



EL Proyecto LHC

1ª Parte

Física Experimental de Partículas

Juan A. Fuster Verdú IFIC-València
Benasque, Julio 2004

π^+

p

π^-

Λ

k^0

π^-

π^-

Agradecimientos (discusiones, material..)

J.E. García-Navarro

E. Ros

L. Poggioli

M. Cerrada

U. Amaldi

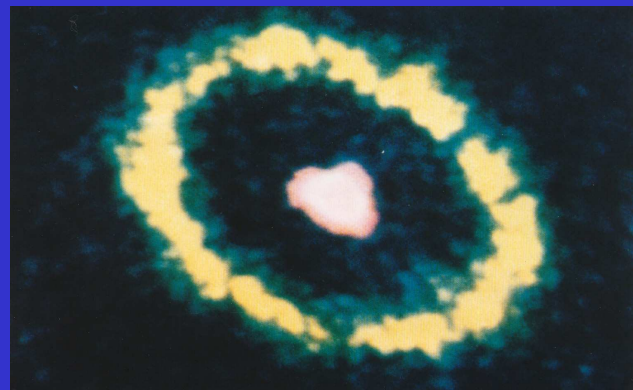
B. Rubio

M.J. Costa

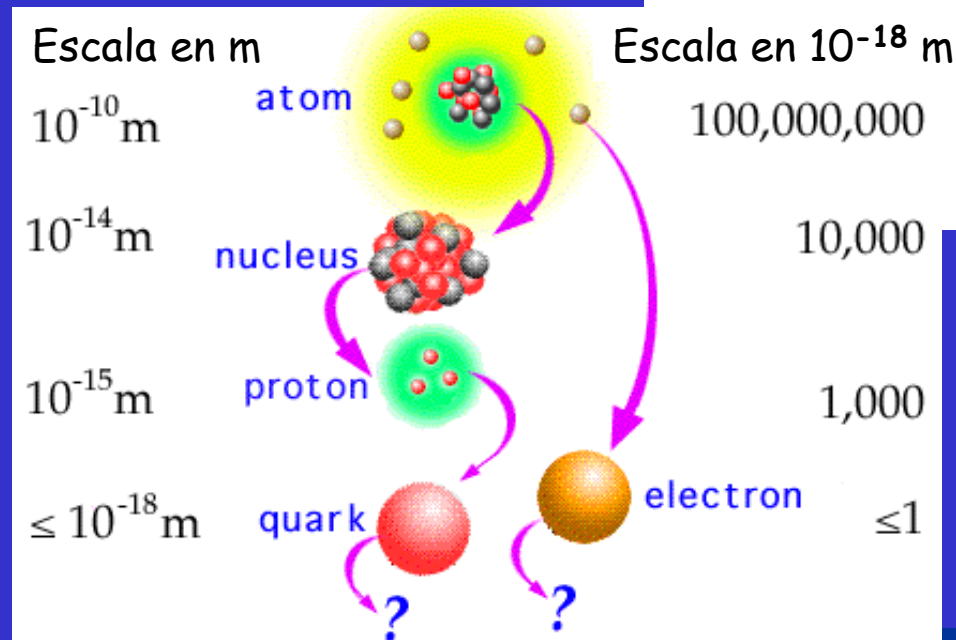
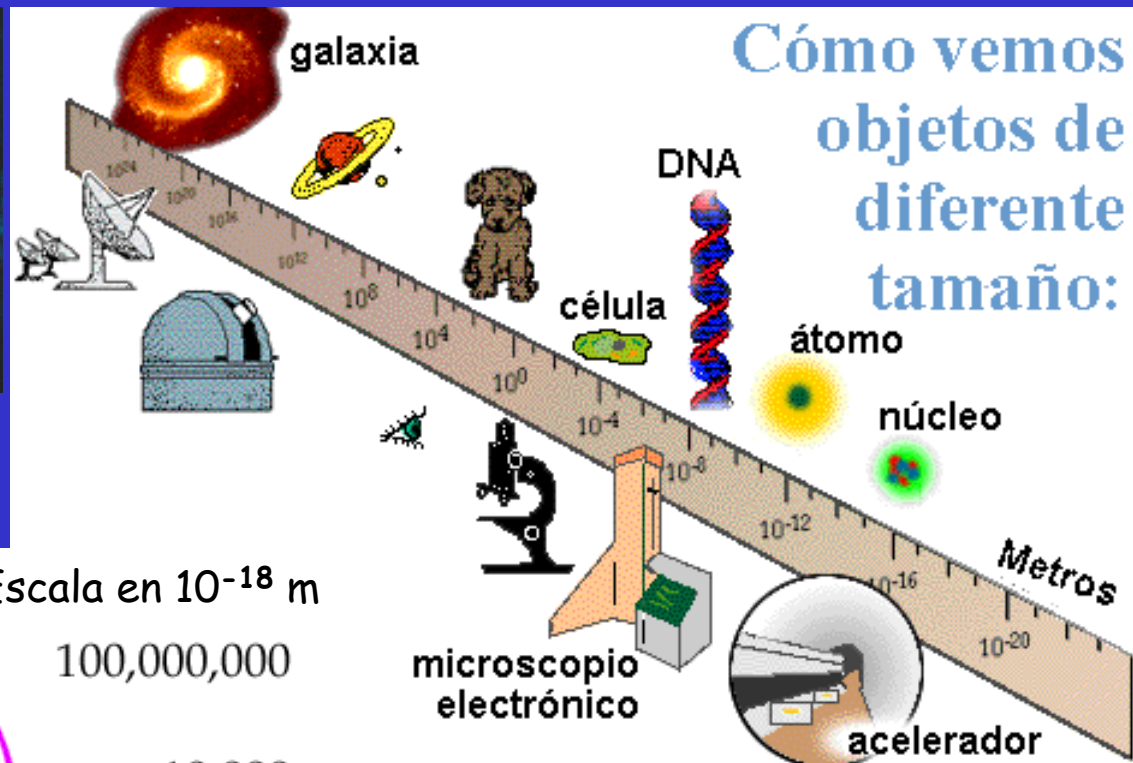
Ph. Bambade

Organizadores del curso

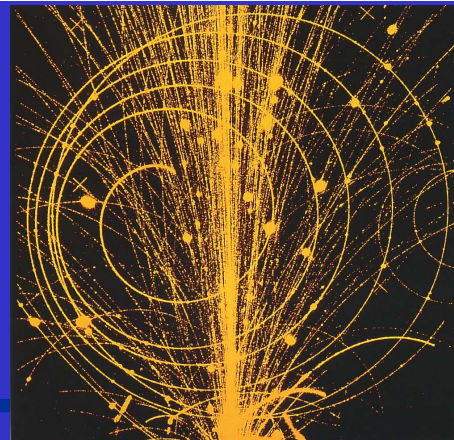
" Las escalas de nuestro mundo "



Lo "grande": 10^{22} m

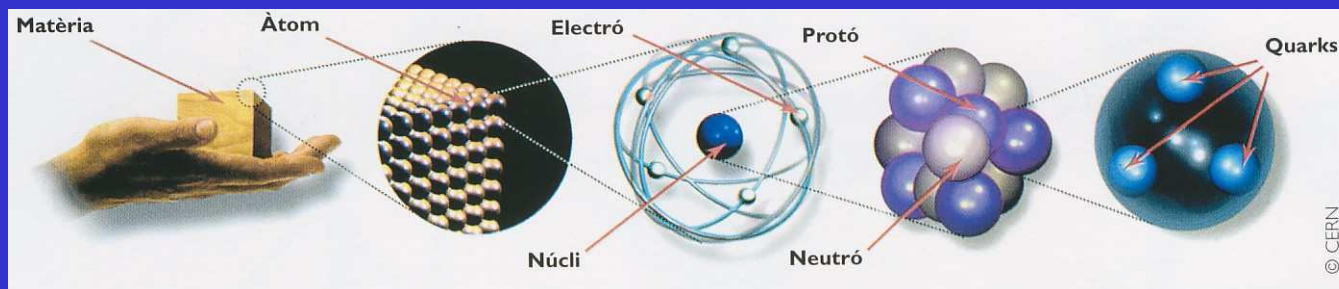


Lo "pequeño":
 10^{-18} m



" Los constituyentes de la materia "

La Tabla de las partículas elementales



Partícules de matèria Totes les partícules ordinàries pertanyen a aquest grup.	LEPTONS	
	PRIMERA FAMÍLIA	SEGONA FAMÍLIA
	Electró Responsable de l'electricitat i de les reaccions químiques; té càrrega -1 .	Neutrí electrònic Partícula sense càrrega elèctrica i probablement sense massa; el nostre cos és travessat per milers de milions de neutrins cada segon.
	Muó Parent pesant de l'electró; viu unes dues milionèsimes de segon.	Neutrí muònic Creat juntament amb els muons en la desintegració de certes partícules.
Partícules d'interacció Aquestes partícules transmeten les quatre interaccions fonamentals de la naturalesa, tot i que els gravitons no s'han trobat encara.	Tau Encara més pesant, és molt inestable. Descobert en 1975.	Neutrí tautònic Descobert en 2000.
	Glucos Portadors de la interacció forta entre quarks.	Fotons Partícules que formen la llum: transporten la interacció electromagnètica.
L'energia alliberada en una explosió nuclear és resultat de la interacció forta. L'electricitat, el magnetisme i la química són resultat de la interacció electromagnètica.		

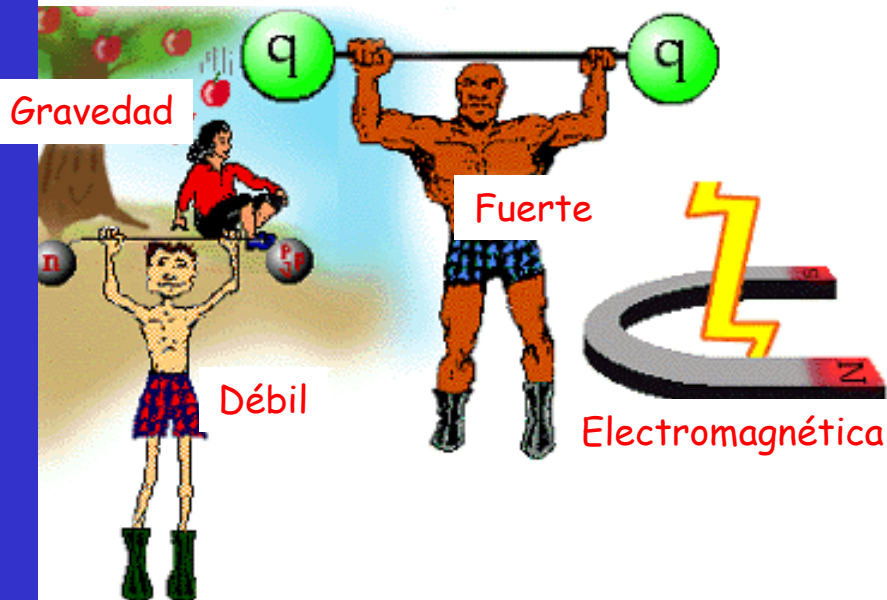
QUARKS		Partícules de matèria Totes les partícules ordinàries pertanyen a aquest grup.
Up (u) Té càrrega elèctrica de $+2/3$; els protons en tenen dos i els neutrons, un.	Down (d) Té càrrega elèctrica de $-1/3$; els protons en tenen un i els neutrons, dos.	
Charm (c) Parent pesant del U. Descobert en 1974.	Strange (s) Parent pesant del d. Descobert en 1964.	
Top (t) Encara més pesant. Descobert en 1994.	Bottom (b) Encara més pesant; la seua detecció ha estat un test important per a la teoria electrofeble. Descobert en 1977.	

Bosons vectorials intermediaris Transporten la interacció débil.	 Experimentada pels quarks i pels leptons.	Partícules d'interacció Aquestes partícules transmeten les quatre interaccions fonamentals de la naturalesa, tot i que els gravitons no s'han trobat encara.
Algunes formes de radioactivitat són resultat de la interacció débil.	Gravitons Transporten la gravetat.	

 Experimentada per totes les partícules amb massa.	Tot el pes que sentim és resultat de la interacció gravitatòria.
--	--

" Las fuerzas "

Las Cuatro Interacciones Fundamentales

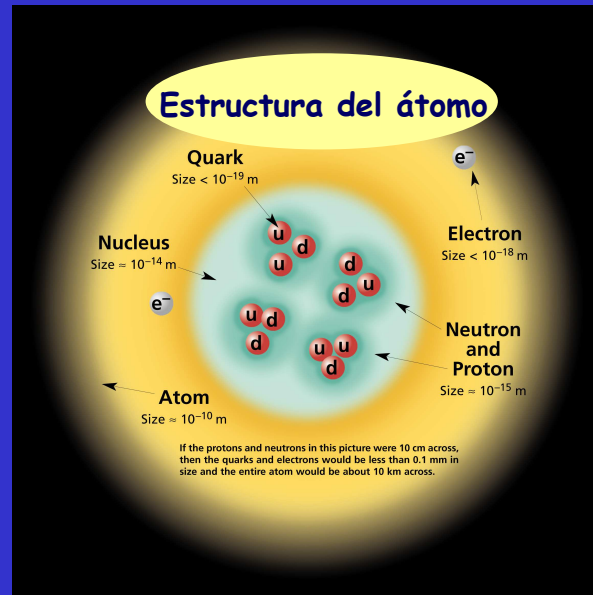


Fuerza	Dominio de Aplicación
Gravedad	Sistemas Planetarios Galaxias
Débil	Radioactividad
Electromagnética	Electrones en el átomo, la química
Fuerte	El núcleo atómico

Propiedades de las Interacciones

Property \ Interaction	Gravedad	Débil Electrodébil	Electromagnética	Fuerte	
				Fundamental	Residual
Acts on:	Mass – Energy	Flavor	Electric Charge	Color Charge	See Residual Strong Interaction Note
Particles experiencing:	All	Quarks, Leptons	Electrically charged	Quarks, Gluons	Hadrons
Particles mediating:	Graviton (not yet observed)	W^+ W^- Z^0	γ	Gluons	Mesons
Strength relative to electromag for two u quarks at: for two protons in nucleus	10^{-41}	0.8	1	25	Not applicable to quarks
	10^{-41}	10^{-4}	1	60	
	10^{-36}	10^{-7}	1	Not applicable to hadrons	20

" El mundo subatómico "



FERMIONS						BOSONS			force carriers		
Leptons			Quarks			Unified Electroweak			Strong (color)		
Flavor	Mass GeV/c²	Electric charge	Flavor	Approx. Mass GeV/c²	Electric charge	Name	Mass GeV/c²	Electric charge	Name	Mass GeV/c²	Electric charge
ν_e electron neutrino	$<1 \times 10^{-8}$	0	u up	0.003	2/3	γ photon	0	0	g gluon	0	0
e electron	0.000511	-1	d down	0.006	-1/3	W^-	80.4	-1			
ν_μ muon neutrino	<0.0002	0	c charm	1.3	2/3	W^+	80.4	+1			
μ muon	0.106	-1	s strange	0.1	-1/3	Z^0	91.187	0			
ν_τ tau neutrino	<0.02	0	t top	175	2/3						
τ tau	1.7771	-1	b bottom	4.3	-1/3						

Mesons $q\bar{q}$						Baryons qqq and Antibaryons $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$					
Mesons are bosonic hadrons. There are about 140 types of mesons.						Baryons are fermionic hadrons. There are about 120 types of baryons.					
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c²	Spin	Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c²	Spin
π^+	pion	$u\bar{d}$	+1	0.140	0	p	proton	uud	1	0.938	1/2
K^-	kaon	$s\bar{u}$	-1	0.494	0	$\bar{p}$	anti-proton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	-1	0.938	1/2
ρ^+	rho	$u\bar{d}$	+1	0.770	1	n	neutron	udd	0	0.940	1/2
B^0	B-zero	$d\bar{b}$	0	5.279	0	Λ	lambda	uds	0	1.116	1/2
η_c	eta-c	$c\bar{c}$	0	2.980	0	Ω^-	omega	sss	-1	1.672	3/2

Solo combinaciones de quarks sin «color» dan a lugar a partículas reales,
 Mesones: Quark-Antiquark
 Bariones : Tres Quarks (o Tres Anti-Quarks)

Solo las partículas de la Primera Generación forman materia estable: e^- , $p(uud)$...
 El resto de partículas solo somos capaces de observarlas en los laboratorios (aceleradores o rayos cósmicos) recreando procesos de producción a Altas Energías ... condiciones que de manera natural existieron en los primeros instantes de nuestro Universo.

Entonces, podemos recrear las condiciones del Big Bang en el laboratorio ? Es decir remontarnos en el tiempo hasta el origen del universo ?



IFIC
INSTITUT DE FÍSICA
CORPUSCULAR

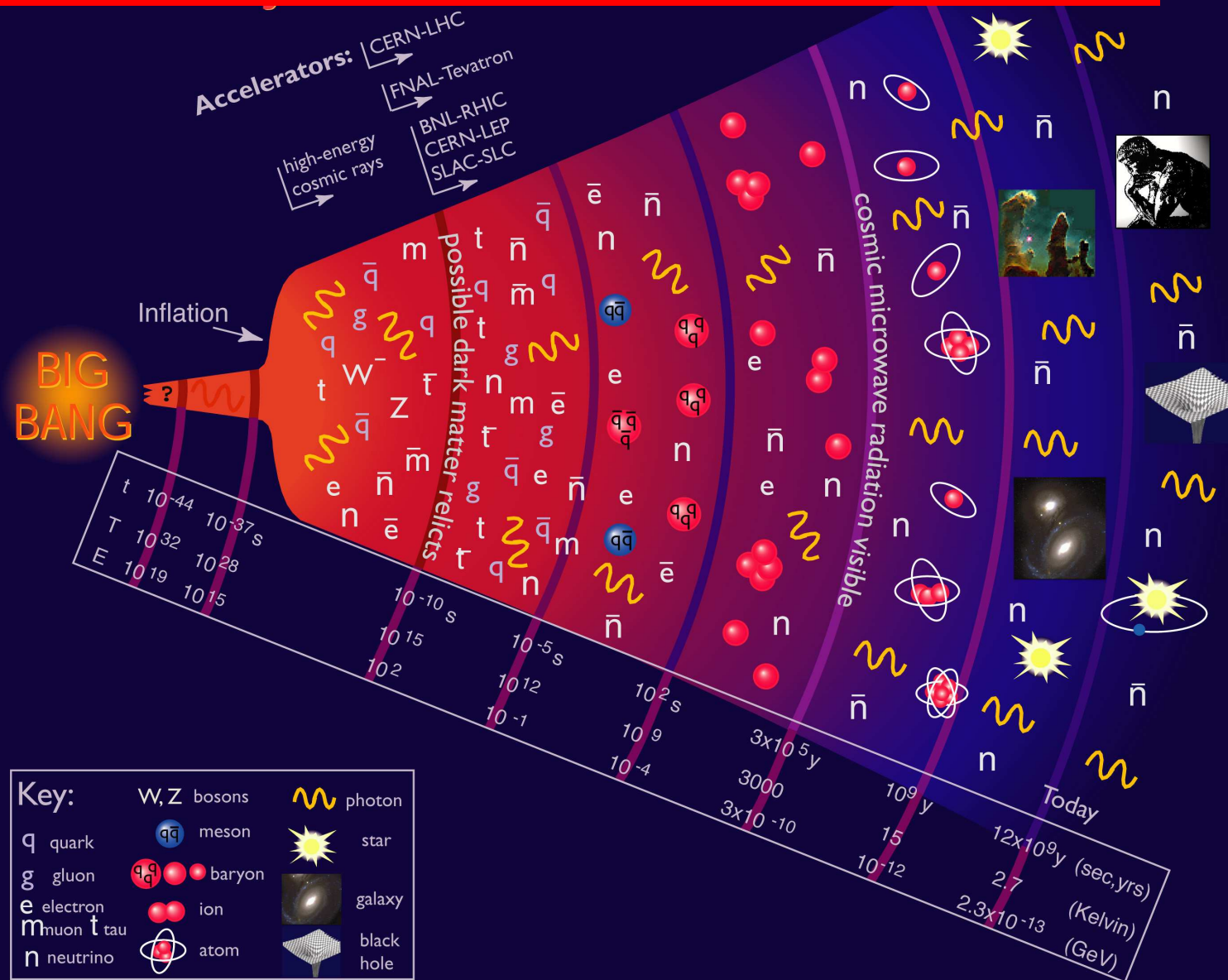
IN2P3

INSTITUT NATIONAL DE PHYSIQUE NUCLÉAIRE
ET DE PHYSIQUE DES PARTICULES



CENTRE NATIONAL
DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

" Historia del Universo en el Laboratorio ? "



Particle Data Group, LBNL, © 2000. Supported by DOE and NSF

¿ Dónde está la frontera del conocimiento
entre lo "grande" y lo "pequeño" ?



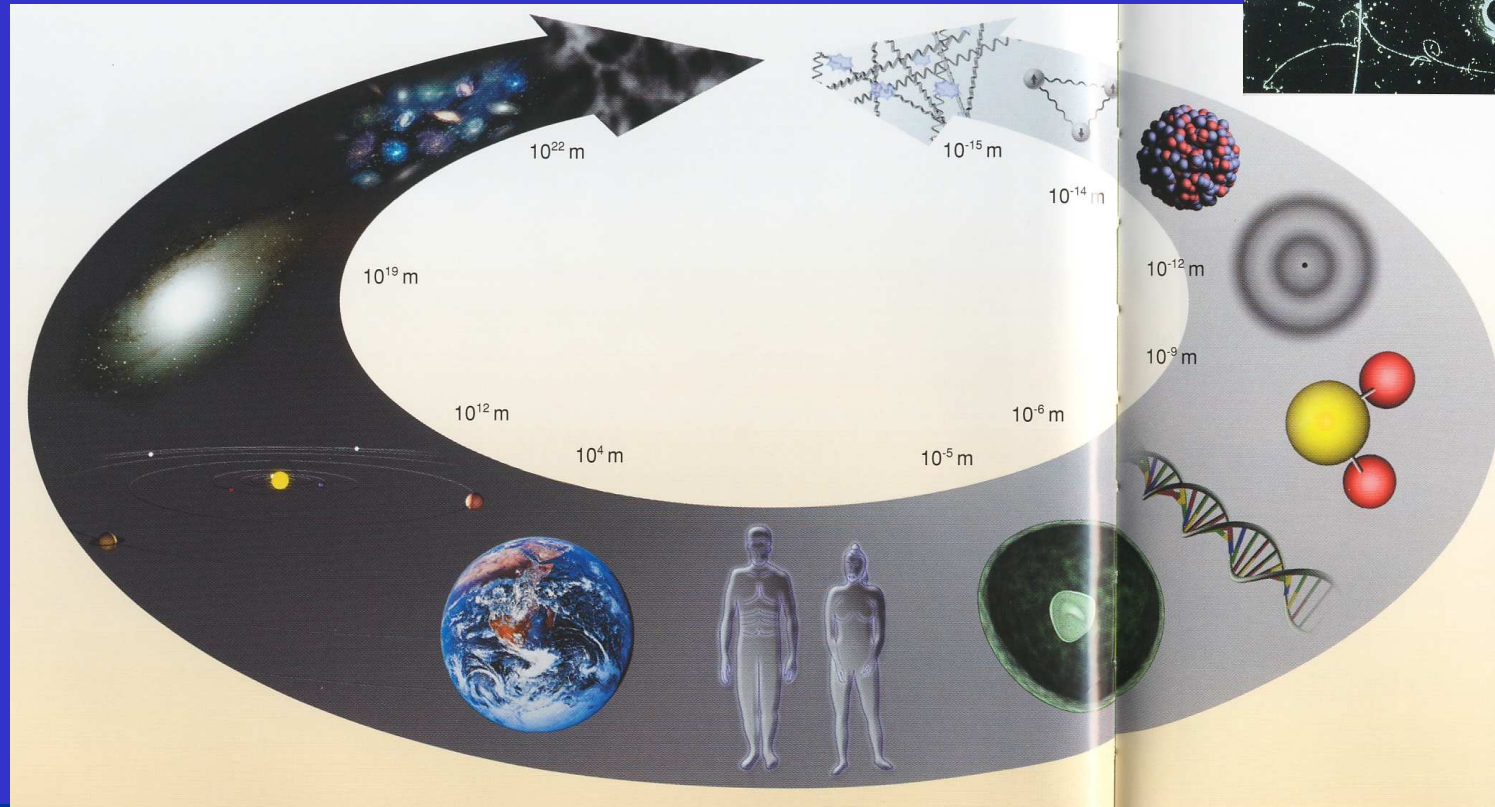
¿?

Enana Blanca



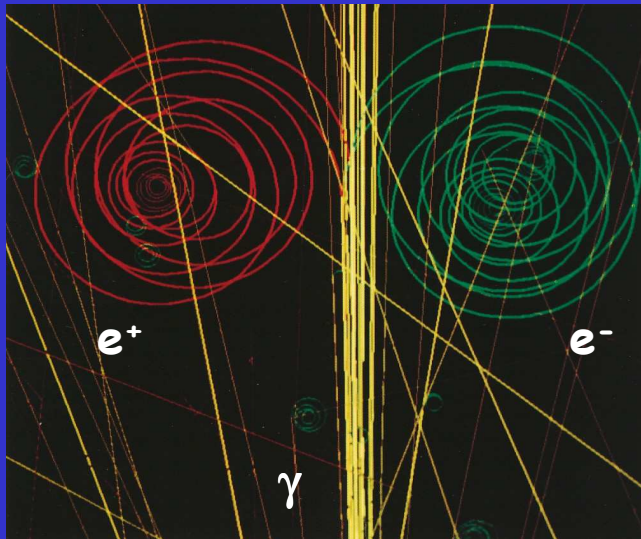
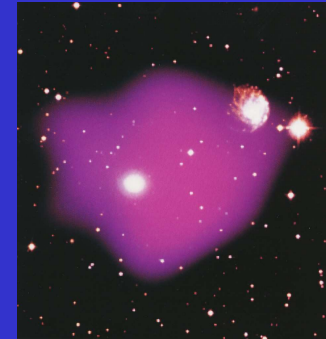
¿?

Descubrimiento de las Corrientes Neutras



El MS Funciona ! Y parece que se entiende, seguro ?

- Por que hay tres generaciones de quarks y leptones ?
- La ordenación de masas de las partículas $M_{top} \gg M_{up}$
Cual es el origen de la masa, existe el Higgs ?
- La física de los neutrinos
- Qué es la materia/energía oscura del Universo ?
- Por qué existe un universo de materia ?



Marylin



Anti-Marylin

Cómo contestar a estas preguntas ? Una manera: Experimentos en Aceleradores



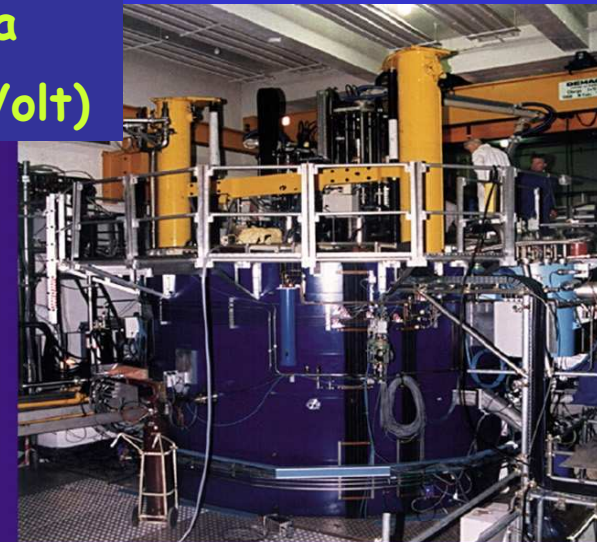
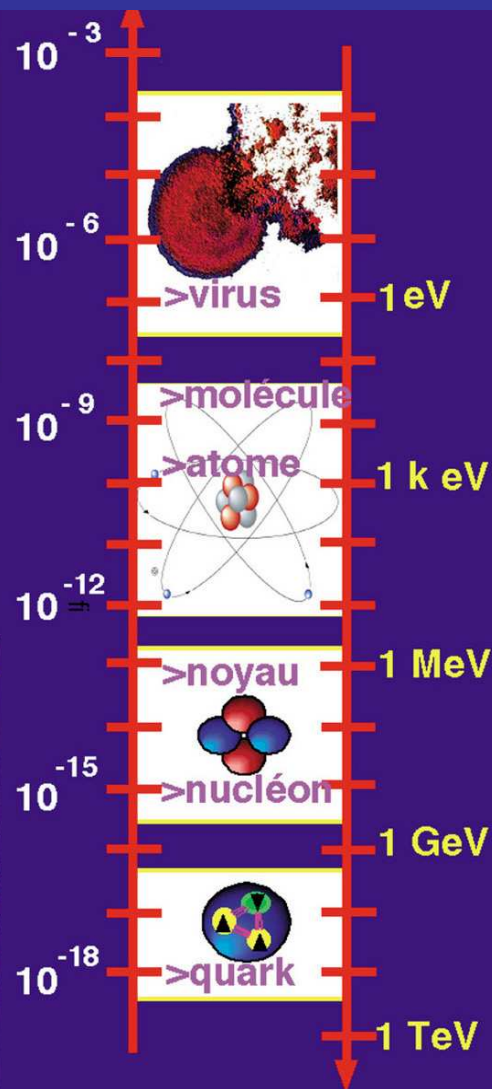
Microscopio Electrónico



Acelerador Lineal

Longitud
(metros)

Energía
(electron-Volt)



Ciclotrón

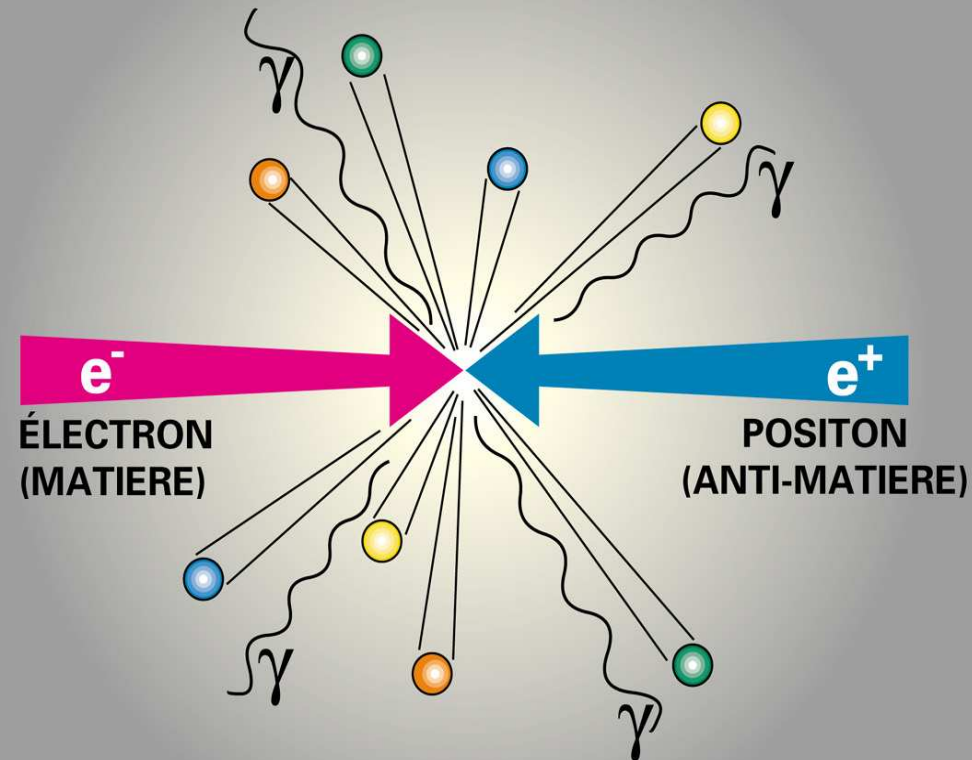


Sincrotrón

$E=mc^2$: aniquilación → El secreto para la accesibilidad y creación de nuevas partículas

CONCENTRATION D'ÉNERGIE

⇒ "MINI BIG-BANG"



El lugar: CERN

El mayor laboratorio europeo dedicado a la investigación de Partículas



Fundado en 1954 (50 aniversario).

Situado en Ginebra (Suiza)

Una de las primeras aventuras europeas de colaboración internacional.

Actualmente cuenta con 20 estados miembros (entre ellos España). Otros estados participan en calidad de "estados observadores" (EEUU, Japón, Rusia ...).

Contribución de acuerdo con PIB de cada país (España contribuye alrededor del 7%).

Más de 10.000 científicos de todo el mundo participan en experimentos del CERN (Consejo Superior de Investigaciones Científicas -CSIC- son unos 5.000 científicos).



Los principios del CERN



1952

Pierre Auger y Edoardo Amaldi

Genève fut choisie comme siège du CERN à la troisième session du Conseil, à Amsterdam, en octobre 1952.

Ce choix fut entériné par un référendum organisé dans le Canton de Genève, en juin 1953, et qui donna 16539 voix pour et 7332 voix contre; en octobre, à l'occasion d'une session du Conseil à Genève, les membres du Conseil du CERN purent visiter un site encore très champêtre.

Votación

1953

Sur le terrain du futur institut nucléaire



Sous la conduite de M. A. Picot, les membres du Conseil européen pour la recherche nucléaire se sont rendus hier à Meyrin pour reconnaître le terrain où s'élèvera le Centre nucléaire (voir en Dernière heure)

(Photo Freddy Bertrand, Genève)

La Suisse du 30 octobre 1953

17 de Mayo de 1954 en Ginebra hace 50 años



Primeros trabajos de construcción civil incluso antes de ser ratificados por el propio Consejo del CERN, para adelantarse al invierno

Las Herramientas: Aceleradores

$$N_{\text{sucesos}} = L \times \sigma$$

L = Luminosidad

σ = sección eficaz

Condiciones
del Experimento
(la energía del proceso,
el estado inicial..)

$$L \propto N_{\text{part}} f / A$$

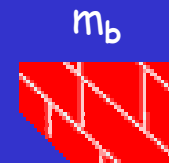
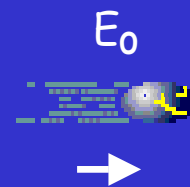
$$f \sim \mu\text{sec-nsec}$$

$$A \sim 20 \times 200 \mu\text{m}^2$$

$$N_{\text{part}} \sim 10^{10-12} \text{ part.}$$

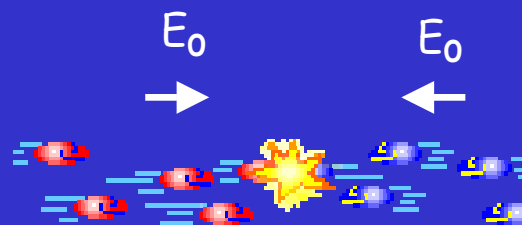
Blanco Fijo

$$E \sim (2m_b E_0)^{1/2}$$



$$L^{**}$$

$$E^*$$

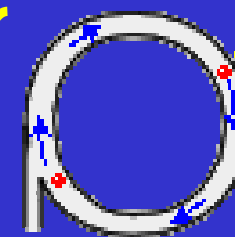


Colisionadores

$$E = 2E_0$$

$$\Delta E_{\text{perdida}} \propto E^4 / R$$

$$\Delta E_{\text{perdida}} \propto 1/m^4$$

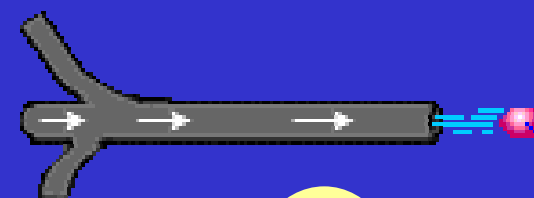


Circular

$$L^{***}$$

$$E^{***}$$

e^+e^-
 pp
 $p\bar{p}$
 ep



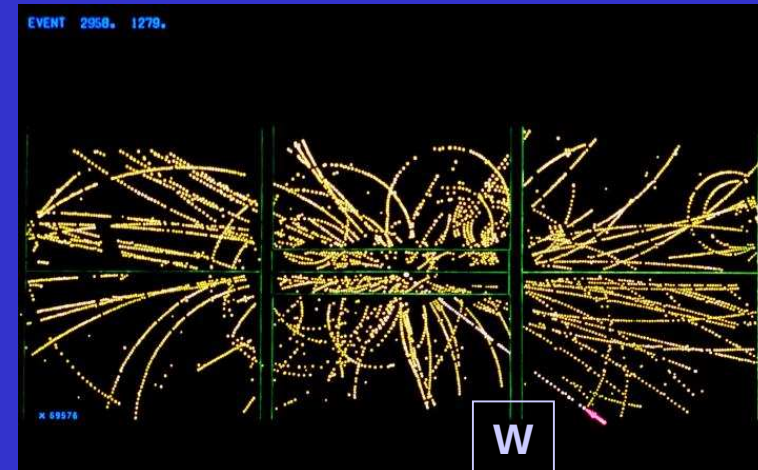
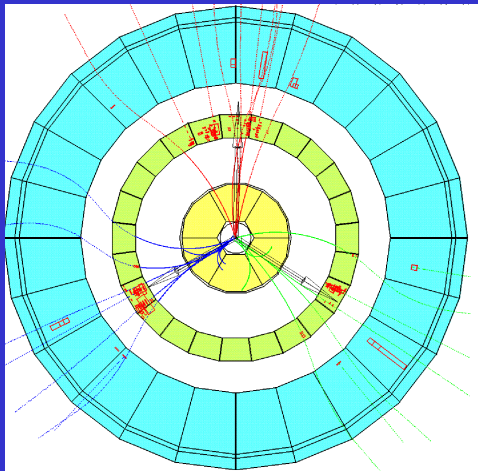
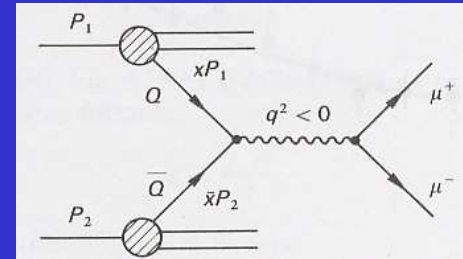
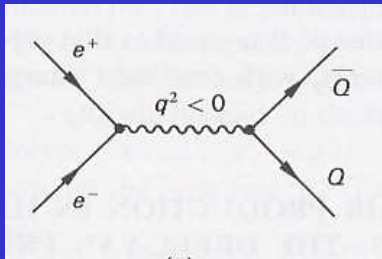
Lineal

$$L^{**}$$

$$E^{***}$$

e^+e^-

Aceleradores: e^+e^- versus pp



Los haces son de partículas elementales (e^+e^-)

Energía de la interacción conocida

Todo el estado final es producto de la interacción

Especialidad: Física de Precisión

LEP, $\Delta E_{\text{perdida}} = 2.3 \text{ GeV}$ para $E = 100 \text{ GeV}$

Los haces son partículas compuestas (pp)

Energía de la interacción desconocida

Parte del estado final es producto de la interacción

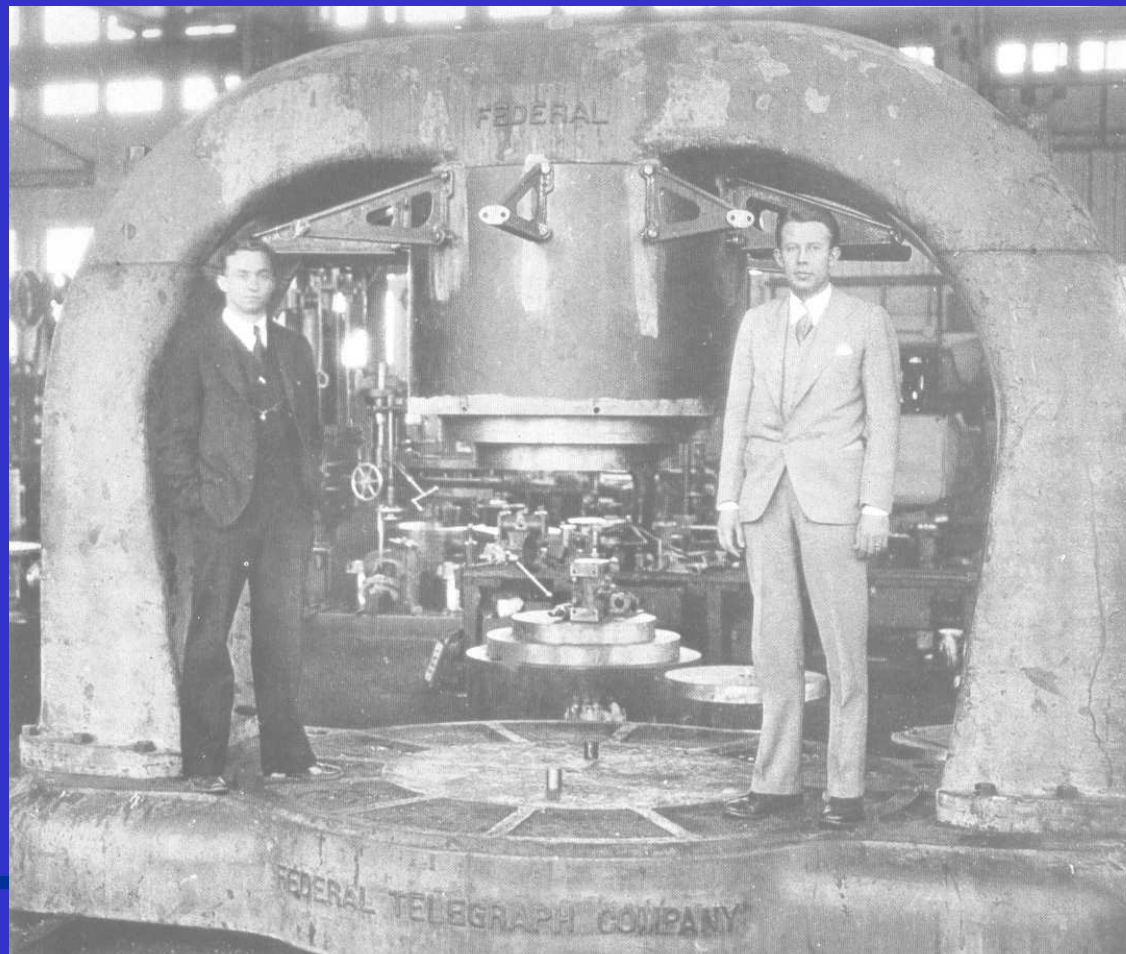
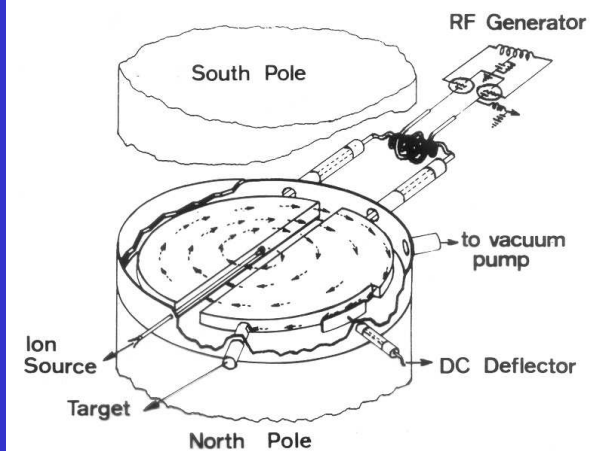
Especialidad: Exploración de regiones cinemáticas nuevas (Descubrimientos).

1930

Ernest Lawrence inventa el primer
Acelerador circular: el ciclotrón

M. S. Livingston and E. Lawrence

Con su ciclotrón de 25'



12-16 Julio 2004

25 de Noviembre de 1959: el SPS funciona !



Wolfgang Schnell
inventor del CLIC

John Adams

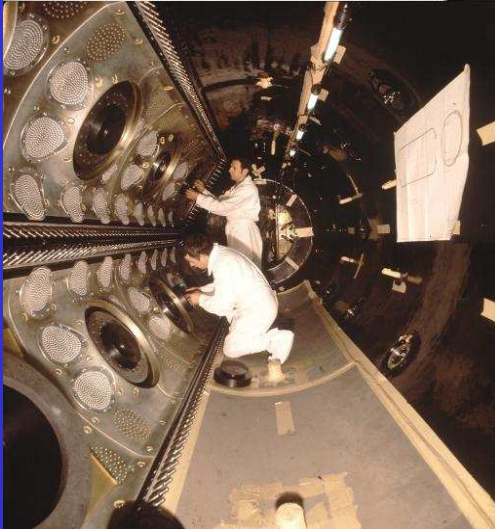
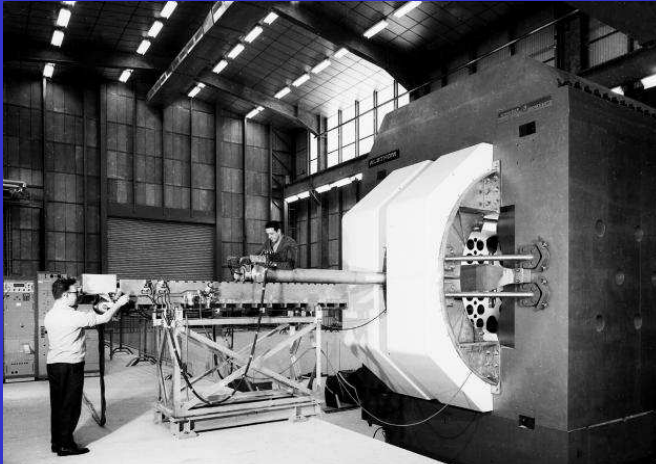


12-16 Julio 2004

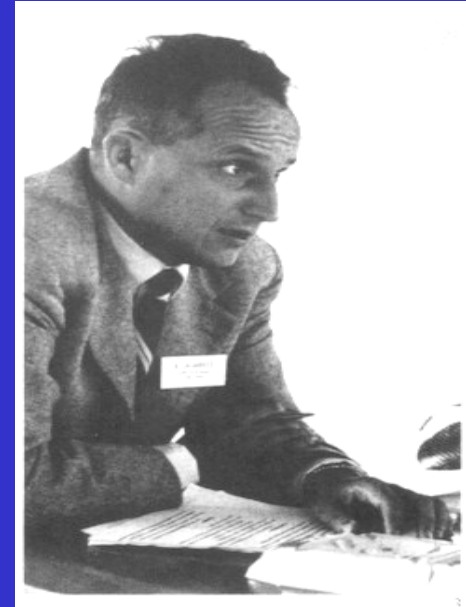
El PS en 1960



1973: Descubrimiento de las corrientes neutras en Gargamelle



GGM 1969-70



André Lagarrigue



Los principios del CERN

1975

Se consiguen protones
a 450 GeV en el SPS



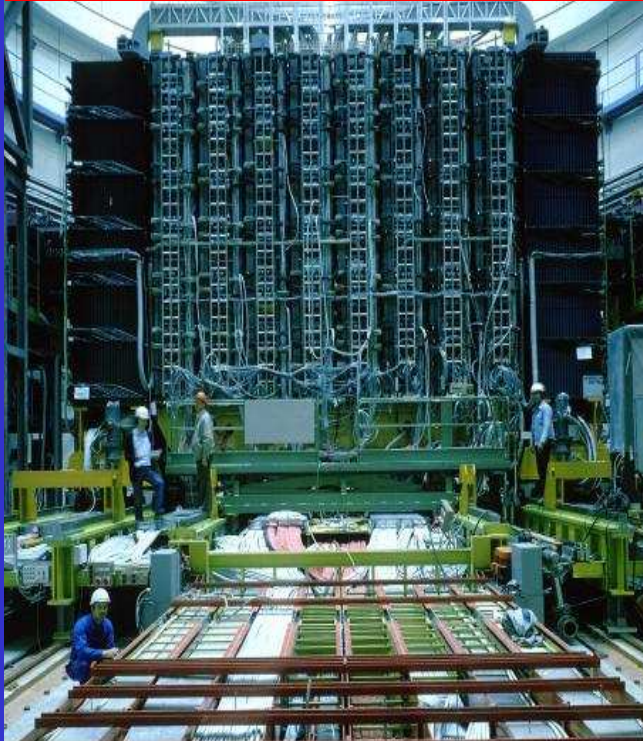
1981: El acumulador de anti-protones



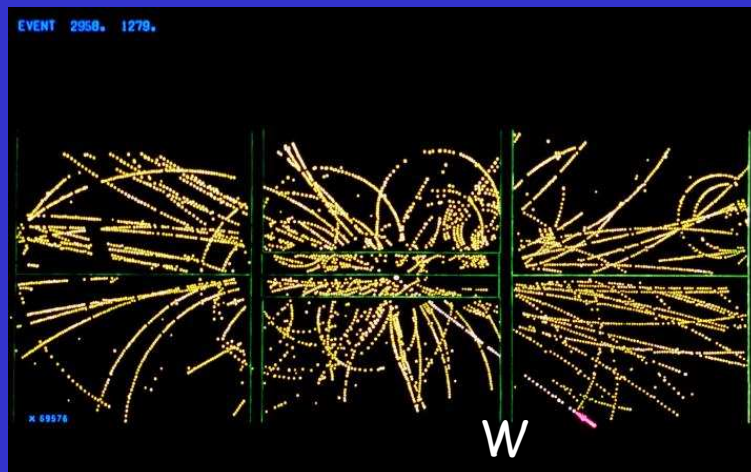
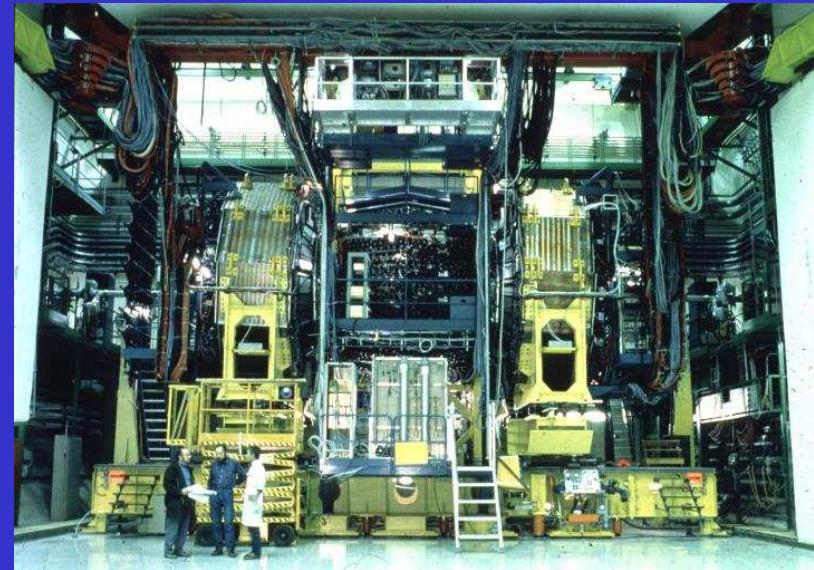
1981: el SPS se transforma en un colisionador proton-antiproton collider utilizando la técnica de Simon van der Meer para el enfriamiento de antiprotones

1983: Descubrimiento de los bosones W y Z

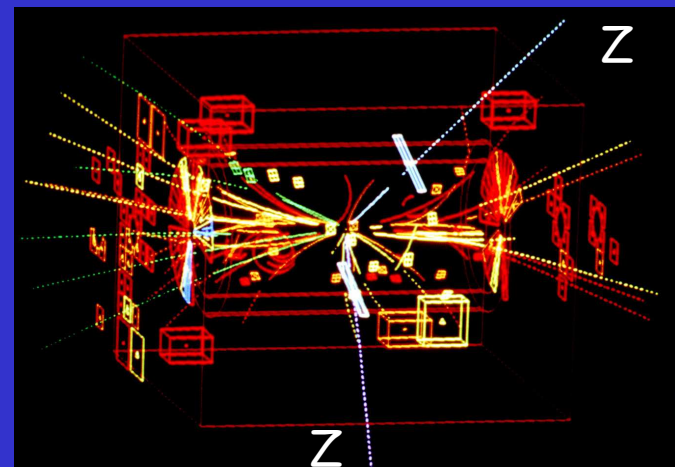
UA1



UA2



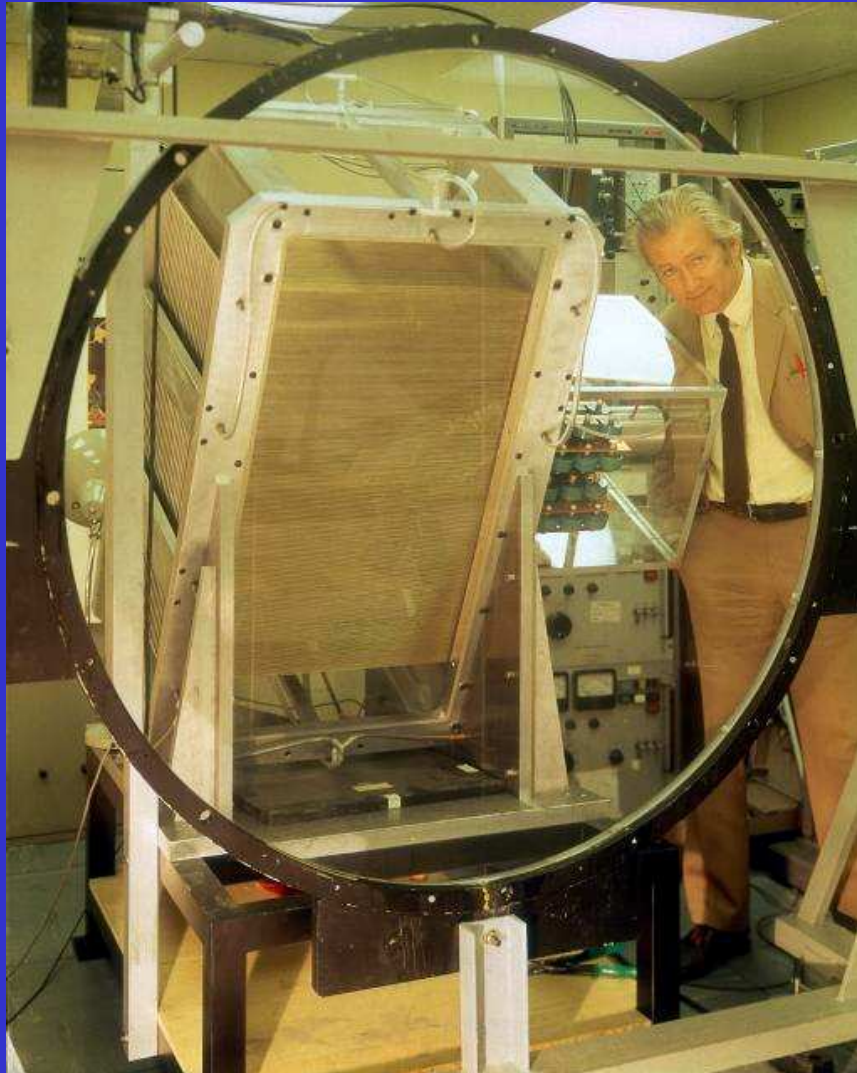
12-16 Julio 2004



J. Fuster

25

Los que recibieron el Premio Nobel



G. Charpak



C. Rubbia

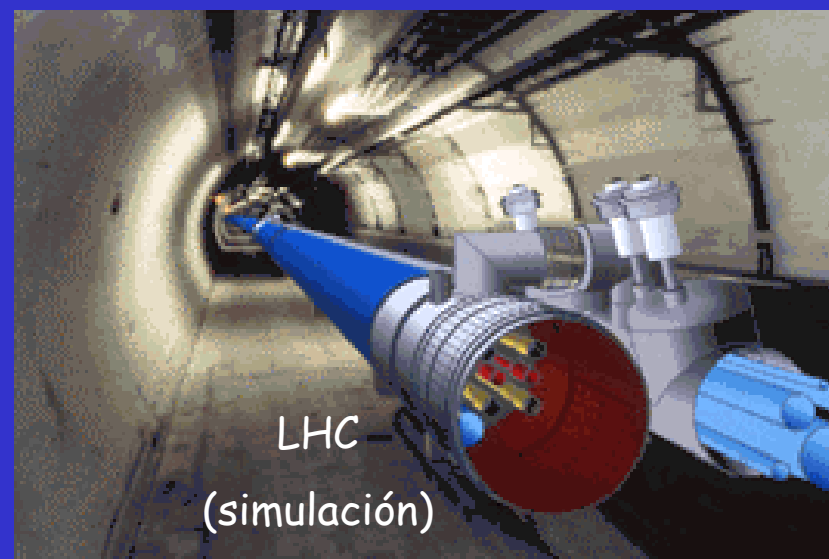
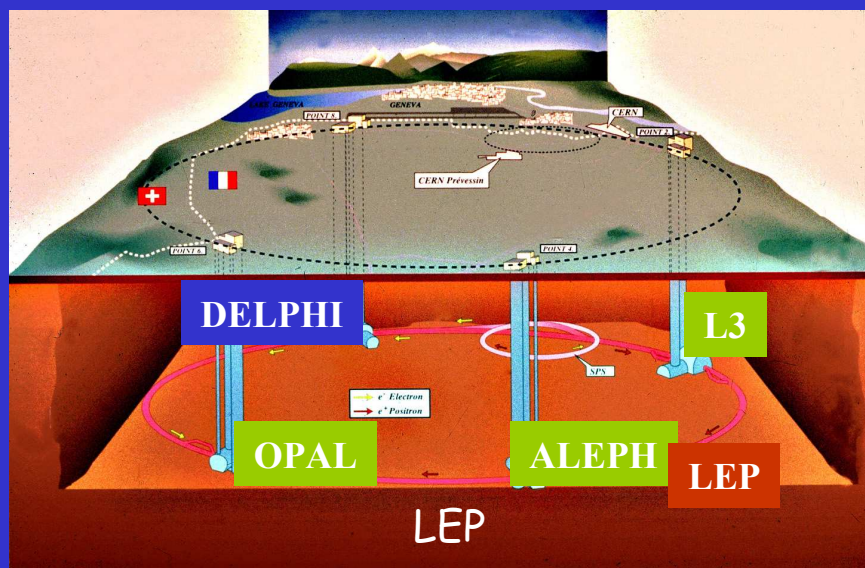
S. van der Meer

Las Infraestructuras del CERN actuales: LEP (1989-2000) -- LHC(2007-2017 ?)

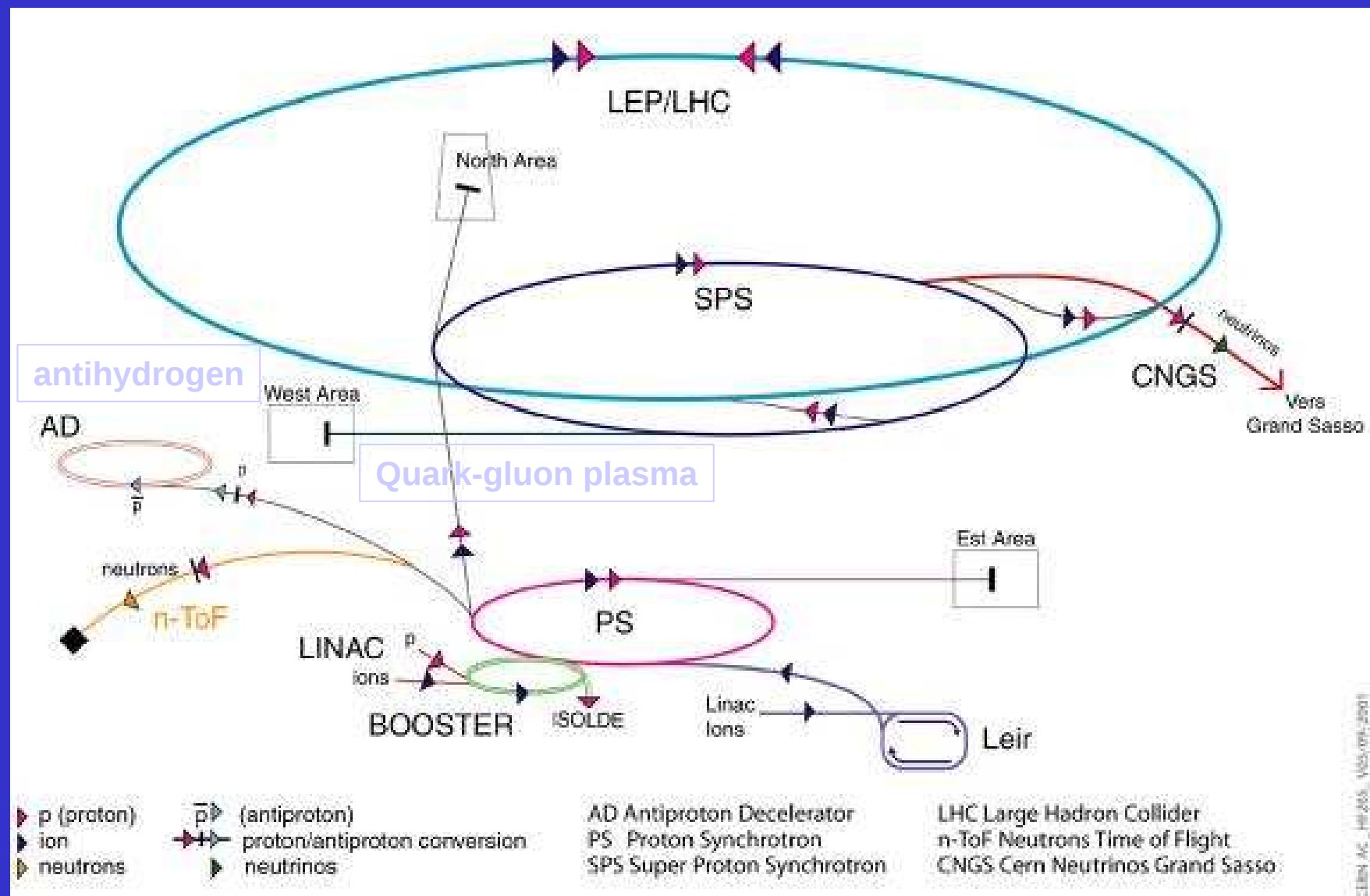


LEP (Large Electron Positron Collider)
 $E \sim 100\text{-}200 \text{ GeV}$
 600 millones de euros
 27 km (a $\sim 100 \text{ m}$ de profundidad)

LHC (Large Hadron Collider)
 Imanes superconductores
 $E \sim 14 \text{ TeV}$
 2000 millones de euros
 27 km (a $\sim 100 \text{ m}$ de profundidad)



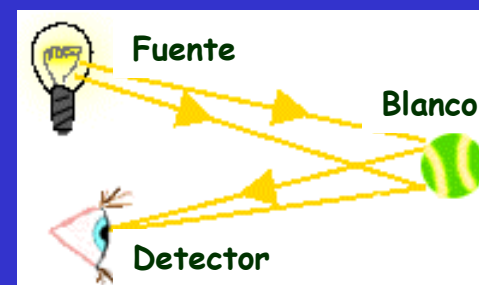
Configuración actual del CERN



Las Herramientas: Detectores

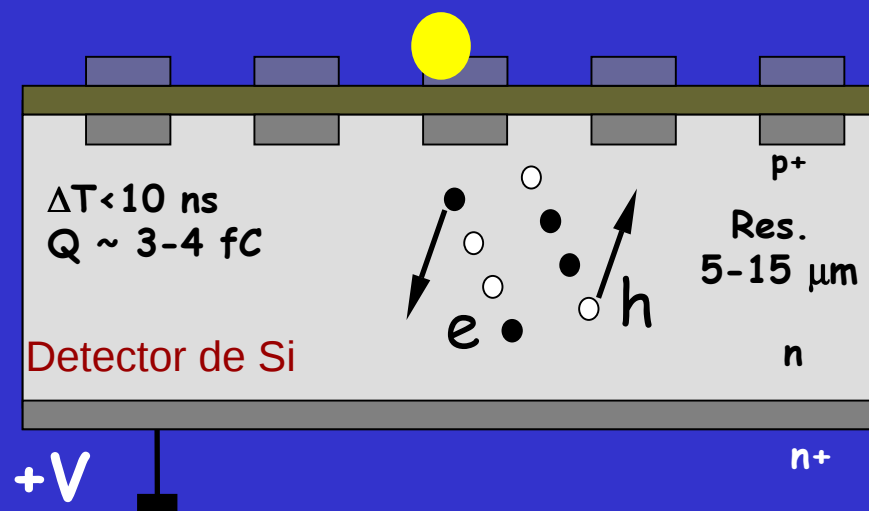
Principio de detección del paso de una partícula:
interacción con el medio + conversión en señal eléctrica + digitalización + procesado

Principio General



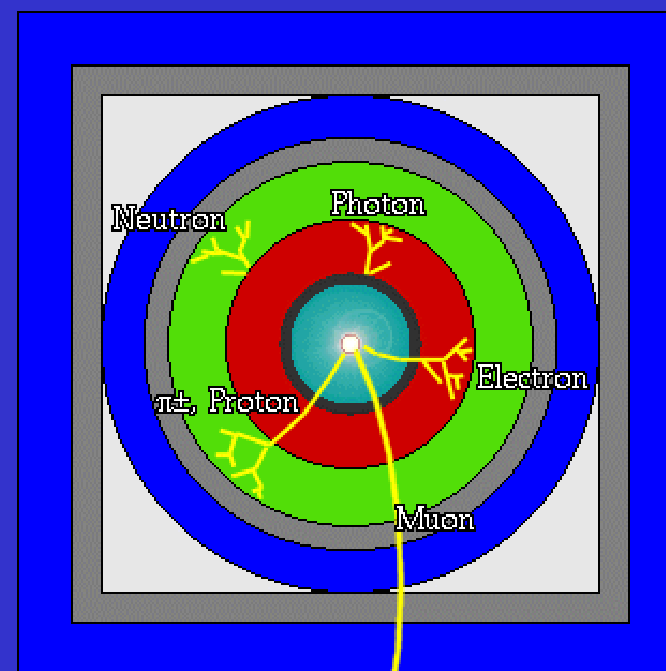
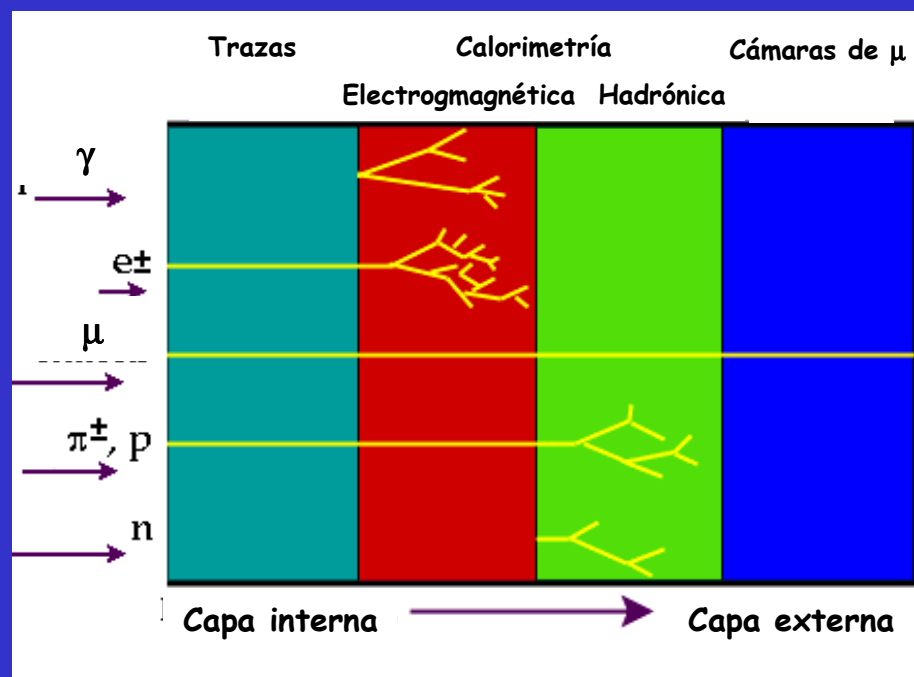
Ejemplo práctico

Lectura de la señal
(amplificación, digitalización...)



Los detectores de los Grandes Aceleradores

Principios Básicos



Ejemplo DELPHI en LEP

Concepción + proyecto:	3 años
Construcción:	4 años
Explotación y toma de datos:	10 años
Colaboración internacional:	~ 50 institutos
Número de físicos:	400-500
Coste de un experimento:	50 Meuros

Organización y especialización

Ejemplo ATLAS en LHC

Concepción + proyecto:	10 años
Construcción:	6 años
Explotación y toma de datos:	10 años
Colaboración internacional:	130 institutos
Número de físicos:	~1500
Coste de un experimento:	300 Meuros

Mayor organización y especialización !!

Un detector LEP : DELPHI

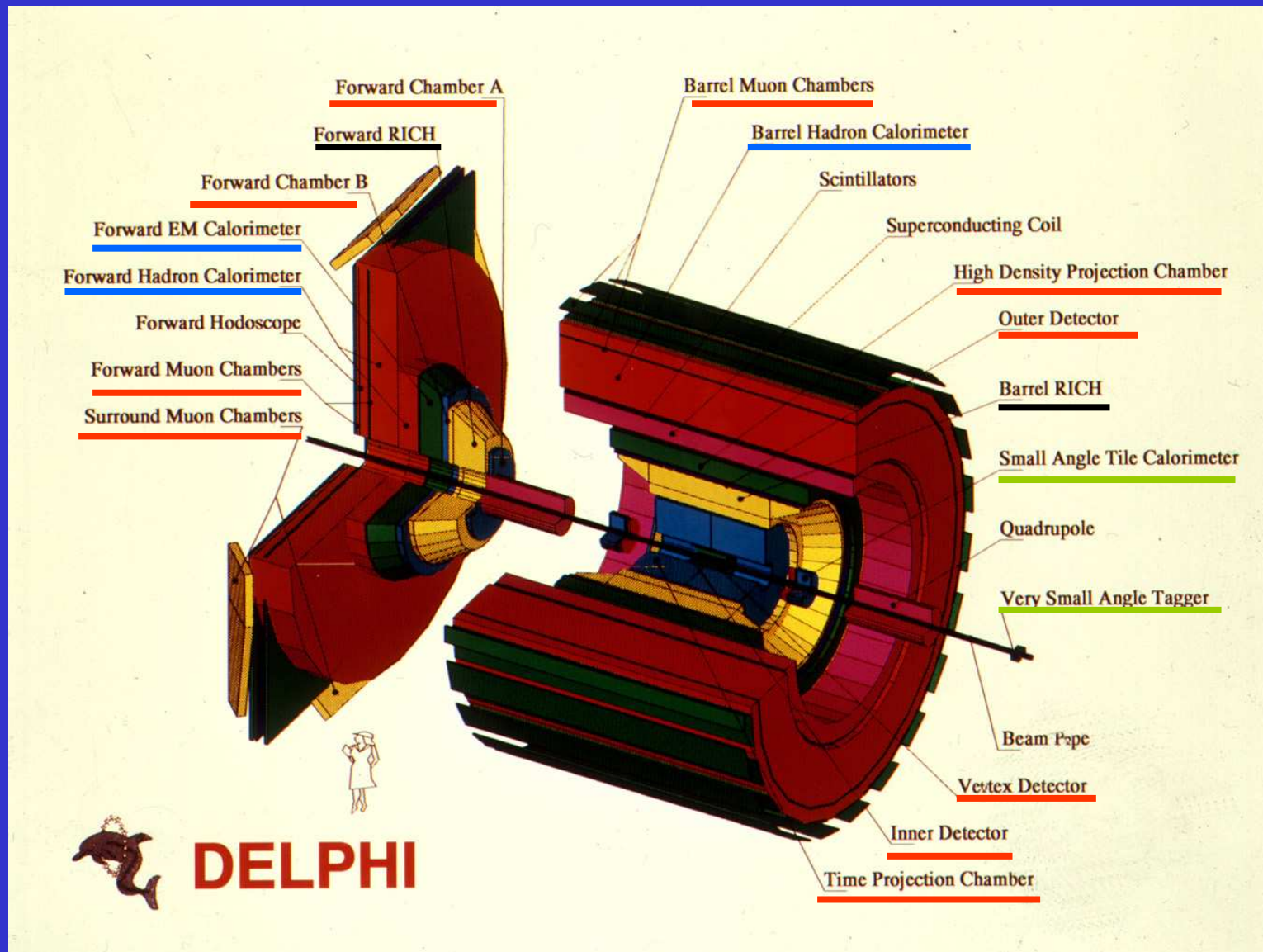


Foto de Familia



DELPHI

Detector for Electron Photon and
Hadron Identification

Country

Austria

Belgium

Denmark

Finland

France

Fed. Rep. Germany

Great Britain

Greece

Italy

Netherlands

Norway

Poland

Portugal

Spain

Sweden

USA

USSR

**International
Organisations**

Institute

Vienna

Antwerp, IIHE, Mons

Copenhagen

Helsinki

College de France, LAL Orsay

Paris LPNHE, Saclay, CRN Strasbourg

Karlsruhe, Wuppertal

Liverpool, Oxford, RAL

Ath. Demokritos, Ath. NTU, Ath. Univ.

INFN: Bologna, Genoa, Milan, Padua,

Turin, Trieste, Rome, Udine

NIKHEF

Bergen, Oslo

Cracow, Warsaw

Lisboa

Santander, Valencia

Lund, Stockholm, Uppsala

Ames Iowa

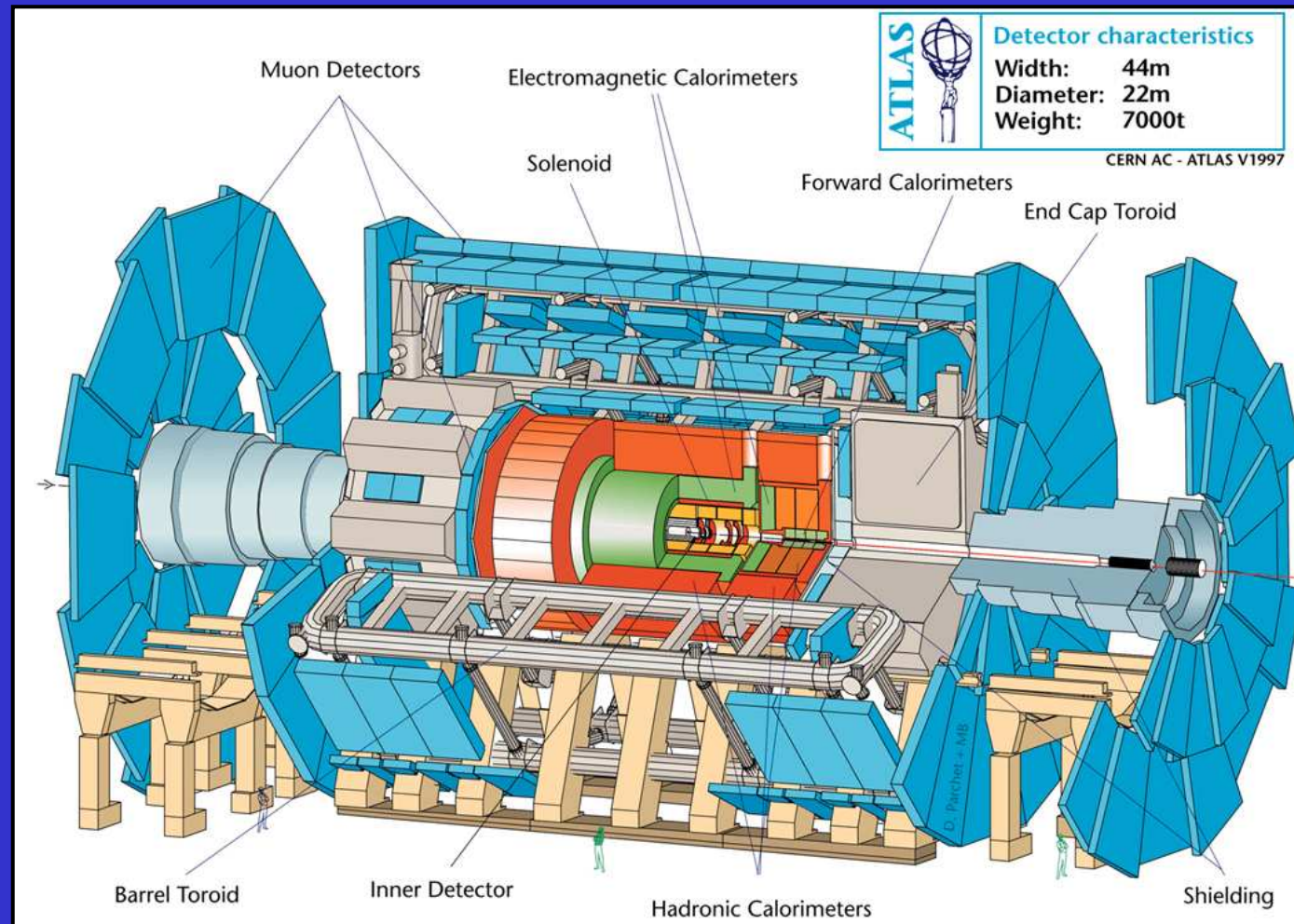
IHEP Protvino (Serpukhov)

JINR (Dubna)

CERN

YB 89

Un detector LHC : ATLAS



Longitud: 44 m

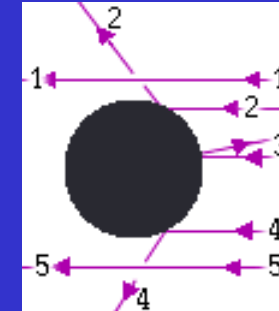
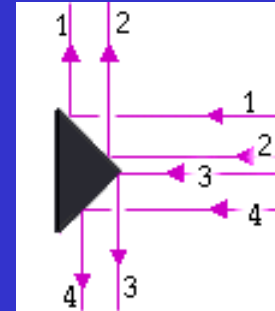
Diámetro: 22 m

Cruce de haces cada 25 ns

Mas de 100 millones de canales de lectura

El Método

- 1) Hipótesis: modelo teórico
- 2) Test de la hipótesis
- 3) Análisis e interpretación de los datos

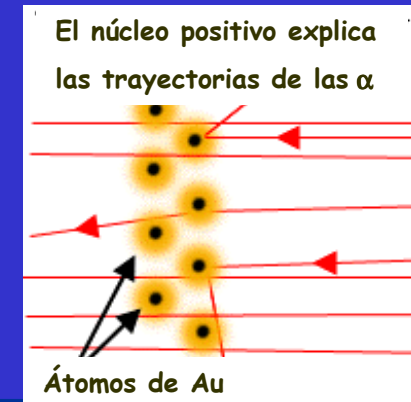
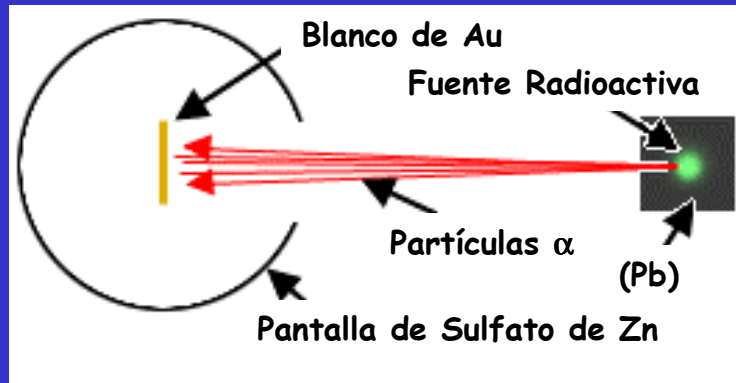


Que forma tienen estos objetos ?

Un ejemplo: el descubrimiento del núcleo atómico (Rutherford, 1911)

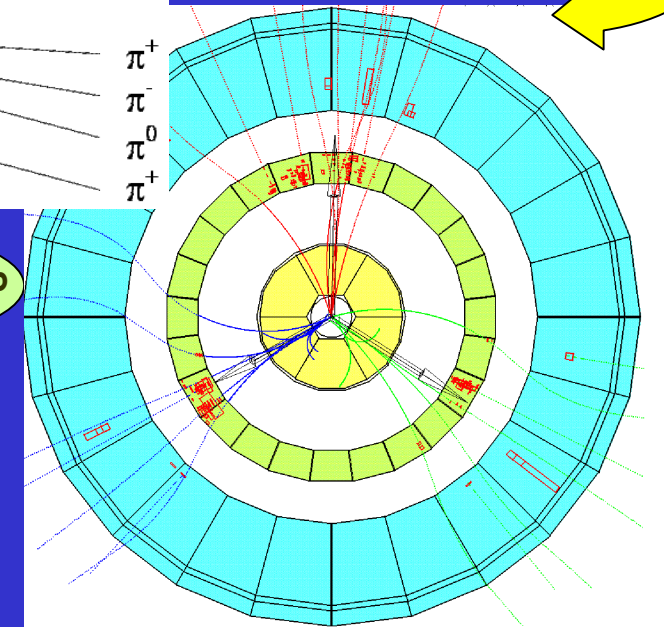
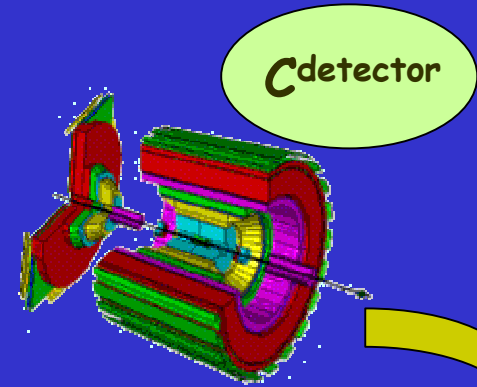
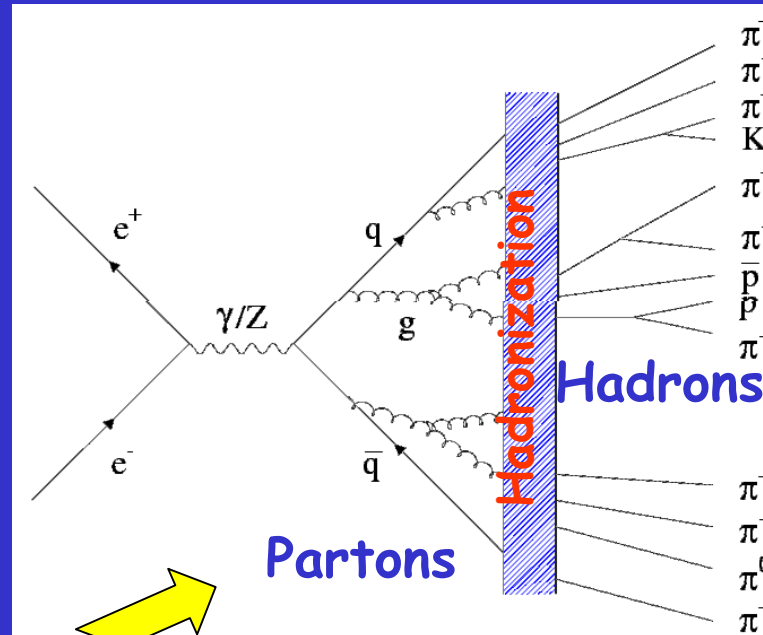
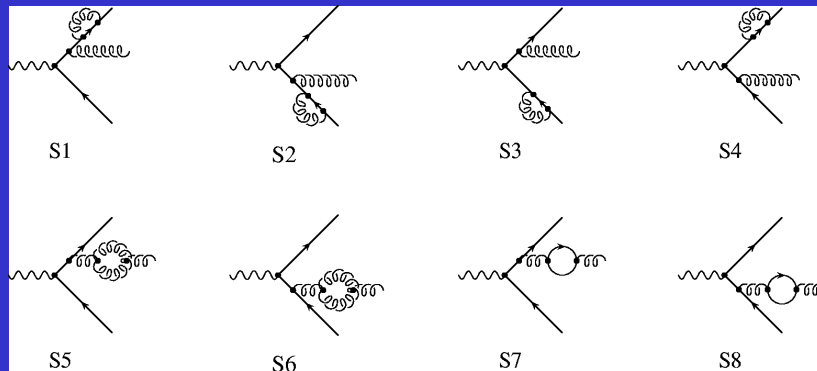
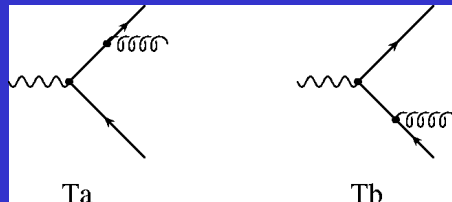
-3.-

Análisis de Datos e Interpretación de Resultados
"Los átomos tienen un núcleo positivo en el centro"



Métodos mas modernos: Suceso hadrónico recogido por DELPHI

Cálculo teórico a nivel de quarks



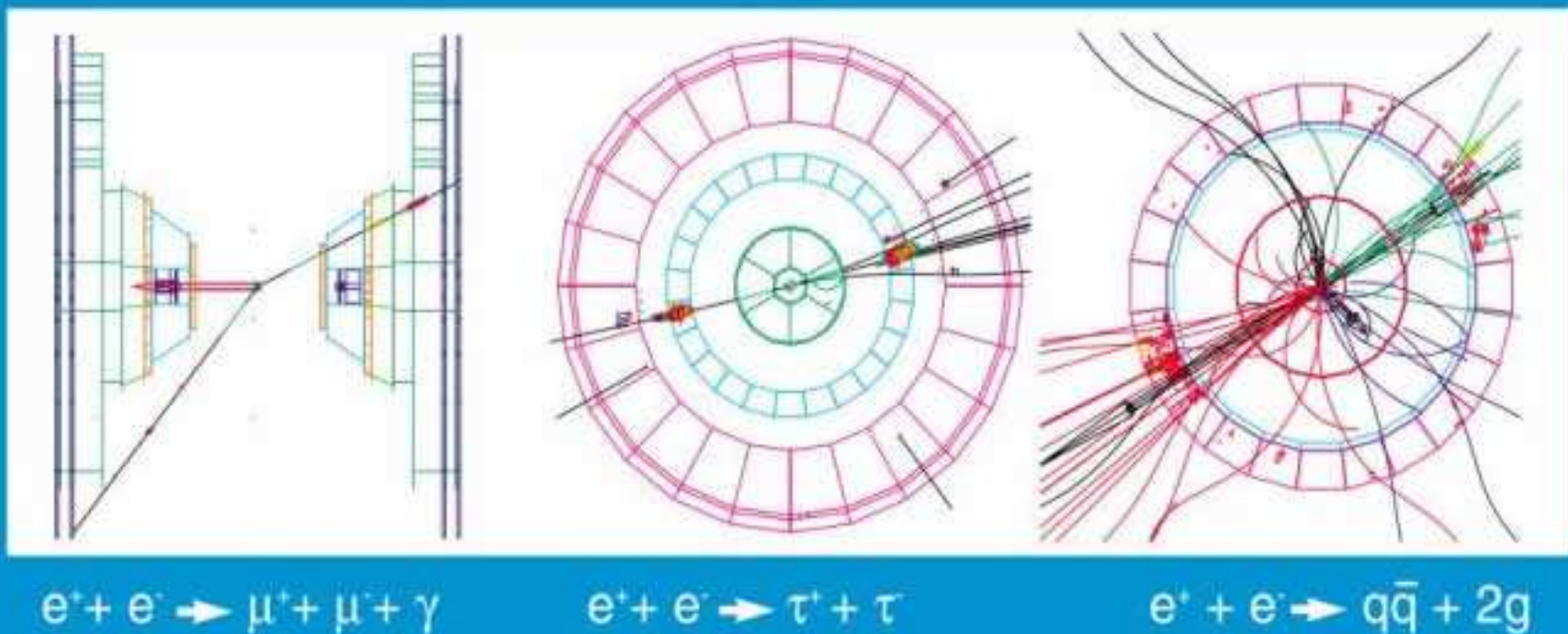
Chadronitzacio

Qué se observa en los detectores ? (procesos distintos)

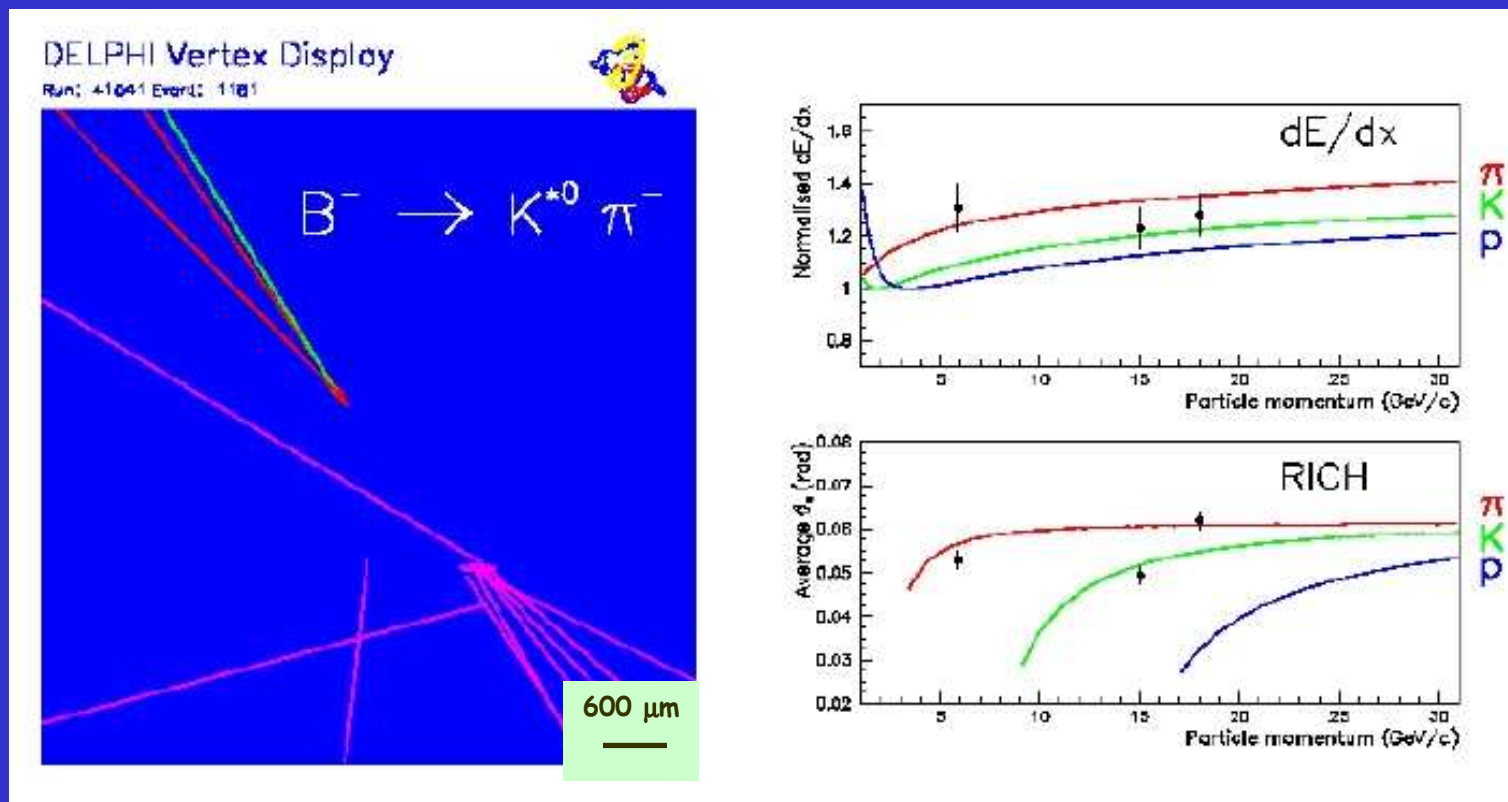
DELPHI Run: 64027 Evts: 1002
Beam: 45.2 GeV Proc:11-Oct-1996
DAS: 4-Nov-1996 Scan:14-Oct-1996
00:00:00 Tan:DST

DELPHI Run: 64101 Evts: 18001
Beam: 45.2 GeV Proc:11-Oct-1996
DAS: 10-Nov-1996 Scan:14-Oct-1996
04:05:16 Tan:DST

DELPHI Run: 63906 Evts: 23033
Beam: 45.2 GeV Proc:11-Oct-1996
DAS: 1-Nov-1996 Scan:14-Oct-1996
00:07:46 Tan:DST



Qué se observa en los detectores ?



Identificación de producción de una partícula de la tercera generación: B^-

Vida media de B^- : 0.000000000001674 (18) seg

Merced a su alta velocidad $\sim c$ y la dilatación relativista del tiempo estas partículas recorren unos pocos milímetros antes de desintegrarse.

Suficiente para que detectores muy precisos detecten su "efímera" existencia.

Una de las mas de 250 publicaciones de DELPHI

Ciertamente un grupo grande..tiene sus inconvenientes..

Pero también

Contacto con últimas tecnologías: microelectrónica, informática, mecánica, materiales, etc...

Muchos temas de análisis: " Gran variedad de tesis "

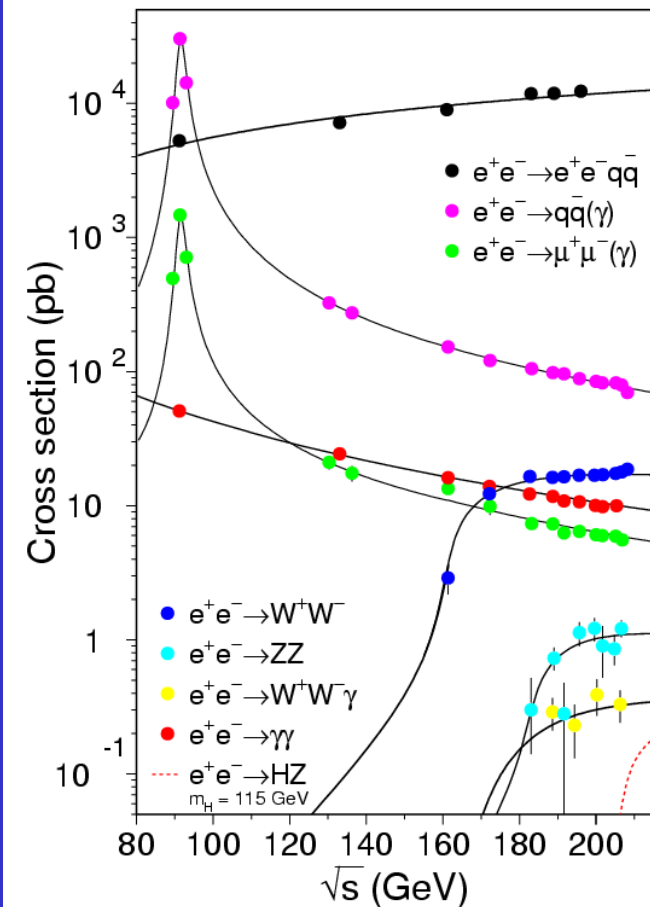
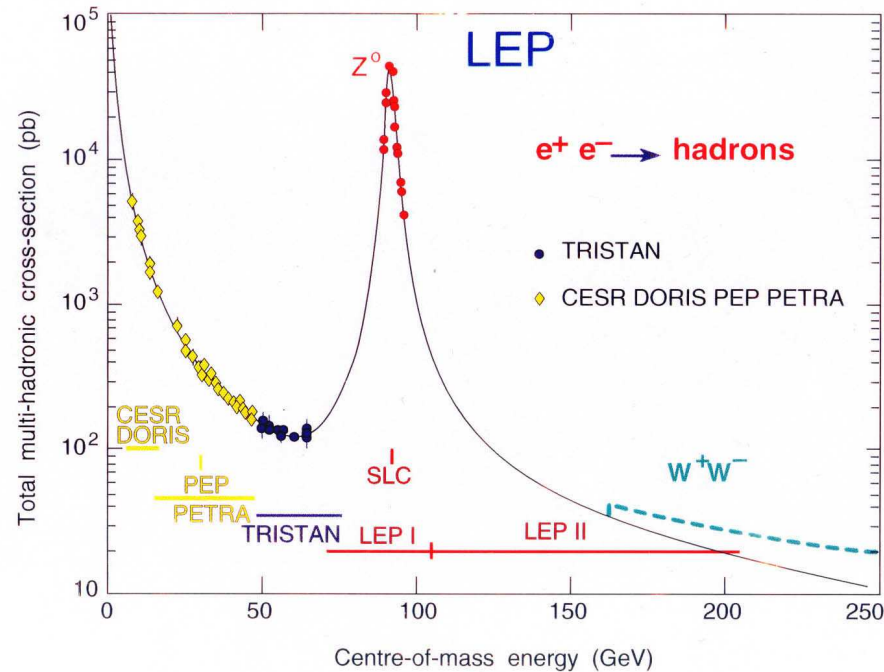
ii Gran capacidad de formación para jóvenes investigadores !!

Resultado de la medida:

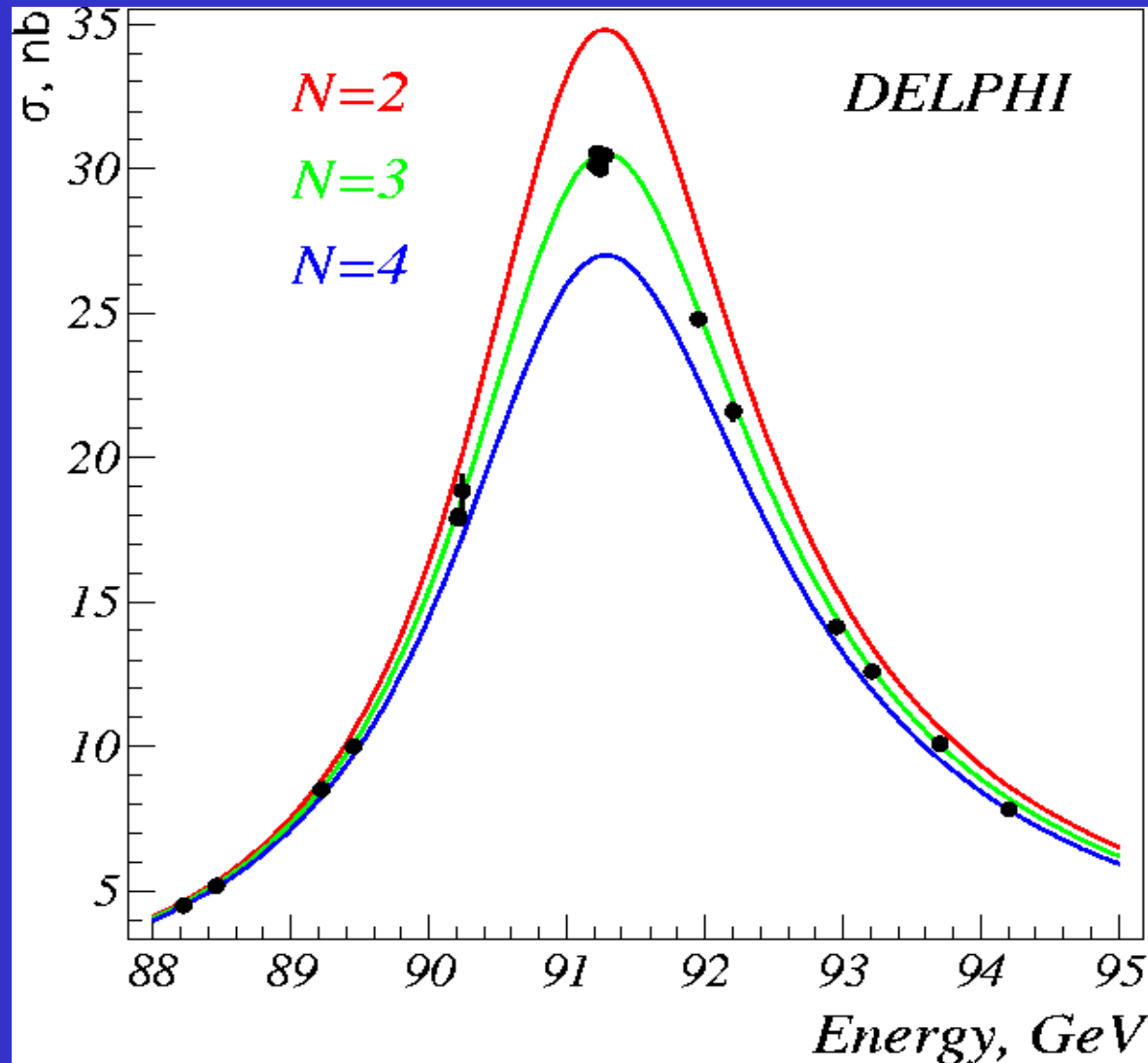
$$\alpha_s = 0,118 \pm 0,002$$

(media de LEP)

Resultados LEP: Sección Eficaz e^+e^-



Ejemplos de resultados: Uno de los mas relevantes de LEP



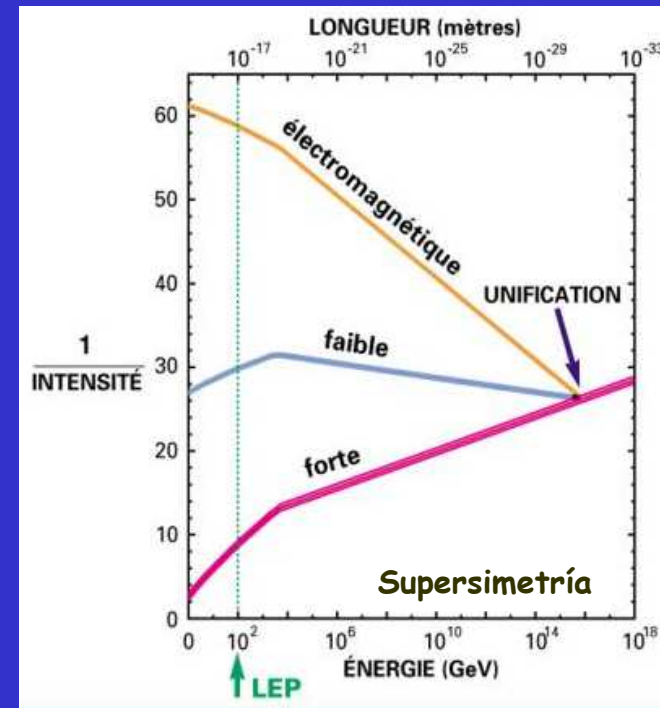
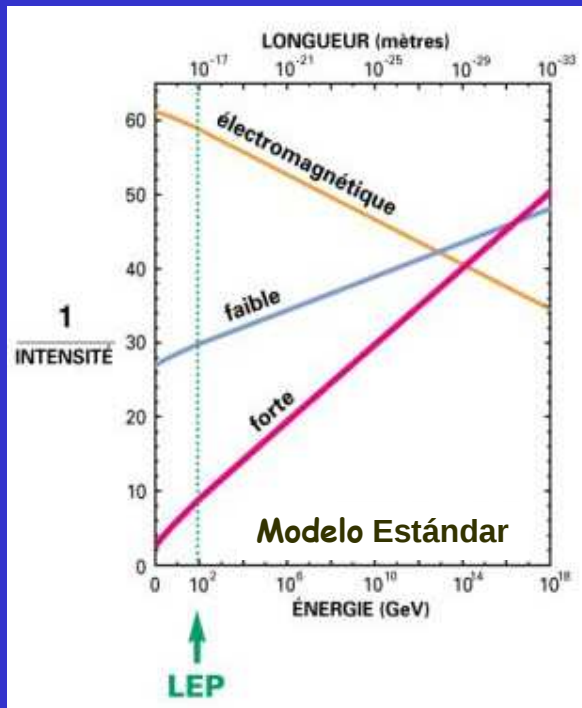
$$N_\nu = 2,989 \pm 0,012$$

(media de LEP)

En la naturaleza
existen solo tres
tipos de neutrinos
ligeros ($m_\nu < M_Z/2$):

« tres familias »

Ejemplos de resultados:



Medidas muy precisas de las constantes de acoplamiento de las distintas interacciones (débil, electromagnética y fuerte) nos permiten predecir usando los modelos teóricos si realmente hay unificación de fuerzas (importante para el modelo Big Bang).

Con los valores actuales Modelo Estándar no justifica dicha unificación.

La Supersimetría si lo puede explicar, sin embargo, aún no se ha observado ninguna partícula "intrínsecamente" supersimétrica ¿quizás en el LHC ?

Y, es fácil obtener estos resultados ?
qué se tiene que controlar ?
qué significa precisión ?

Un resultado experimental:

$$M_Z = 91188 \pm 2 \text{ MeV}/c^2$$

Sensibilidad de LEP:

$$\Delta E/E \sim -10^{-4} \Delta C/C; E = \text{Energía del haz}$$
$$C = \text{Circunferencia de LEP}$$

$$\text{Si se necesita } \Delta E/E \sim 1 \text{ MeV} \longrightarrow \Delta C \sim 1 \text{ mm}$$



Avance del tema de la
próxima transparencia !

Cambios incontrolados de
~1 mm en la circunferencia de LEP (27 km) afectarán nuestros resultados !

$\Delta \sim 1 \text{ mm..}$ No hay por qué preocuparse o si ?

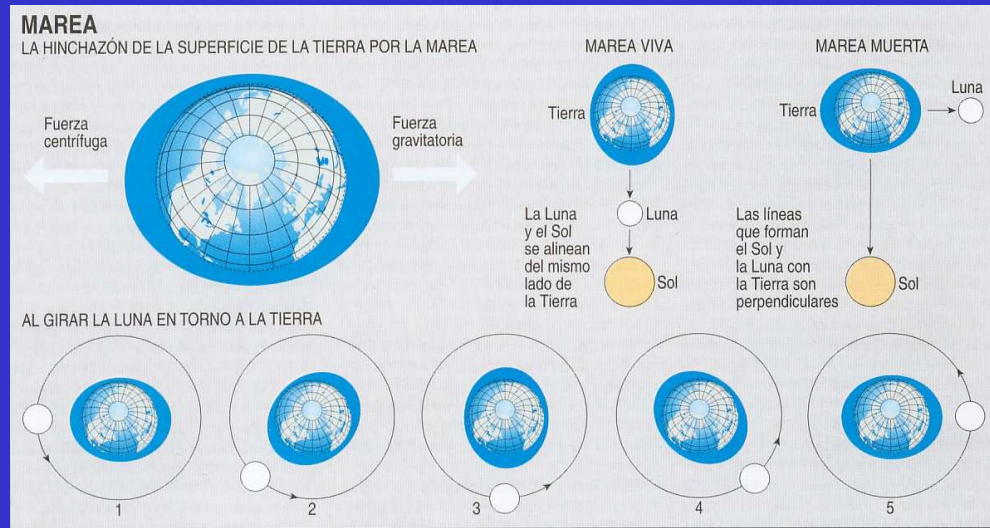
Y, es fácil obtener estos resultados ?
qué se tiene que controlar ?

La Luna y las Mareas...

« Debido a la atracción gravitatoria la luna (y el sol) deforman la superficie de la tierra según sus posiciones relativas...

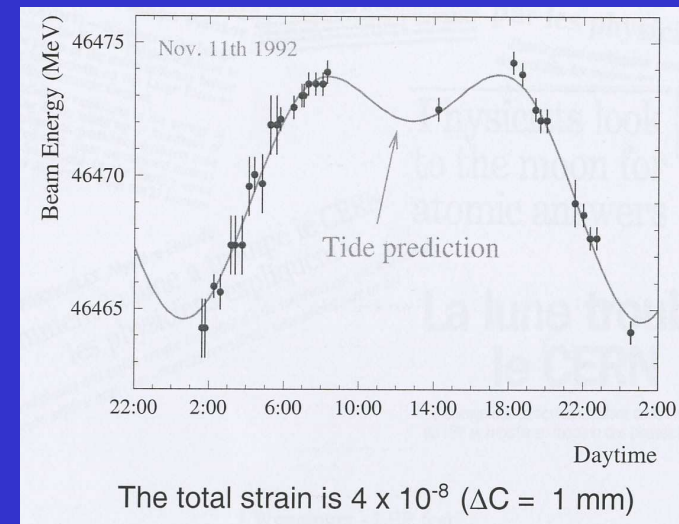
y la circunferencia de LEP cambia varios mm, alterando su energía en ± 5 MeV »

Así pues LEP corroboró que efectivamente las mareas deben existir !!



12-16 Julio 2004

J. Fuster



43

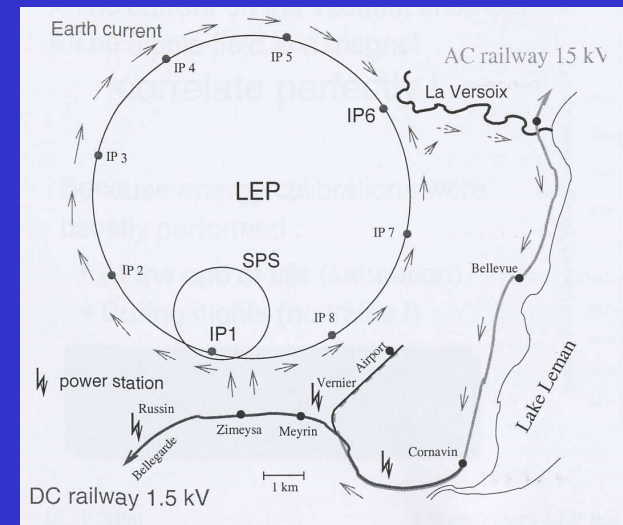
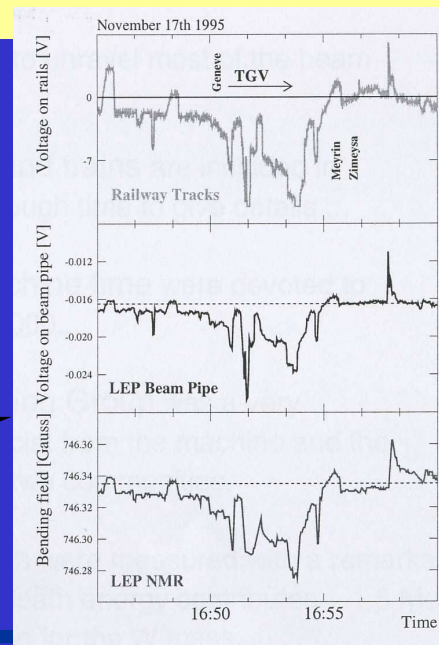
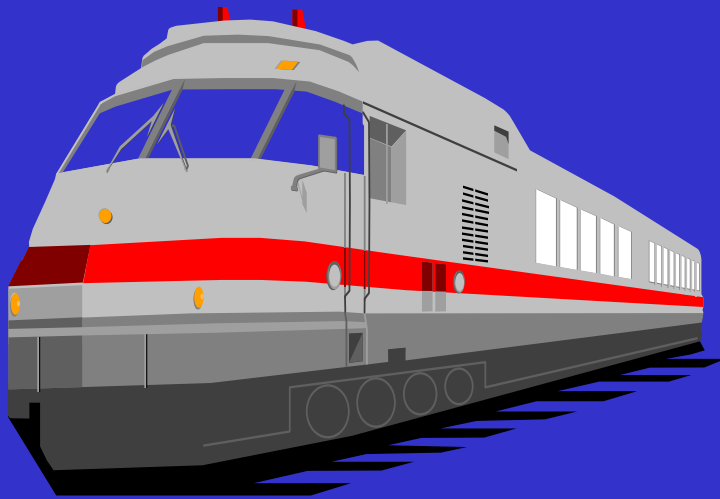
Y, es fácil obtener estos resultados ? qué se tiene que controlar ?

Y después de las mareas ya quedó todo claro ?

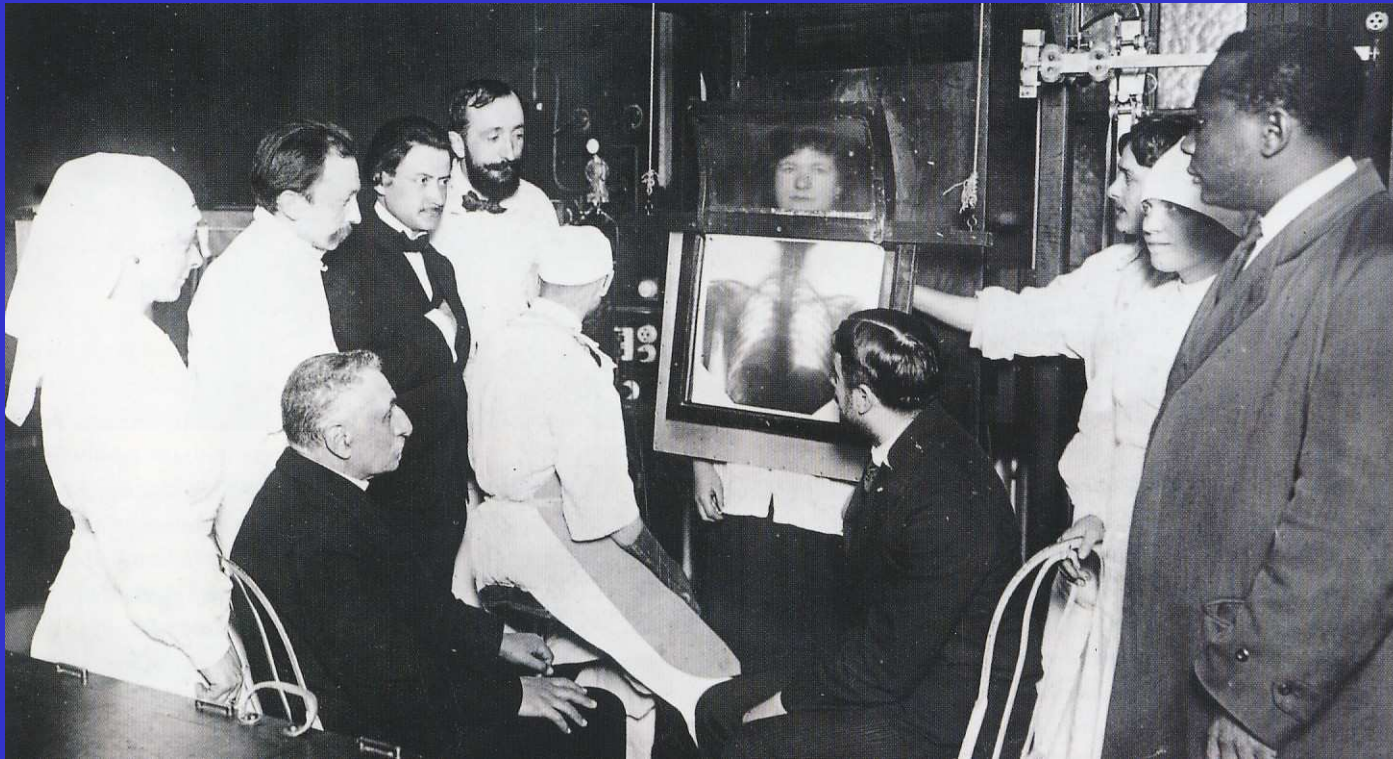
Pues no....

Midiendo el campo magnético de los imanes de LEP se podía saber en que tramo estaba el TGV (Paris-Ginebra)..

Y el lago Lemán.. su nivel.. las lluvias... etc.....

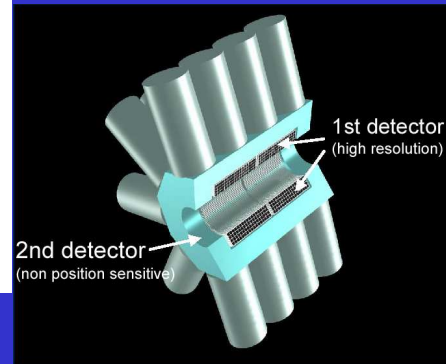
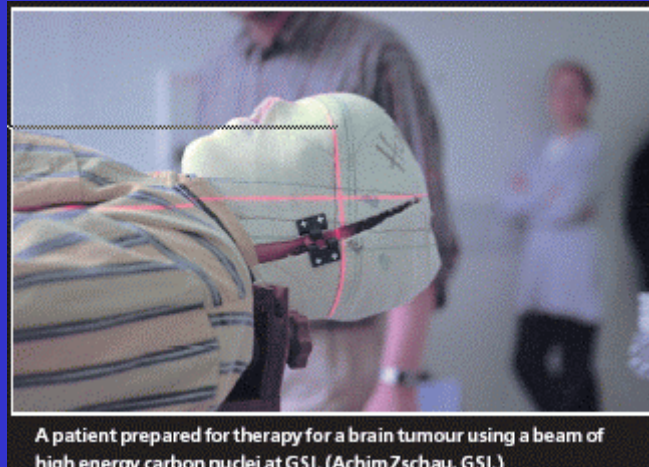
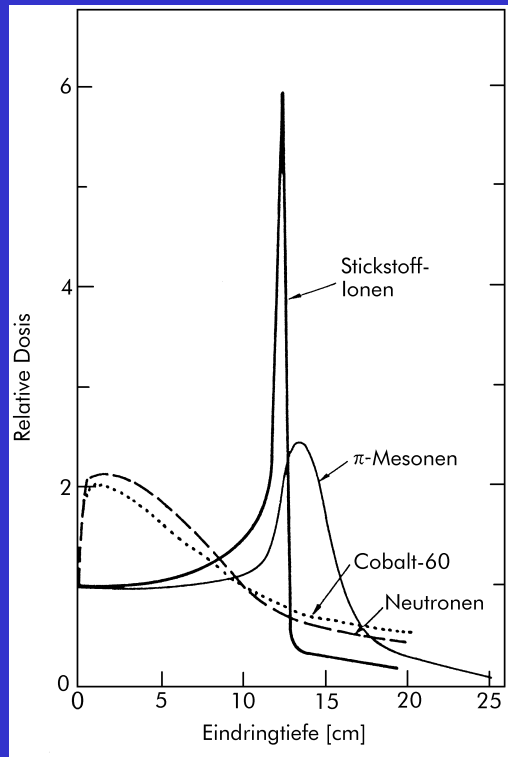


Física Médica..



Con el descubrimiento de los Rayos X (1895) por Röntgen empezó una gran colaboración entre la física sub-atómica y la medicina

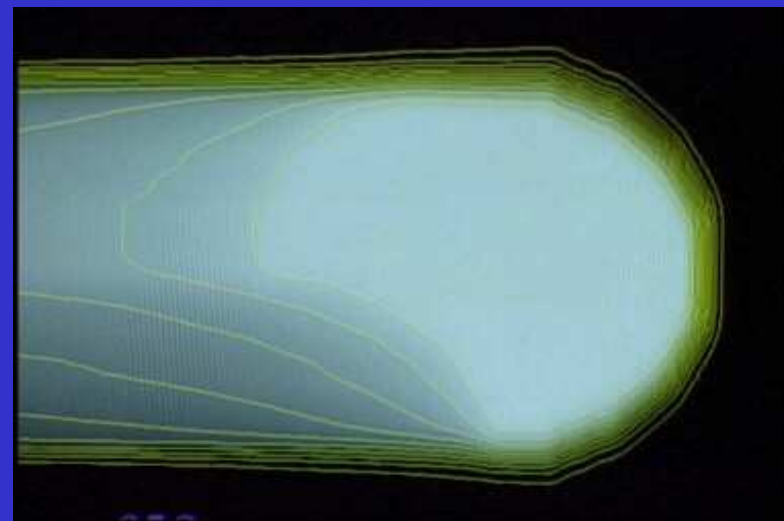
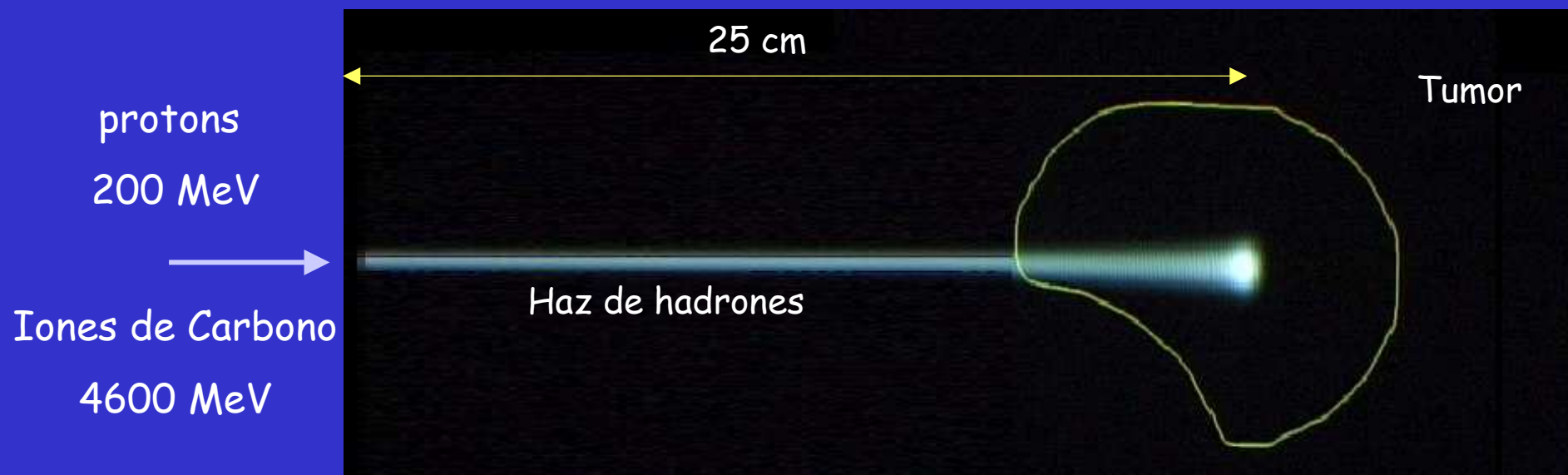
Física Médica: actualidad



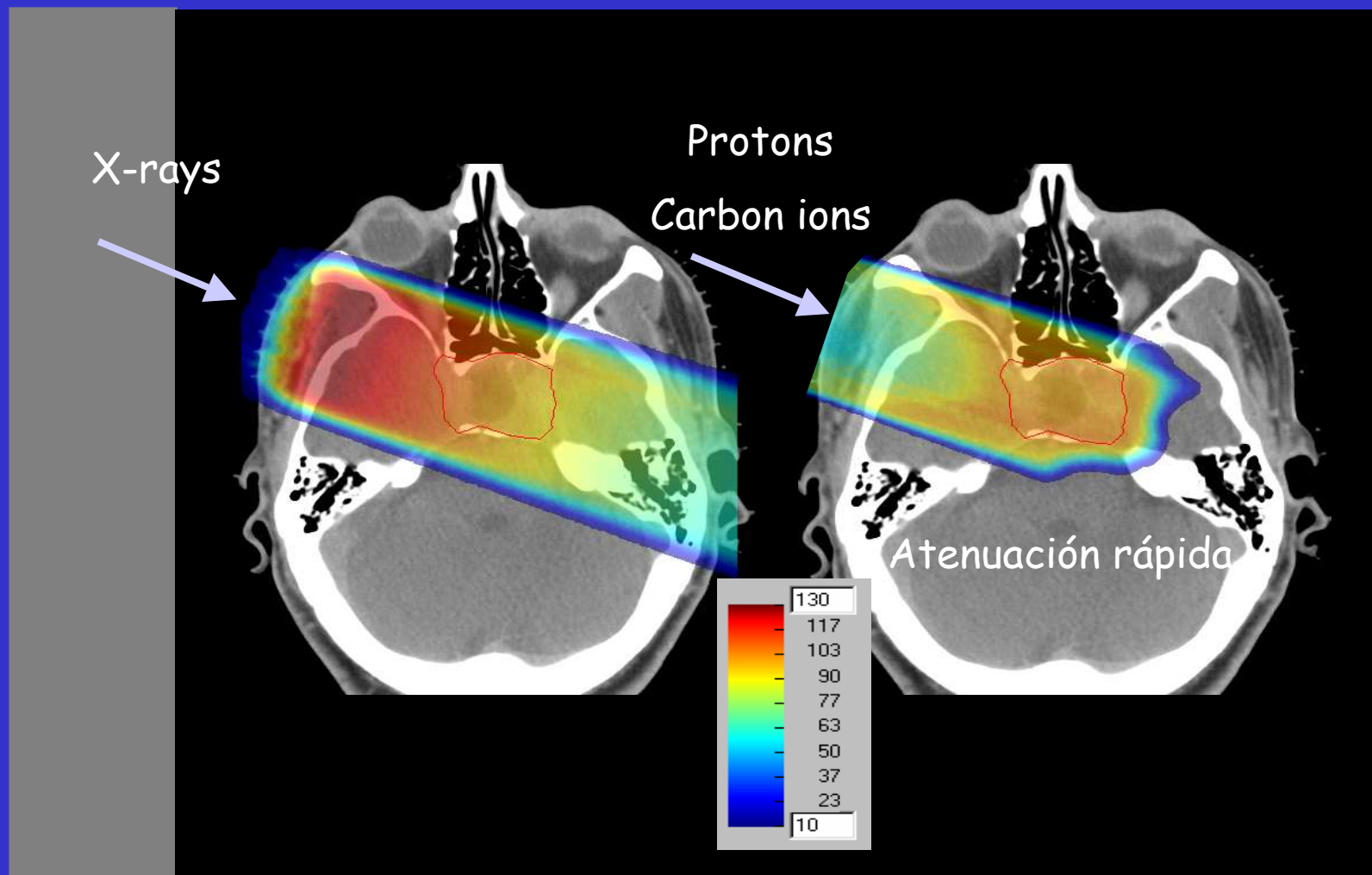
Aplicaciones en medicina:

- Terapia de tumores con iones pesados (precisión $\sim 1\text{mm}$)
- Detección de tumores (precisión $\sim 350\ \mu\text{m}$)

Hadroterapia



Ventajas de la Hadroterapia



“ Un resultado en Física (visión personal) ”

Un número, su incertidumbre y sus unidades

$$m_b(M_Z) = 2.85 \pm \Delta \text{ GeV}/c^2$$

$$\Delta_{\text{sta}} = 0.18 \text{ GeV}/c^2$$

$$\Delta_{\text{exp}} = 0.13 \text{ GeV}/c^2$$

$$\Delta_{\text{mod}} = 0.20 \text{ GeV}/c^2$$

$$\Delta_{\text{teo}} = 0.12 \text{ GeV}/c^2$$

Una buena medida: $\Delta_{\text{sta}} \sim \Delta_{\text{exp}} \sim \Delta_{\text{mod}} \sim \Delta_{\text{teo}}$

- 1) El error estadístico *
- 2) El error sistemático experimental **
- 3) El error sistemático de modelización ***
- 4) El error teórico ***

*) Fácil ; **) Difícil ; ***) Muy Difícil

“¿Cómo se avanza en física de altas energías?”

- a) Construyendo detectores, aceleradores ?
- b) Calculando, modelizando nuevas teorías ?
- c) Analizando datos (interpretación, comparación teoría-experimento, corroboración o descubrimiento) ?
- d) $a+b+c$?
- e) $\overline{a+b+c}$?