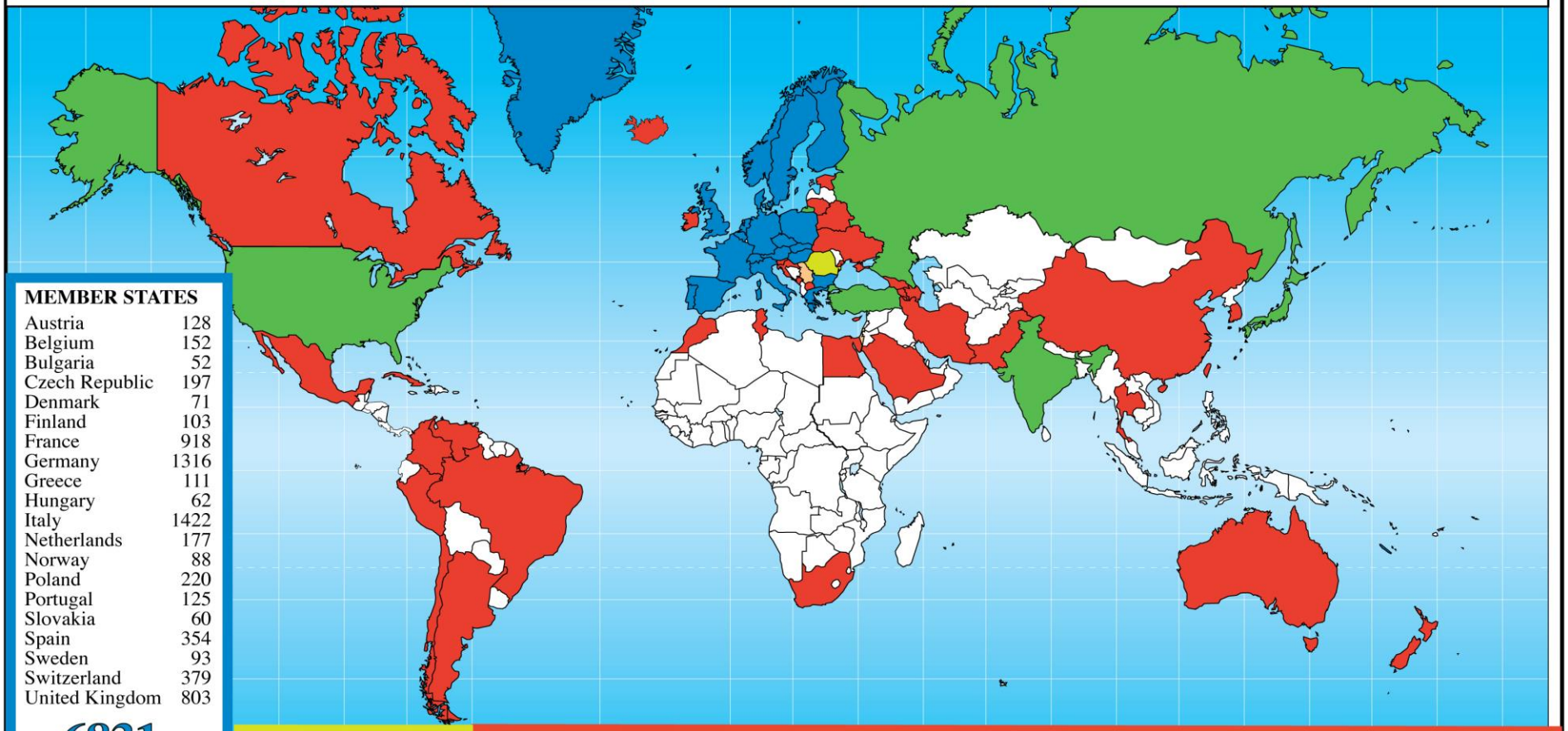
Actualmente: 20 Naciones Europeas son miembros de pleno derecho

- ~ 2300 titulares
- ~ 1000 otro personal pagado
- > 11000 utilizadores
- Presupuesto (2013) ~ 1000 MCHF

- **20 Estados Europeos miembros de pleno derecho:** Austria, Alemania, Bélgica, Bulgaria, Republica Checa, Dinamarca, Finlandia, Francia, Grecia, Hungría, Italia, Holanda, Noruega, Polonia, Portugal, Eslovaquia, España, Suecia, Suiza y el Reino Unido.
- **Candidato a miembro de pleno derecho:** Rumania
- **Estados Asociados candidatos a miembro de pleno derecho:** Israel, Serbia
- **Nuevas solicitudes:** Brasil, Chipre, Eslovenia, Pakistán, Rusia, Turquía, Ucrania
- **Observadores en el Consejo:** India, Japón, la Federación Rusa, los Estados Unidos de América, Turquía, la Comisión Europea y UNESCO

La Ciencia deviene cada vez mas global

Distribution of All CERN Users by Location of Institute on 14 January 2013



MEMBER STATES

Austria	128
Belgium	152
Bulgaria	52
Czech Republic	197
Denmark	71
Finland	103
France	918
Germany	1316
Greece	111
Hungary	62
Italy	1422
Netherlands	177
Norway	88
Poland	220
Portugal	125
Slovakia	60
Spain	354
Sweden	93
Switzerland	379
United Kingdom	803

6831

OBSERVERS

India	146
Japan	238
Russia	883
Turkey	94
USA	1757

3118

CANDIDATE FOR ACCESSION

Romania	88

ASSOCIATE MEMBER IN THE PRE-STAGE TO MEMBERSHIP

Israel	63
Serbia	31

OTHERS

Argentina	19	Chile	7	Georgia	10	Morocco	10	Tunisia	1
Armenia	15	China	114	Iceland	4	New Zealand	9	Ukraine	25
Australia	32	China (Taipei)	69	Iran	23	Pakistan	22	Venezuela	1
Azerbaijan	2	Colombia	10	Ireland	8	Peru	2		
Belarus	22	Croatia	24	Korea	96	Saudi Arabia	3		
Brazil	107	Cuba	3	Lithuania	13	Slovenia	30		
Canada	168	Cyprus	7	Malta	1	South Africa	25		
		Egypt	11	Mexico	41	Thailand	5		
		Estonia	17	Montenegro	1	T.F.Y.R.O.M.	2		

959

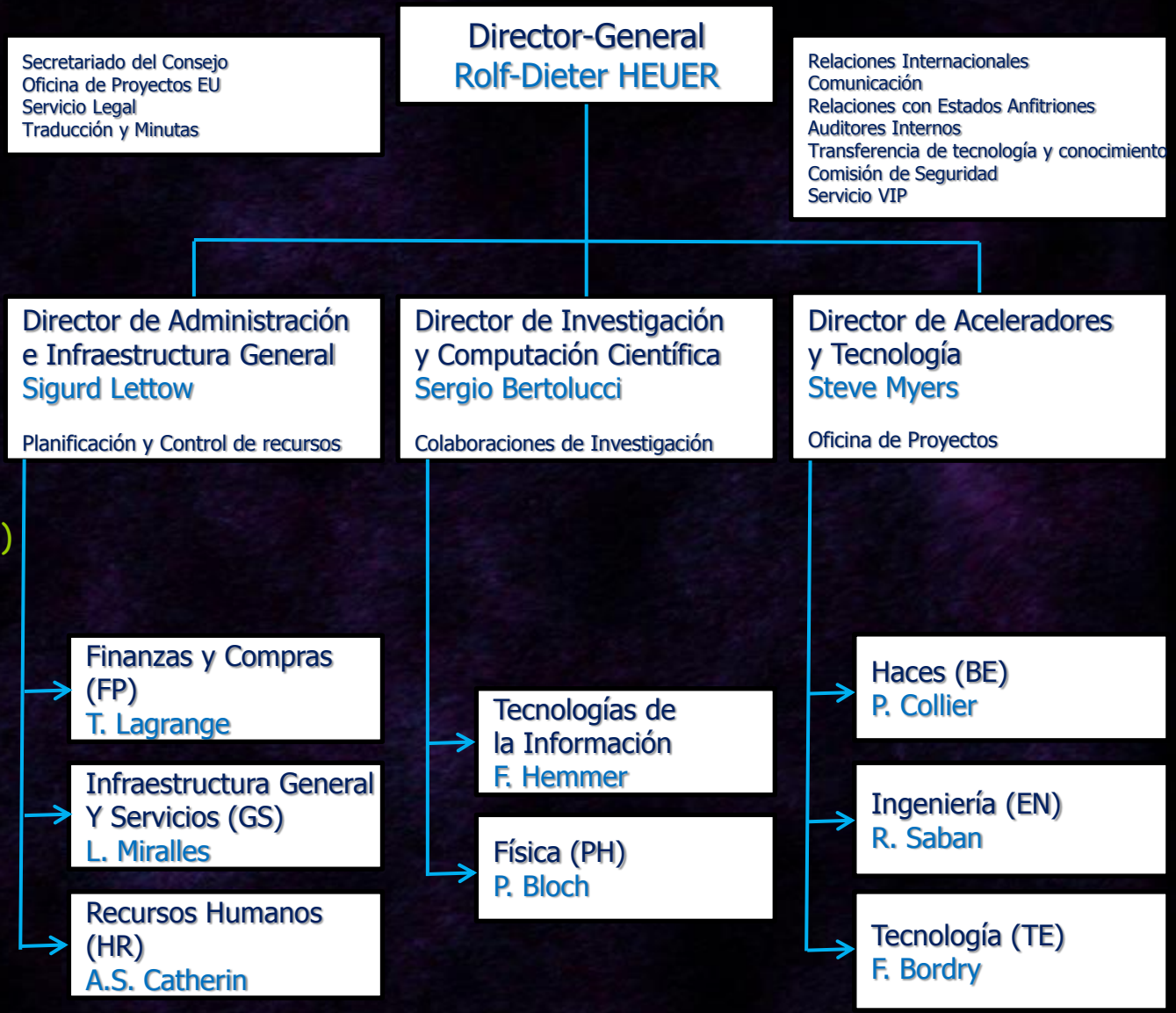
Estructura orgánica

Órganos políticos

Consejo del CERN
Comité de Política Científica
Comité de Finanzas

Comités científicos

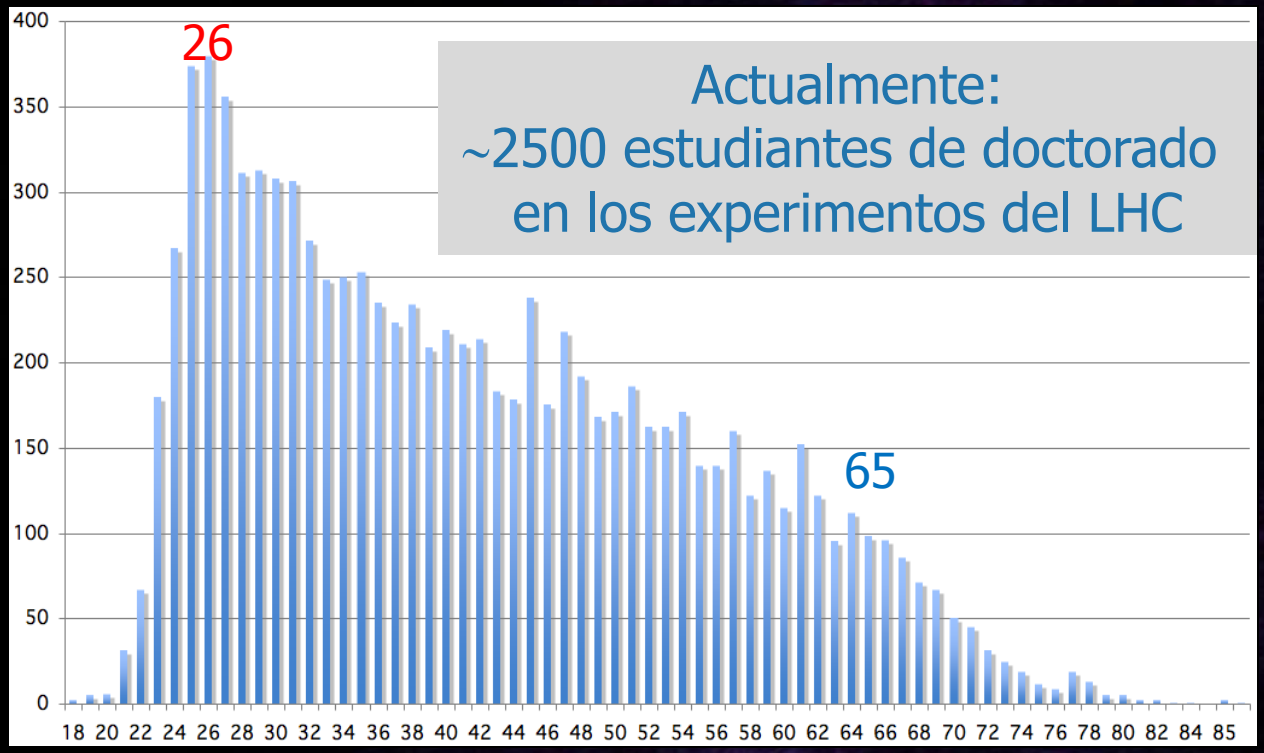
SPSC
INTC
LHCC
Comisión de Investigación (RB)



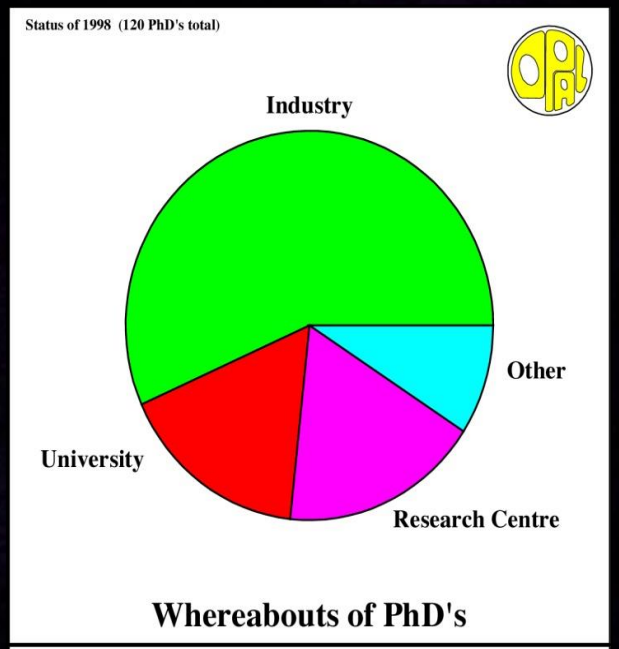
Distribución de la edad de los Científicos

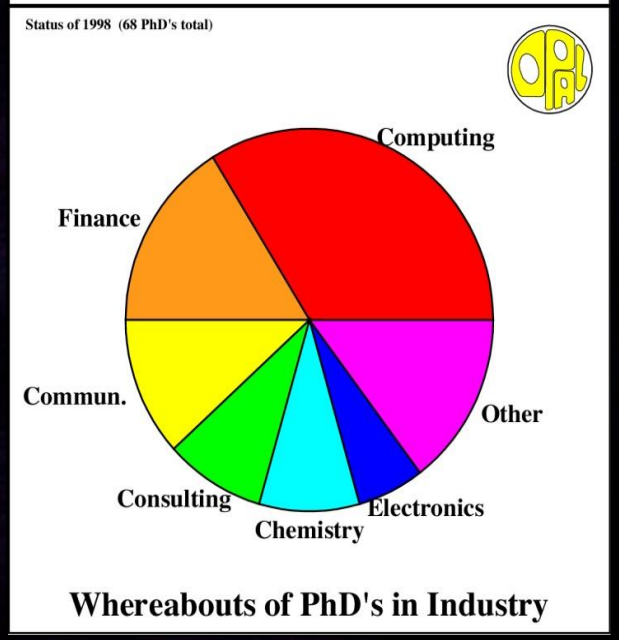
- y donde van después

Datos de marzo 2009



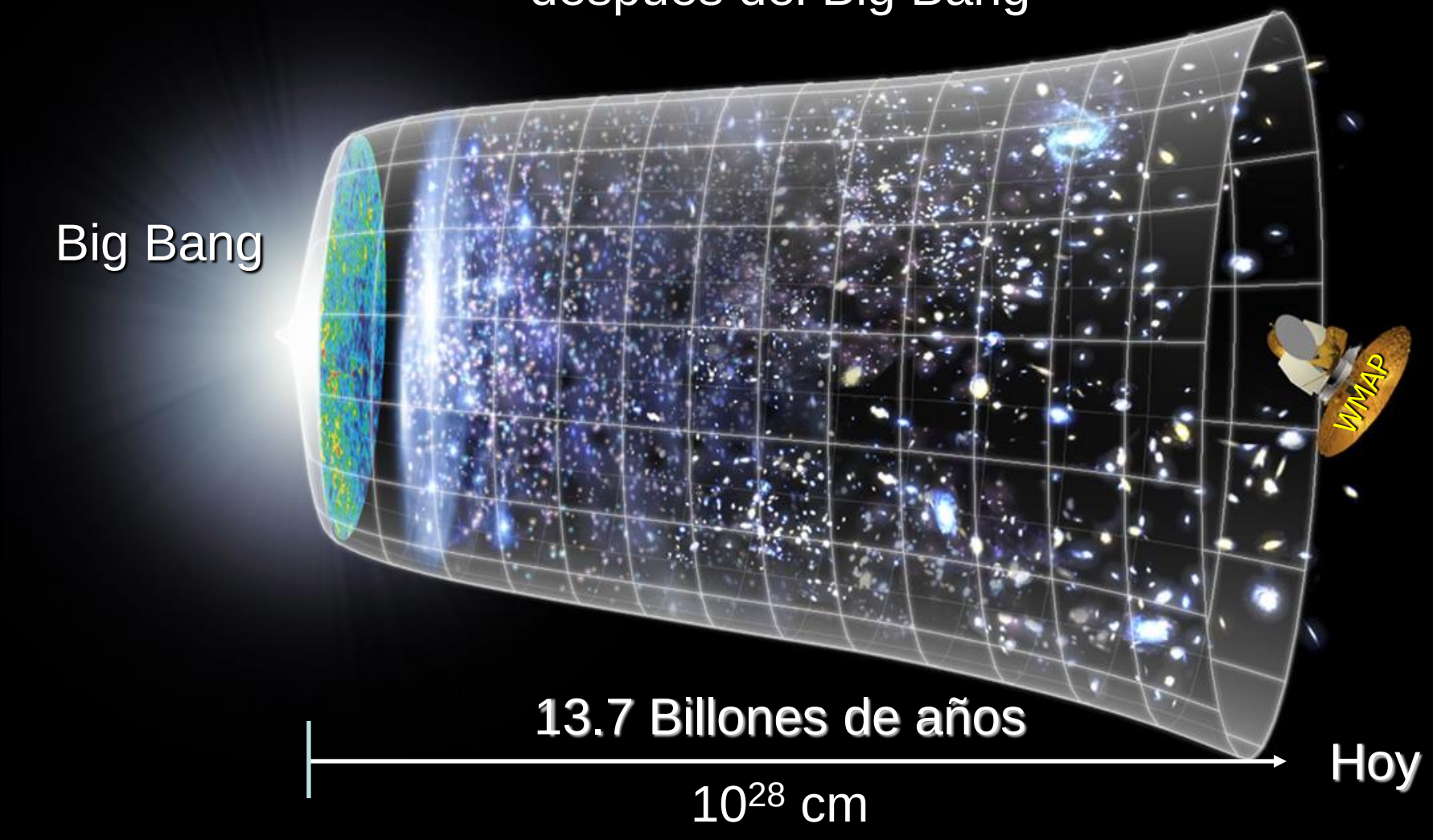
No todos se quedan: donde van?





Próximo desafío científico:

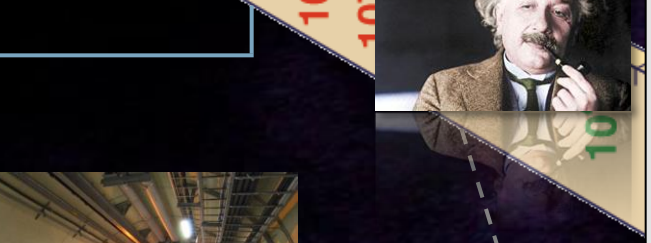
entender los primeros instantes de nuestro universo después del Big Bang

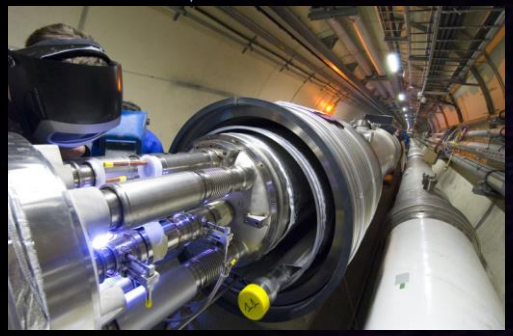


Big Bang

Protón

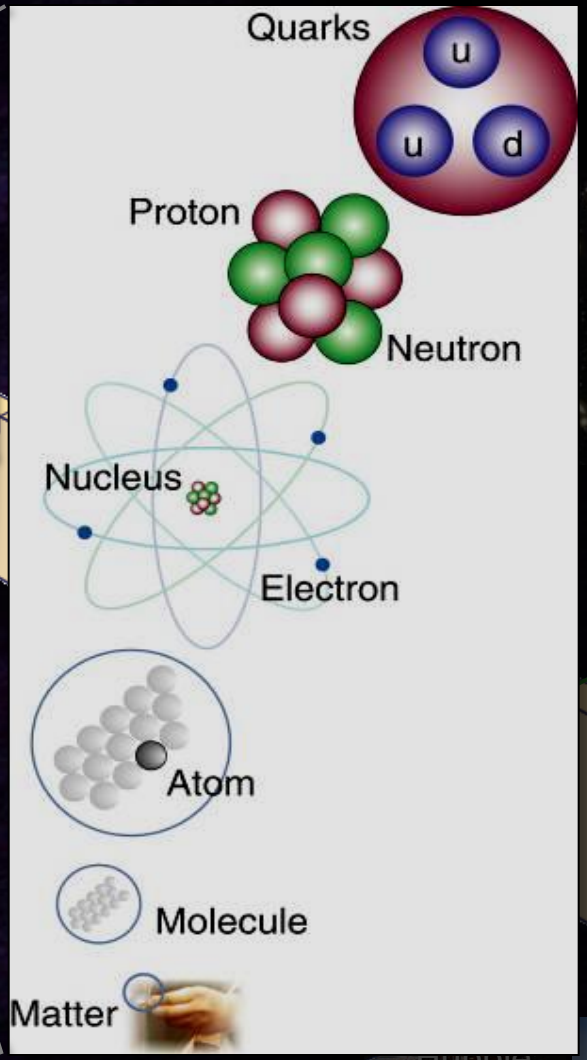
Átomo





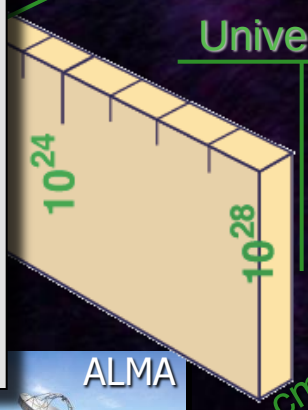
LHC

Súper-Microscopio



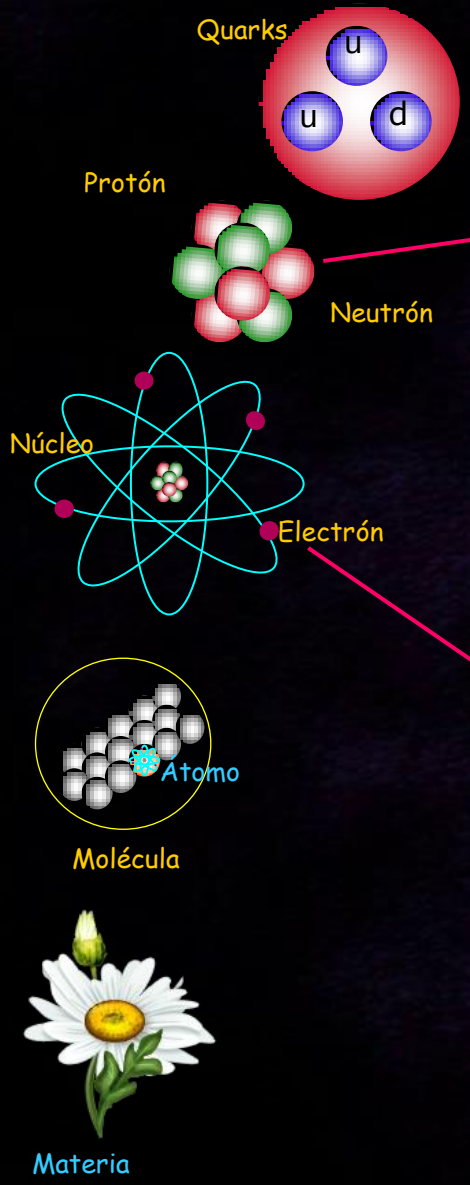
Radio de las Galaxias

Universo



Estudiar las leyes físicas de los primeros momentos después del Big Bang incrementando la Simbiosis entre Física de Partículas, Astrofísica y Cosmología

Progreso en nuestro conocimiento de la materia



Desde los átomos a los quarks

Los hadrones están hechos de quarks, e.g.

$p = uud$

$\Lambda^0 = uds$ Bariones

$\Lambda^0_b = udb$

$\pi^+ = u\bar{d}$

$\Psi = c\bar{c}$ Mesones

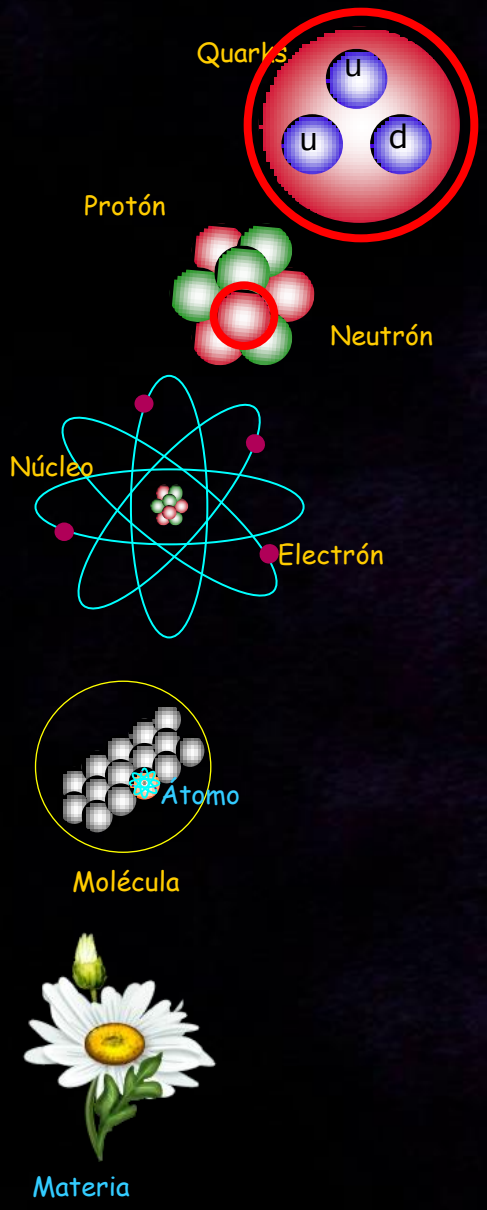
$\Upsilon = b\bar{b}$

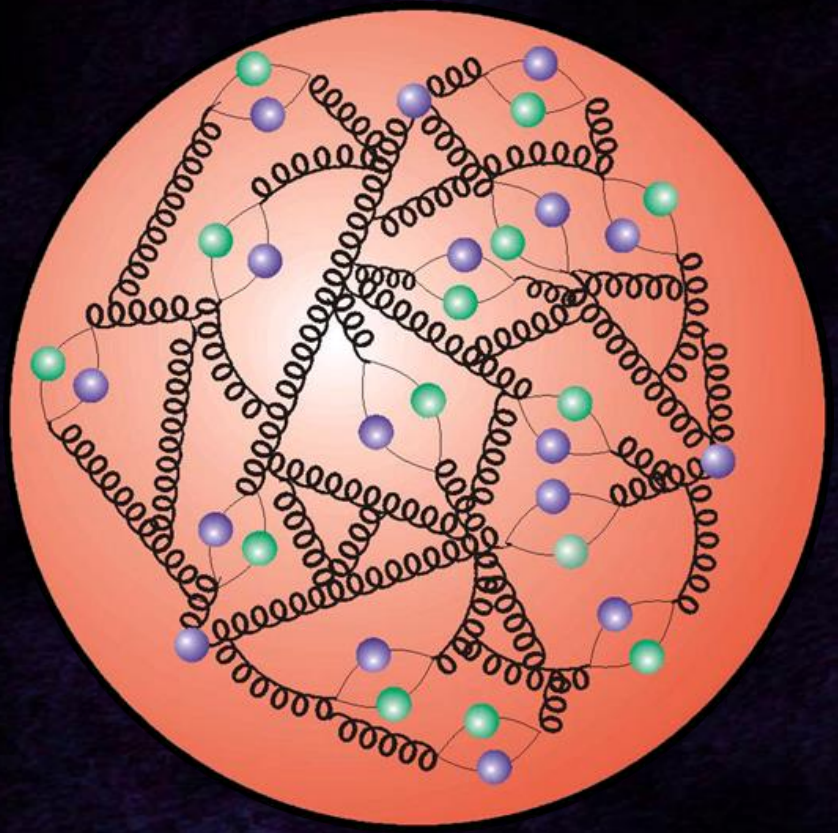
Los leptones son partículas fundamentales, e.g.

electrón, muón, tau

neutrinos

Progreso en nuestro conocimiento de la materia

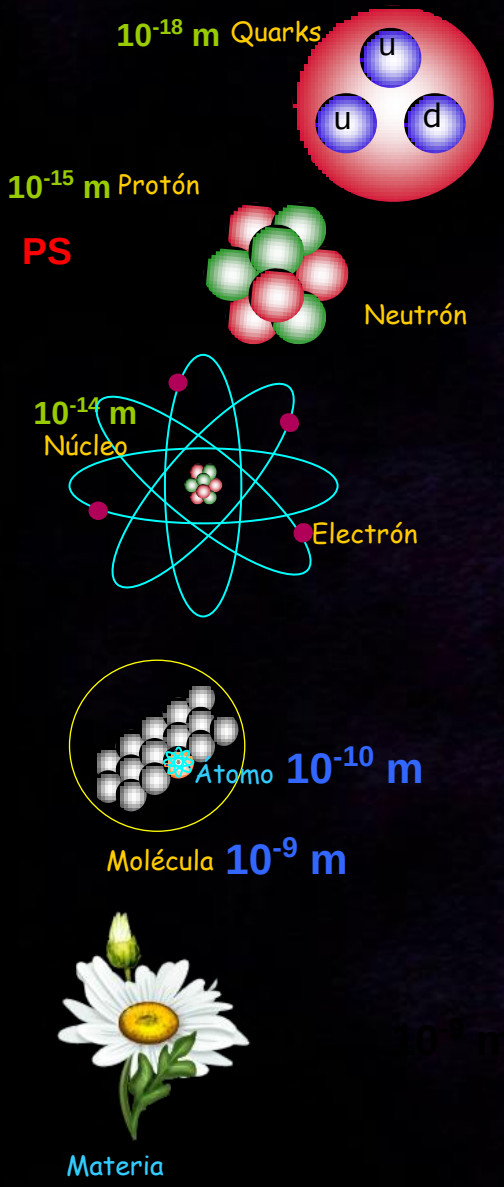




De hecho, el proton esta formado con 3 quarks de valencia (uud) y con un “mar” de gluones y parejas quark-antiquark de vida corta

El protón no se construye solo con tres quarks (uud)

Los constituyentes de la materia



Partículas y Campos elementales
Ingredientes del Modelo Estándar

partículas materiales

	1ra gen.	2da gen.	3ra gen.
QUARKS	u up	c encanto	t top
	d down	s extraño	b belleza
LEPTONES	ν_e neutrino e	ν_μ neutrino μ	ν_τ neutrino τ
	e^- electrón	μ^- muón	τ^- tau

partículas gauge

Fuerza fuerte

g gluón

Fuerza electromagnética

γ fotón

Fuerza débil

W^+ W^- bosones W

Z bosón Z

Partícula(s) escalar(es)

H Higgs ? ? • • •

Sin embargo …

Cuando observamos objetos estelares e intentamos medir su masa, nos encontramos con que las partículas del modelo estándar no son suficientes para explicar las observaciones.

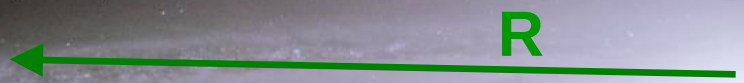
Por ejemplo: observando la velocidad de rotación de objetos dentro de una galaxia en función de su distancia al centro R vemos que esta no coincide con la masa visible.

Para R pequeño v ~ R (disco sólido)

Para R grande v = constante, que significa que M crece ~ R

➔Materia Oscura

(Kepler: $v \sim 1/R^{1/2}$)



Mas evidencias de otras observaciones del fondo cósmico de microondas (CMB)

¡¡ Se necesita mucha mas materia !! ➔ Materia Oscura (Dark Matter)

¿¿ De que esta hecho nuestro universo ??

el oscuro misterio de la materia permanece…

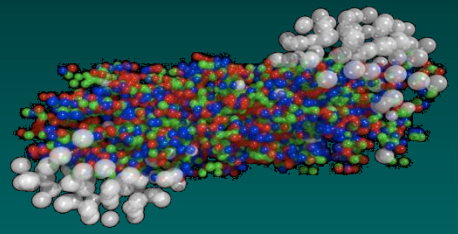
- Partículas elementales — 0.1% → Mecanismo higgs del SM
  - Materiales (leptones y quarks)
  - Gauge (γ, Z, W, gluones)
- Partículas Compuestas (hadrones) — 4% → Ruptura de la simetría chiral QCD
  - Bariones (protones, neutrones, …)
  - Mesones (piones, kaones, …)
- Materia oscura — 23%
  - **partículas desconocidas**
- Energía oscura — 73%
  - **energía del vacío**
  - → **origen desconocido**

No sabemos el "como" ni el "porque" del ~ 5% del SM

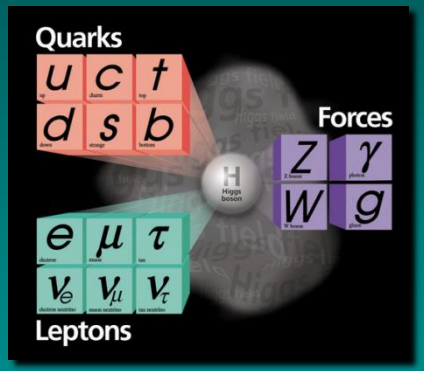
Ni tan siquiera sabemos el "***que***" del otro 95%

No sabemos todo!

El estudio de los datos del LHC nos permitirá responder alguna de las preguntas fundamentales ...



¿Entenderemos el estado primordial de la materia después del Big Bang y antes de que protones y neutrones se formasen?



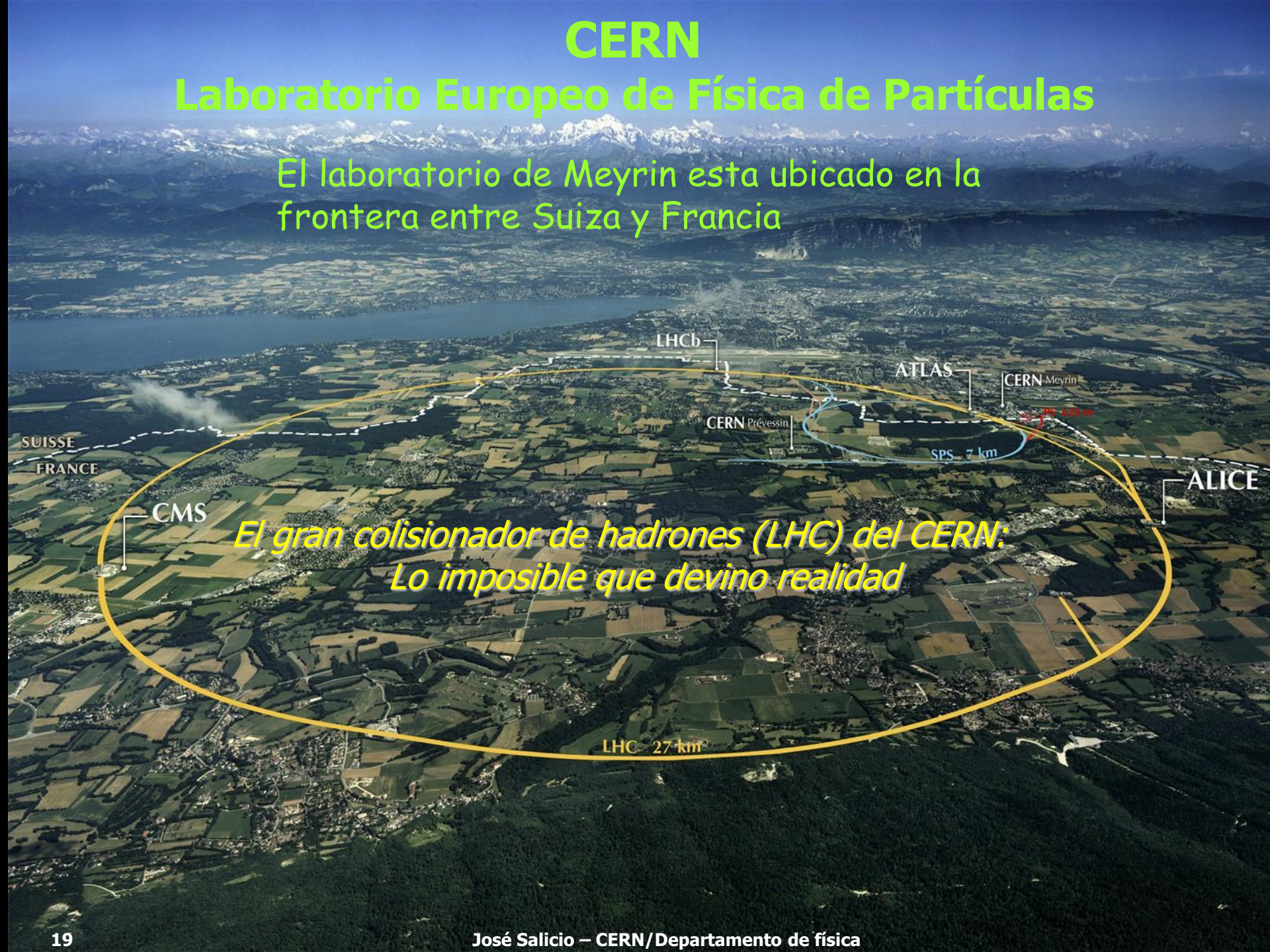
¿Hemos encontrado la partícula Higgs responsable de dar masa a todas las partículas?

¿Encontraremos la razón por la cual antimateria y materia no se destruyeron completamente una con otra?

¿Encontraremos la(s) partícula(s) que forman la misteriosa 'materia oscura' de nuestro Universo?

CERN
Laboratorio Europeo de Física de Partículas

El laboratorio de Meyrin esta ubicado en la frontera entre Suiza y Francia



El gran colisionador de hadrones (LHC) del CERN:
Lo imposible que devino realidad

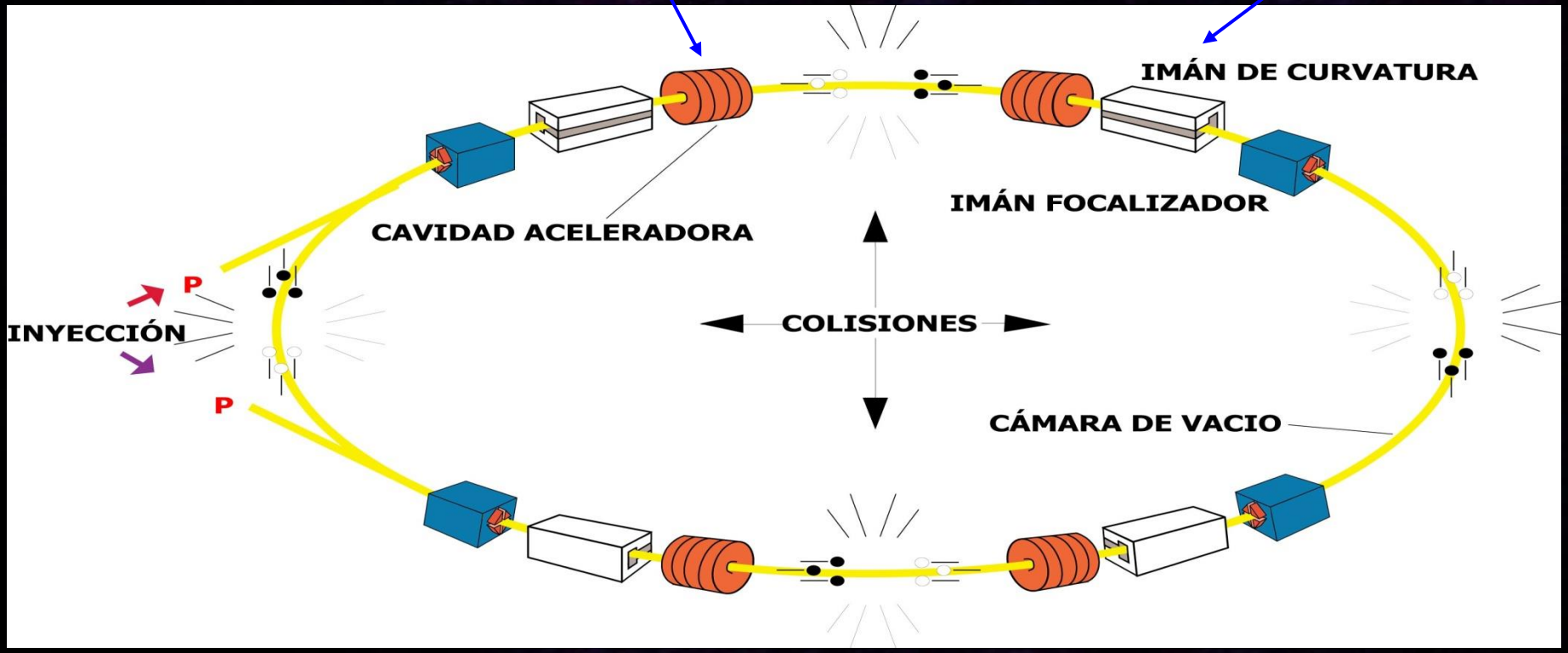
Elementos de un colisionador circular

- Producción de las partículas del haz
- Sistema de inyección y cámaras de vacío
- Definición/Mantenimiento de las orbitas
- Óptica del haz
- Sistema de aceleración y compensación
- Puntos de interacción y detectores

Las herramientas de la física de partículas

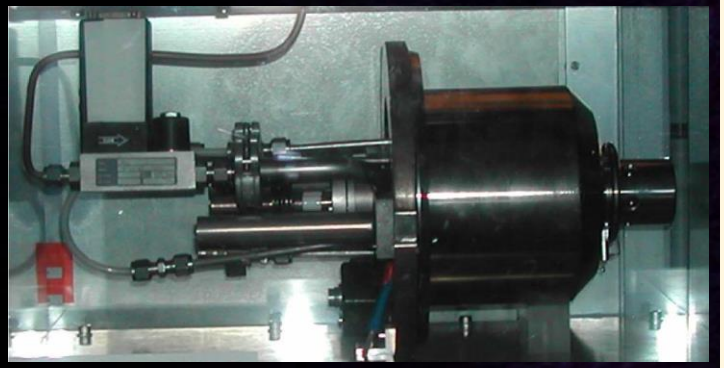
Cavidades Superconductoras

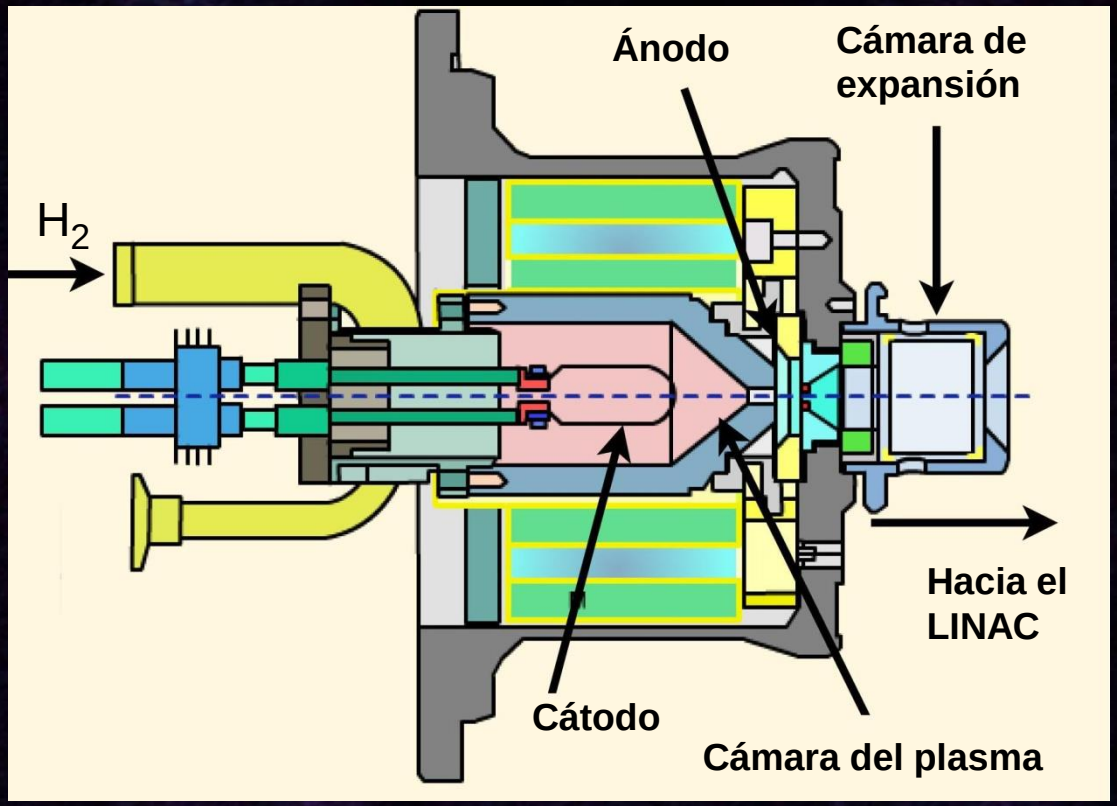
Criodipolos



Producción de partículas (protones): fuente duoplasmatron

Los protones se producen por la ionización del plasma de H_2 potenciada con un haz de electrones.

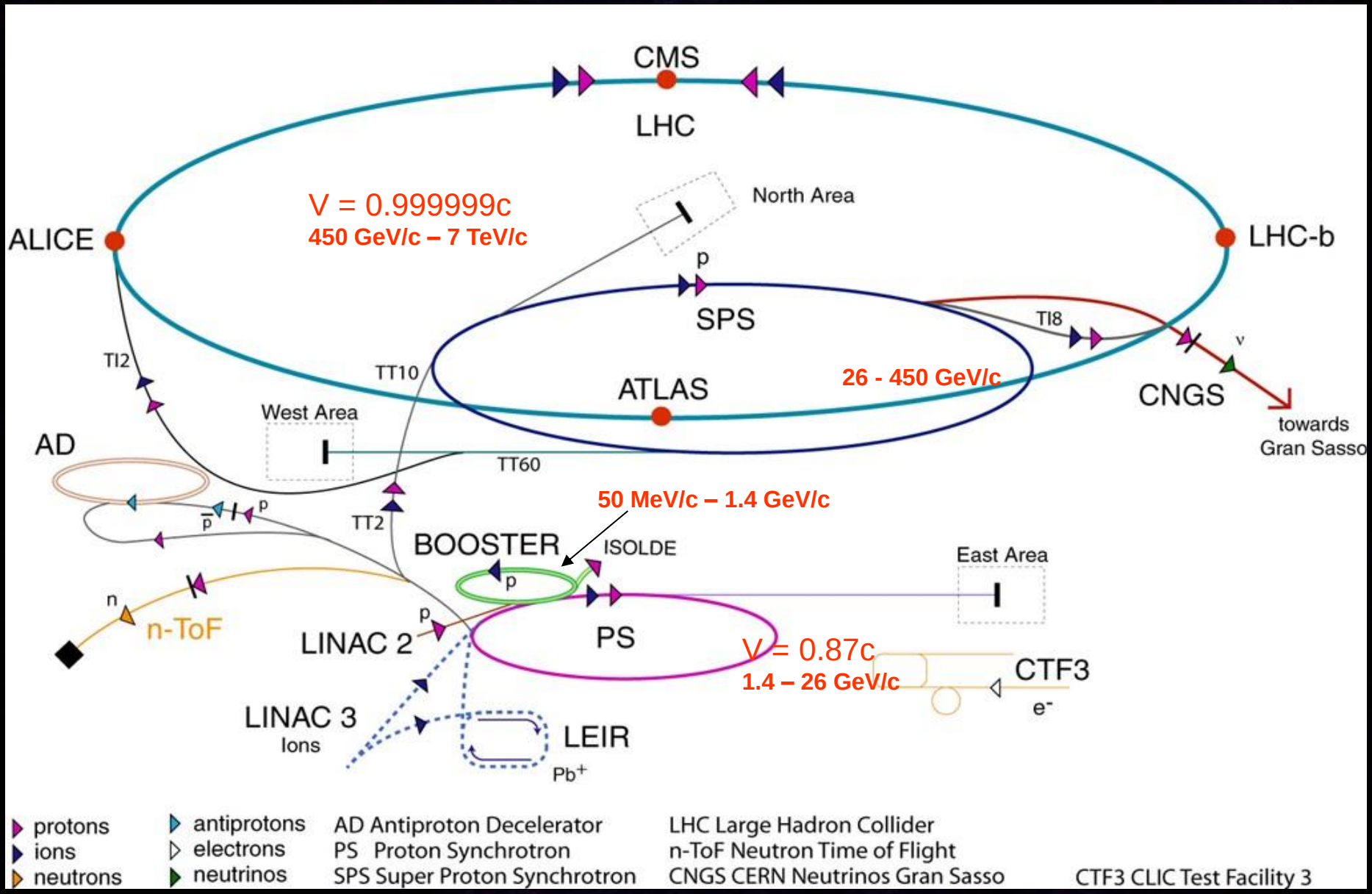




Los protones salientes por la apertura de ~ 1 mm² de la fuente tienen una velocidad del 1,4% de la velocidad de la luz, i.e., ~ 4000 km/s

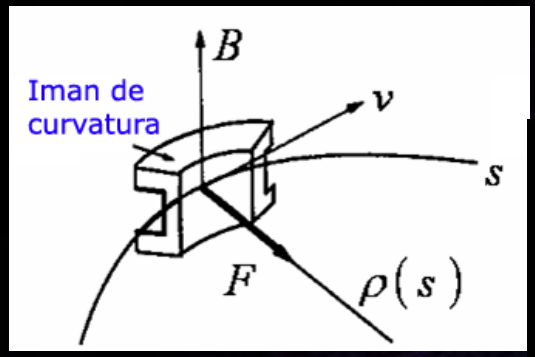
El SPACE SHUTTLE viaja a una velocidad de solo 8 km/s

Esquema de los sistemas de inyección y aceleración



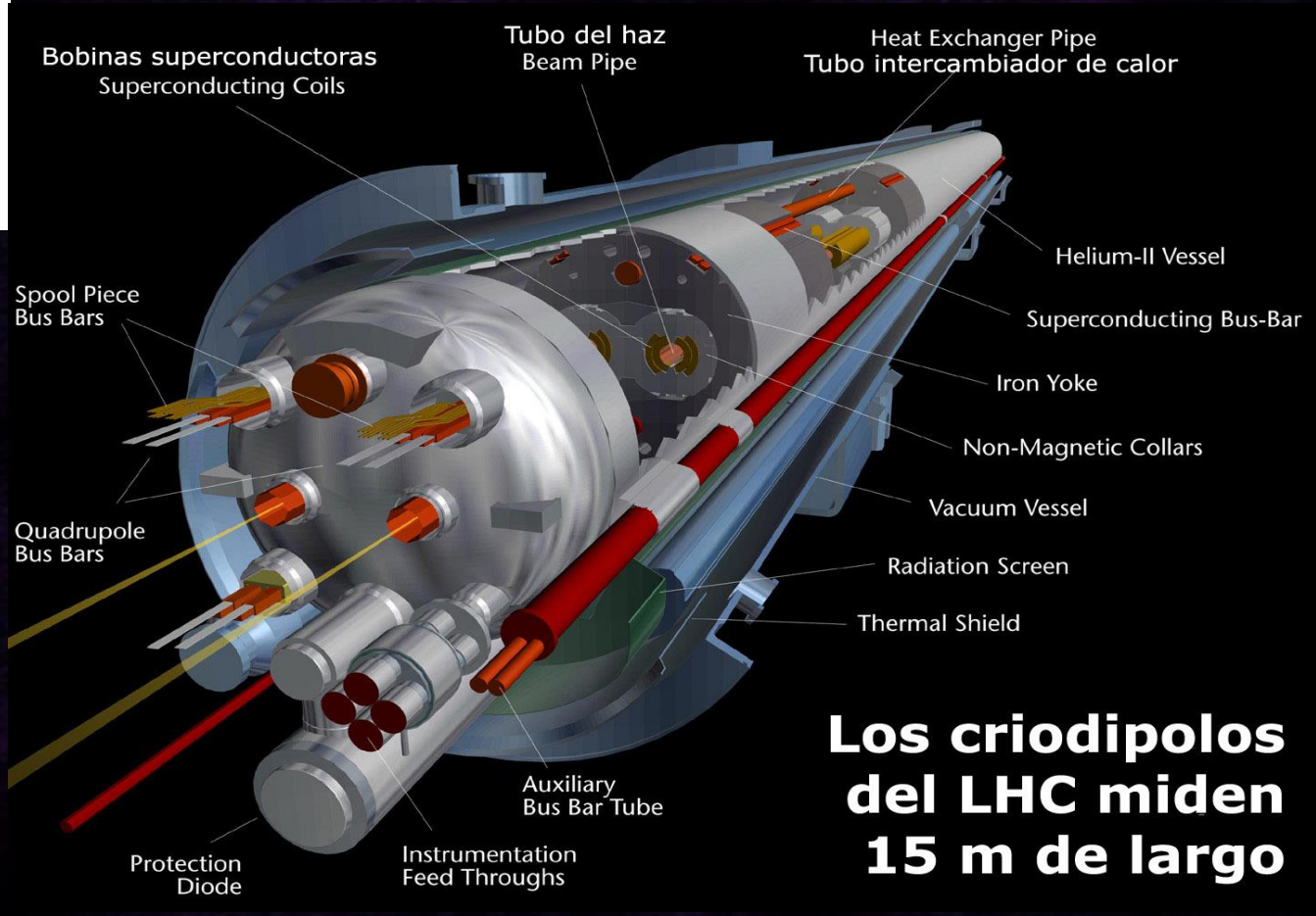
Definición y mantenimiento de orbitas

Diseño y mantenimiento de las órbitas - Imanes dipolares

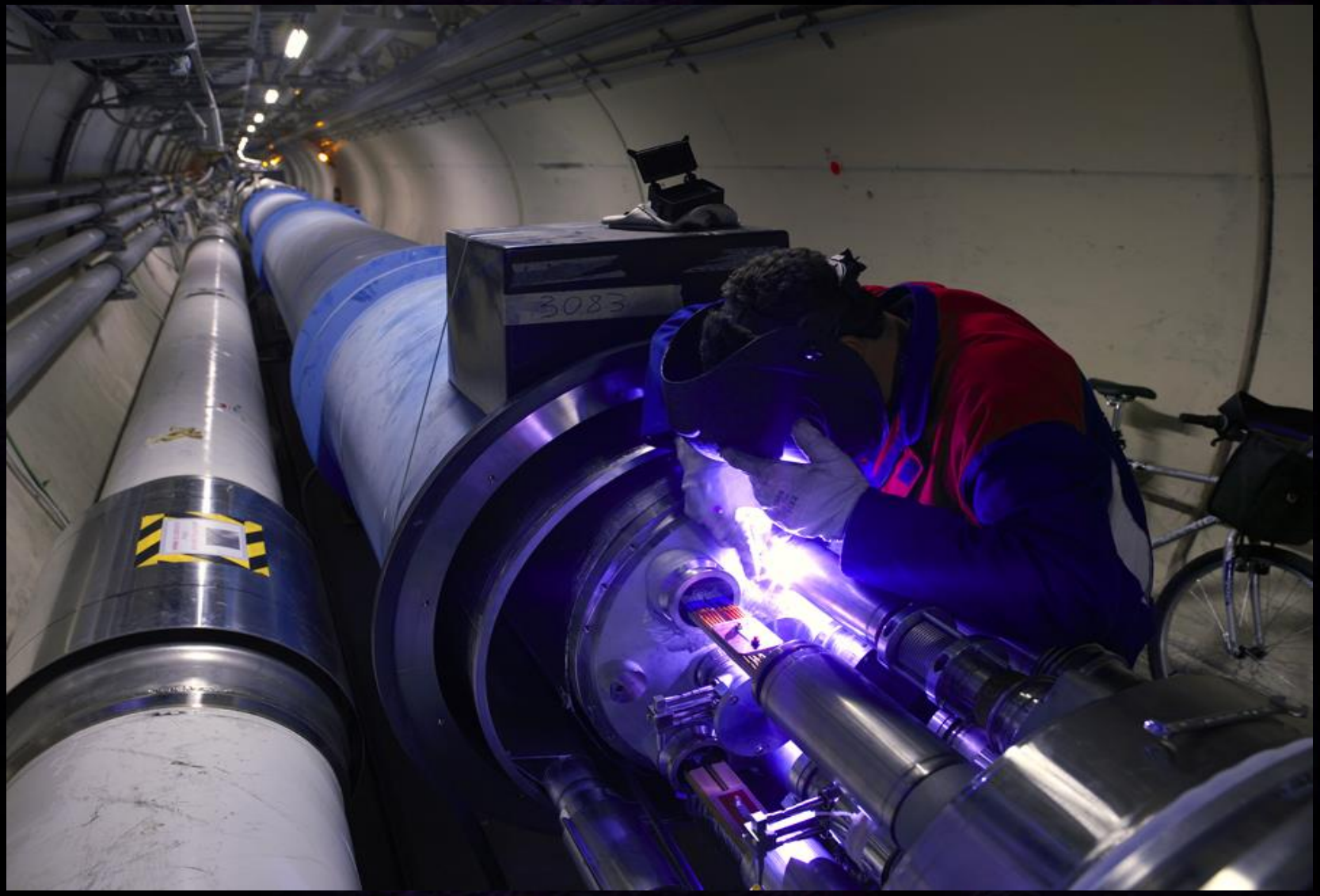


$\rho = 1 / r = e B / p$

1232 Criodipolos

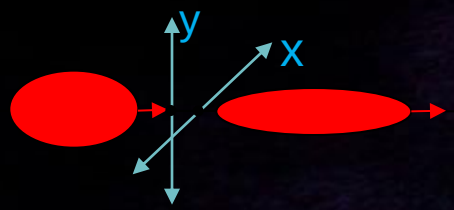


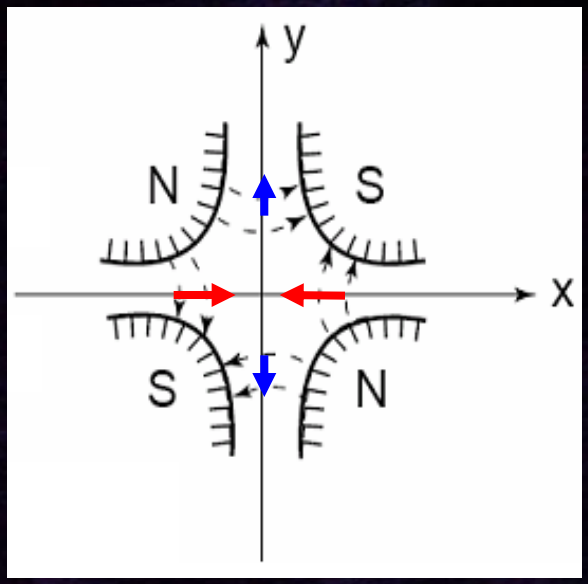
Interconexión de criodipolos en el túnel del LHC

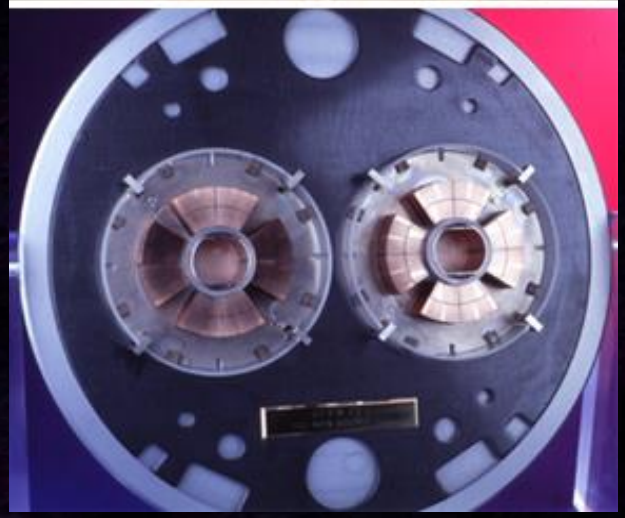


Óptica del haz

Imanes cuadrupolares (lentes magnéticas)





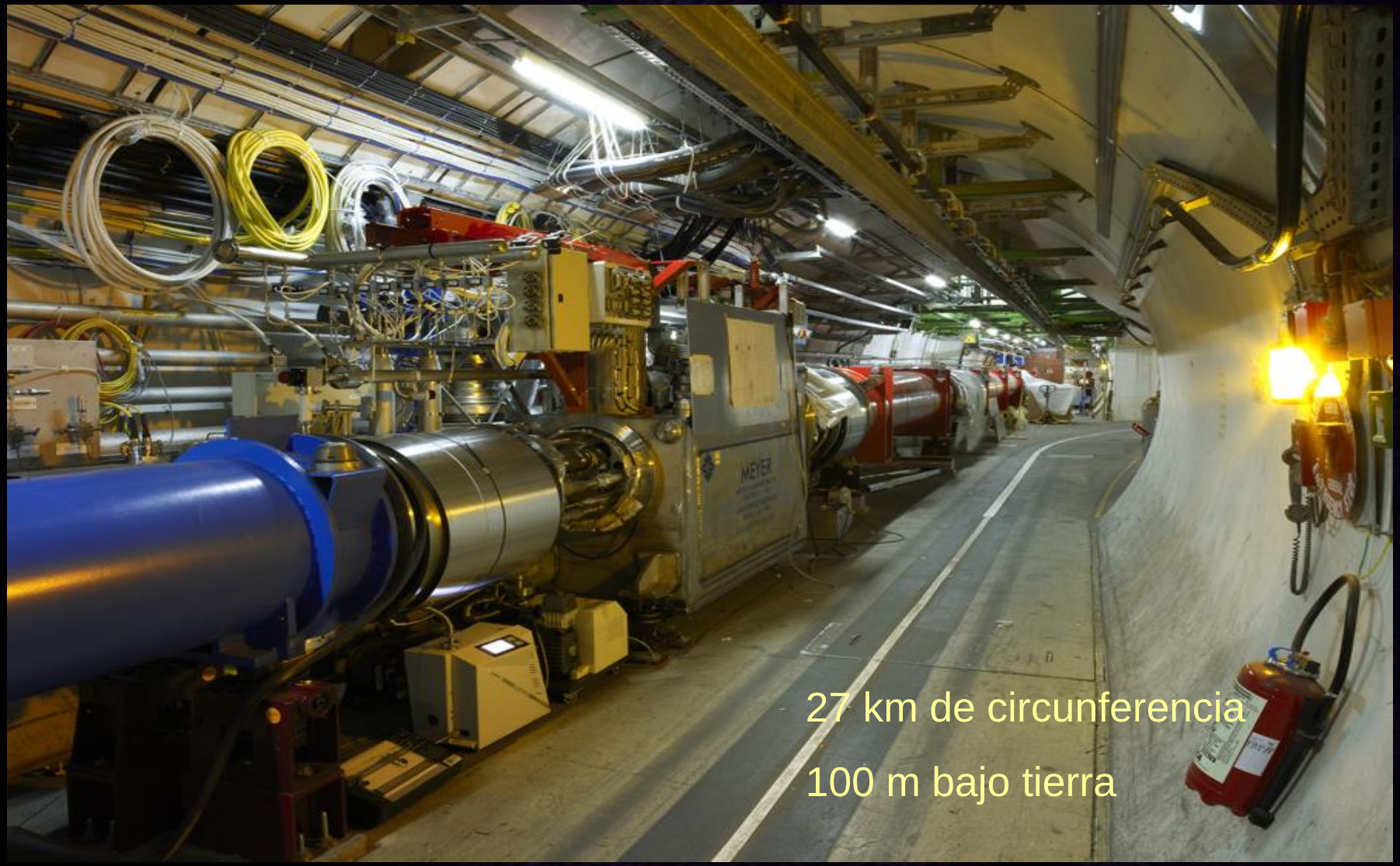


Los cuadrupolos focalizan en una coordenada (x) y desfocalizan en la otra (y)

Normalmente están organizados por parejas donde los elementos están girados 90 grados entre ellos

Los paquetes de partículas que pasan a través de ellos reducen sus dimensiones transversales pero aumentan su dimensión longitudinal.

Vista del túnel del LHC mirando hacia el punto de interacción

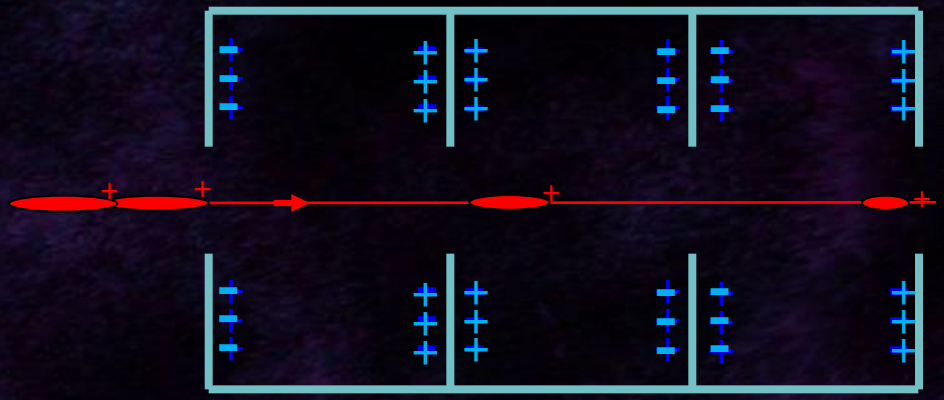


Cavidades aceleradoras

Las partículas adquieren energía en las cavidades aceleradoras en cada ciclo de la radiofrecuencia que las alimenta.

Los paquetes de partículas se hacen más compactos: las partículas del paquete retrasadas se aceleran más mientras que las adelantadas se aceleran menos .

Las pérdidas energéticas por radiación sincrotón se compensan en las cavidades de aceleración.



Vista del túnel del LHC mirando hacia atrás

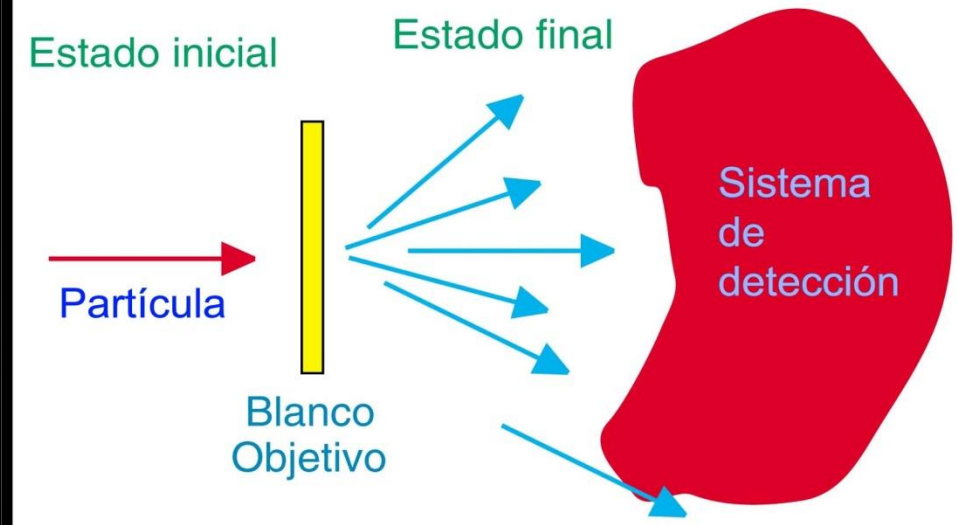
Los Experimentos

Los experimentos

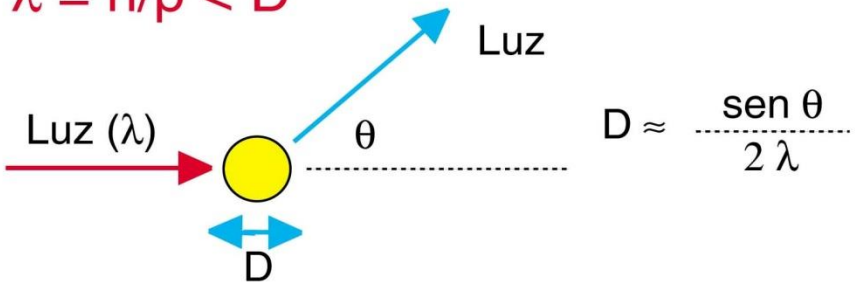
- Tipos de experimentos
  - Blanco fijo
  - Colisionadores
    - Simétricos
    - Asimétricos
- Los detectores y la detección de partículas
  - Medida de trayectorias
  - Medida de energía
- El programa científico del CERN
- Las colaboraciones

Tipos de experimentos

Blanco fijo

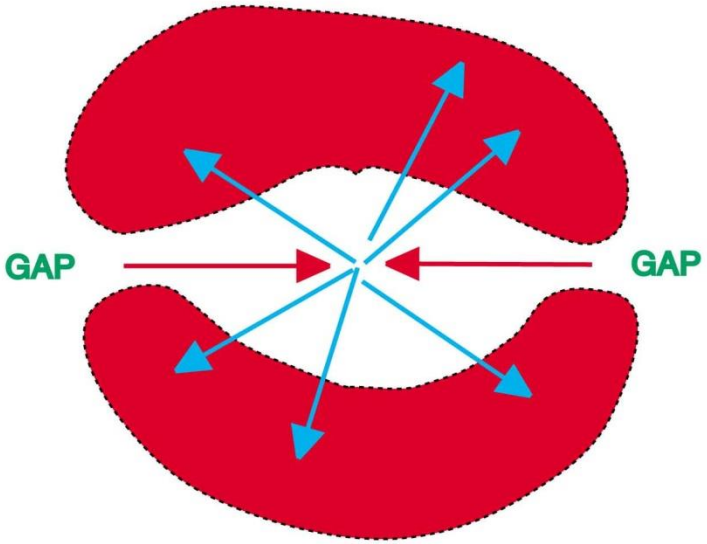


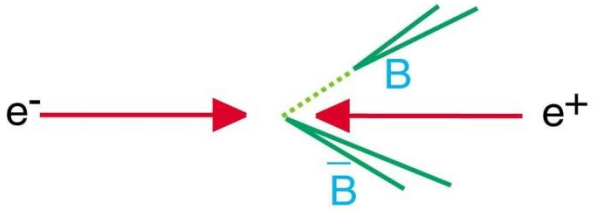
$\lambda = h/p < D$



$$D \approx \frac{\text{sen } \theta}{2\,\lambda}$$

Colisionadores circulares

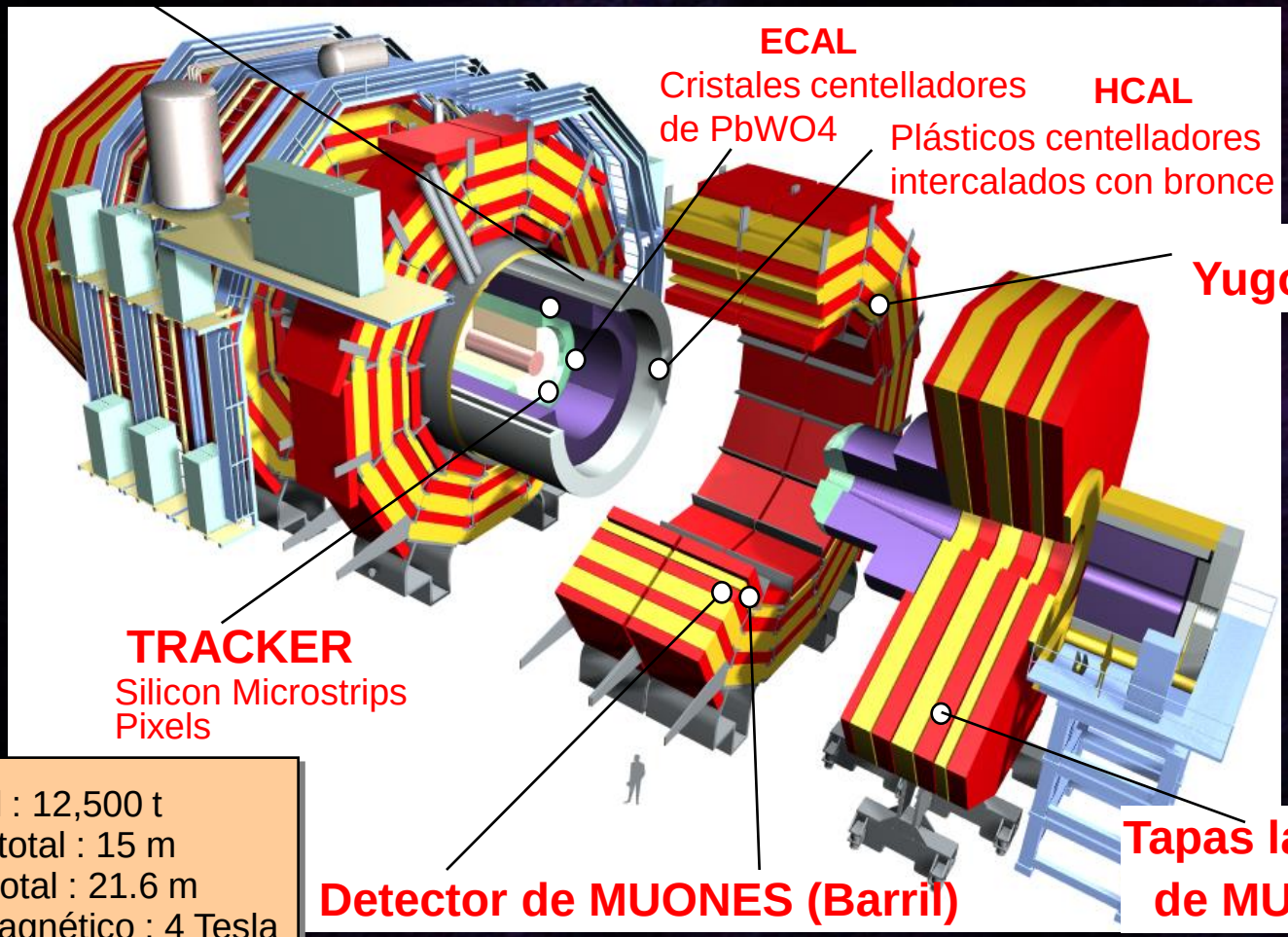




Un experimento típico (CMS)

IMAN SUPERCONDUCTOR

CALORIMETROS

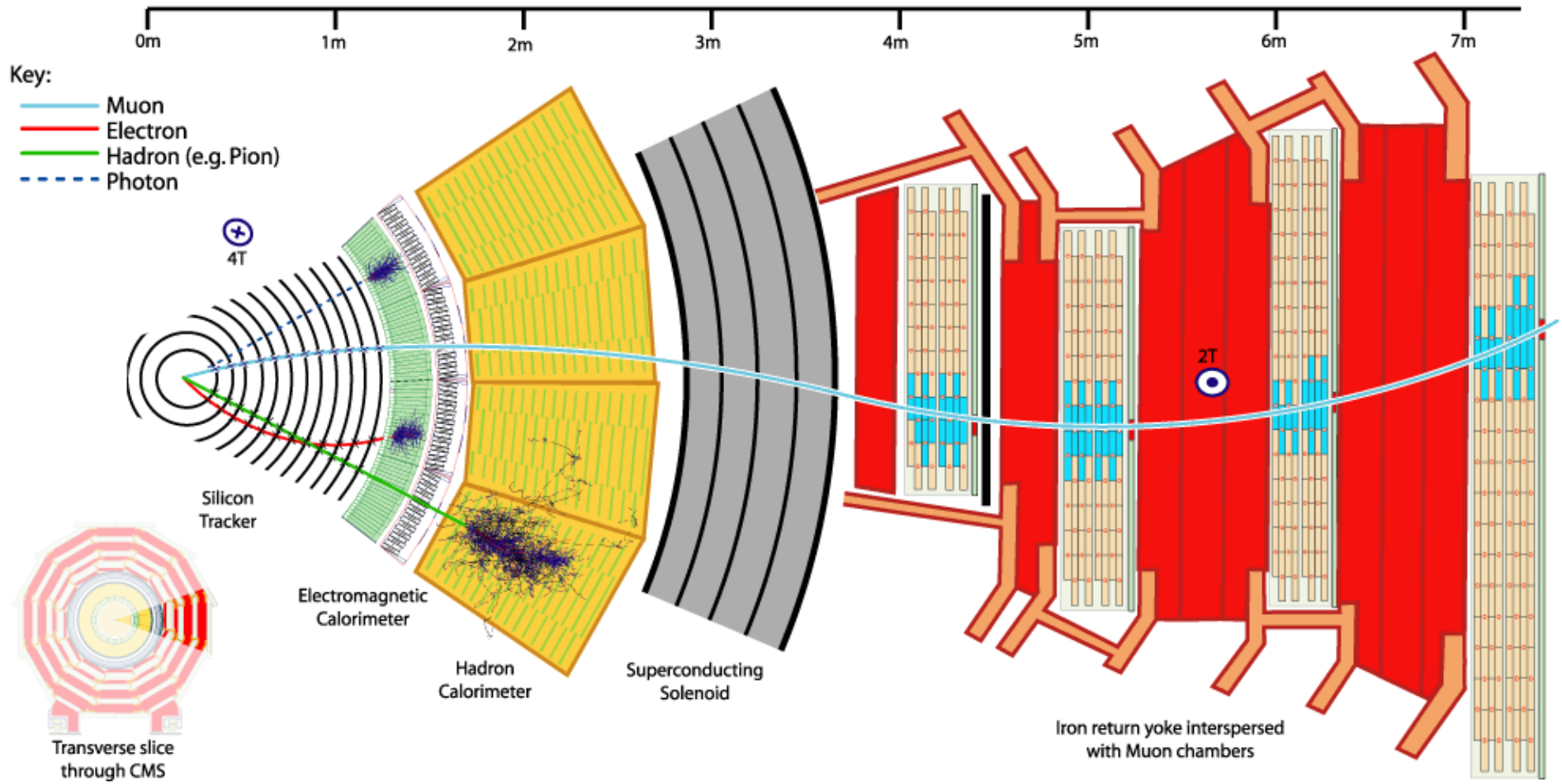


Peso total : 12,500 t
Diámetro total : 15 m
Longitud total : 21.6 m
Campo magnético : 4 Tesla

3 g/cm³

Anatomía de un Detector

(Detección de partículas - Medida de trayectorias y energía)



Curvatura ~ BL^2/p → se necesitan grandes imanes y B alto (SC); medida de la posición de gran precisión (10 -100μ) para p grande; también medidas de posición y energía a través de la absorción total (fotón, electrón, hadrón)

El programa científico del CERN

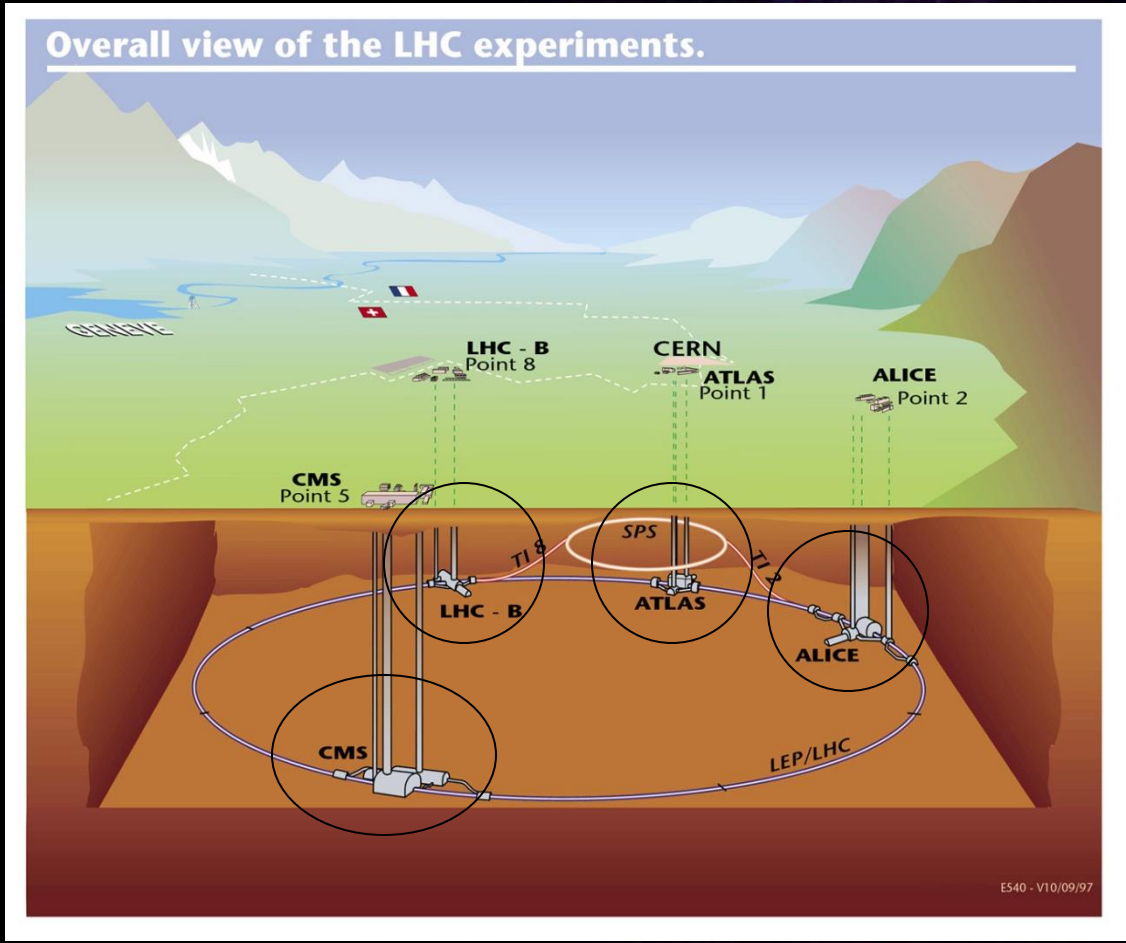
- De-acelerador de antiprotones
  - ATRAP (Cold Antihydrogen for Precise Laser Spectroscopy)
  - AEGIS (Antihydrogen Experiment Gravity Interferometry Spectroscopy)
  - ALPHA (**Antihydrogen Laser PHysics Apparatus)**
- Neutrinos
  - Gran Sasso (Opera, Icarus)
- PS y SPS
  - CLOUD (A Study of the Link between Cosmic Rays and Clouds with a Cloud Chamber)
  - nTOF
  - DIRAC (Lifetime Measurements of pi+ pi- and pi+- K-+ Atoms to Test Low-Energy QCD Predictions)
  - COMPASS (COmmon Muon and Proton Apparatus for Structure and Spectroscopy)
  - NA62 (Proposal to Measure the Rare Decay K+ -> pi+ nu nu at the Cern SPS)
- Experimentos sin acelerador
  - CAST
- Los experimentos del LHC

Colaboraciones internacionales y experimentos

- Los experimentos de física de partículas del CERN se realizan a través de colaboraciones internacionales
- El interés científico de cada experimento ha tenido que ser estudiado y recomendado por el correspondiente comité científico (SPSC, INTC o LHCC). La Comisión de Investigación (RB) analiza las recomendaciones del comité científico correspondiente y aprueba o no el experimento y los recursos necesarios
- Cada instituto se responsabiliza a través de la firma de un "Memorandum of Understanding" (MoU) de la construcción de un subdetector, de alguna parte del dispositivo experimental y/o del análisis de los datos

Los 4 experimentos del LHC

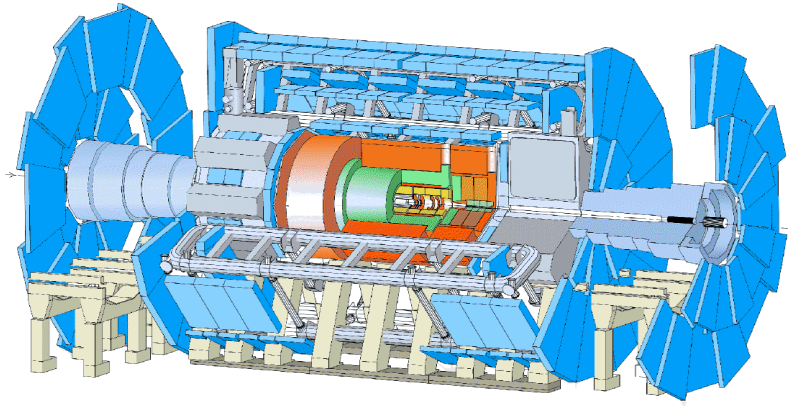
El LHC (Large Hadron Collider/Gran colisionador de hadrones) es el instrumento mas poderoso jamás construido para investigar las propiedades de las partículas.



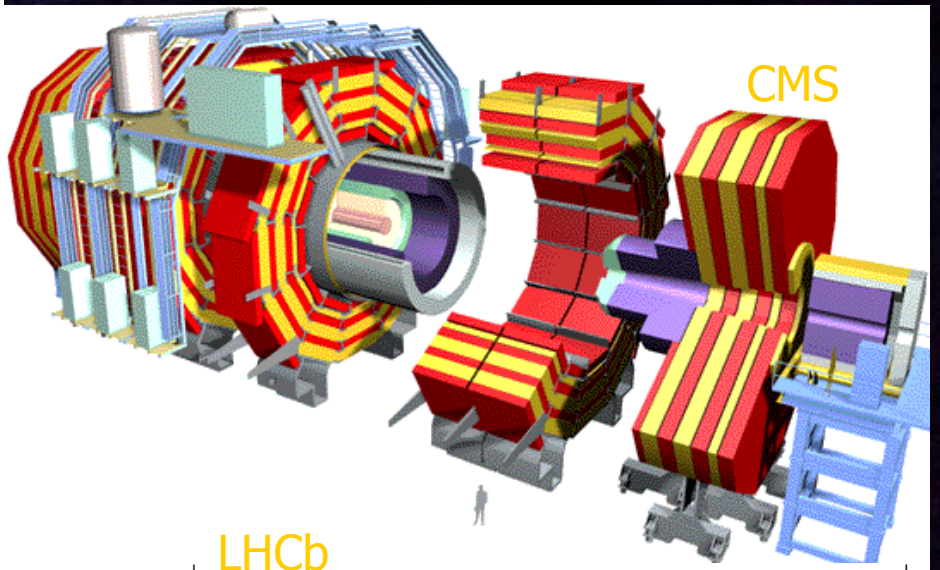
- Cuatro gigantescas cavernas subterráneas albergan inmensos detectores
- Energía mayor que ningún otro acelerador en el mundo
- Los haces mas intensos de partículas colisionantes
- Opera a una temperatura mas fría que la del espacio exterior

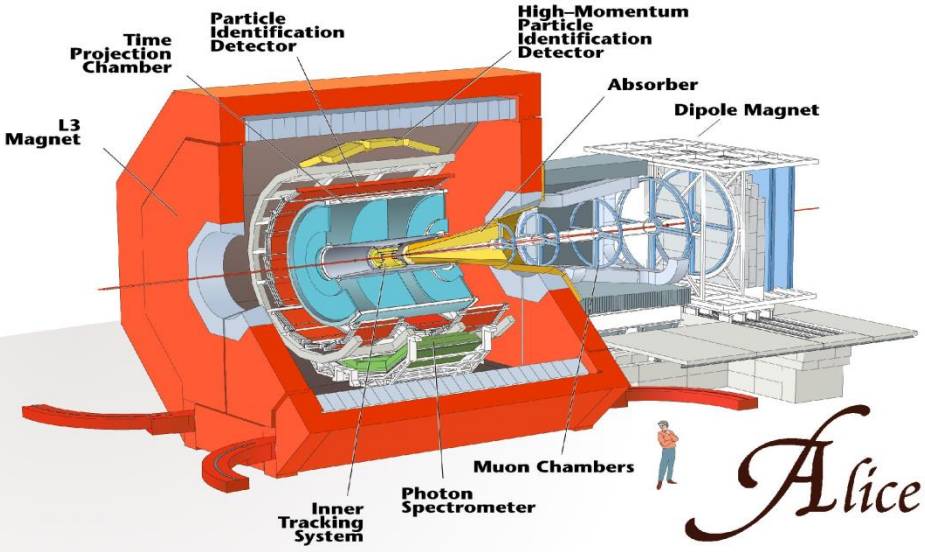
Los 4 experimentos del LHC

ATLAS

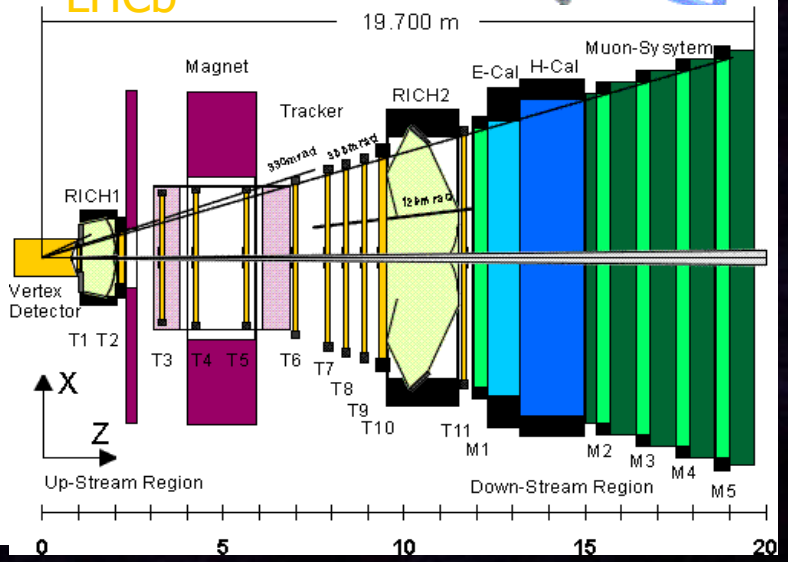


CMS





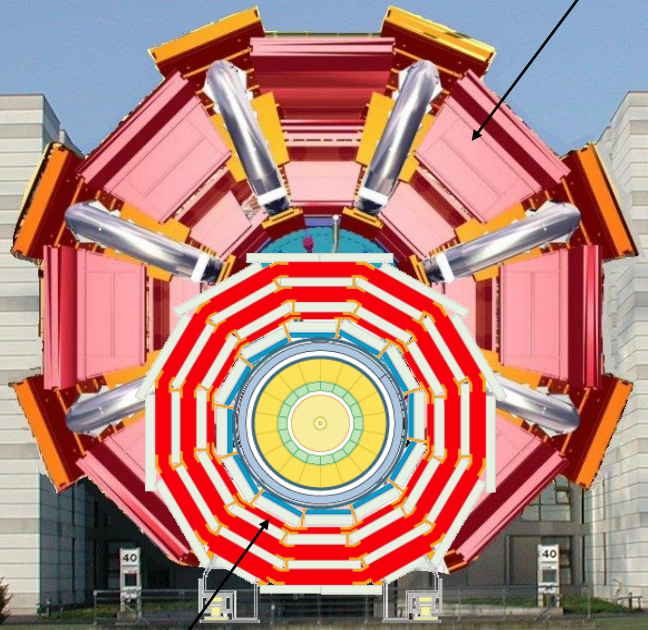
LHCb



Los experimentos del LHC

- Detectores complejos y de altas prestaciones
- Periodos de I+D y de construcción grandes (mas de 20 años)
- Instalación compleja y delicada.
- Grandes Colaboraciones. CMS: involucra ~ 3000 científicos e ingenieros de 183 instituciones de 38 países. Se requieren estructuras complejas de gestión (Portavoz, Coordinadores, GLIMOS, Comité de gestión de la colaboración, …)
- Gastos de mantenimiento y de operación relativamente elevados.

B40, ATLAS y CMS



ATLAS

ATLAS:
Diámetro 25m
Largo del toroide 26m
Largo total 46m
Peso 7000 toneladas
10^8 Canales electrónicos

CMS

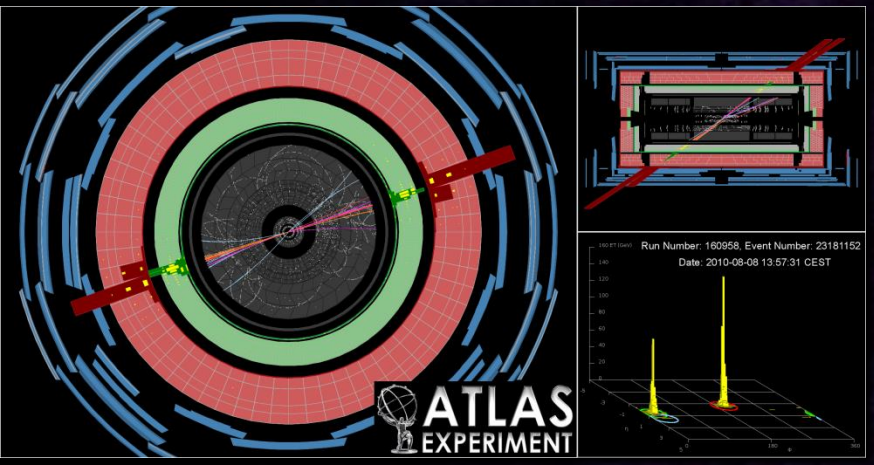
CMS:
Diámetro total 15m
Largo total 21.6m
Peso 12 500 toneladas
Campo magnético 4 Tesla

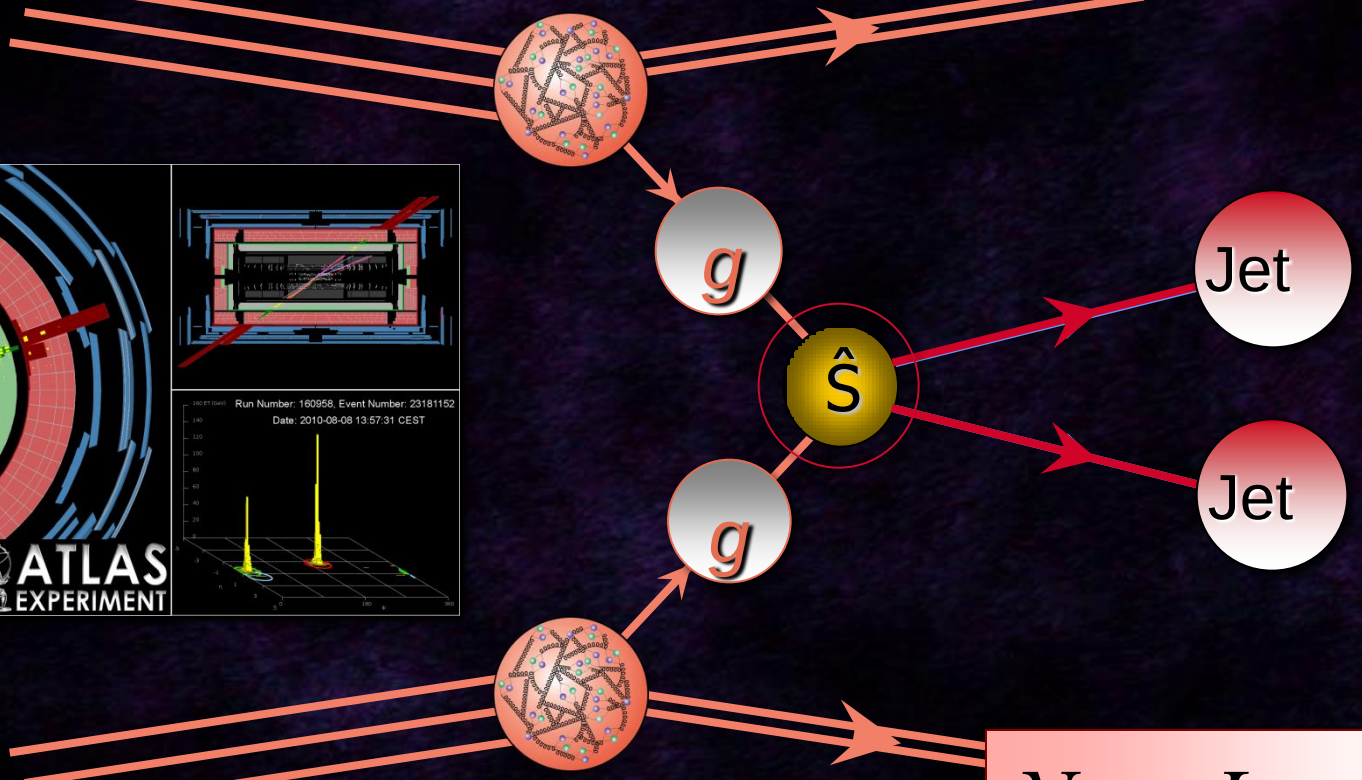
¿ Que ocurre en las colisiones protón-protón ?

El proceso básico

Protón 2
p_2

$F_b\ (X_2, Q^2)$





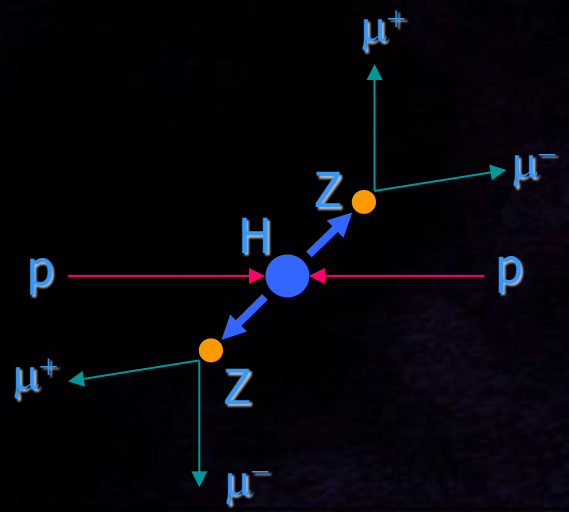
Protón 1
p_1

$F_a\ (X_1, Q^2)$

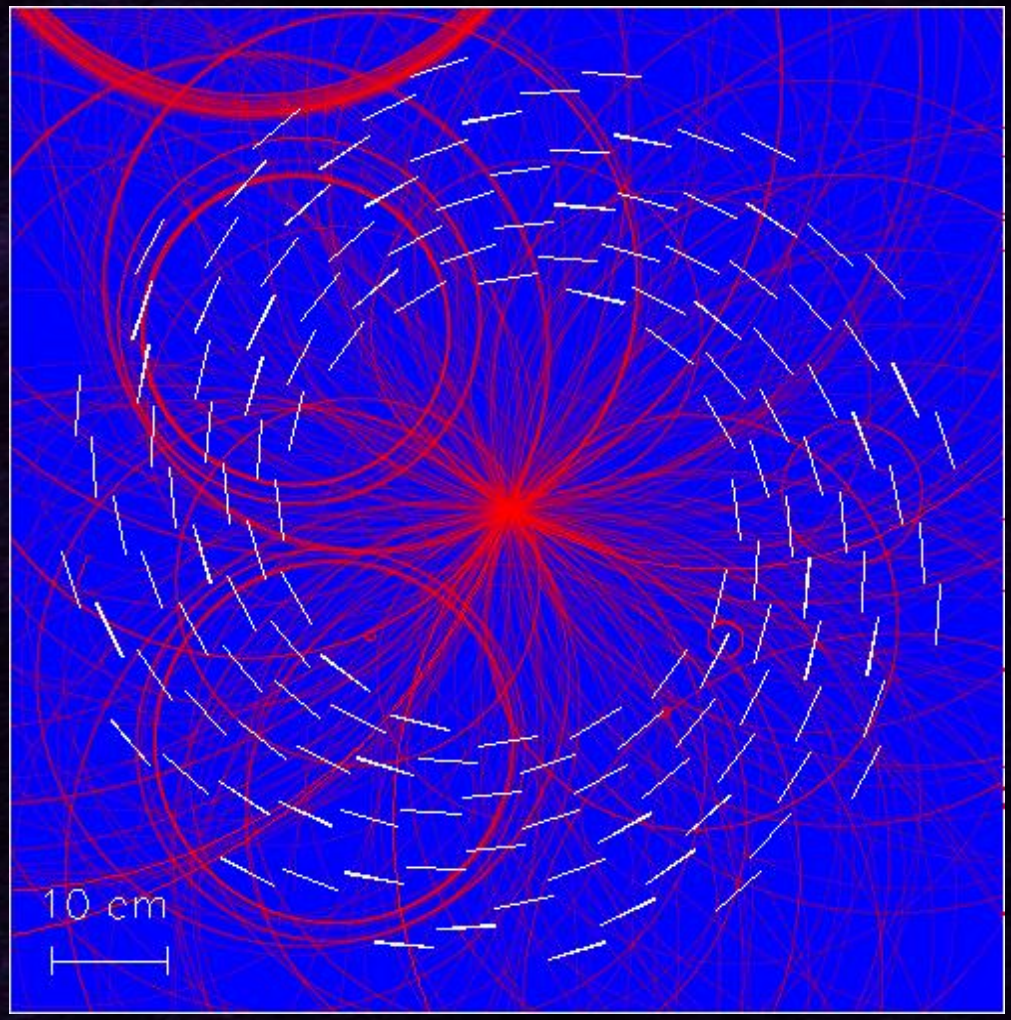
$$N_{ev} = L_{\text{int}} \times \sigma$$

El análisis de los datos (Rompecabezas)

Ejemplo: buscamos un suceso Higgs que se desintegra a través de 2 Z^0 en 4 muones



Vista sobre el plano perpendicular a la línea del haz del "inner tracking" de CMS, con un suceso $H \rightarrow 4\mu$ superpuesto. Los μ tienen energía muy alta de manera que dejan **trayectorias casi rectas** que se originan en el centro y viajan hacia el exterior.

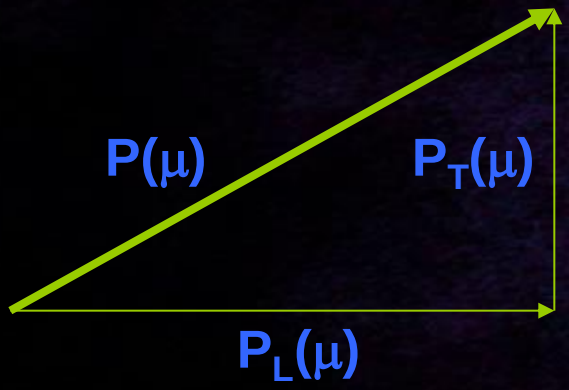


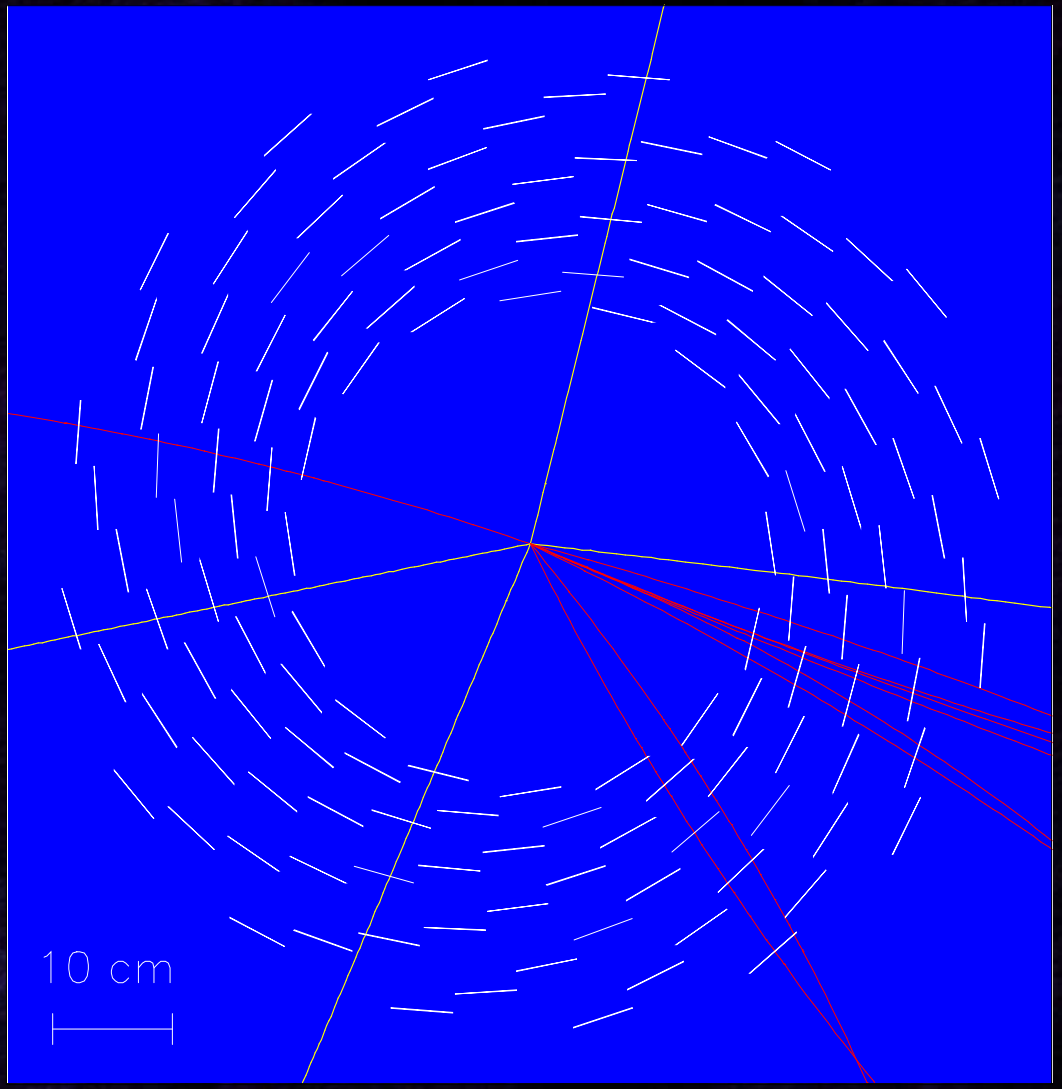
Hay que encontrar 4 trayectorias rectas

Solución del rompecabezas

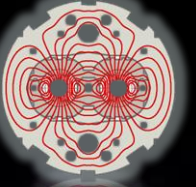
Eliminar todas aquellas trayectorias con momento transverso menor que 2 GeV

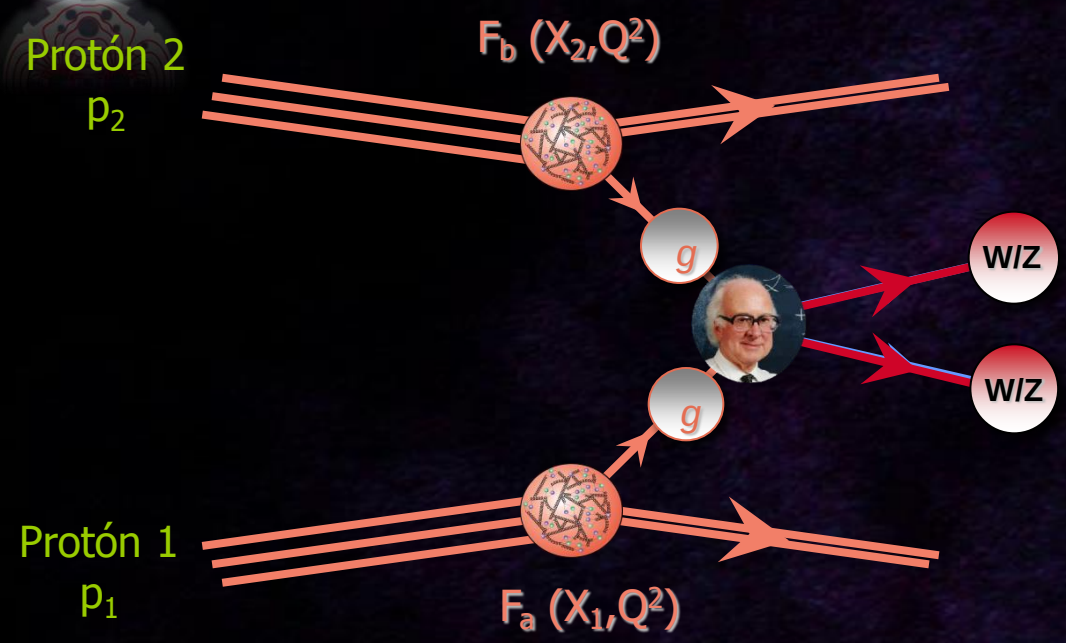
(p_T>2 GeV)

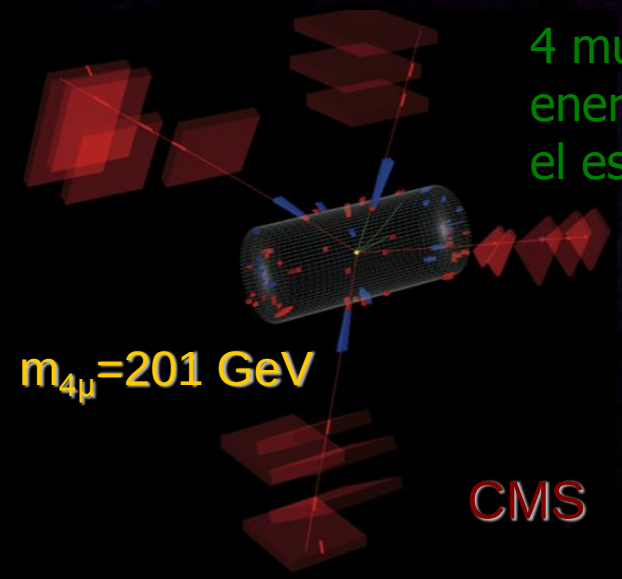




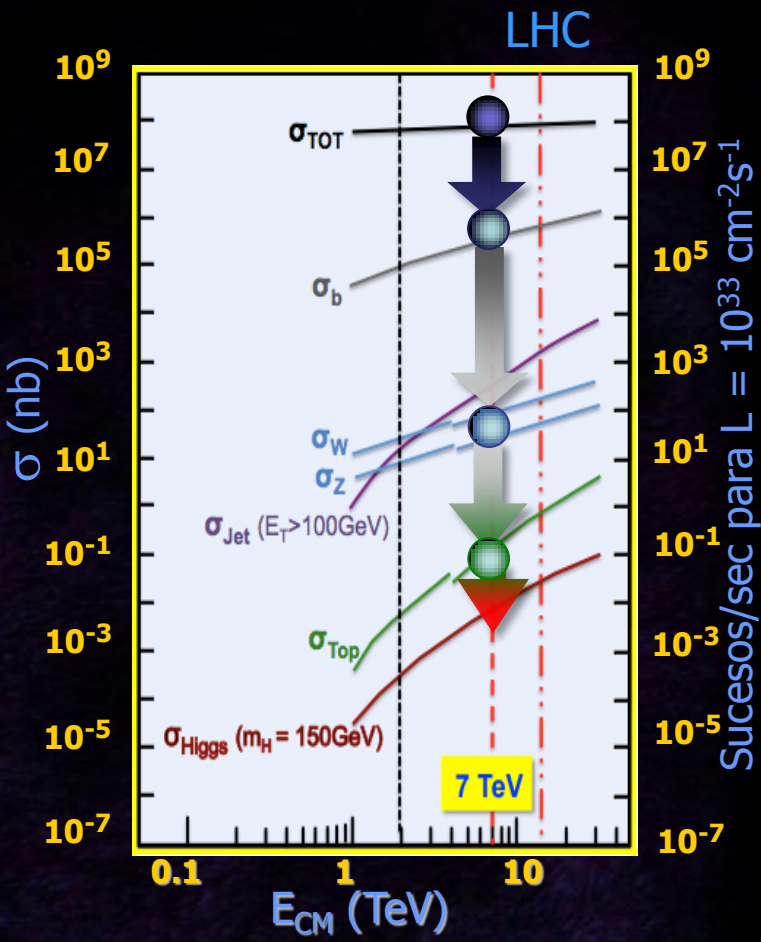
La toma de datos del 2011, 2012, 2013 …







4 muones energéticos en el estado final

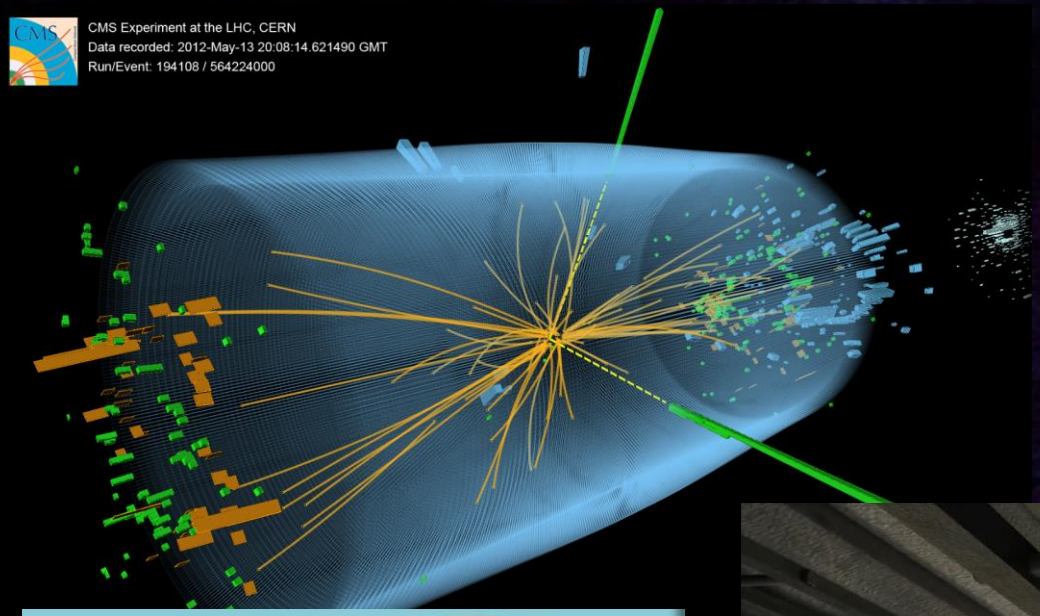


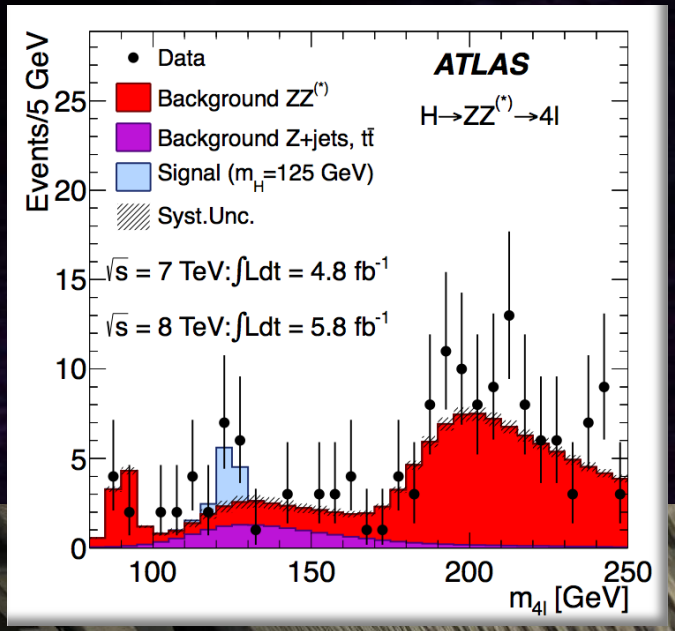
Prestaciones excelentes del LHC, experimentos y la computación GRID durante los periodos 2010, 2011, 2012 y 2013 de toma de datos

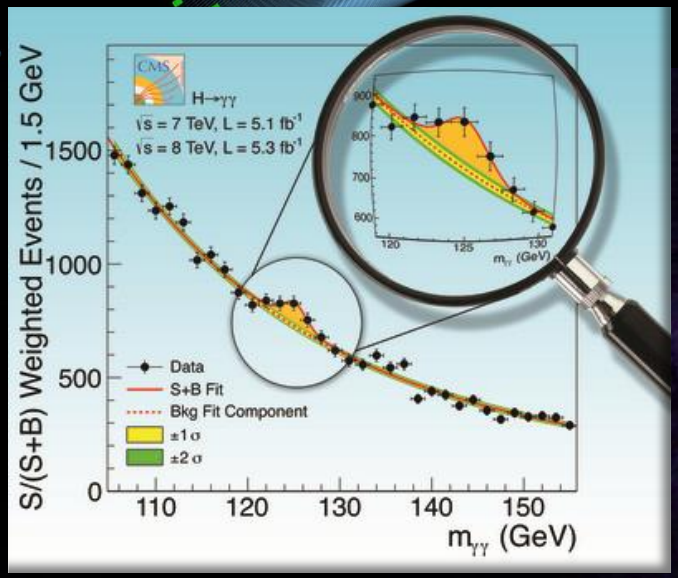
Run en el 2012: aumento de energía (7 TeV → 8 TeV), un factor 3 mas de datos esperados del LHC

Datos suficientes para anunciar Higgs-like

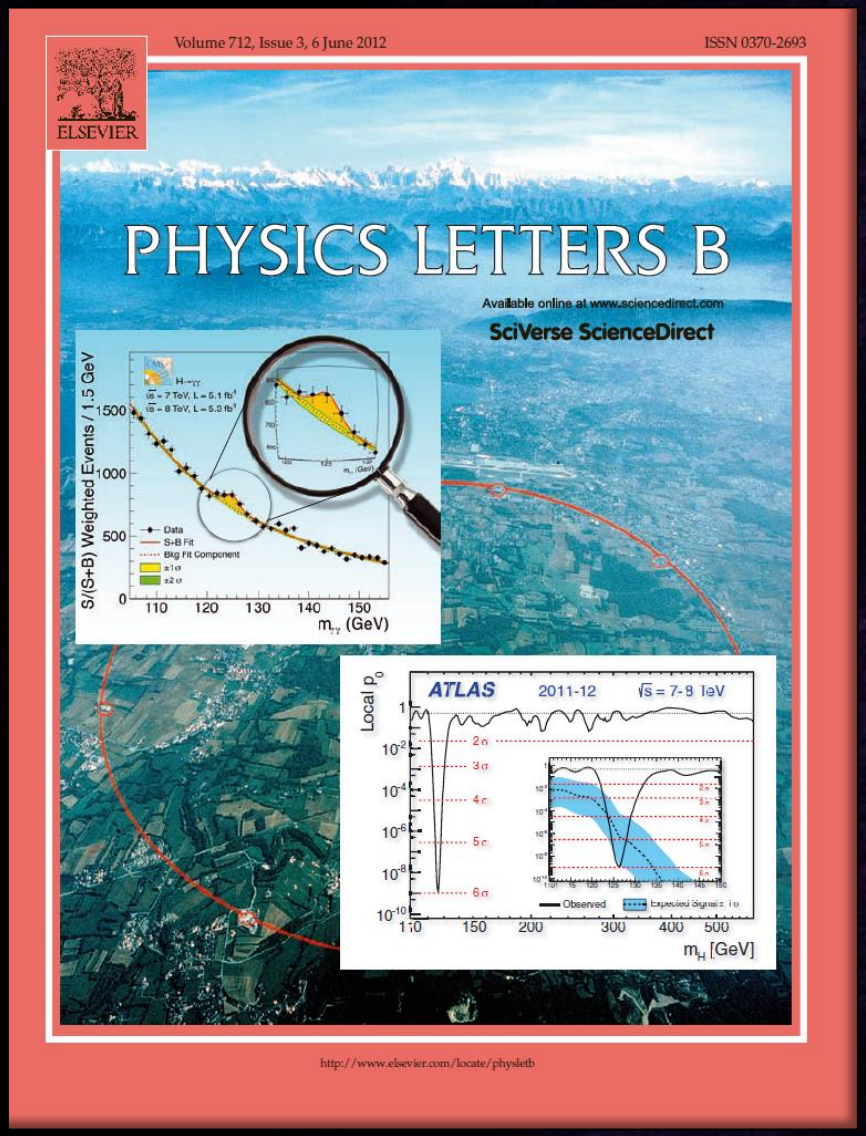
4 Julio 2012: “Experimentos del CERN observan una partícula consistente con el deseado bosón de Higgs”







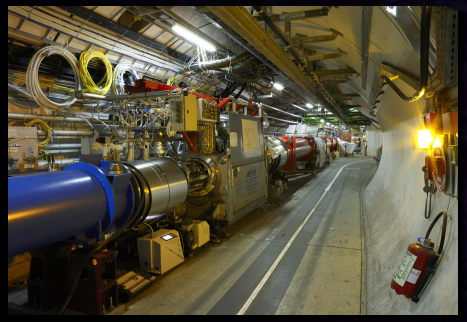
Notas de un año notable 2012



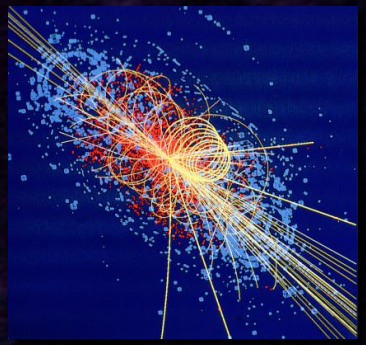
CERN: Física de partículas e innovación

- **Interface** entre ciencia fundamental y clave desarrollos tecnológicos

- CERN Tecnologías e Innovación



Aceleración de haces de partículas

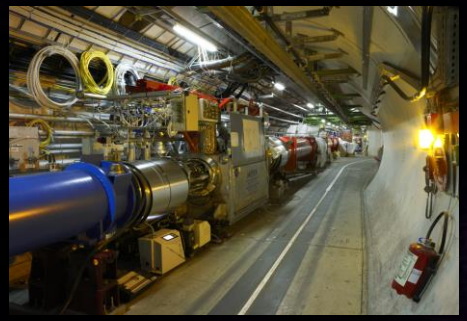


Detección de partículas

Computación a Gran Escala

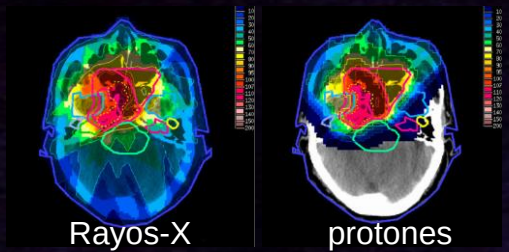
Aplicación medica como ejemplo del spin-off en física de partículas

Combinando física, ICT, biología y medicina para combatir cáncer



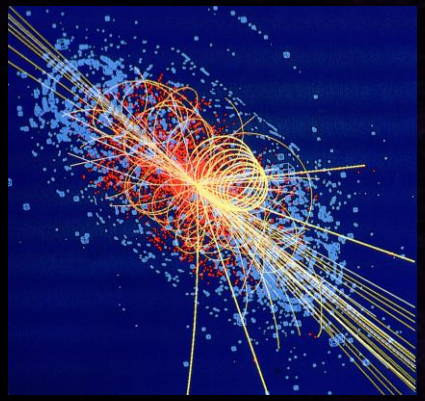
Acelerando haces de partículas

Terapia con hadrones



Liderazgo en terapia con haces de iones en Europa y Japón

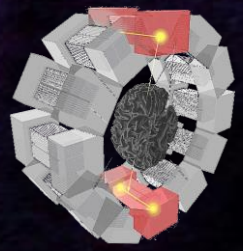
>70'000 pacientes tratados en el mundo (30 facilidades)
>21'000 pacientes tratados en Europa (9 facilidades)

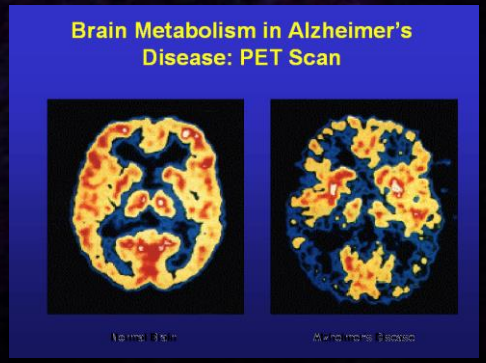


Detectando partículas

Imaginería PET Scanner

Ensayo clínico en Portugal del nuevo sistema de imaginería para pechos (ClearPEM)





Tecnología e innovación

Los detectores – desarrollados en los laboratorios de física se utilizan en imaginería medica

Tomografía por emisión de positrones

Hospital cantonal de Ginebra

PET (Positron Emission Tomography) es una técnica muy importante para localizar y estudiar ciertos tipos de cáncer utilizando el isótopo Fluor-18 producido en aceleradores de partículas.

El PET utiliza antimateria (positrones, la antipartícula del electrón).

El GRID: una solución para satisfacer las necesidades de computación del CERN

La GRID de computación para el LHC (WLCG) fue un proyecto financiado por la Unión Europea. El objetivo era construir la próxima generación de infraestructura de computación que fuese capaz de proveer análisis y cálculos intensivos de los datos provenientes de los experimentos LHC.

Estrategia:

Integrar miles de ordenadores situados en los muchos institutos que participan a nivel mundial en los recursos globales de computación

- Basarse en el software desarrollado o siendo desarrollado en proyectos avanzados de tecnología grid en Europa y en USA

World LHC Computing Grid (WLCG)

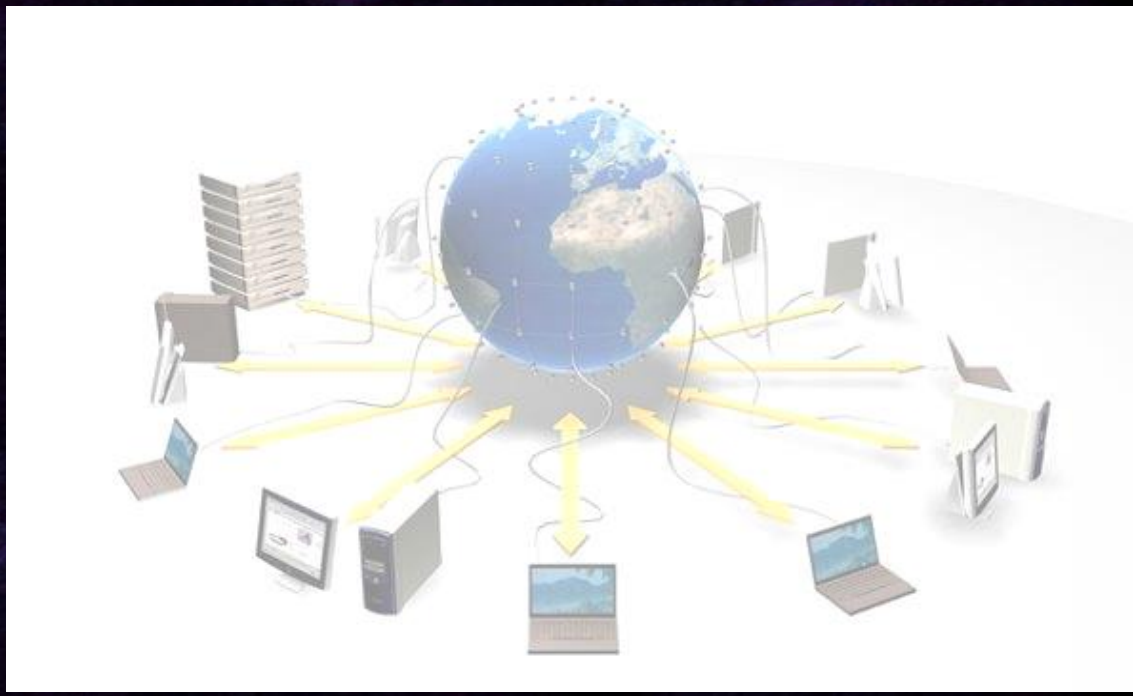
(Grid de computación para el LHC)

Como funciona?

• La Grid se basa en una capa de software avanzado, denominada middleware, que asegura comunicación ininterrumpida entre los diferentes ordenadores en las diferentes partes del mundo

• La máquina de búsqueda de la Grid no solamente encuentra los datos que necesita el científico sino que además provee las técnicas de procesado de datos y la capacidad de cálculo para ejecutarlas

• Distribuye las tareas de computación a cualquier sitio en el mundo donde existan recursos de calculo sin utilizar, y devuelve el resultado al científico

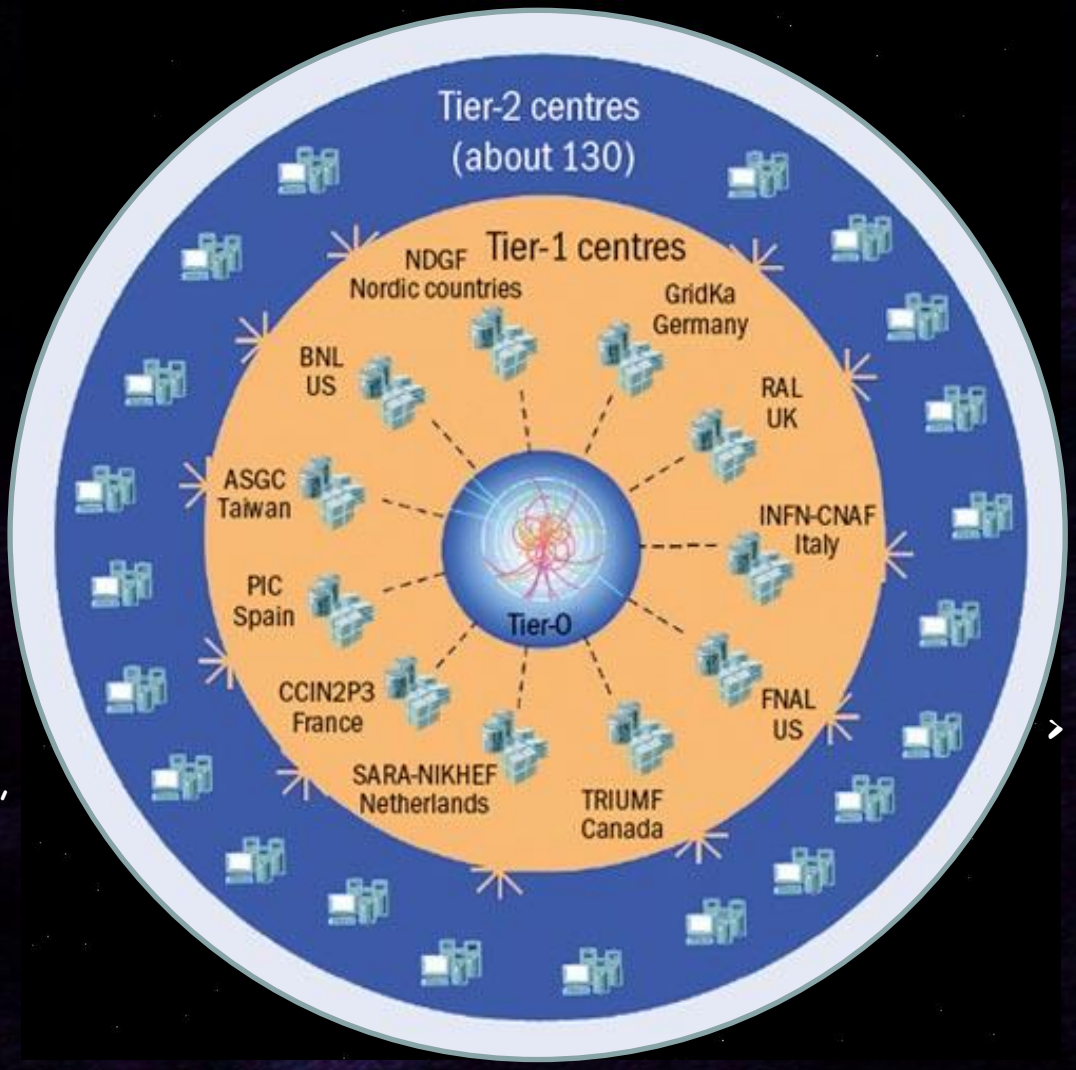


La Grid Mundial para la Computación LHC

Tier-0 (CERN): registro de datos, reconstrucción y distribución

Tier-1: almacenamiento permanente, re-procesado, análisis

Tier-2: Simulación, análisis del utilizador final



Aproximadamente 160 sitios, en 35 países

~250'000 cores

173 PB de almacenamiento

> 2 millones Jobs/día

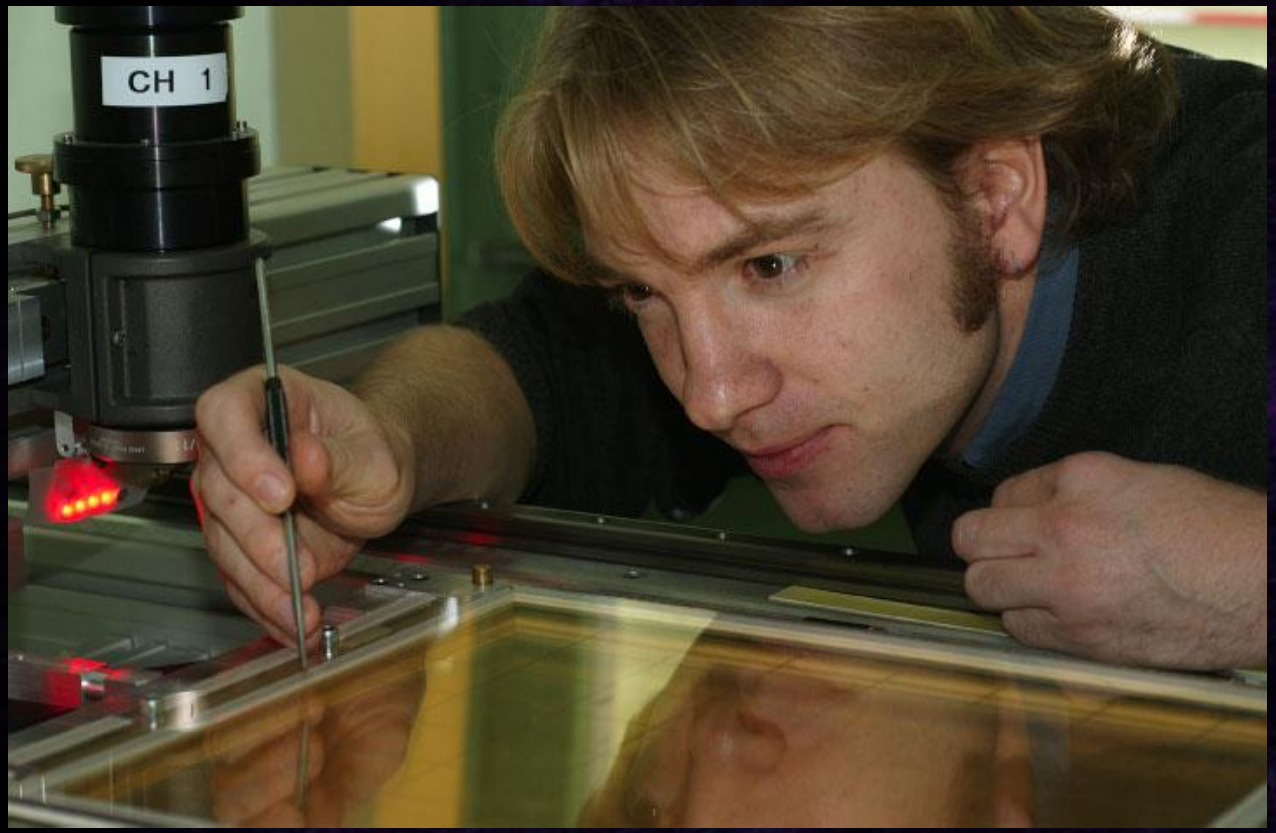
10 Gb links

WLCG:
Una colaboración Internacional para distribuir y analizar los datos del LHC

Integra centros de calculo en todo el mundo que suministran recursos de almacenamiento y de calculo en una infraestructura simple accesible a todos los físicos del LHC

Educación y entrenamiento

de los científicos e ingenieros del mañana...



Desde talleres mini-Einstein para edades de cinco a seis años hasta escuelas profesionales de física, aceleradores e informática, el CERN tiene un papel importante en la creación de entusiasmo por la ciencia y en la provisión de entrenamiento formal...

Educación y entrenamiento

Estudiantes de verano (SS)

- Ingeniería, IT y física aplicada
- Clases especializadas, trabajos prácticos y visitas
- 8-13 semanas durante el verano
- 129 SS de MS, ES: 10

Estudiantes técnicos (TS)

- Ingeniería, IT y física aplicada
- Proyecto fin de carrera, periodo obligatorio de practicas
- 5 - 12 meses
- 171 TS, ES: 13

Estudiantes de doctorado (DS)

- Ingeniería, IT y física aplicada
- Clases especializadas & tesis doctorales
- 12 - 36 meses
- 174 DS, ES: 12

Programa de entrenamiento para diplomados en ingeniería

- Ingeniería, IT & disciplinas relacionadas
- Diplomados recientes con el nivel de licenciado o ingeniero
- 2-3 años

Becarios

- **Becas Senior** : candidatos con doctorado
- **Becas Junior** : Bsc / Msc
- Investigación en física experimental o teórica
- Ciencias aplicadas, computación e ingeniería
- 2-3 años
- 475 becarios, ES: 68

Becas Marie-Curie (MC) de la CE

- **Early Stage Training (EST)**
- Dependen de los proyectos o áreas de investigación
- 2-36 meses
- 72 becarios MC, ES: 7

Mas detalles en : http://cern.ch/jobs

Estadística actual: números en rojo

Actividades educativas del CERN

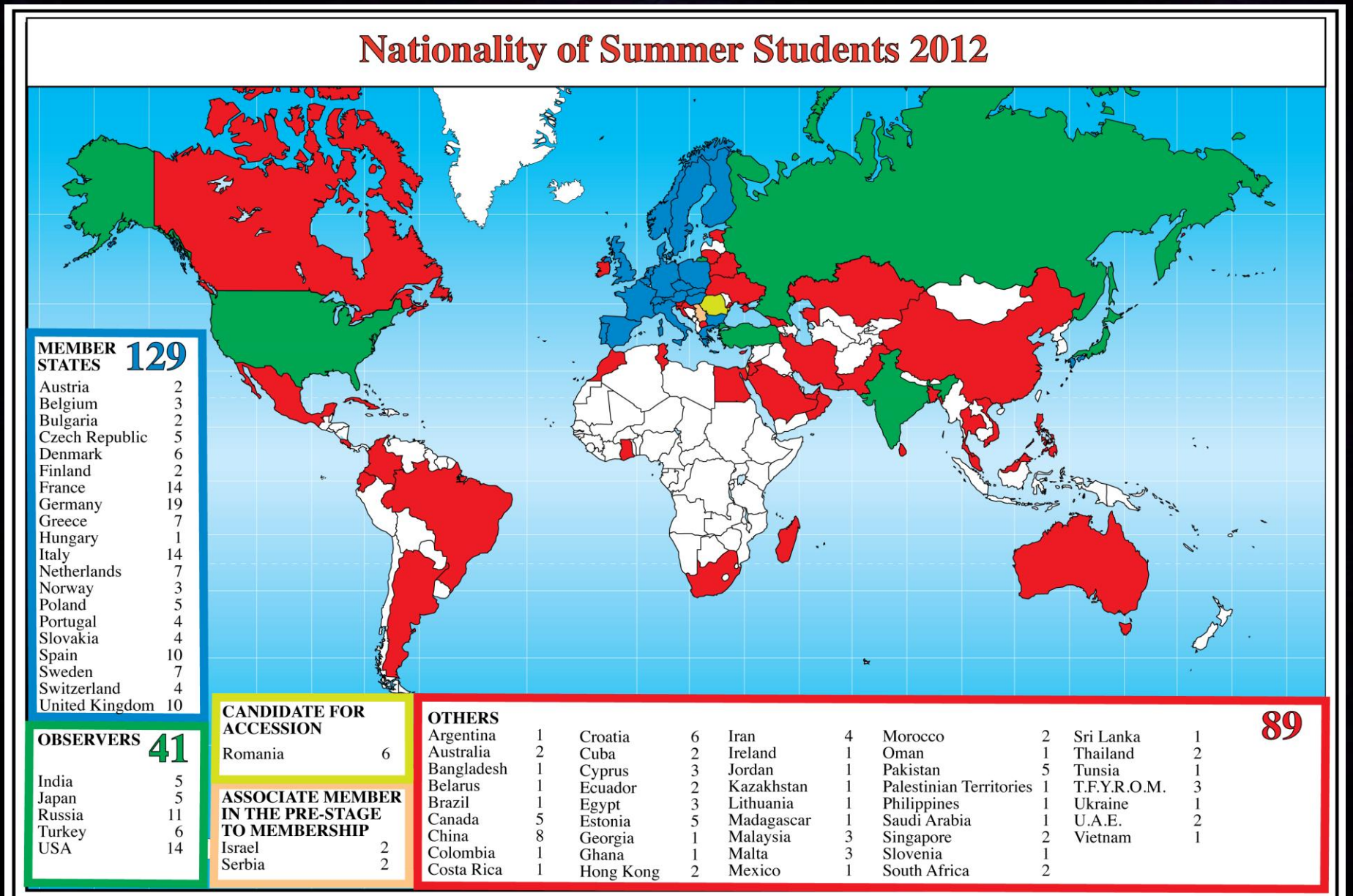
Científicos en el CERN
Programa de enseñanza académica

Jóvenes investigadores
Escuelas de física de altas energías
Escuela de computación
Escuelas de aceleradores

Estudiantes de física
Programa de estudiantes de verano

Escuelas para profesores de EM
Programas nacionales e Internacionales

Estudiantes de verano 2012



Estudiantes de Verano 2012

Programa para profesores de EM

Teacher Programme Participants 1998 - 2012

MEMBER STATES

Austria	89
Belgium	79
Bulgaria	239
Czech Republic	140
Denmark	72
Finland	421
France	202
Germany	542
Greece	410
Hungary	305
Italy	188
Netherlands	84
Norway	80
Poland	544
Portugal	292
Slovakia	190
Spain	282
Sweden	127
Switzerland	138
United Kingdom	945

5369

CANDIDATE FOR ACCESSION

Romania	11

ASSOCIATE MEMBER IN THE PRE-STAGE TO MEMBERSHIP

Israel	4
Serbia	12

OBSERVER STATES

India	2
Japan	4
Russia	163
Turkey	3
USA	61

233

OTHERS

Angola	4	Chile	3	Kazakhstan	3	Mozambique	17	Thailand	6
Australia	3	China	1	Kenya	2	Qatar	1	T.F.Y.R.O.M.	11
Azerbaijan	1	Croatia	1	Latvia	1	Rwanda	15	Timor-Leste	4
Brazil	83	Cyprus	8	Lebanon	1	Sao Tome	3	Uganda	1
Burundi	1	Ecuador	2	Madagascar	2	Saudi Arabia	1	Ukraine	57
Cameroon	3	Estonia	35	Malta	36	Singapore	2	U.A.E.	1
Canada	2	Georgia	55	Mexico	5	Slovenia	21		
Cape Verde	3	Ghana	6	Mongolia	1	South Africa	6		
		Guinea Bissau	1	Montenegro	13	South Korea	44		
		Ireland	3	Morocco	2	Swaziland	1		

472

España en el CERN

Galicia
Cantabria
Aragón
Cataluña
Madrid
Extremadura
Valencia
Andalucía

ALICE (CIEMAT, USC)

ATLAS (UAB, CNM, UV, UAM)

CMS (UAM, CIEMAT, UO, UC)

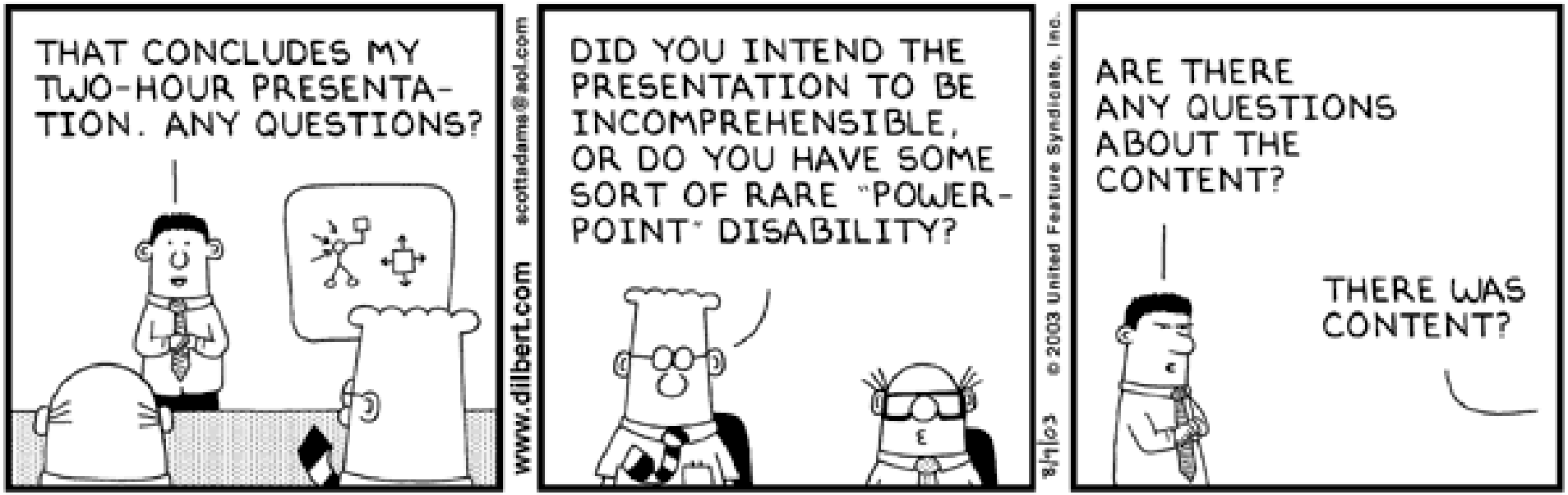
LHCb (UB, USC)

Staff	124	Fellows	75
PJAS	38	TECH	13
DOCT	12	Users	384

Ciudad del Conocimiento que, …

- basada en su misión principal: encontrar respuestas a las preguntas fundamentales sobre el universo,
- nos lleva a desarrollar tecnologías mas allá de los limites actuales en los campos de aceleradores y de detectores,
- crea un entorno adecuado para la formación de los científicos e ingenieros del mañana mediante el trabajo cotidiano y a través de nuestros programas de educación
- y une las naciones a través de la ciencia.

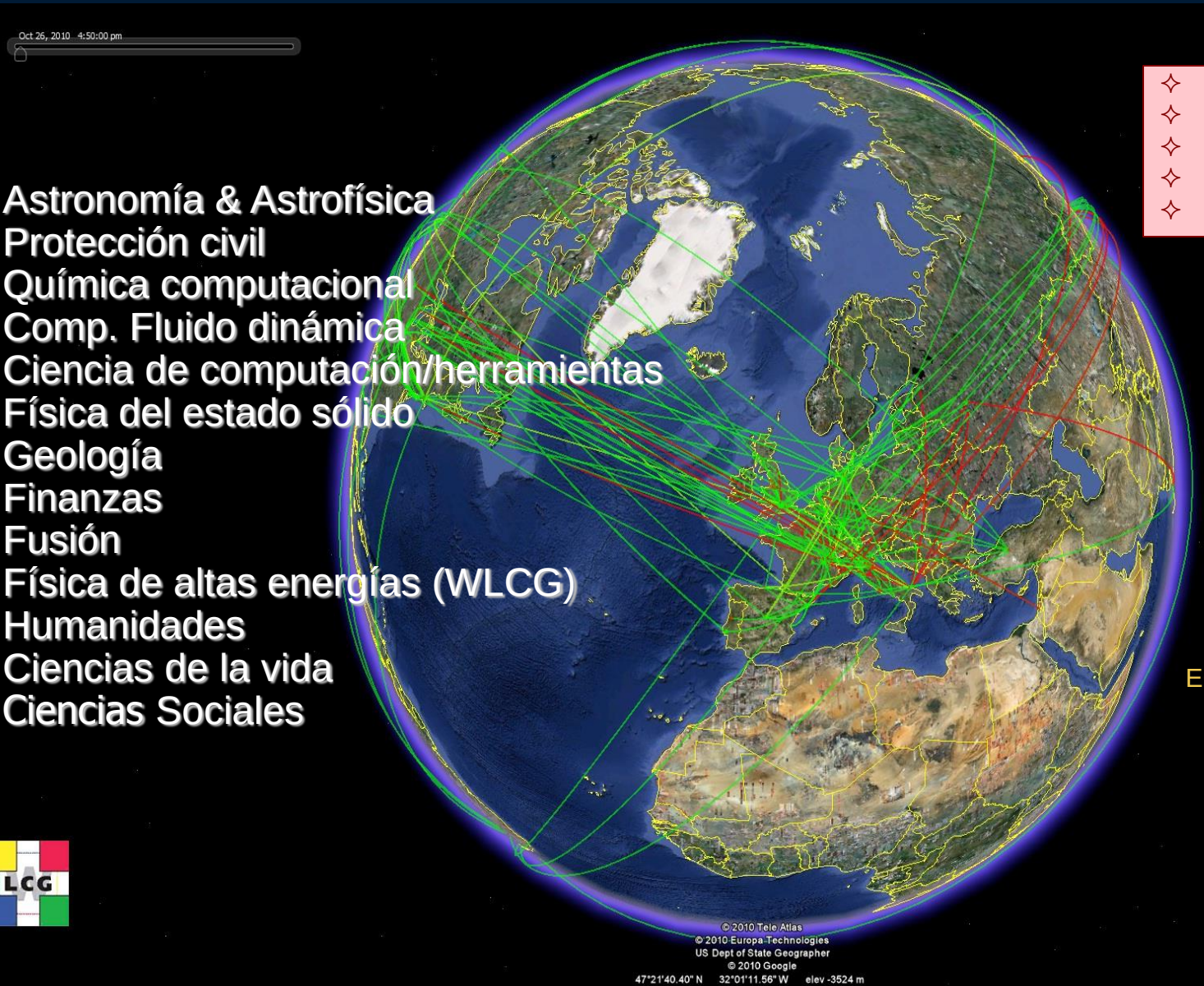
Promovemos HEP y ayudamos a los países interesados en esta rama de la física.



© 2003 United Feature Syndicate, Inc.

Gracias

Algunos datos de la Grid



- 285 sitios in 48 países
- ~250k núcleos de CPU
- ~100 PB almacenamiento
- Gran numero de usuarios
- 1M programas/día

Astronomía & Astrofísica
Protección civil
Química computacional
Comp. Fluido dinámica
Ciencia de computación/herramientas
Física del estado sólido
Geología
Finanzas
Fusión
Física de altas energías (WLCG)
Humanidades
Ciencias de la vida
Ciencias Sociales

GÉANT

eGee
Enabling Grids for E-sciencE

EGEE-III INFSO-RI-222667

egi

LCG

©2010 Google