

The background of the image is a photograph of a coastal area from an aerial perspective. The foreground shows green agricultural fields and some small buildings. In the middle ground, there's a body of water with a few small boats. The sky is clear and blue.

LEP:

EL VALOR DE LA PRECISIÓN

*Eusebio Sánchez Álvarez
CIEMAT*

CONTENIDOS

- ◆ **La física de partículas pre-LEP**
- ◆ **¿Qué fue LEP?**
- ◆ **Resultados de LEP: El triunfo del Modelo Estándar**
- ◆ **¿Qué hemos aprendido de LEP?**



LA FÍSICA DE PARTÍCULAS PRE-LEP

LEP fue un proyecto de enorme envergadura, y su historia es larga...

- 1976 - Primer estudio sobre la física en LEP
- 1978 - Reunión en Les Houches
- 1979/1980 - Diseño de la máquina
 - Adoptado como nuevo proyecto del CERN
- 1981 - Aprobado por el consejo del CERN
- 1983 - Se eligen los experimentos
- 1986 - Libro amarillo sobre LEP
- 1989 - **INICIO: Primeras colisiones**
Libro amarillo sobre la física del Z
- 1989/2000 - Física
- 2000 - Final...

LA HISTORIA
DE LEP

Se descubre el charm	(1976)
Se descubre el tau	(1975)
No hay quark b	(1978)
Derivada la libertad asintótica	(1973)
Pero no demostrada	(1979)
No hay gluones	(1979)
No hay bosones débiles	(1983)

Se vislumbraba la nueva teoría (el Modelo Estándar), que fue confirmándose hasta el descubrimiento de los W,Z

LA FÍSICA
DE
PARTÍCULAS
CUANDO SE
PROPUSEO LEP

LA FÍSICA DE PARTÍCULAS PRE-LEP

El Modelo Estándar

Las masas de W y Z conocidas al poco %

Sólo límites en sus anchuras

2 generaciones y media establecidas ($t, \nu_t?$)

α_S al 10%

$m_t > 44\text{GeV}$

$N_\nu < 6$ (137)

¿Cuántas generaciones?

δm_Z $\pm 50 \text{ MeV}$

$\delta \Gamma_Z$ $\pm 50 \text{ MeV}$

$\delta(m_W/m_Z)$ $\pm 2 \times 10^{-3}$

$\delta \sin \theta_W$ ± 0.002

δN_ν ± 0.2

No había una discusión real sobre lo que era posible esperar acerca del quark top y el bosón de Higgs

LA FÍSICA
DE PARTÍCULAS
AL COMIENZO
DE LEP

LO QUE SE
ESPERABA DE
LEP(1986,1989)

¿QUÉ FUE LEP?



¿QUÉ FUE LEP?

La máquina más grande jamás construida por el ser humano

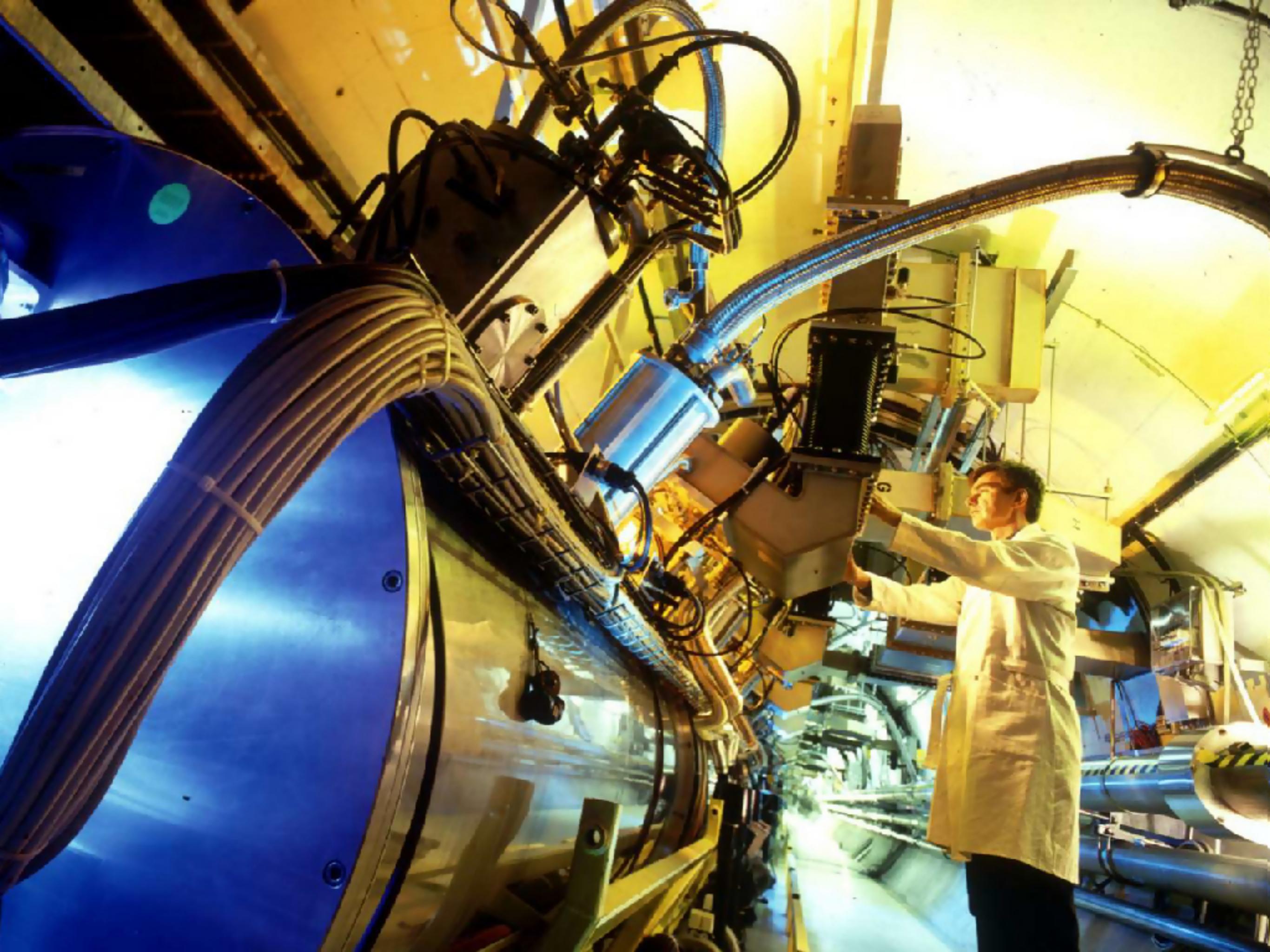
El mayor acelerador de partículas de la historia

LEP
"Large Electron Positron collider"
Colisionador electrón-positrón.

Situado en la frontera entre Francia y Suiza, cerca de Ginebra.

26.7 km de circunferencia:
14% mayor que la línea 6 de metro.





¿QUÉ FUE LEP?

Para construirlo se excavaron 1.4 millones de metros cúbicos de suelo, durante los 6 años que duró la construcción.

La longitud del túnel (26.7 km) se conoce con una precisión mejor que 1 cm.

Está a una profundidad que varía entre 50 y 175 m.

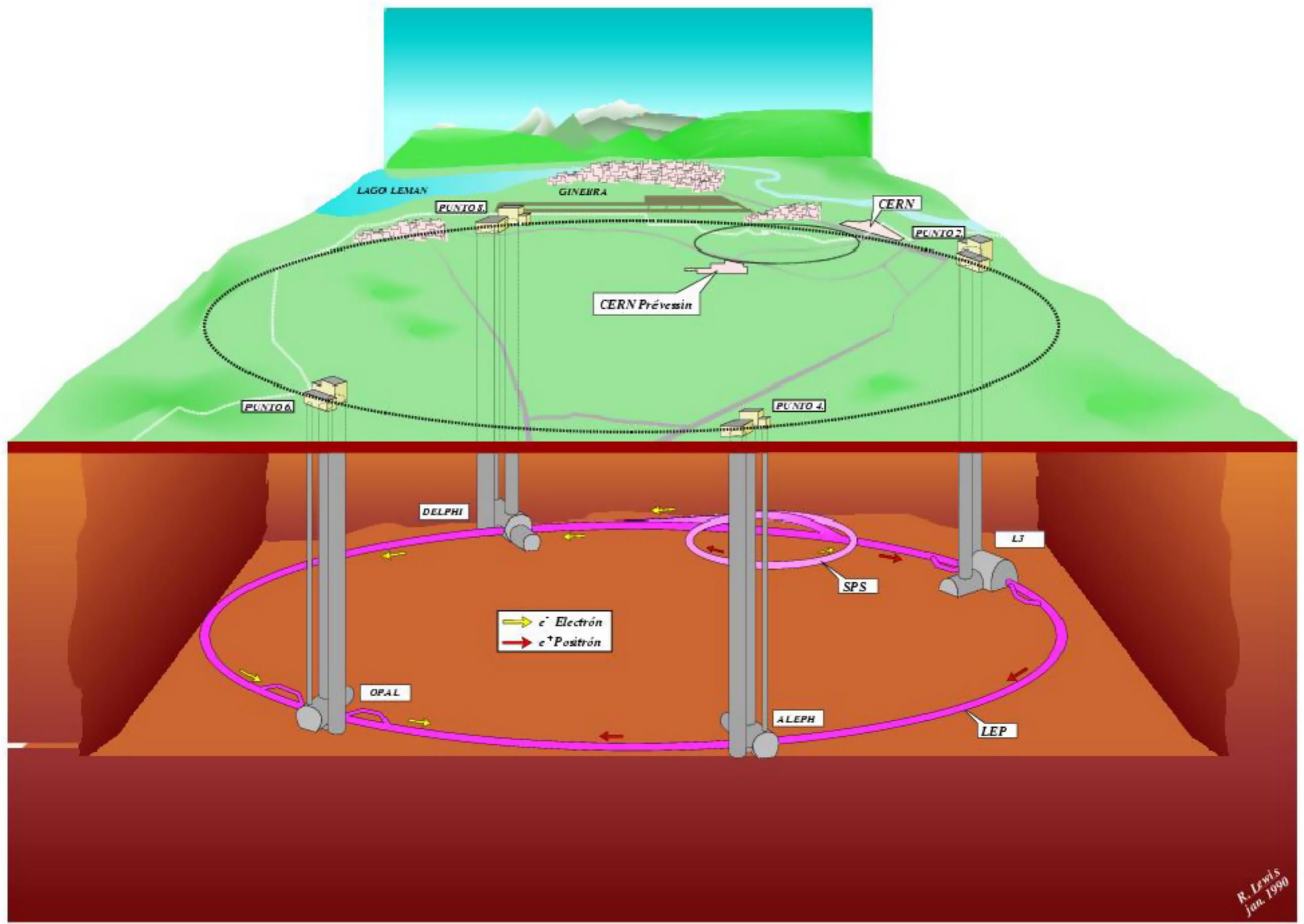
Los electrones y positrones recorrían el anillo completo unas 11200 veces por segundo.

La sección de los haces colisionantes era de 10x250 micras a las energías del Z.

La velocidad de los electrones y positrones en el tubo de LEP I era $c-19$ km/h.

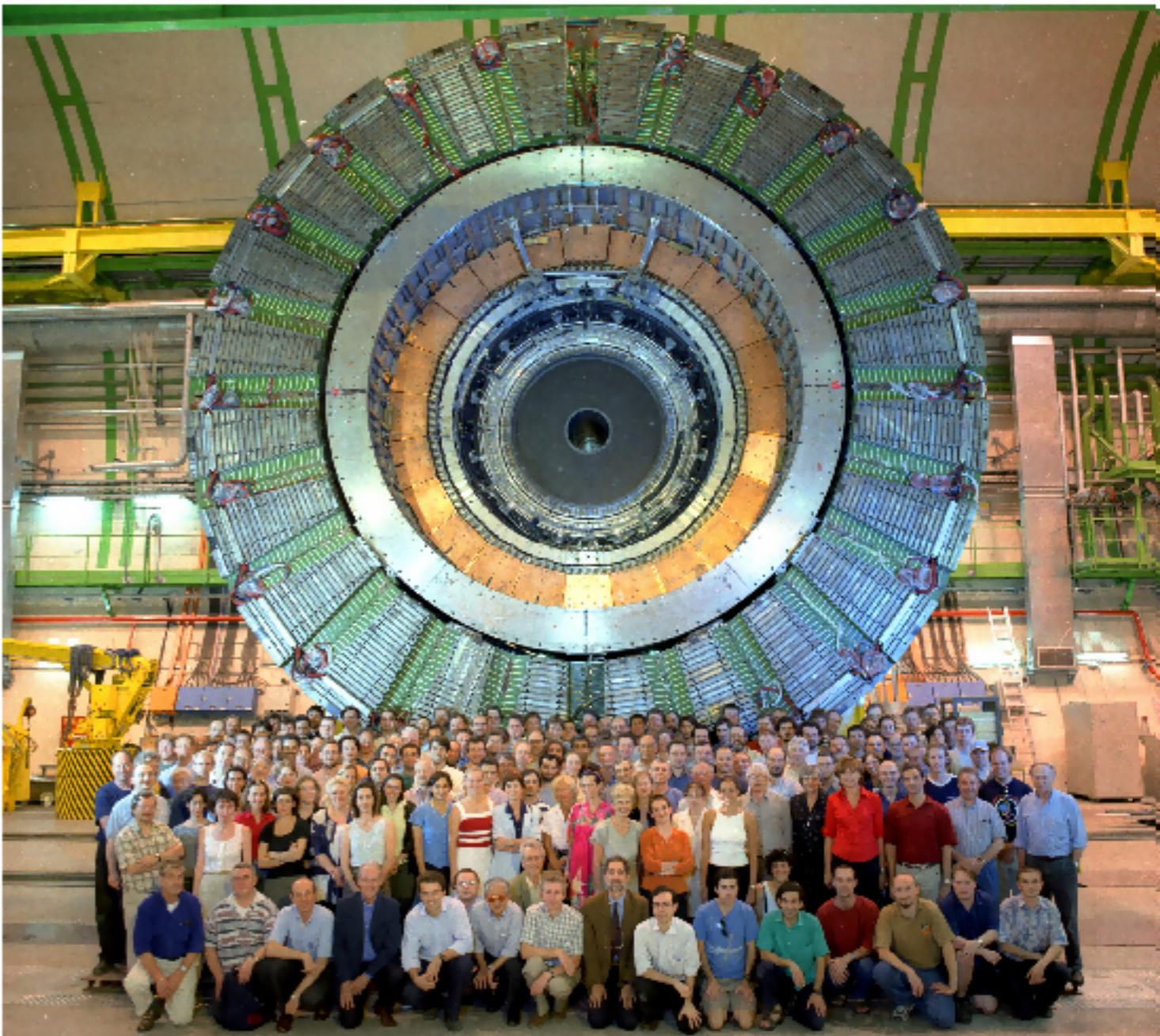
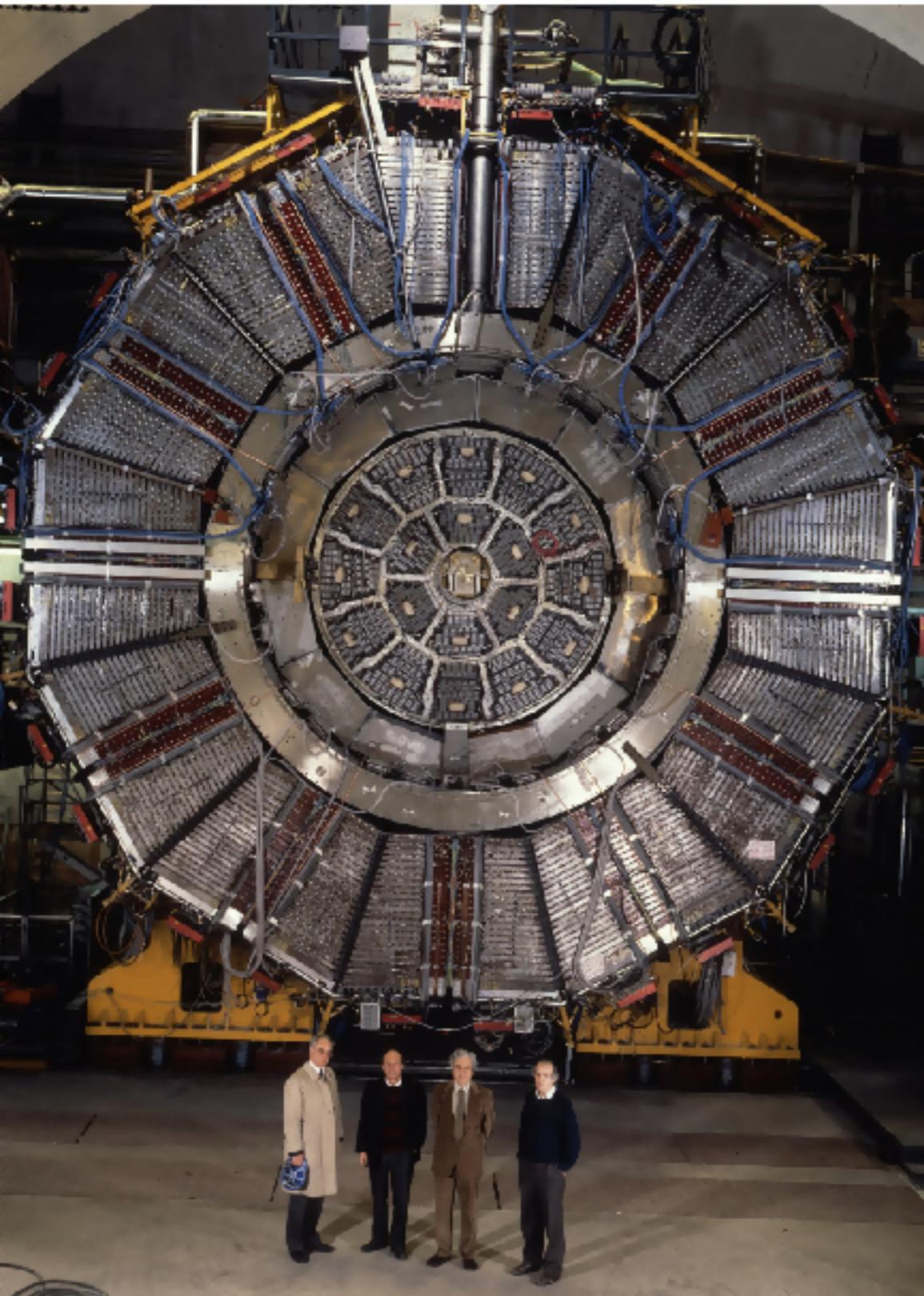
En una carrera a la Luna, la luz gana a un electrón de LEP por 20 cm (después de 384500 km!)

La energía del haz de LEP está por debajo del 1% de la energía de un mosquito. Pero un mosquito a la velocidad de un electrón de LEP tendría 10000 veces la energía de todas las bombas nucleares del arsenal terrestre.



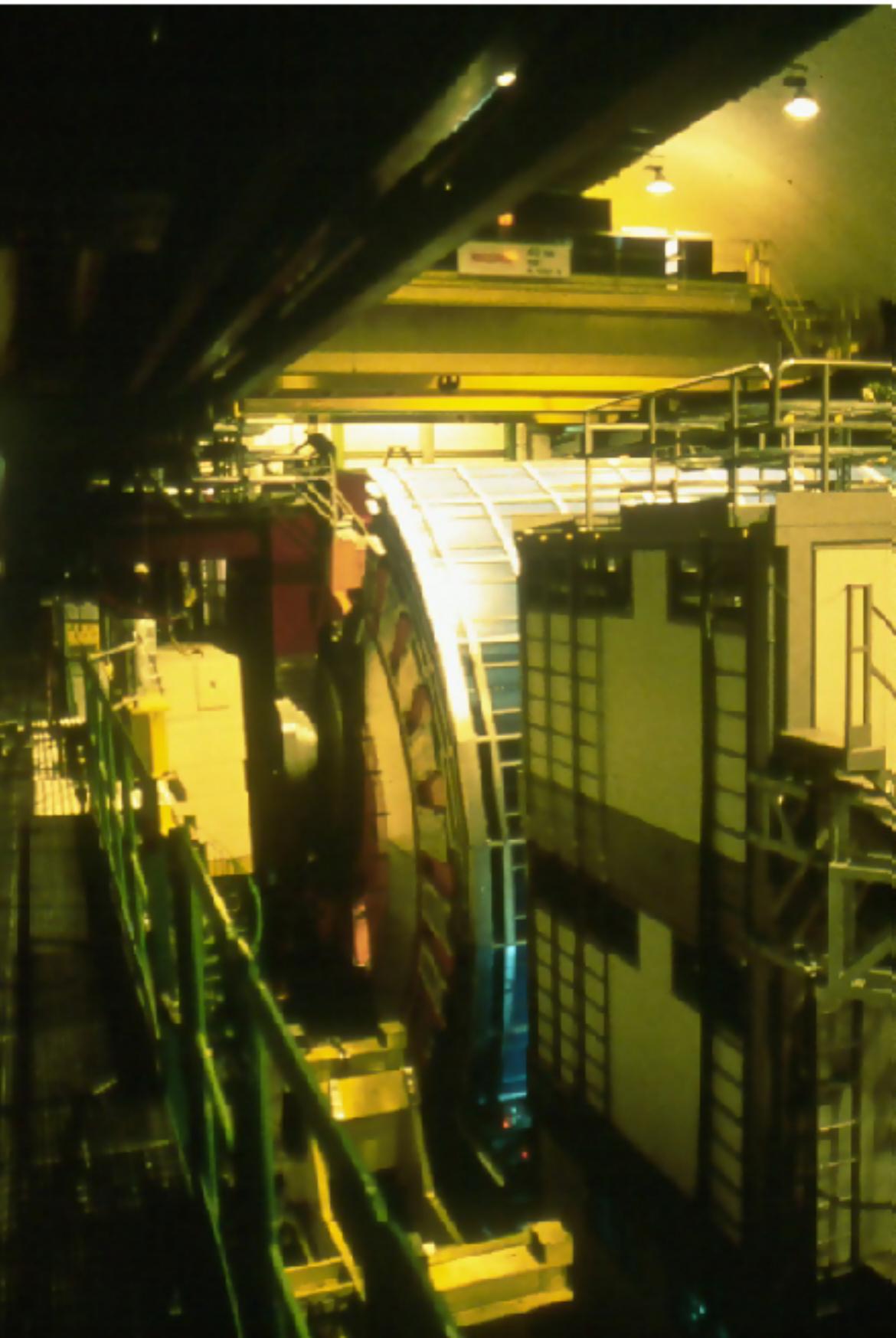
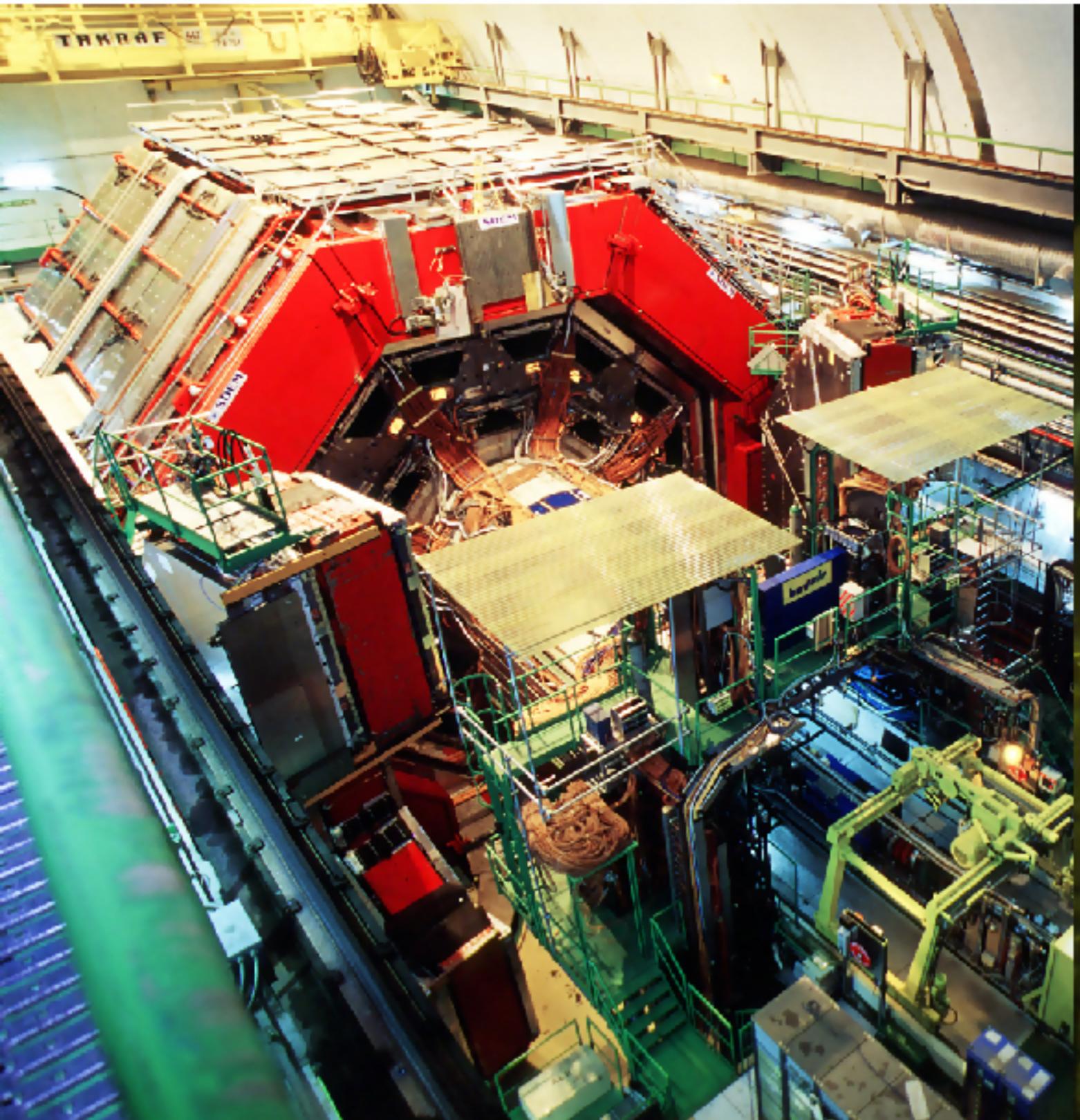
¿QUÉ FUE LEP?

4 Detectores (las catedrales escondidas):ALEPH, DELPHI

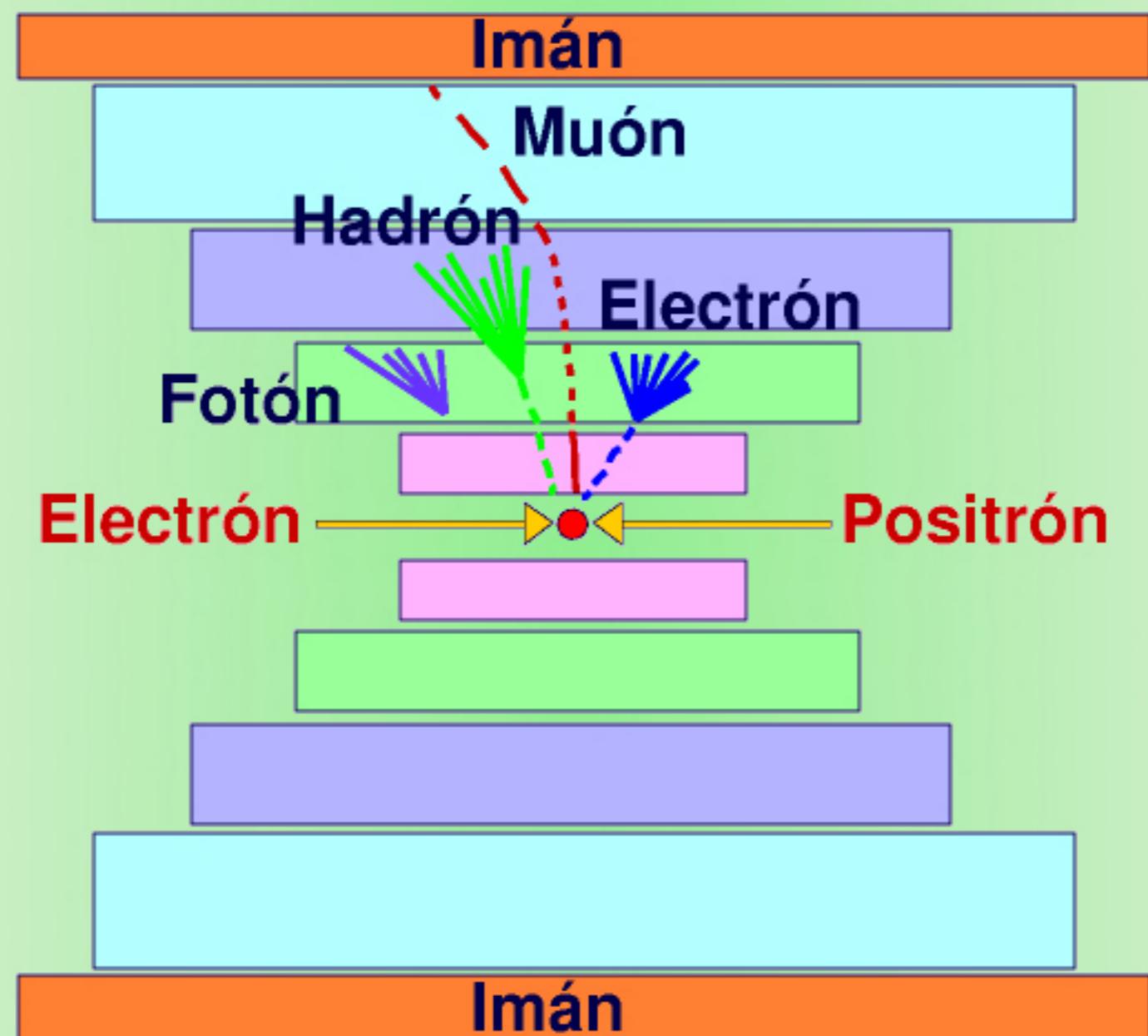


¿QUÉ FUE LEP?

4 Detectores (las catedrales escondidas):L3, OPAL



EL DETECTOR GENÉRICO

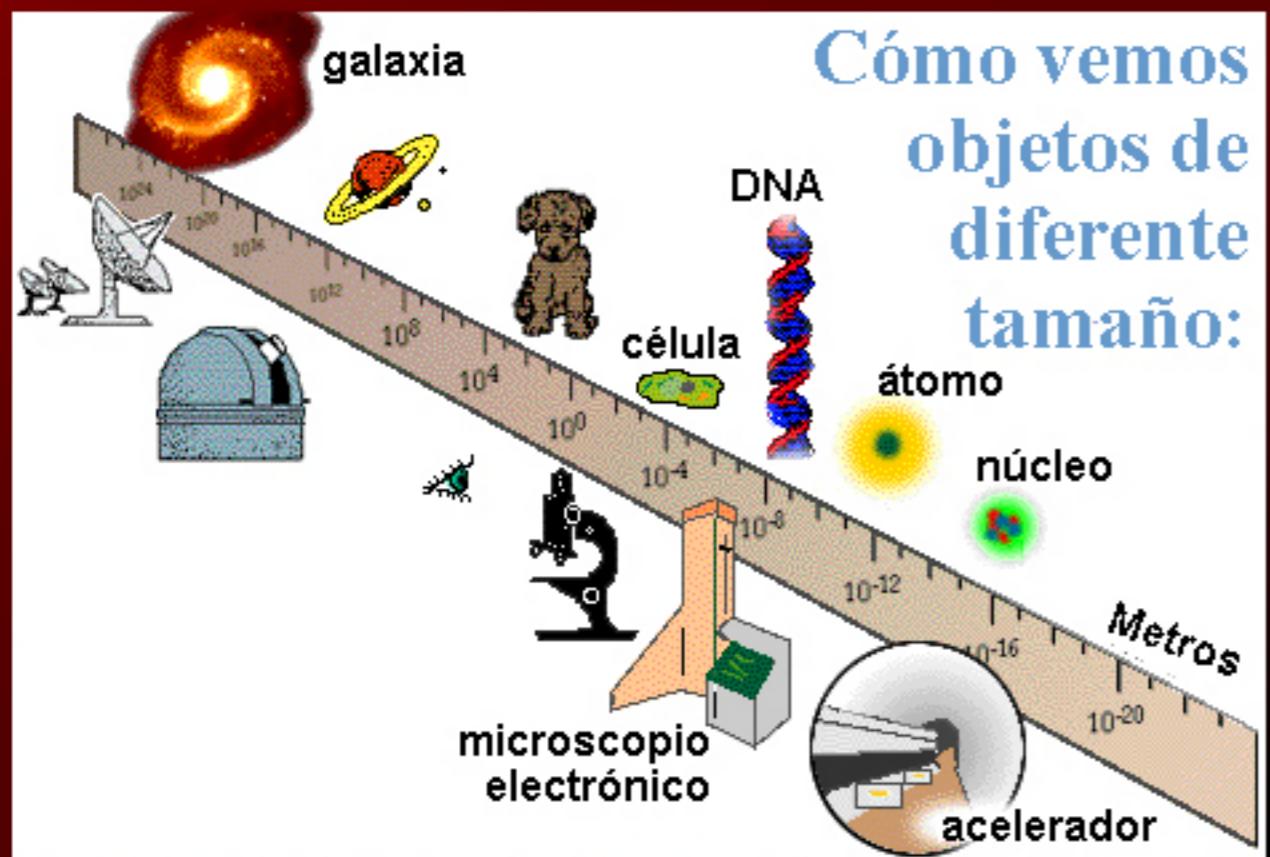


Estructura en capas

Permite distinguir los diferentes tipos de partículas.

Participación española en ALEPH (Barcelona), DELPHI (Valencia, Santander) y L3 (Madrid)

¿POR QUÉ?



Cómo vemos
objetos de
diferente
tamaño:

Ver átomos: eV
Ver núcleos: MeV
**Ver protones y
neutrones: GeV**

Para continuar el viaje al espacio interno, y buscar los constituyentes últimos de la materia, se necesitan aceleradores cada vez más poderosos y detectores cada vez más grandes.

¿POR QUÉ?

Pero LEP también fue...

- ◆ **¡¡¡La WEB (WWW)!!!**
- ◆ **Técnicas de ultravacío en 27 km**
 $(10^{-15} atm)$
- ◆ **Superconductividad a gran escala**
- ◆ **La primera explotación de microstrips y micropixels**
- ◆ **El uso masivo de cristales centelleadores (BGO) allanando el camino a su uso en medicina (PET, TAC...)**
- ◆ **La colaboración a nivel mundial de unos 1500 físicos de los 4 experimentos combinando resultados, de los teóricos...**



H. Dierck



Eduard Glöss



P. J.



Børge Stromsmo



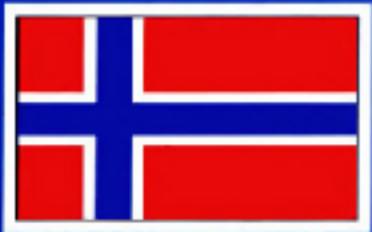
Ueli Baumgärtner



Åke Lindqvist



Fernando



Haugland



Condominio



Hausen



Juan M. Marí



Emmanuelle Hélène



John Major



Efthimios

En ce jour 13 novembre 1989,

les Représentants

des 14 Etats Membres du CERN

ont, par leurs signatures, ouvert

l'ère d'expérimentation scientifique

avec

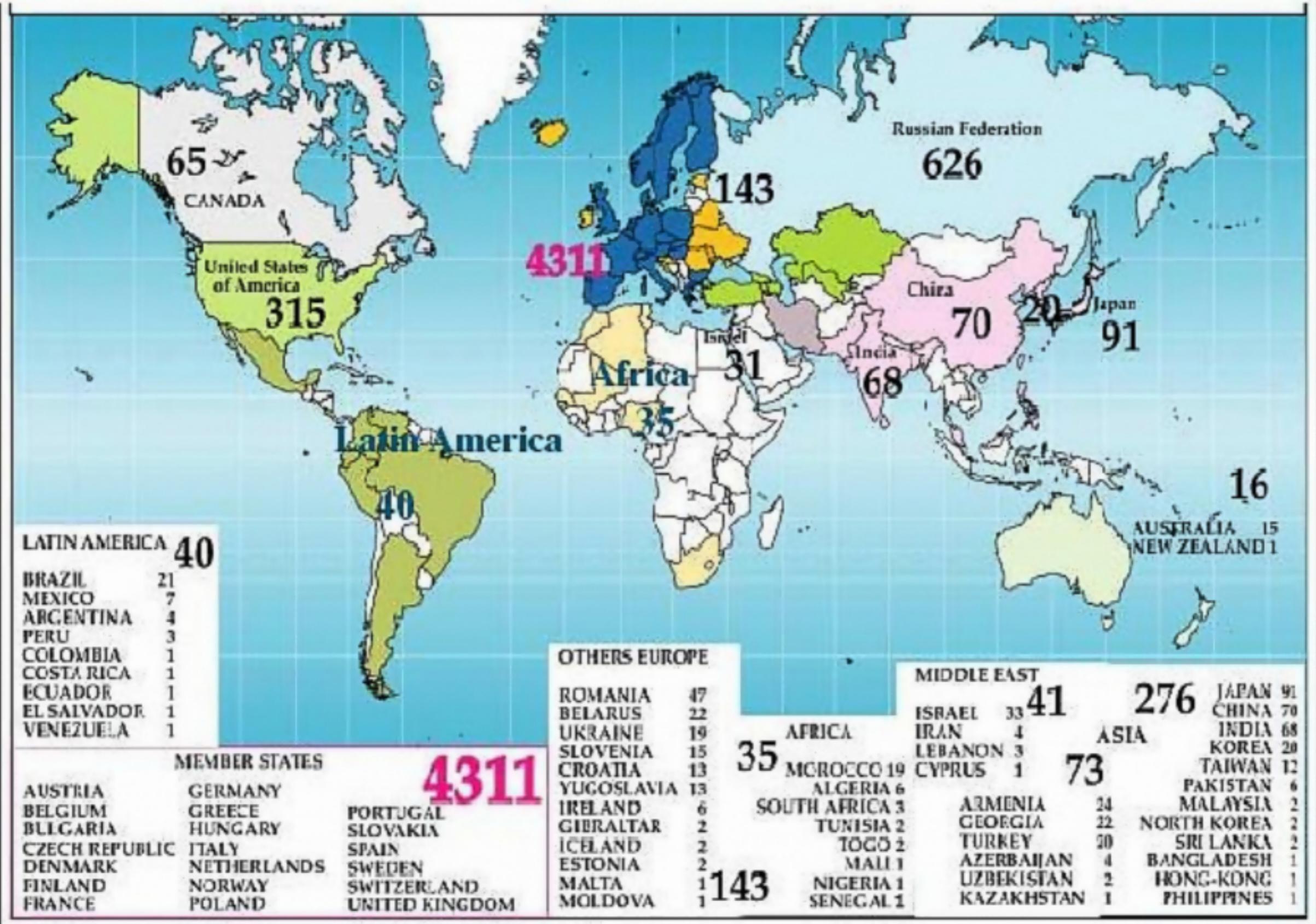
le collisionneur du LEP.

The Twenty Member States of CERN



Member States (Dates of Accession)

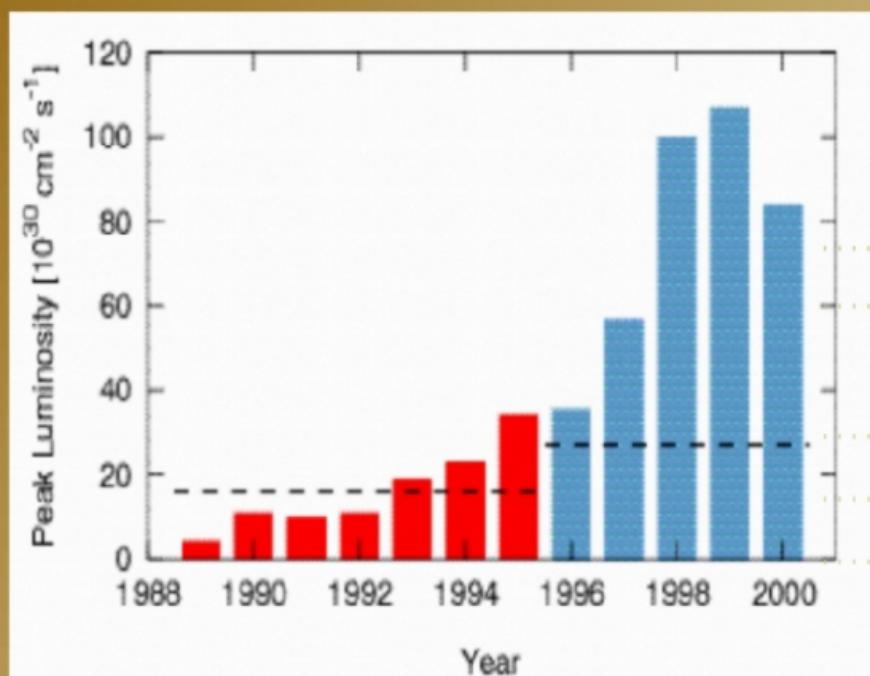
	AUSTRIA (1959)		DENMARK (1953)		GREECE (1953)		NORWAY (1953)		SPAIN (1/1961-12/1968-1/1983)
	BELGIUM (1953)		FINLAND (1991)		HUNGARY (1992)		POLAND (1991)		SWEDEN (1953)
	BULGARIA (1999)		FRANCE (1953)		ITALY (1953)		PORTUGAL (1986)		SWITZERLAND (1953)
	CZECH FR (1993)		GERMANY (1953)		NETHERLANDS (1953)		SLOVAK FR (1993)		UNITED KINGDOM (1953)



RESULTADOS

EXPECTATIVAS Y RESULTADOS DEL ACCELERADOR

Parámetro	Esperado (diseño)	Conseguido
	55/95 GeV	45/105 GeV
Corriente en el bunch	0.75 mA	1.00 mA
Corriente total (haz)	6.0 mA	8.4/6.2 mA
Máxima luminosidad	16/27 $\times 10^{30} \text{ cm}^{-2} \text{s}^{-1}$	23/100 $\times 10^{30} \text{ cm}^{-2} \text{s}^{-1}$



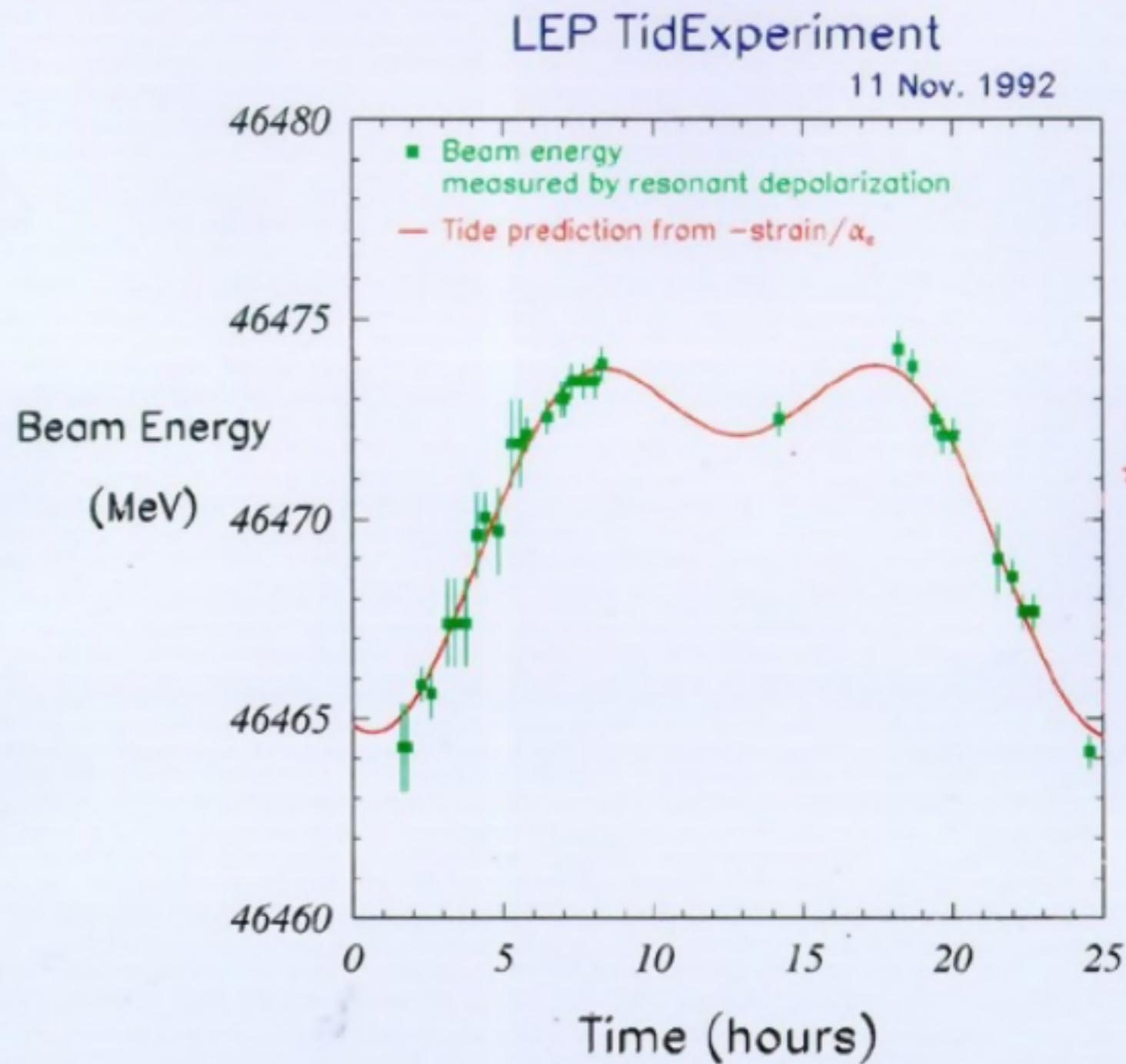
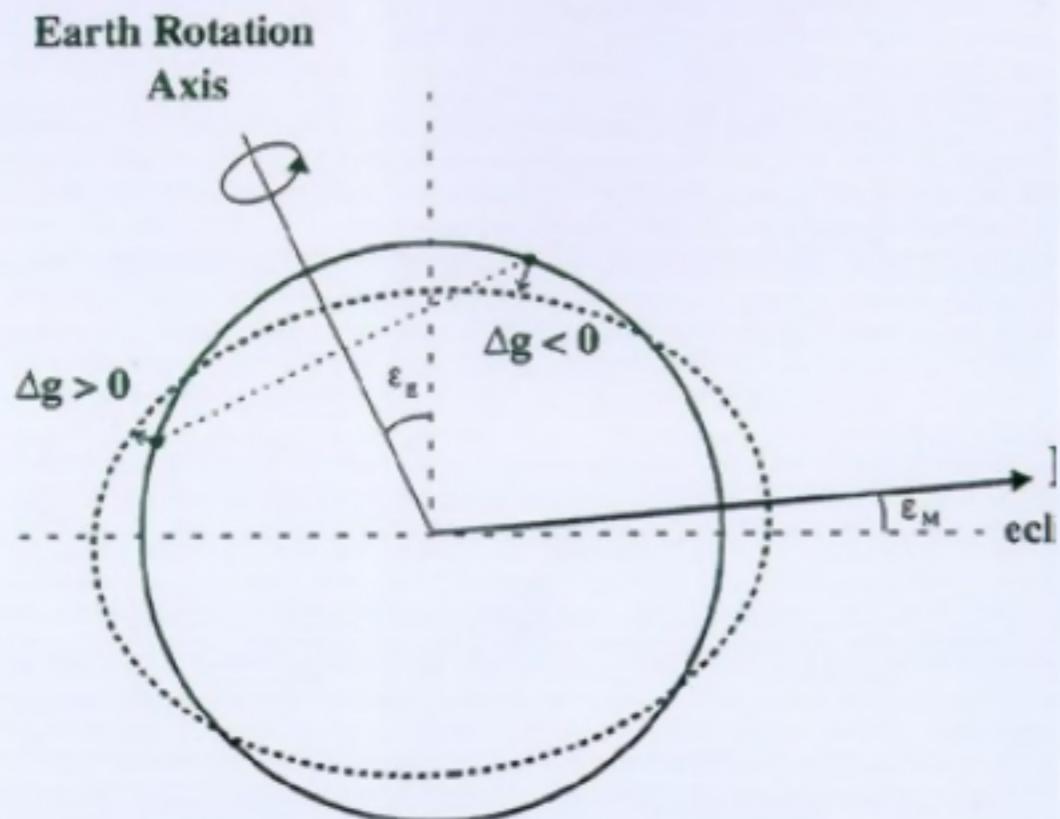
El rendimiento del acelerador fue superior a lo esperado.

Las expectativas eran conservadoras y fueron ampliamente superadas.

LO INESPERADO

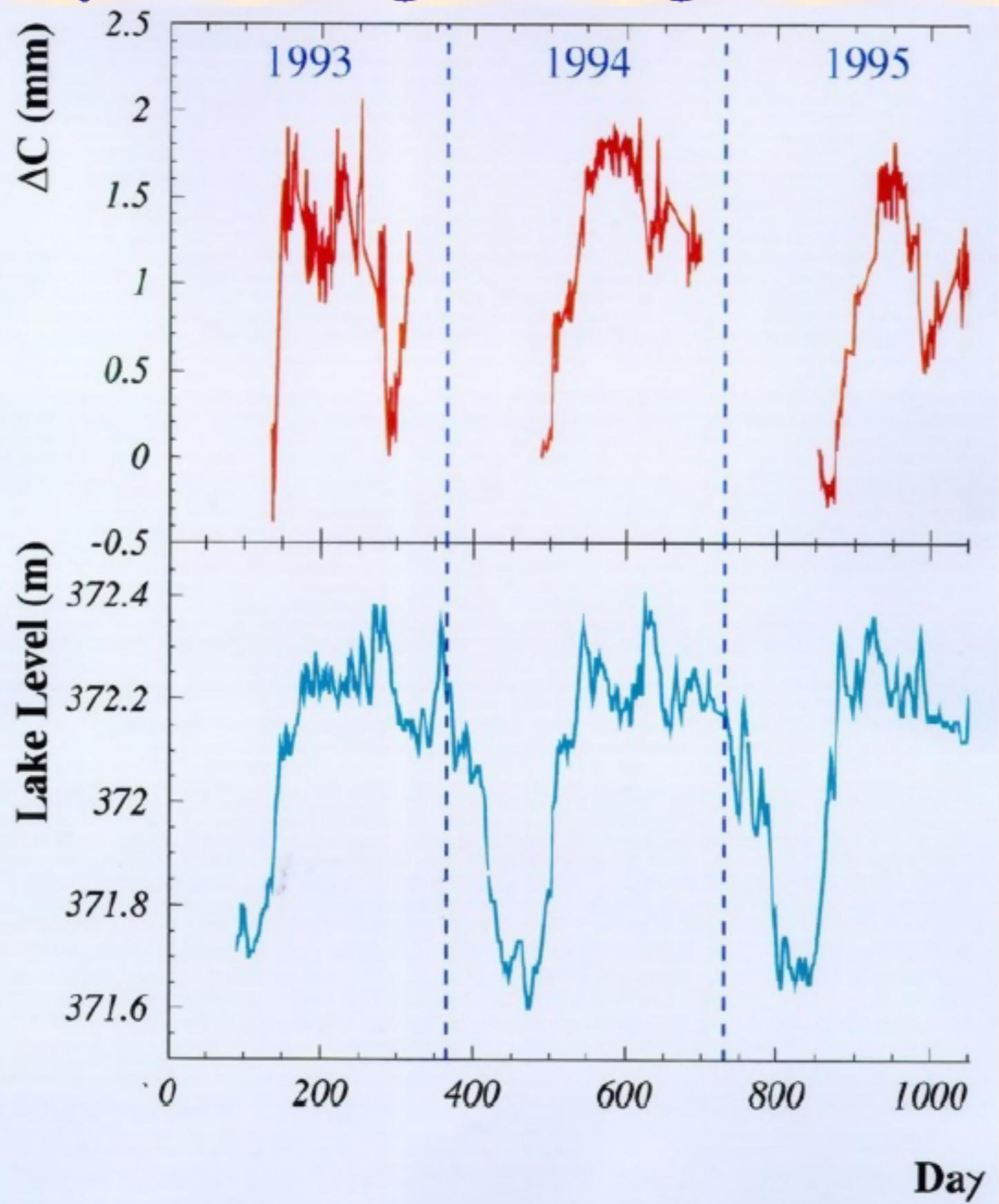
El acelerador fue una herramienta tan sensible y precisa que se veía influenciado por...

¡Las fases de la Luna a través de las mareas!



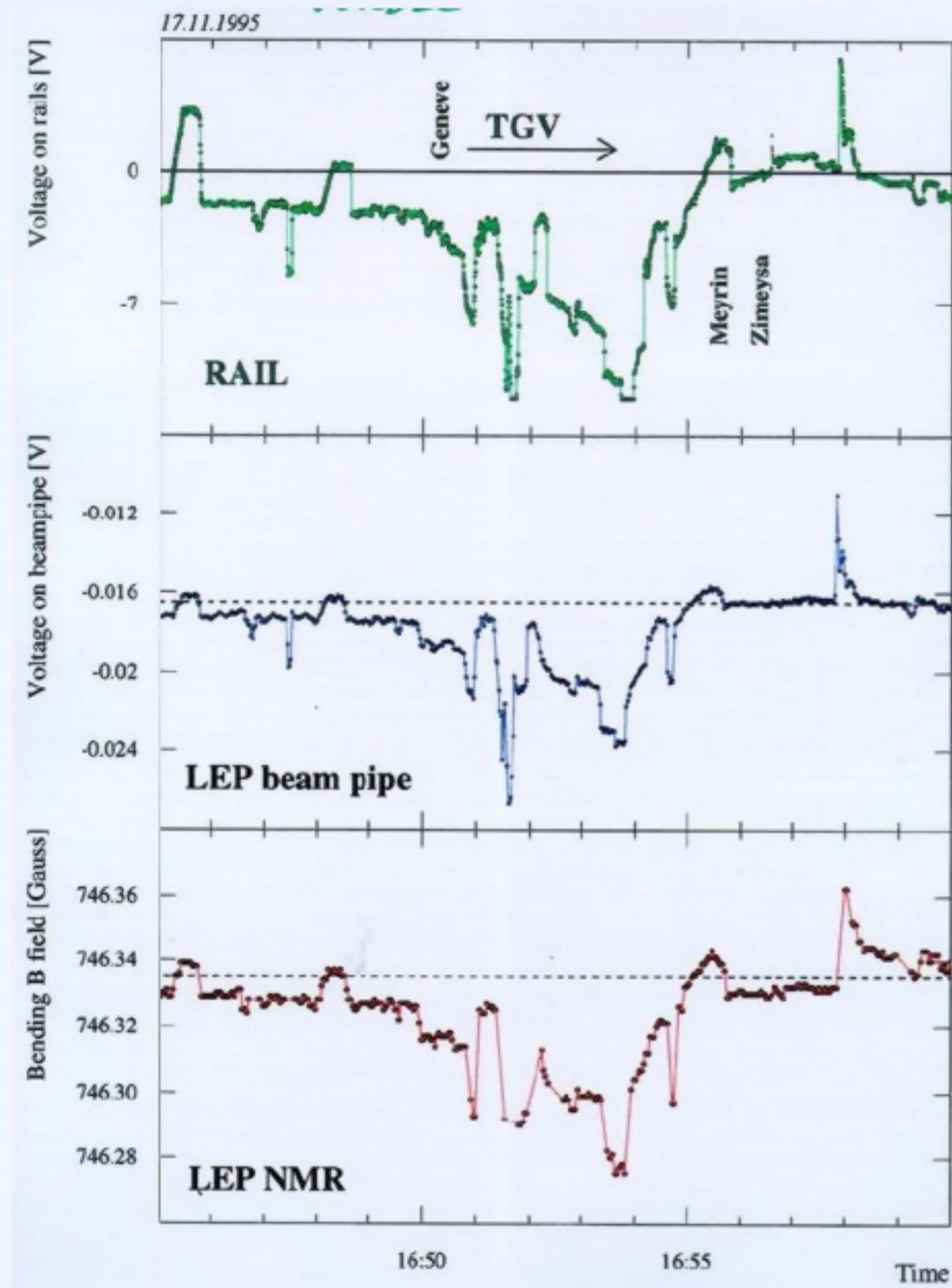
LO INESPERADO

¡El nivel del agua en el lago Leman!

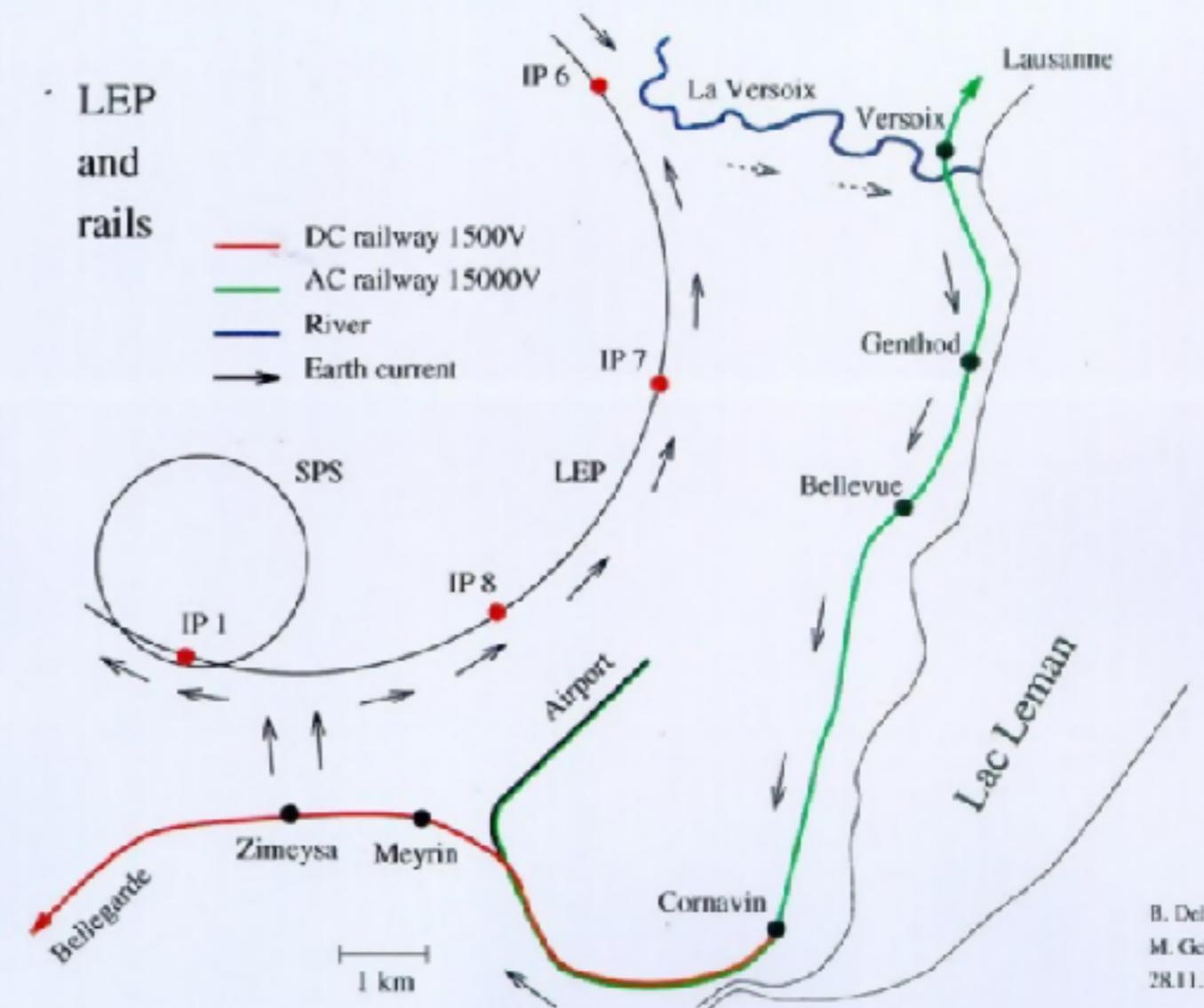


LO INESPERADO

¡El paso del tren de alta velocidad!

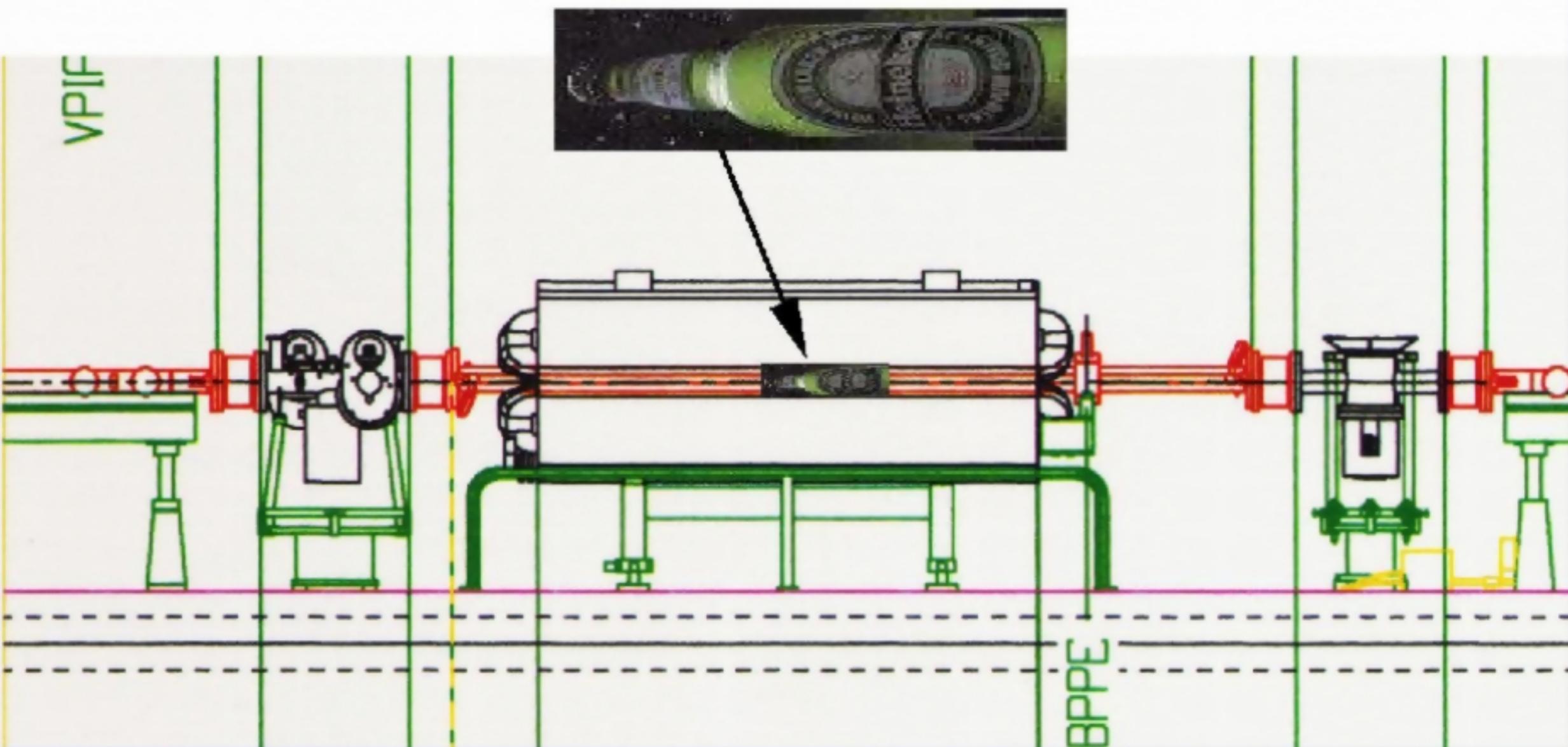


LEP
and
rails



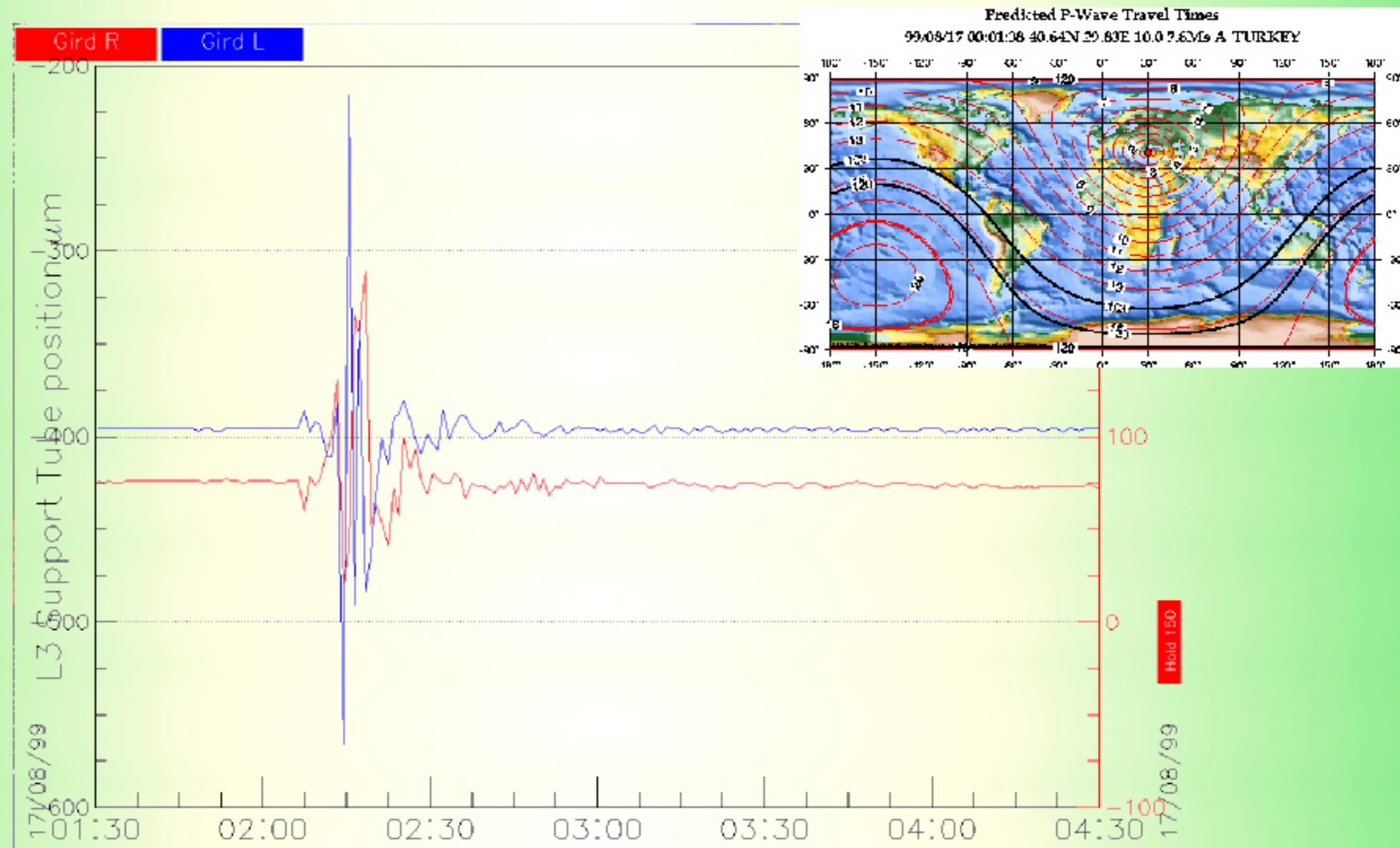
LO INESPERADO

Pero lo más inesperado ocurrió el año 1995...

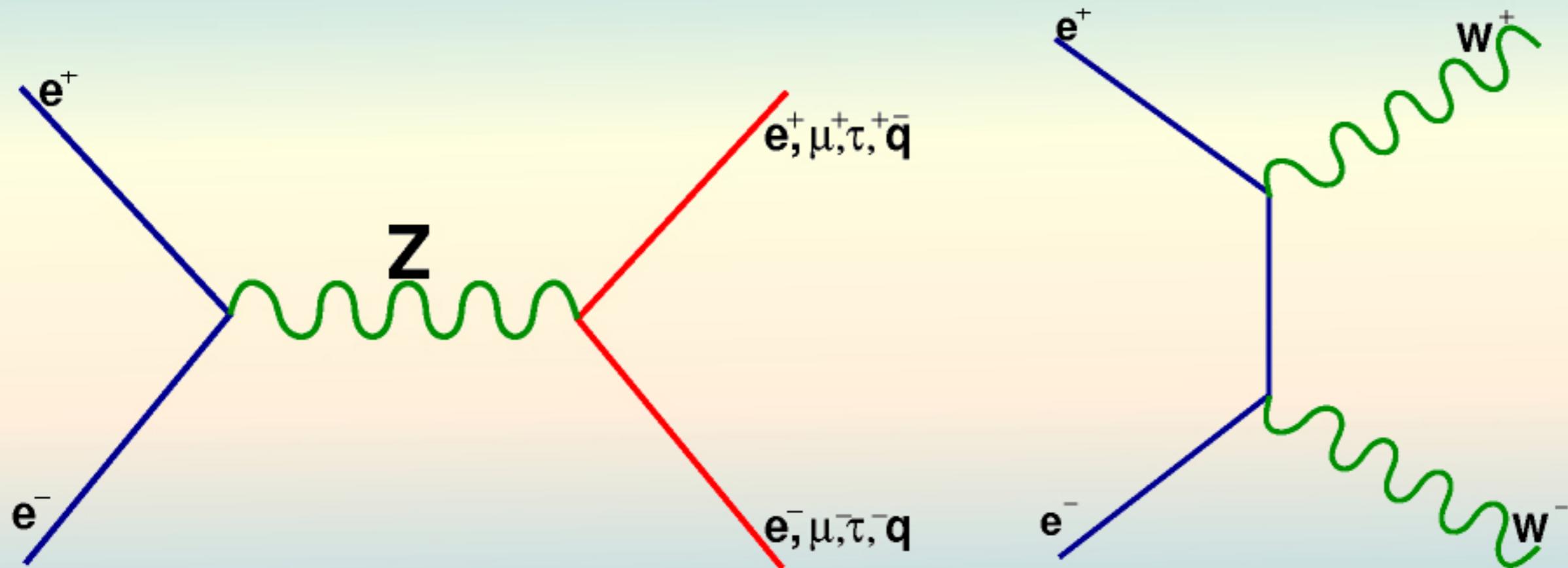


LO INESPERADO

Una prueba más de la sensibilidad de la máquina:



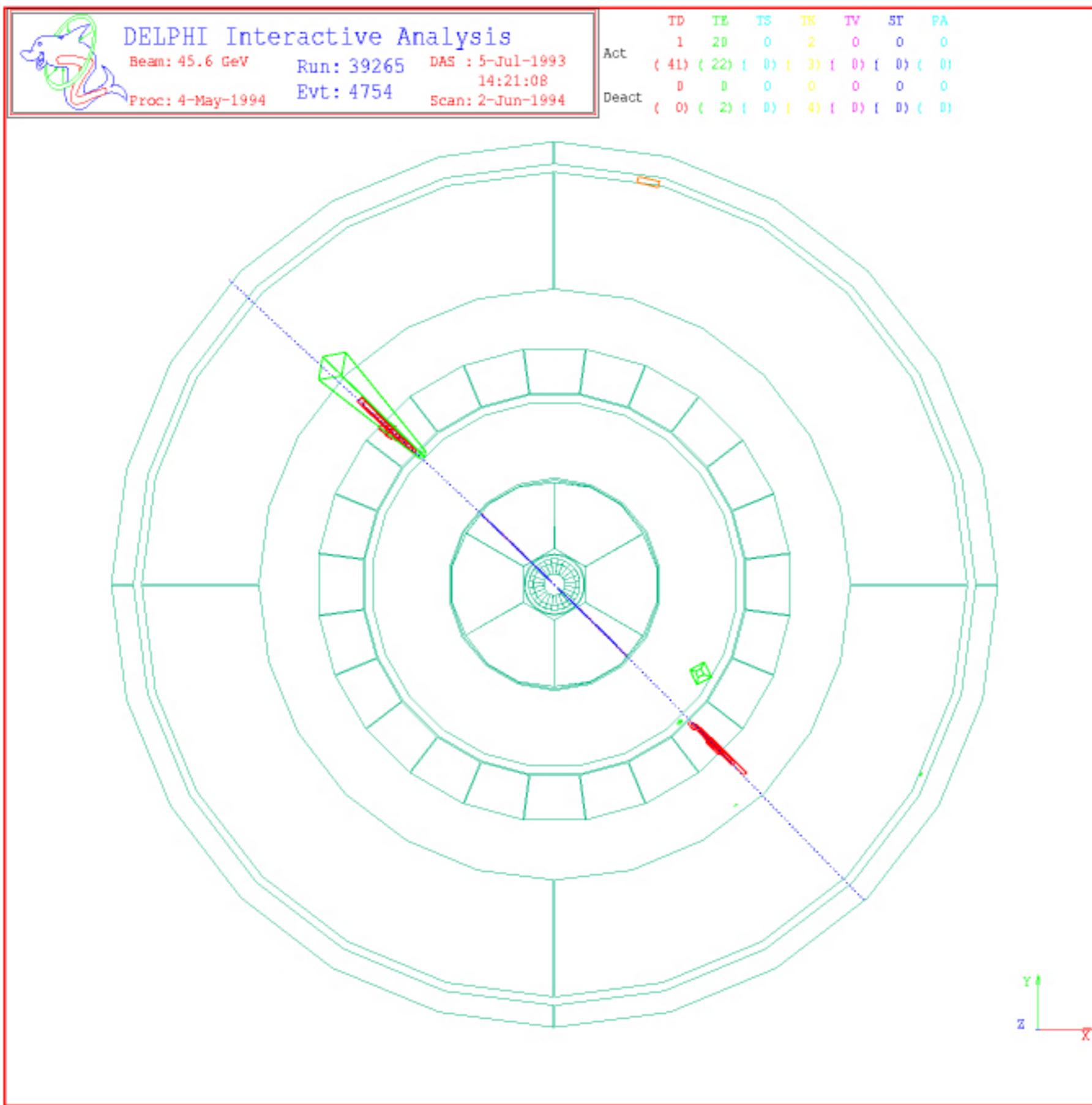
Terremoto en Turquía (1999) detectado en L3.



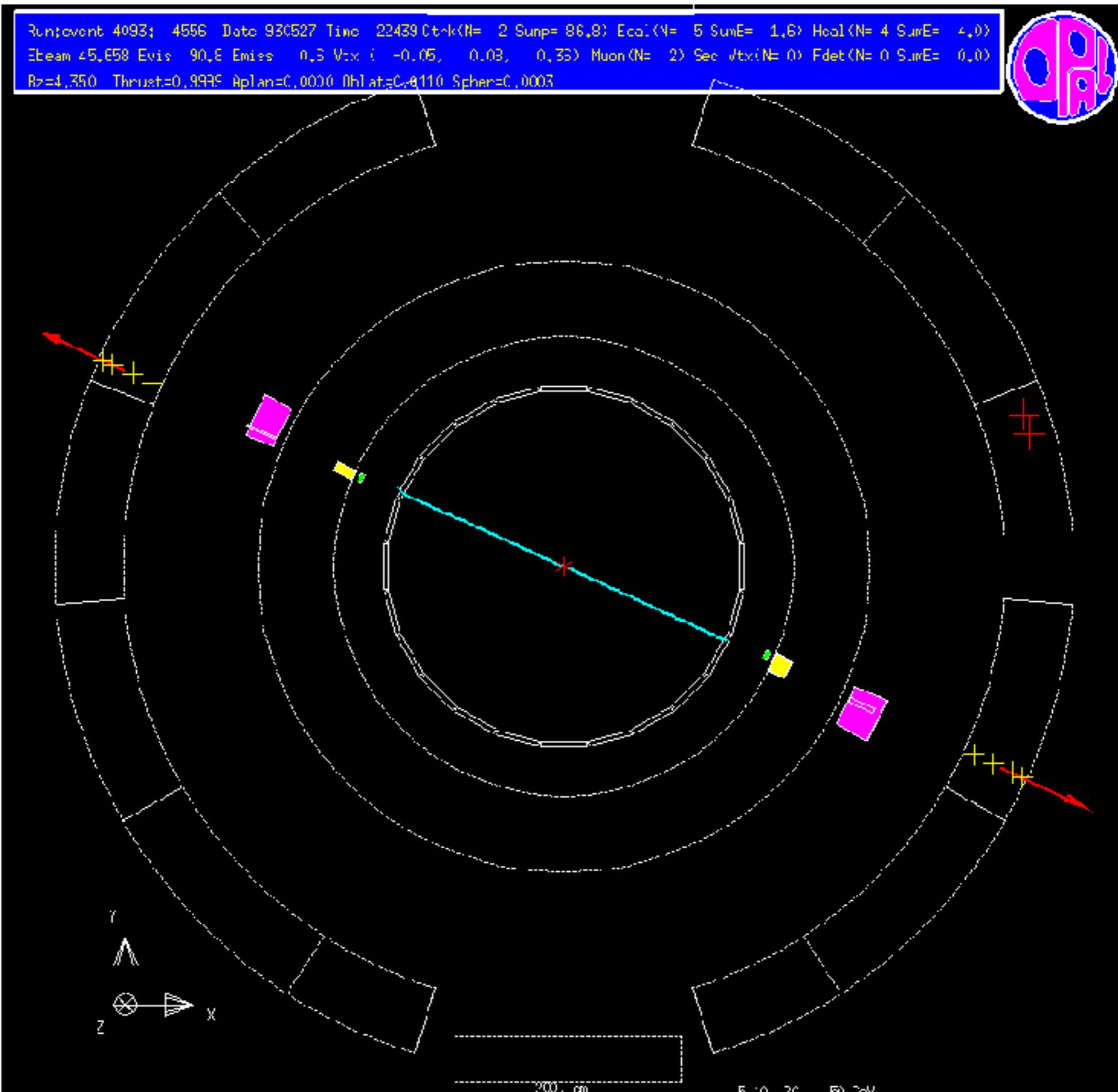
**2 etapas: LEP-1 donde la energía era la masa del Z
LEP-2 con energía para producir pares de W**

**Estudios de alta precisión de las fuerzas electrodébil y fuerte
Estudio de la naturaleza cuántica de las partículas
Búsquedas de nuevas partículas
EL MODELO ESTÁNDAR**

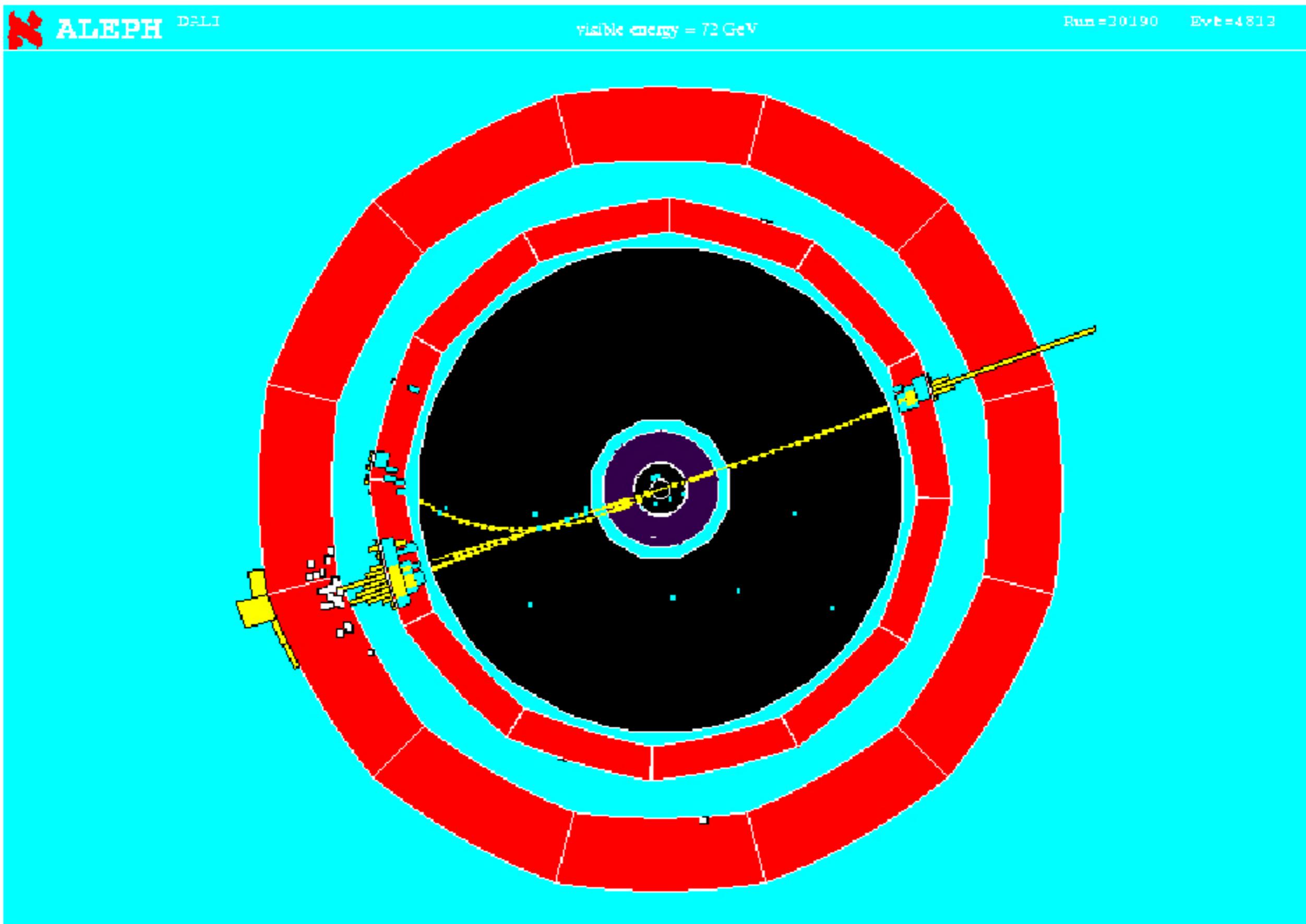
LA FÍSICA EN LEP: Suceso electrón-positrón



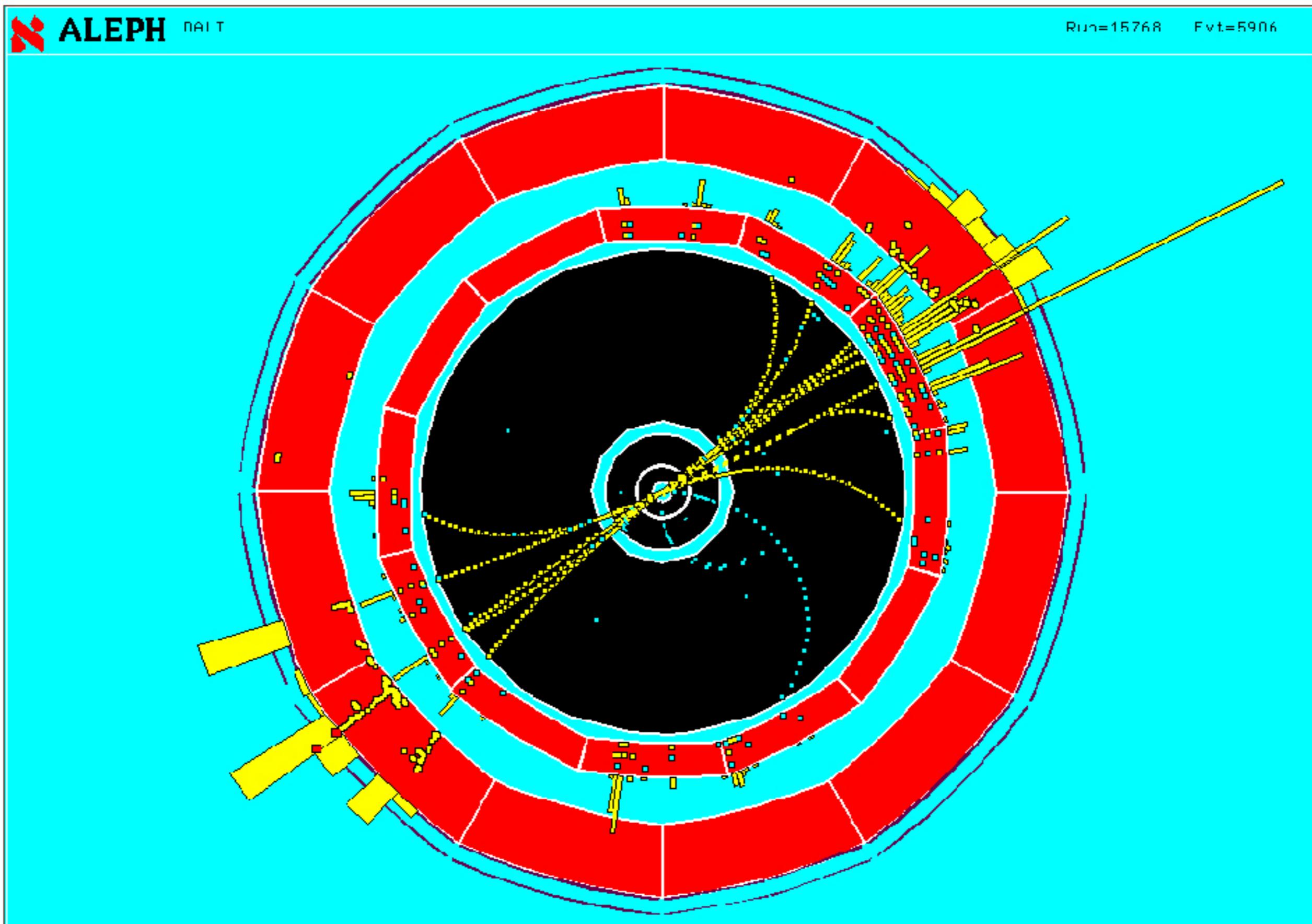
LA FÍSICA EN LEP: Suceso muon-antimuon



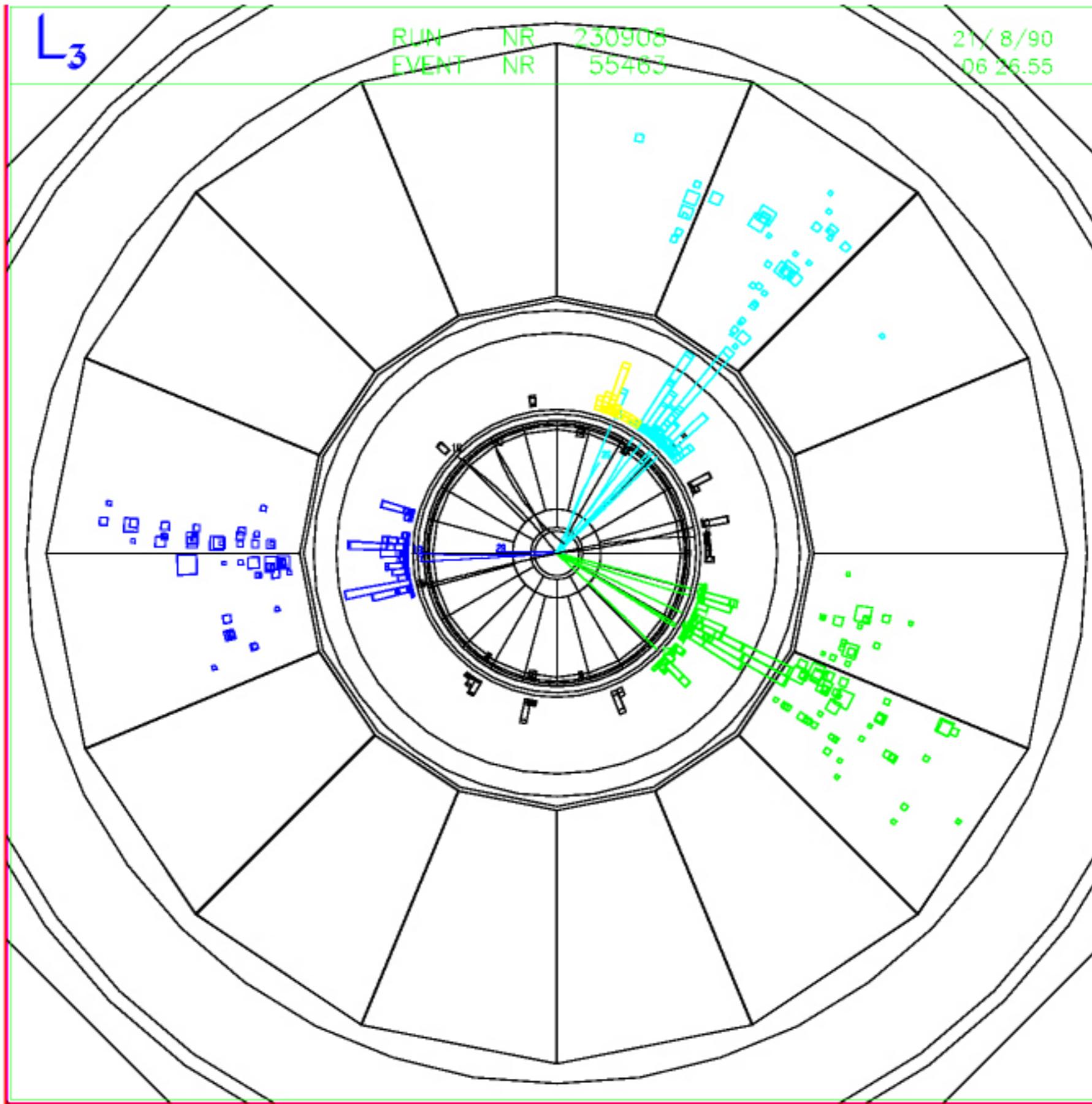
LA FÍSICA EN LEP: Suceso tau-antitau



LA FÍSICA EN LEP: Suceso quark-antiquark

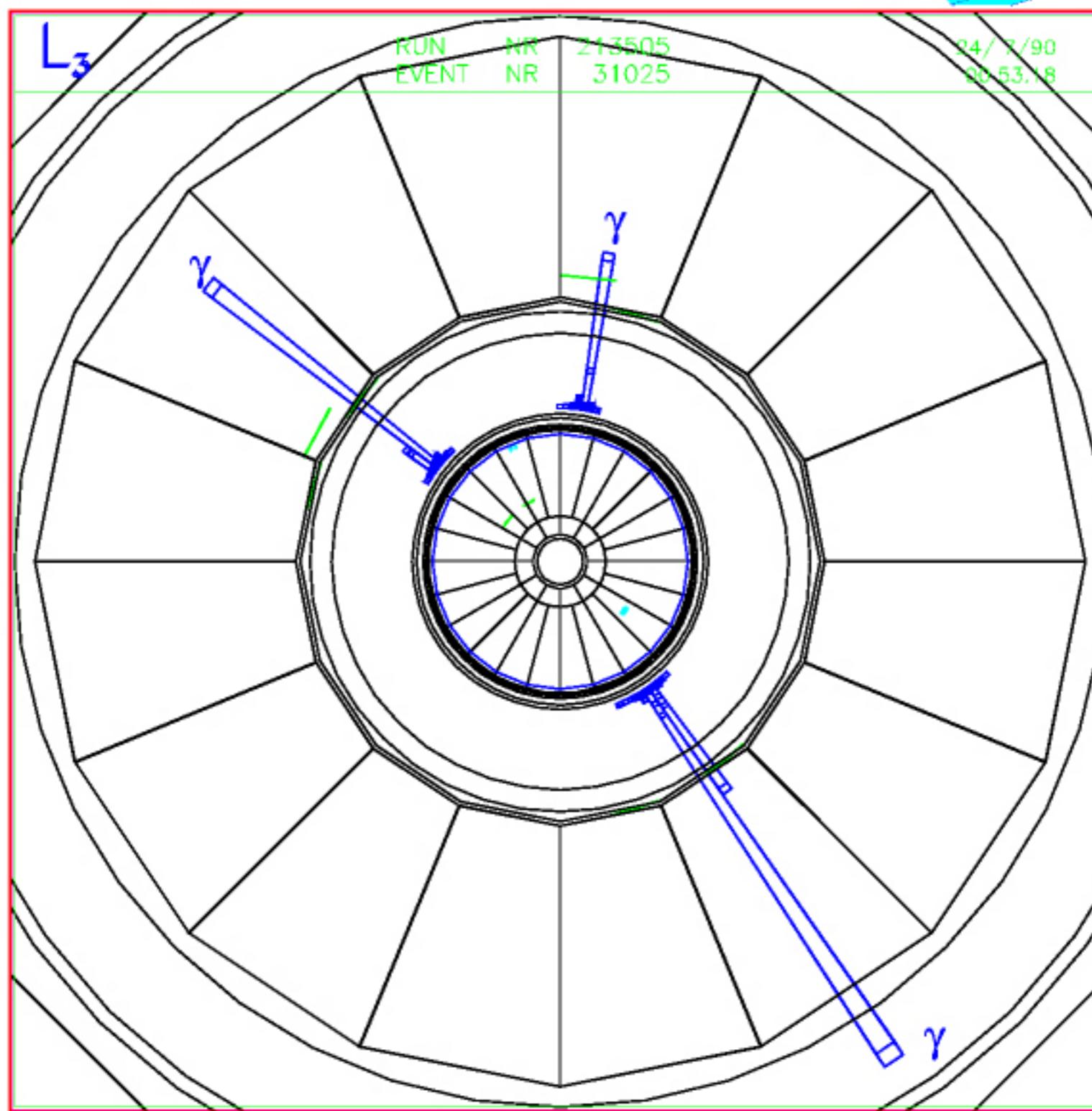


LA FÍSICA EN LEP: Suceso quark-antiquark-gluon

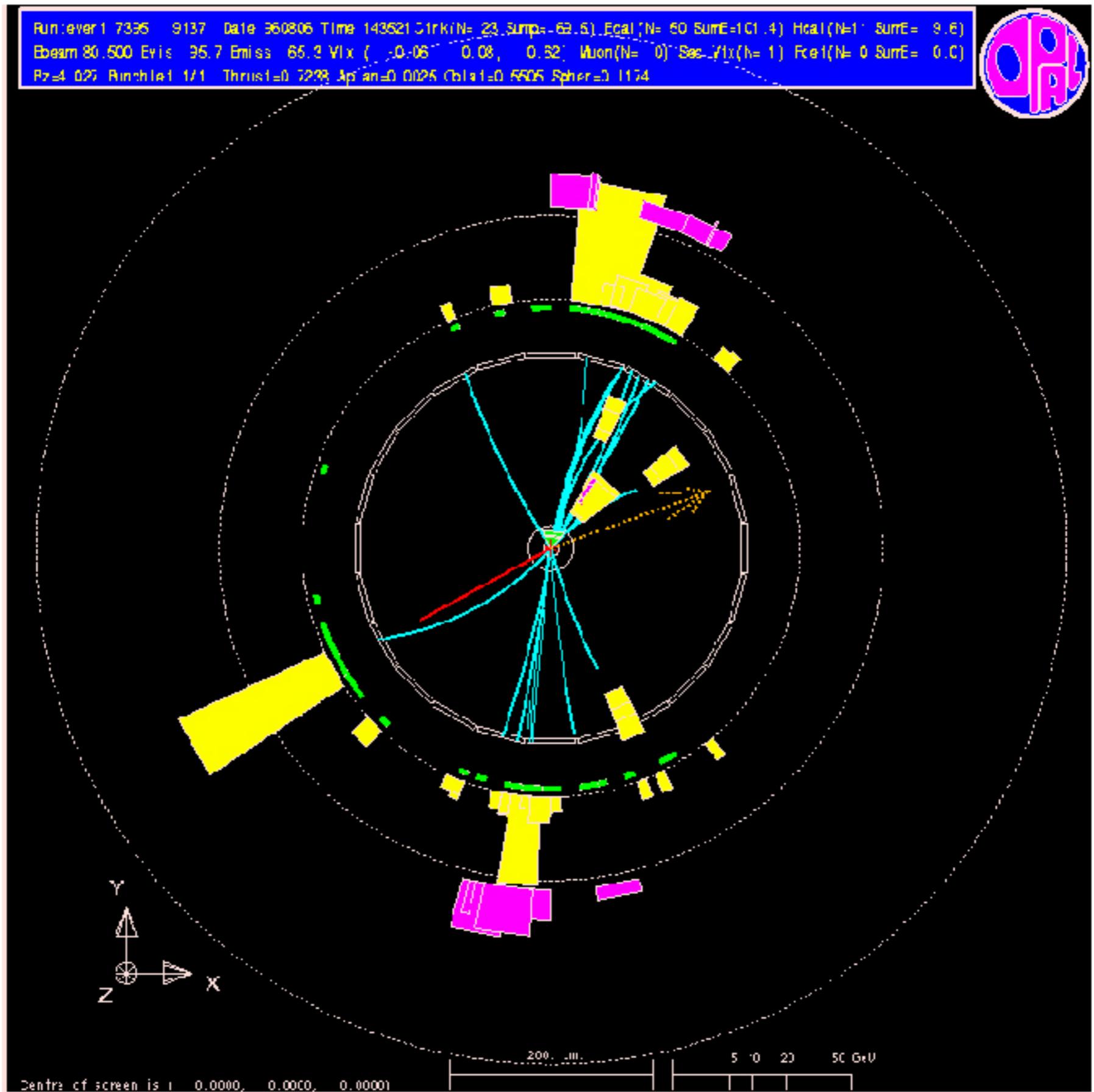


LA FÍSICA EN LEP: Suceso multifotónico

$$e^+ e^- \rightarrow \gamma + \gamma + \gamma$$

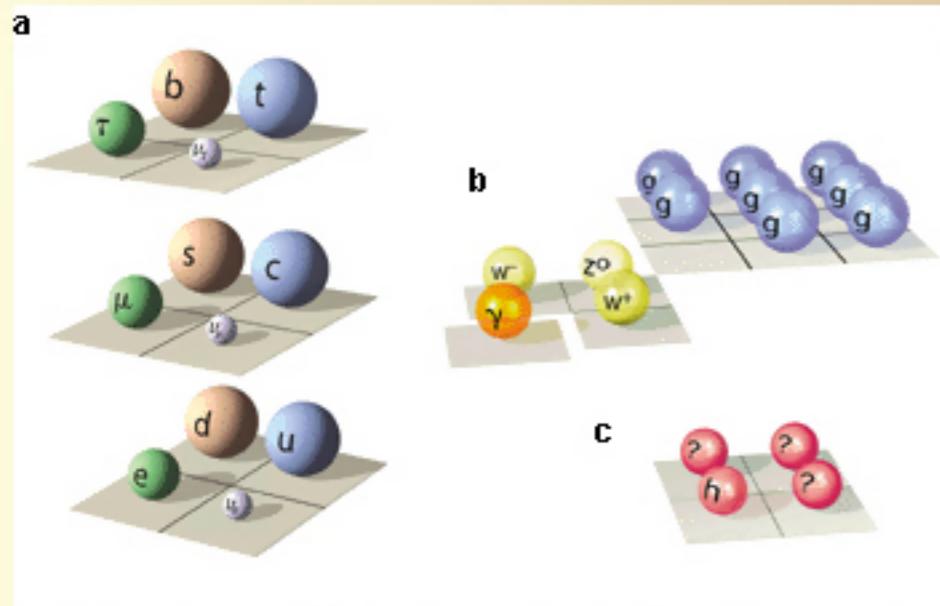


LA FÍSICA EN LEP: Suceso WW



EL MODELO ESTÁNDAR

La teoría de las interacciones fundamentales



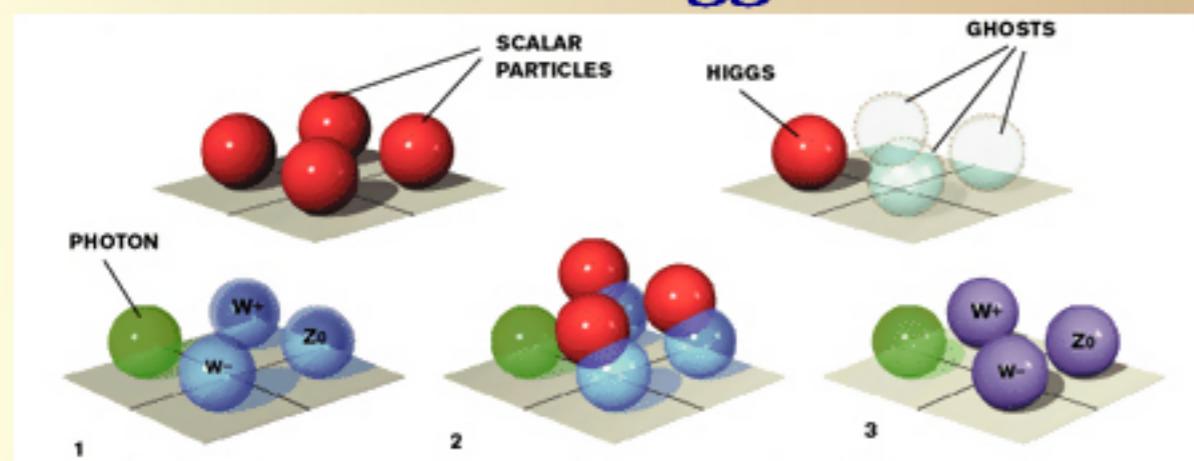
a) Materia

**3 generaciones o familias:
Leptones y quarks**

b) Fuerzas

**4 fuerzas fundamentales
fuerte, electromagnética
débil, gravitación**

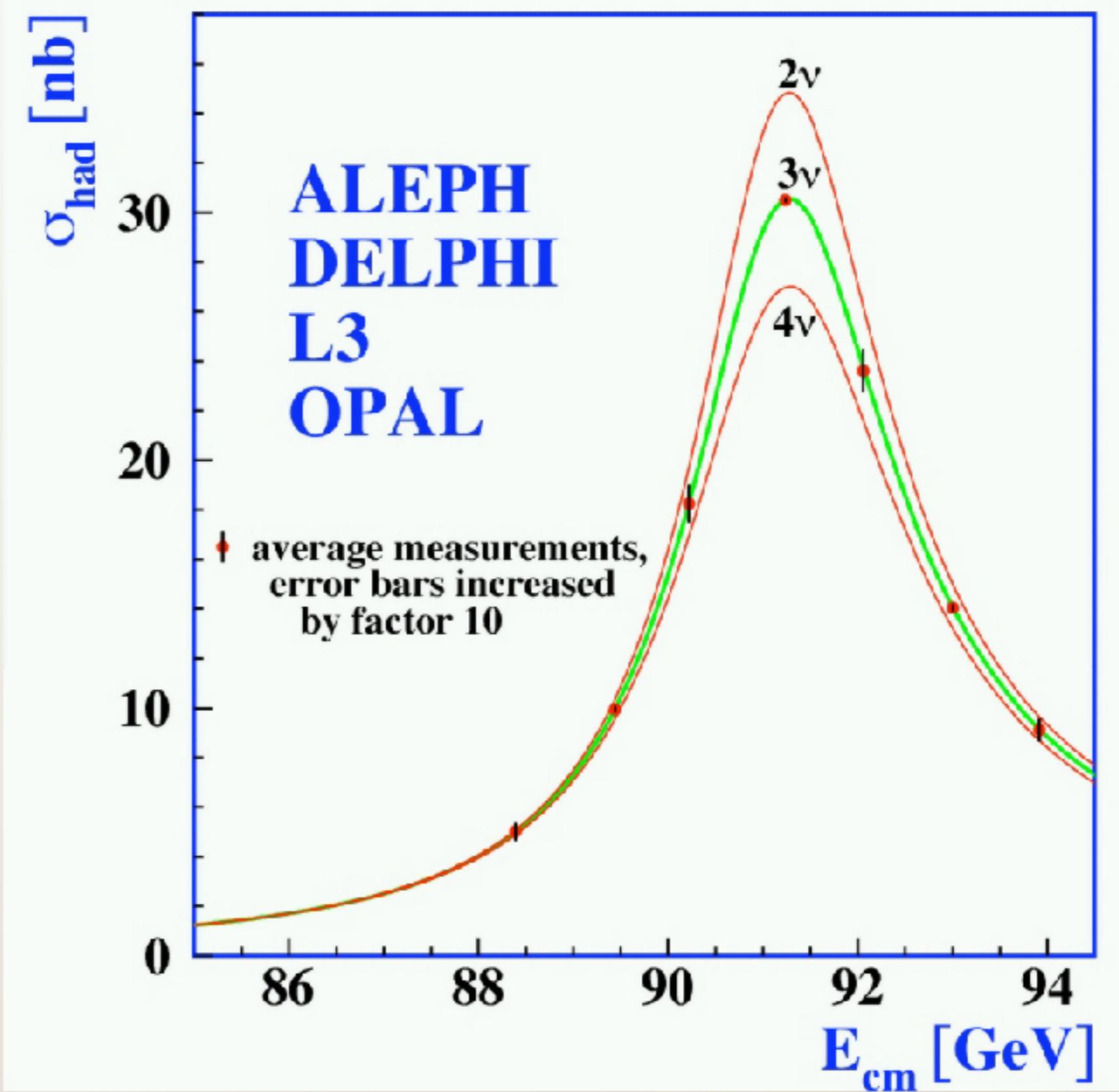
El mecanismo de Higgs:



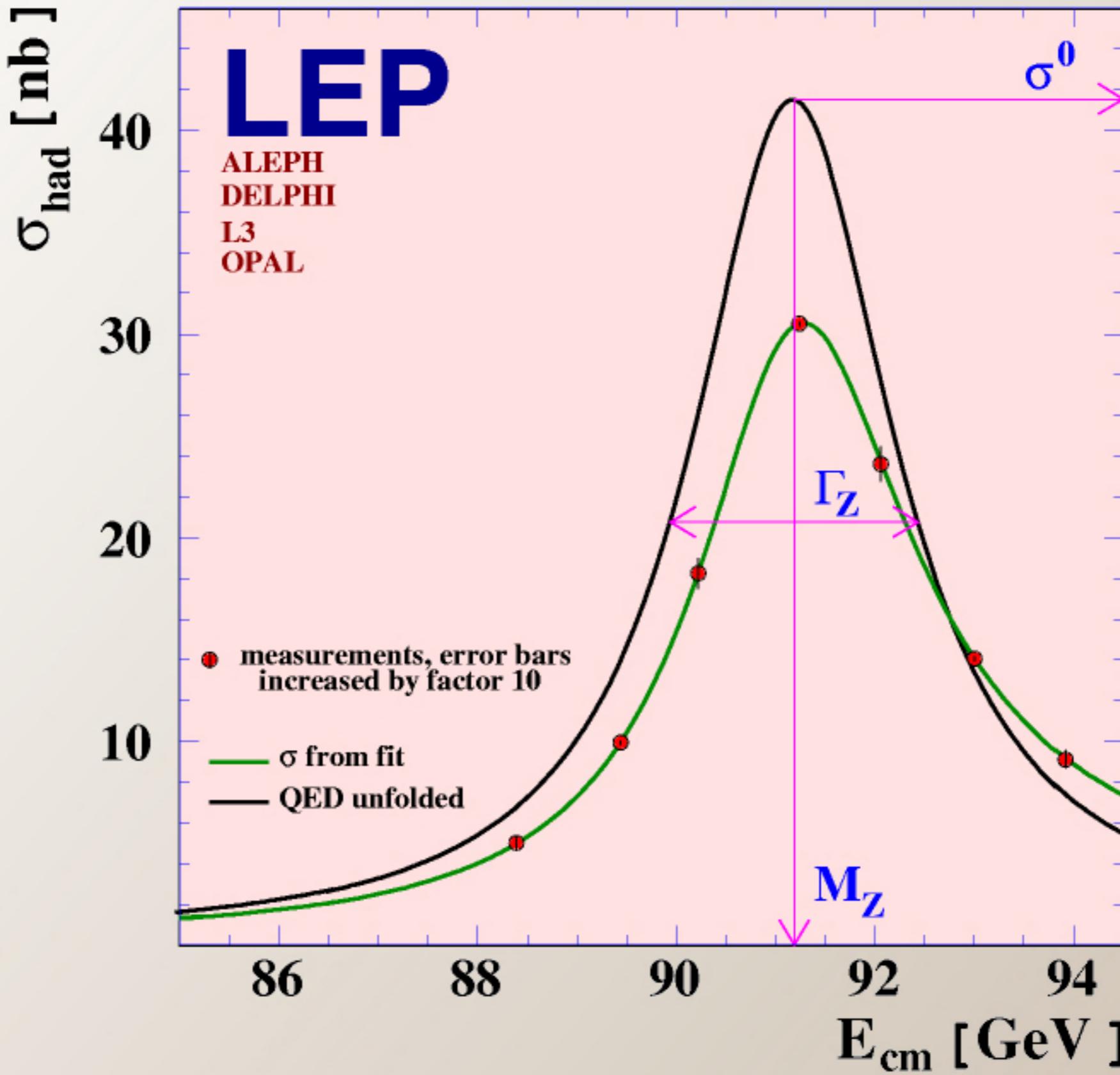
c) Bosón de Higgs

**Los bosones vectoriales "se comen"
3 de los "escalares" y adquieren
masa, el cuarto queda como una
partícula.**

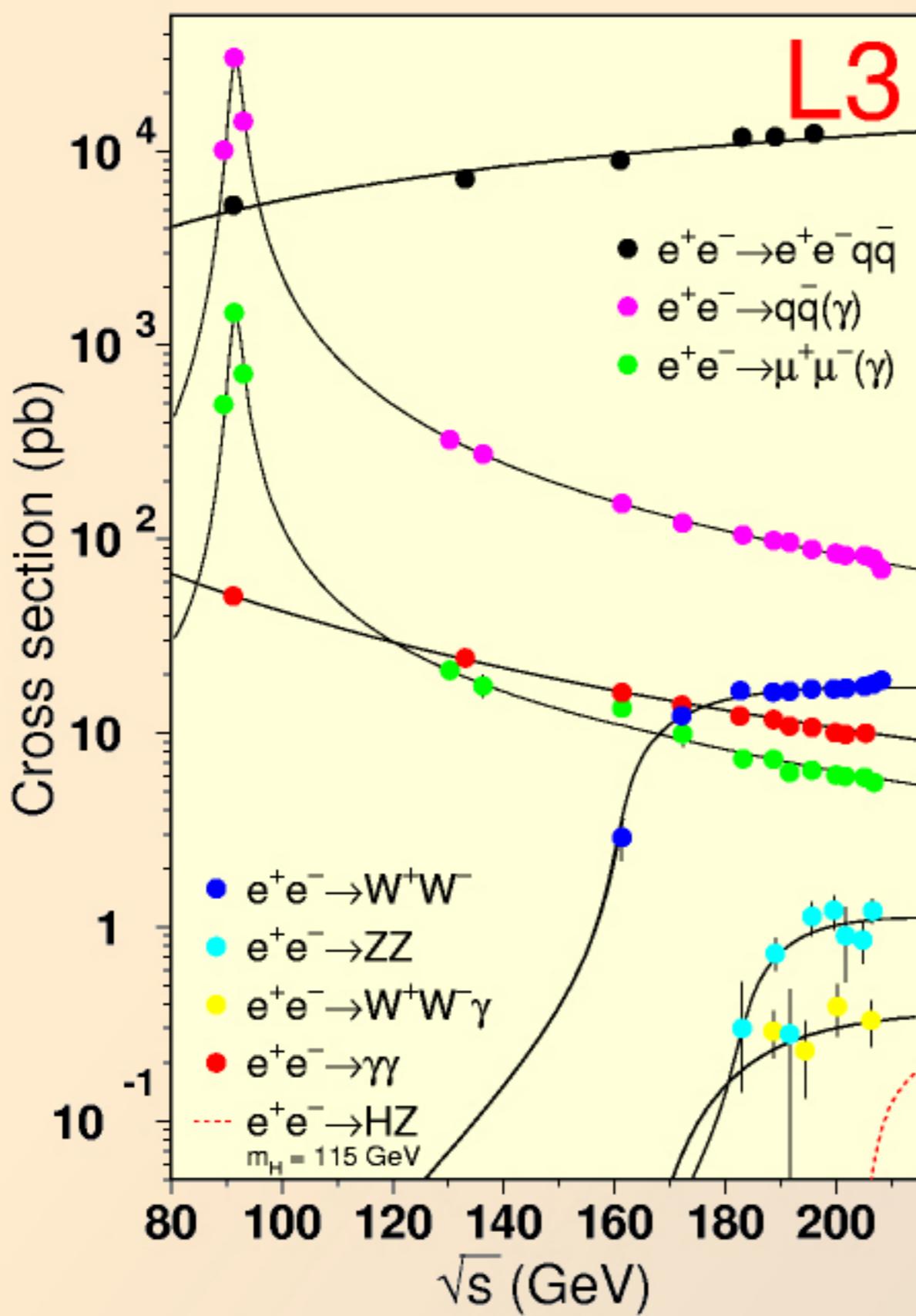
LEP-1: ¡El número de familias es 3! → Cosmología



LEP-1: Masa y anchura del bosón Z



EL MODELO ESTÁNDAR



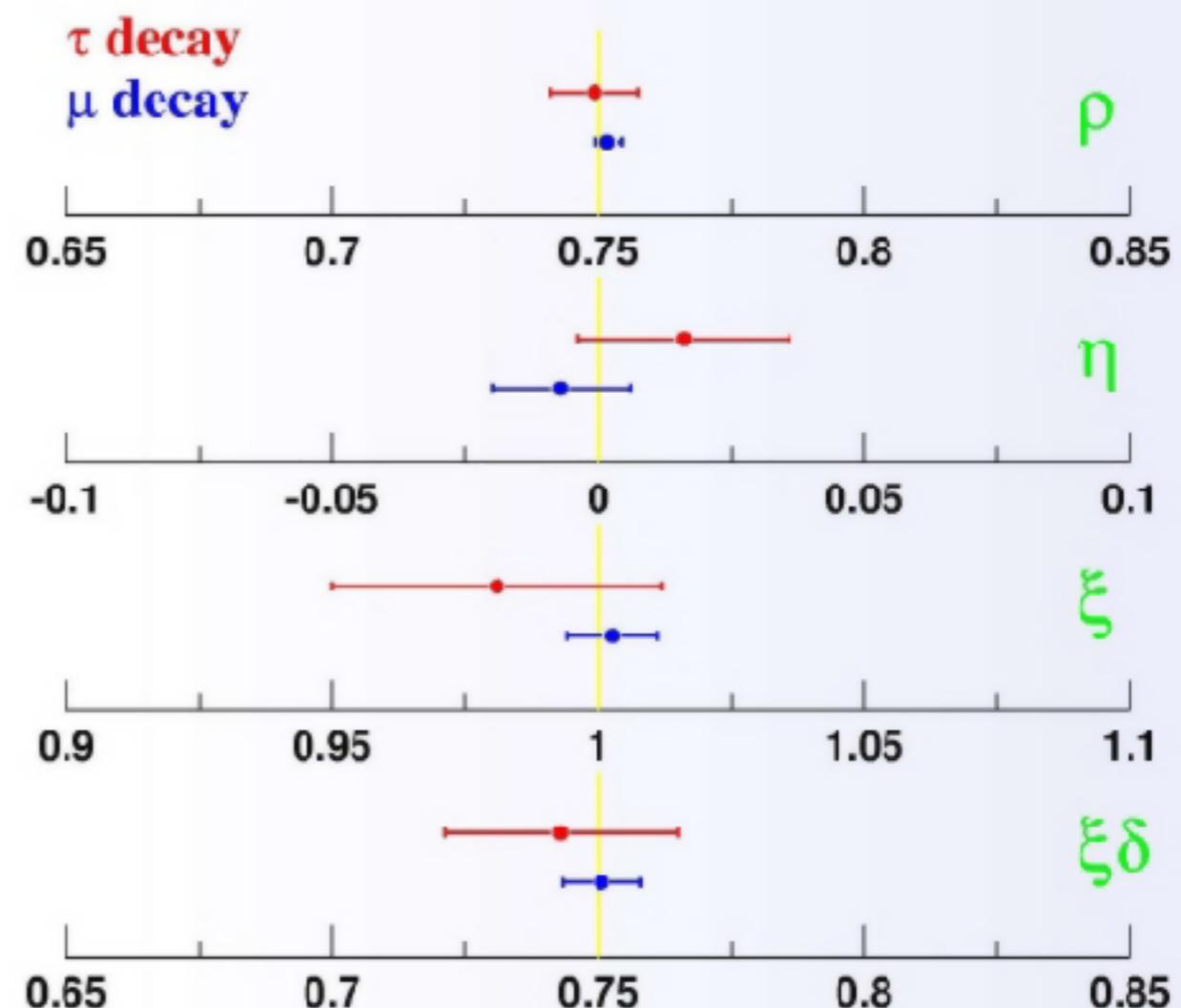
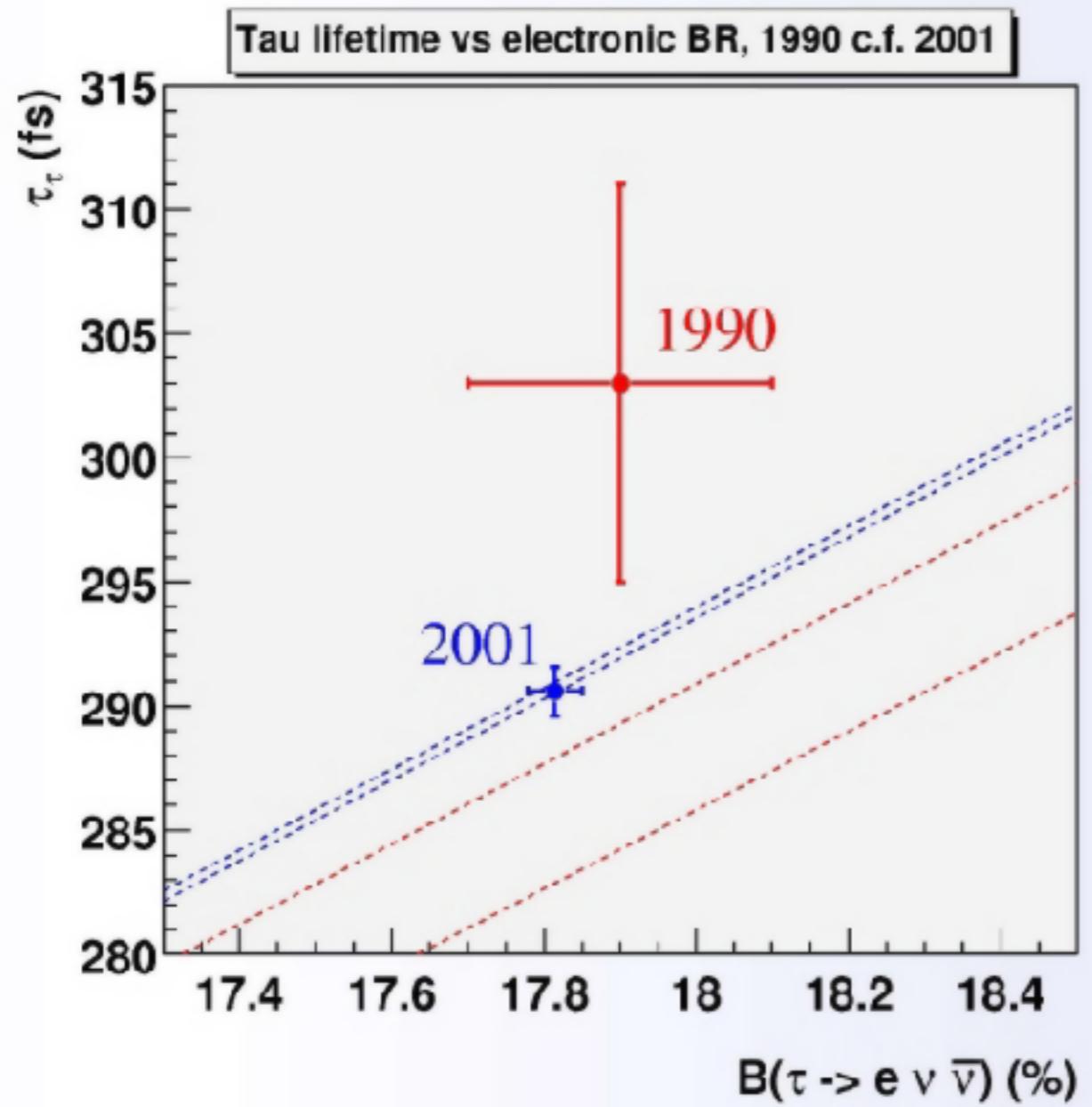
Secciones eficaces
Multitud de procesos medidos
En total, para los 4 experimentos:

En torno a 16 millones de Z

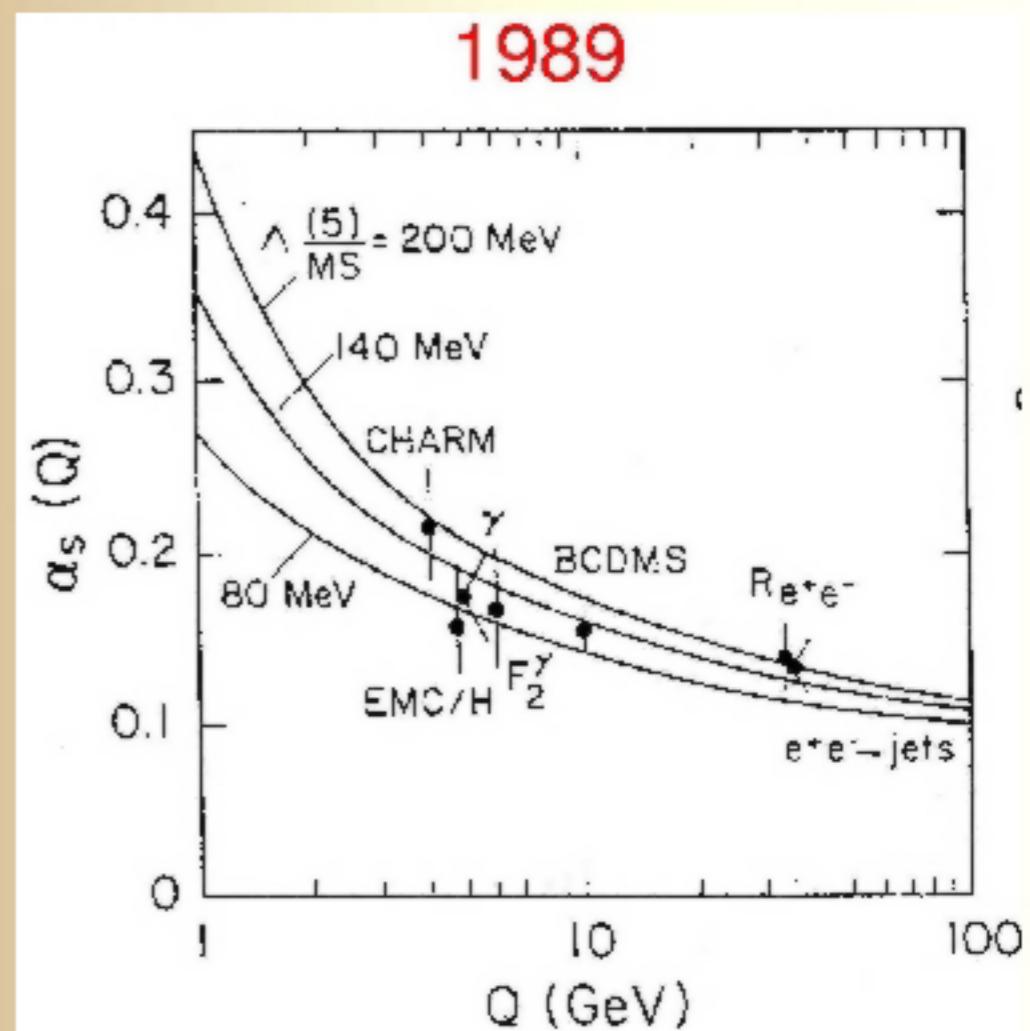
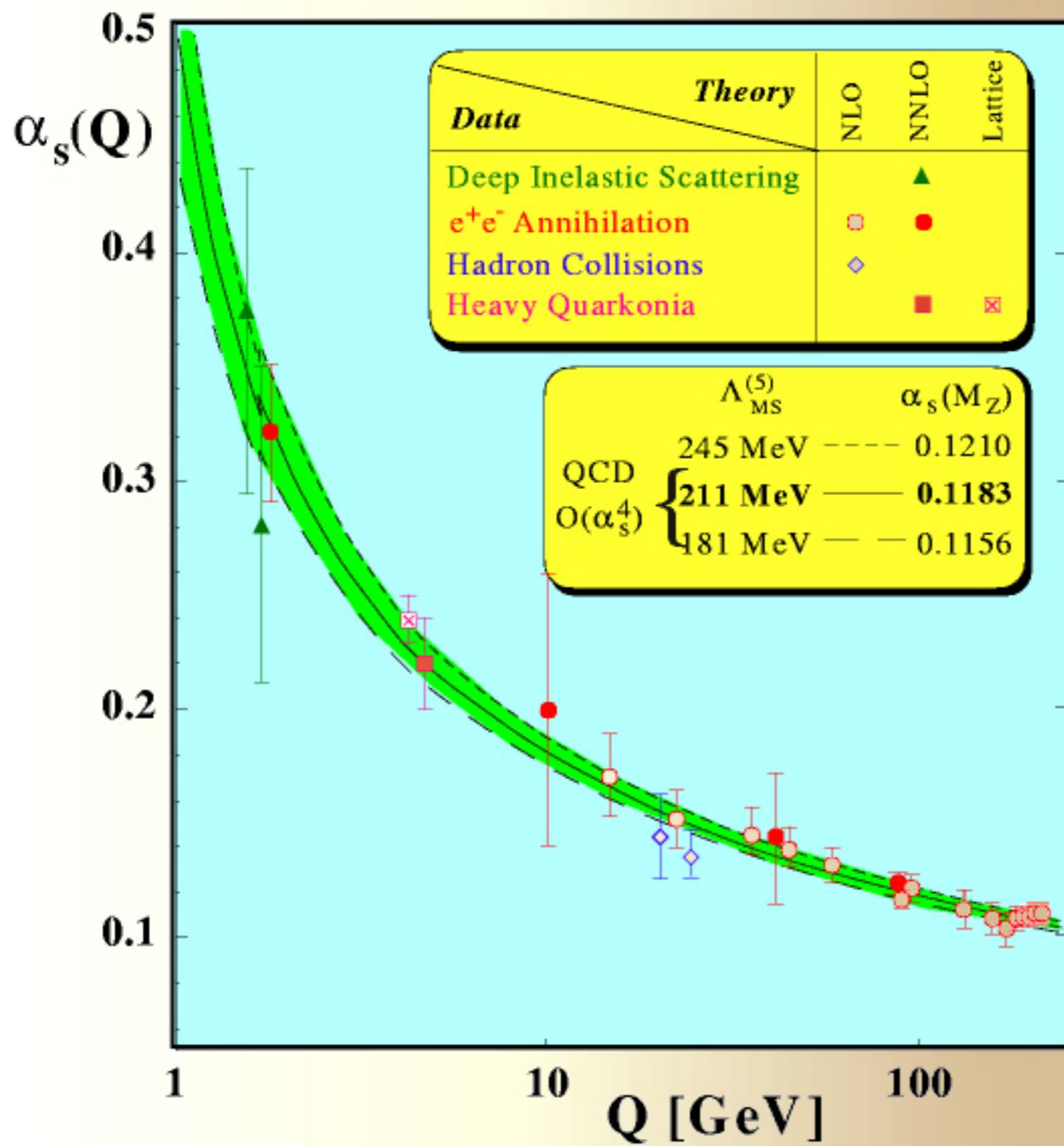
En torno a 40000 W

En torno a... 0 Higgs

El leptón tau: Es como el electrón y el muon



QCD: La constante de acoplamiento fuerte

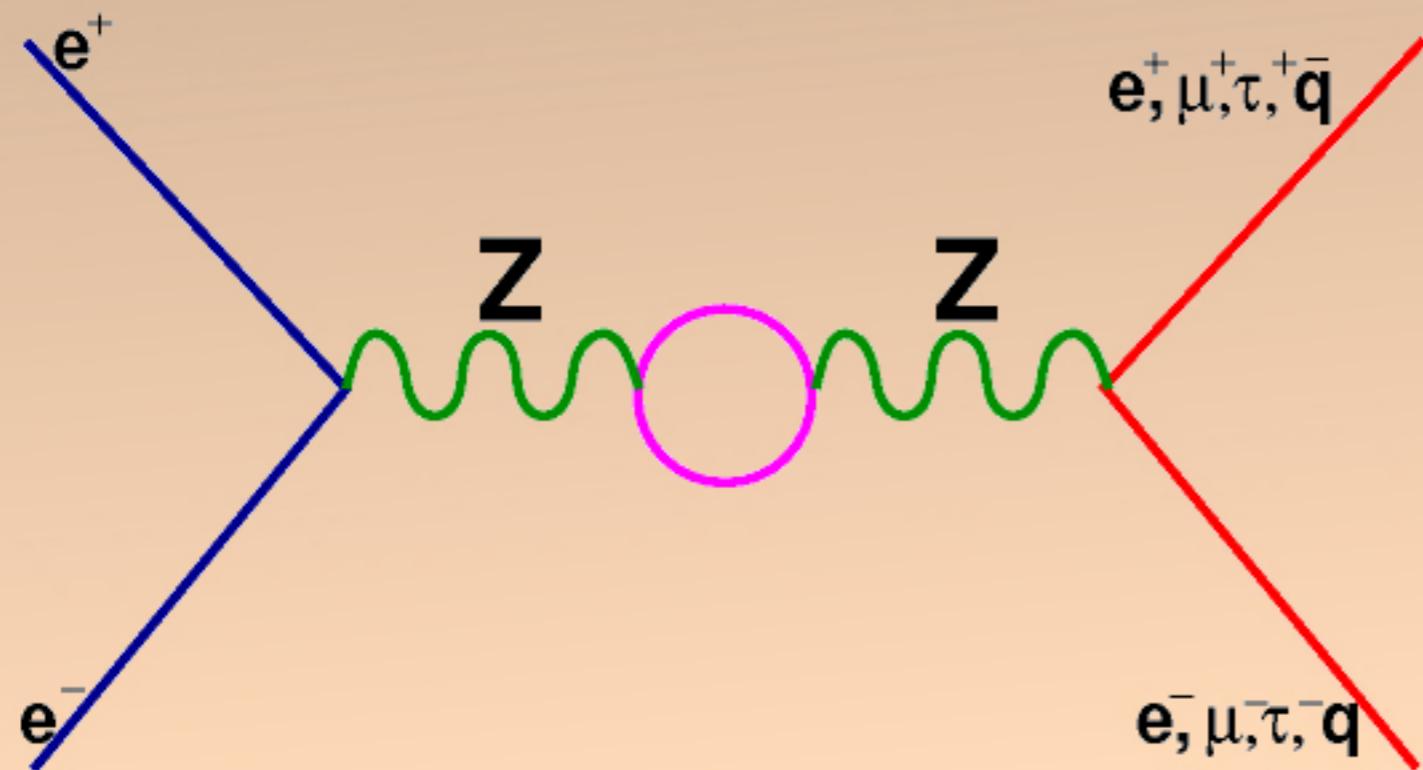


$$\alpha_s(M_Z) = 0.11 \pm 0.01$$

Physics at LEPI (after Altarelli)

EL MODELO ESTÁNDAR

CORRECCIONES CUÁNTICAS



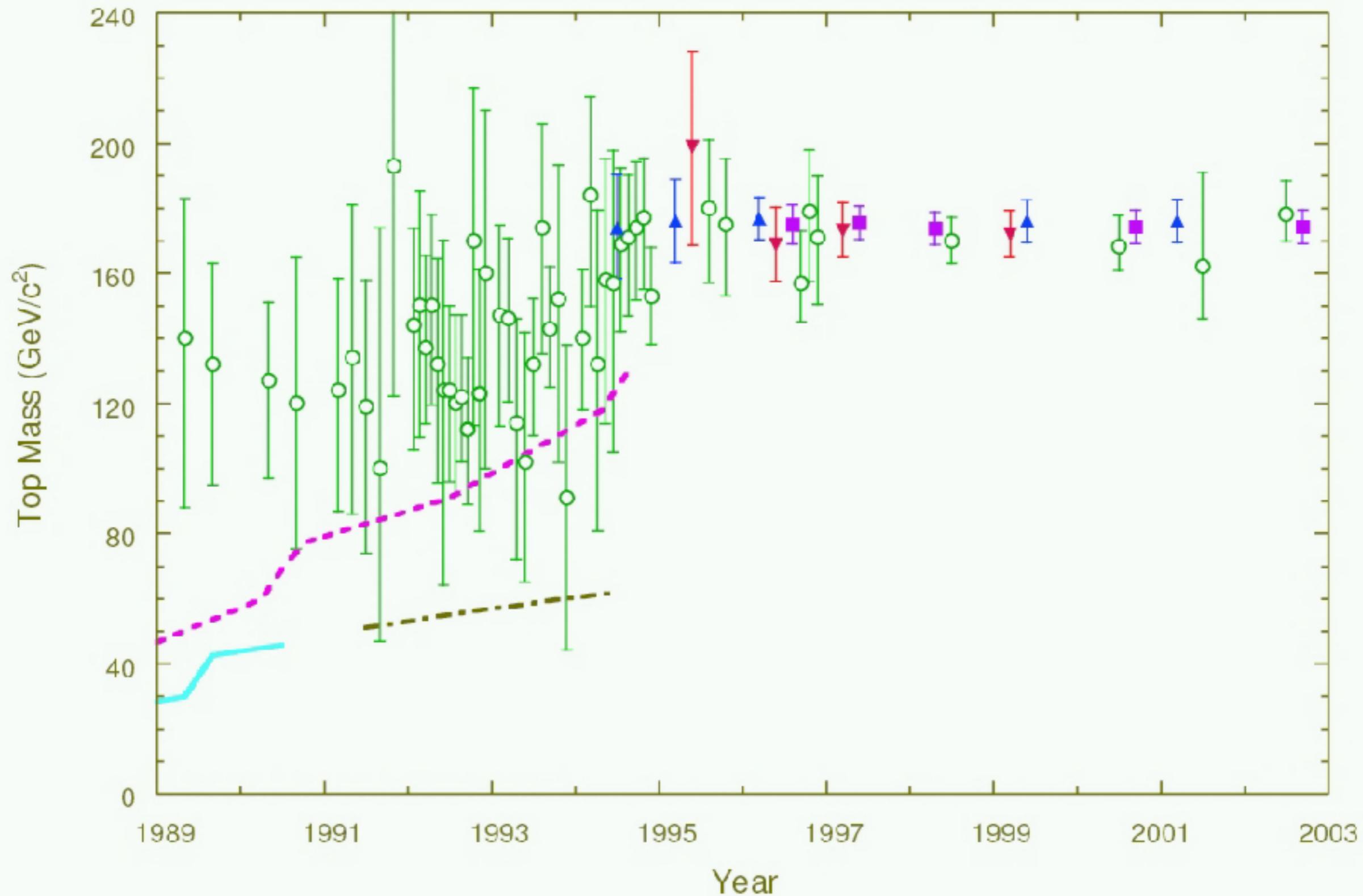
Partículas virtuales.
Es posible obtener información incluso de partículas que no se producen directamente en LEP.
(Es necesaria más energía)

EL QUARK TOP EL BOSÓN DE HIGGS

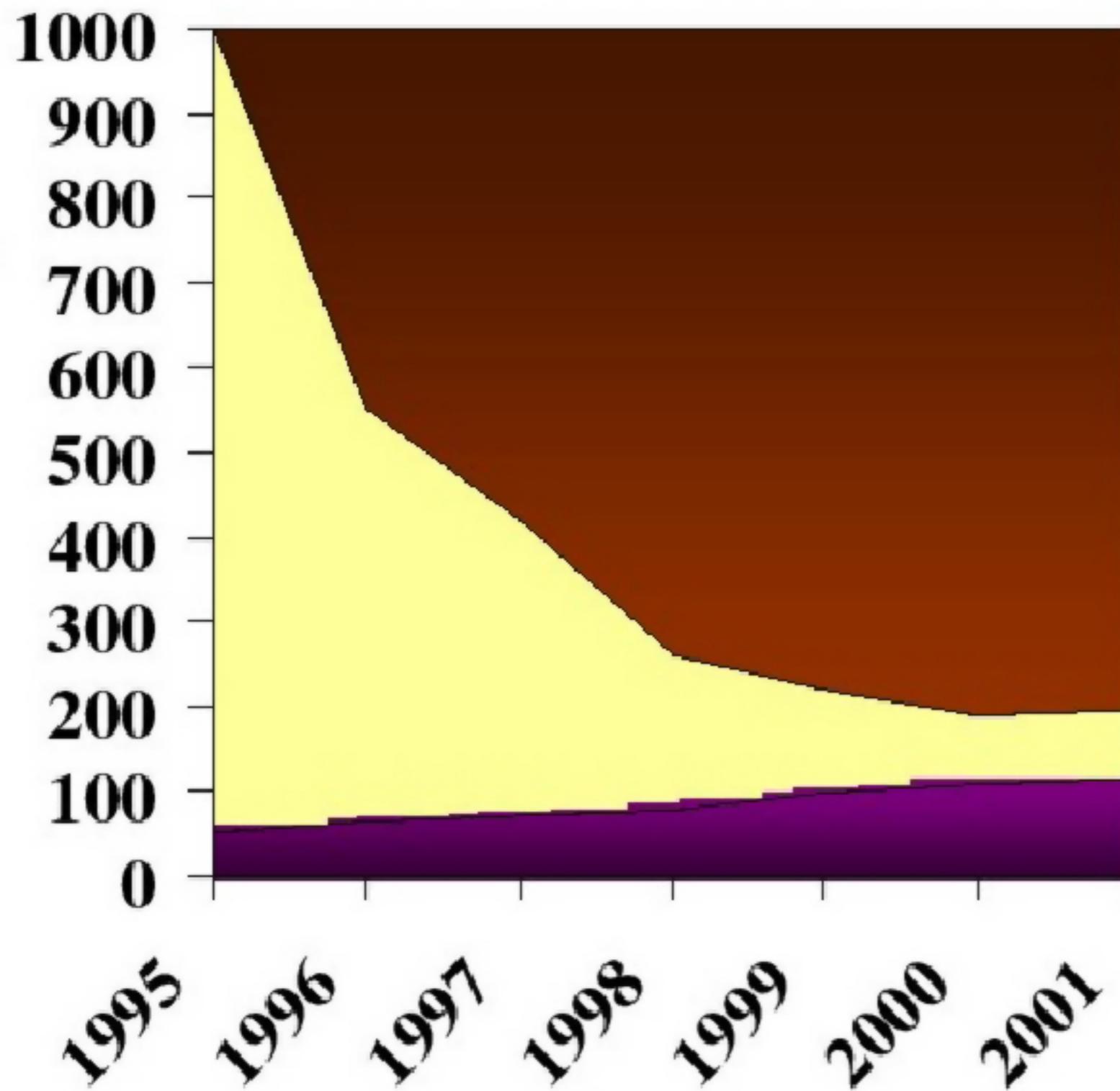
Se puede obtener información sobre sus propiedades por las correcciones cuánticas en el Modelo Estándar.

Ésto también supone un test para la estructura de la teoría.

CORRECCIONES CUÁNTICAS: EL QUARK TOP



CORRECCIONES CUÁNTICAS: EL BOSÓN DE HIGGS



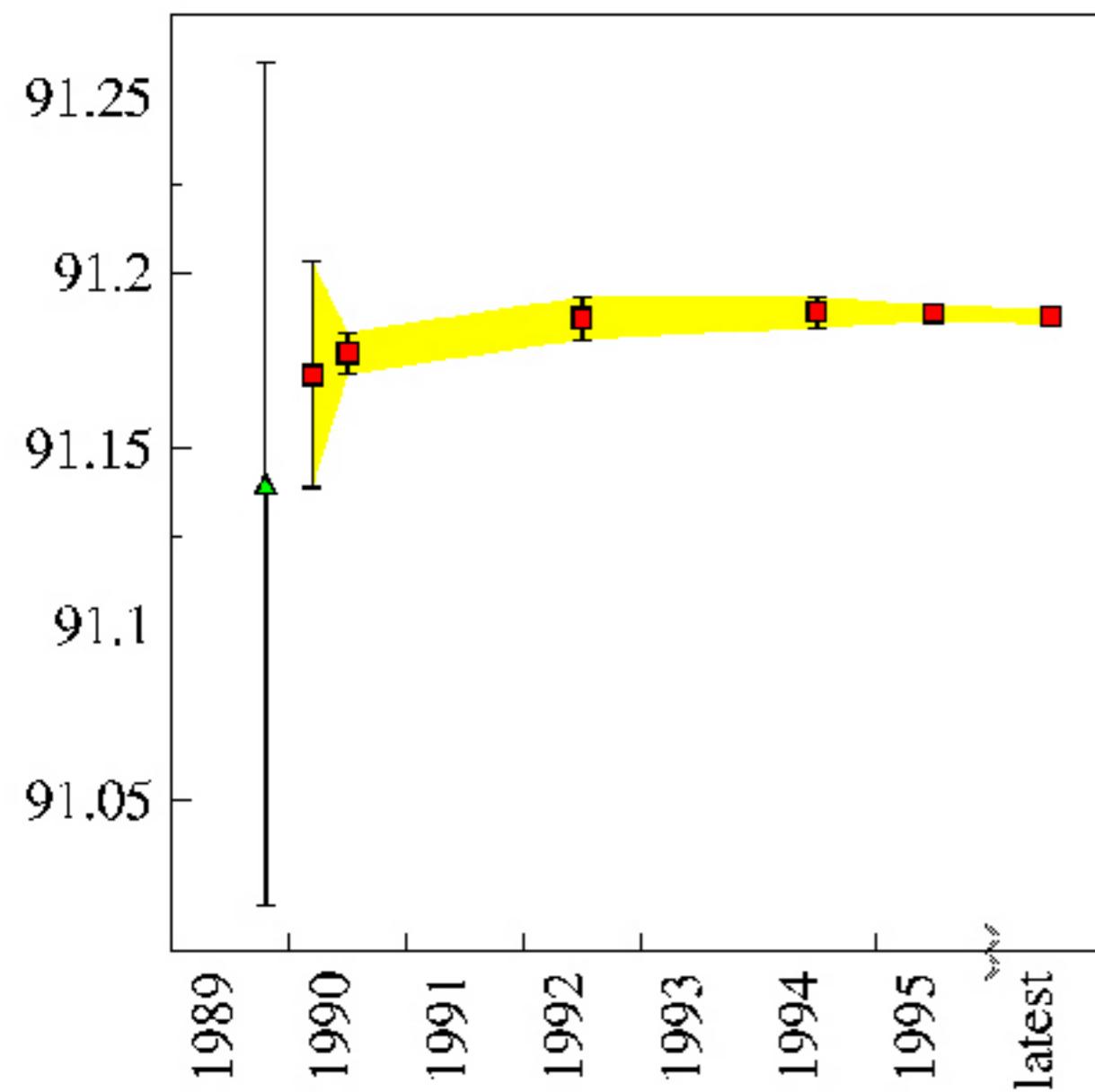
EW fits assume a
Higgs

Search looks for one

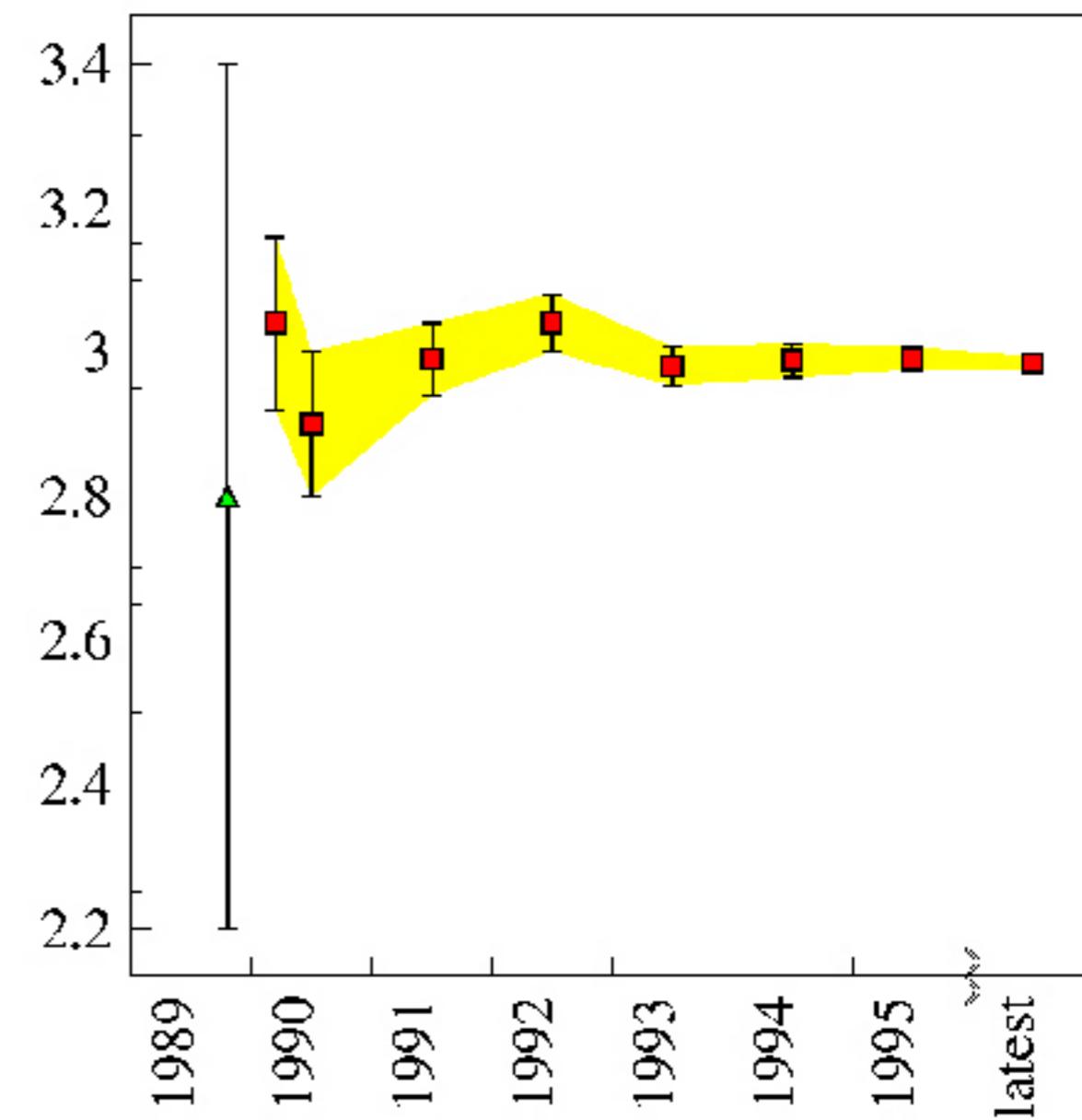
- Excluded by EW fits
- Allowed
- Excluded by Direct Search

EL MODELO ESTÁNDAR: PRECISIÓN

Mz

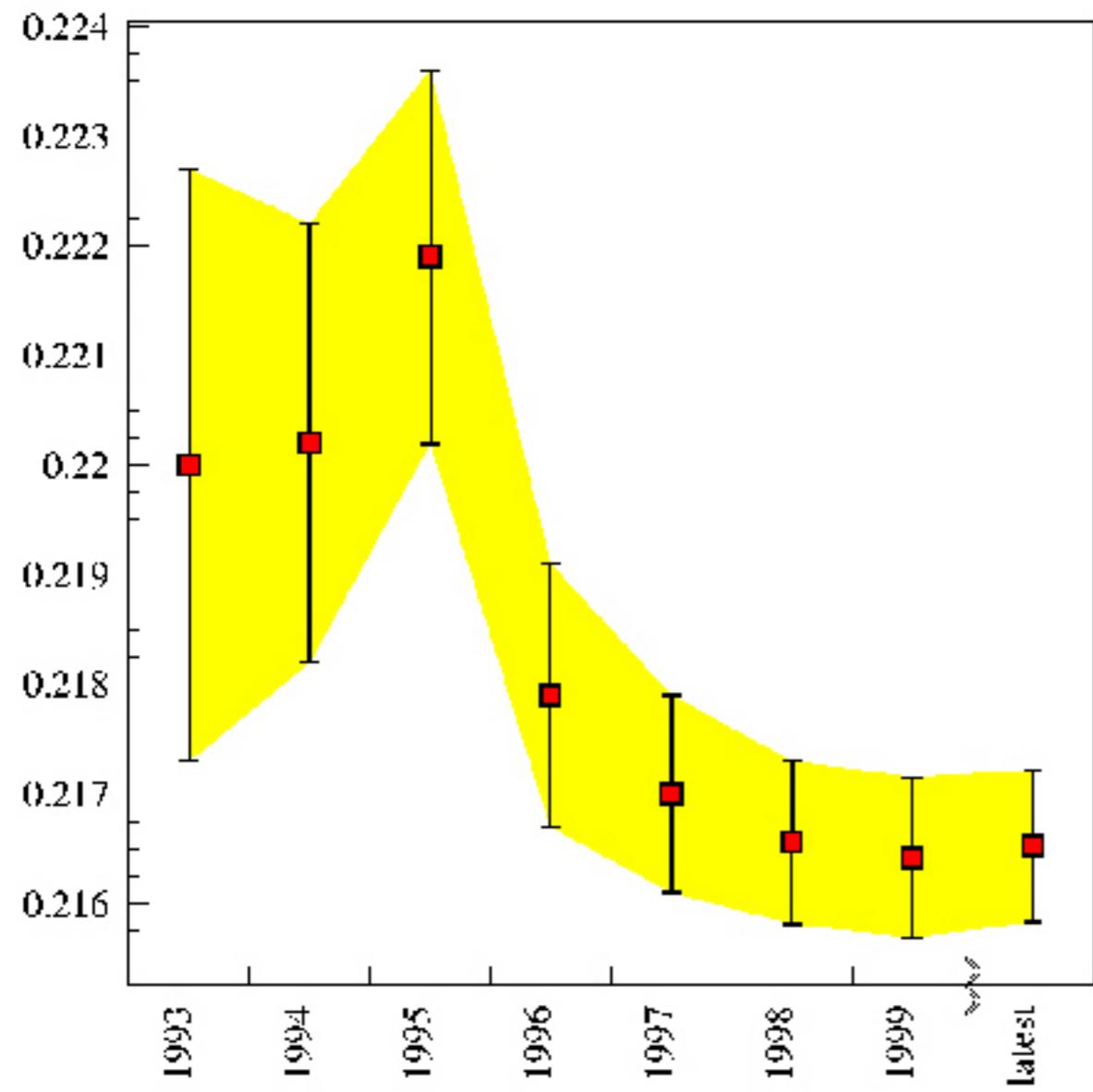


Nº familias

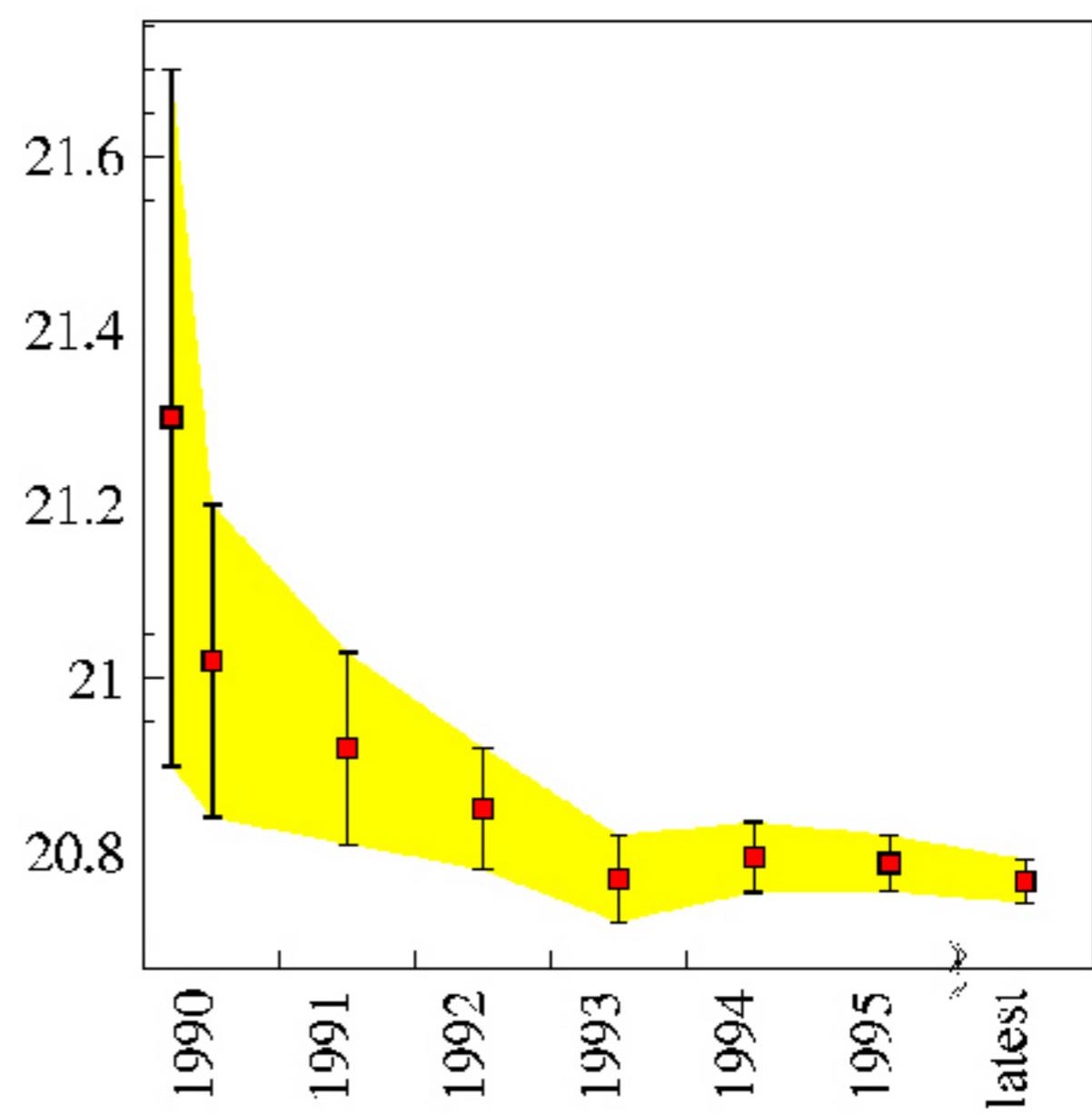


EL MODELO ESTÁNDAR: PRECISIÓN

Rb

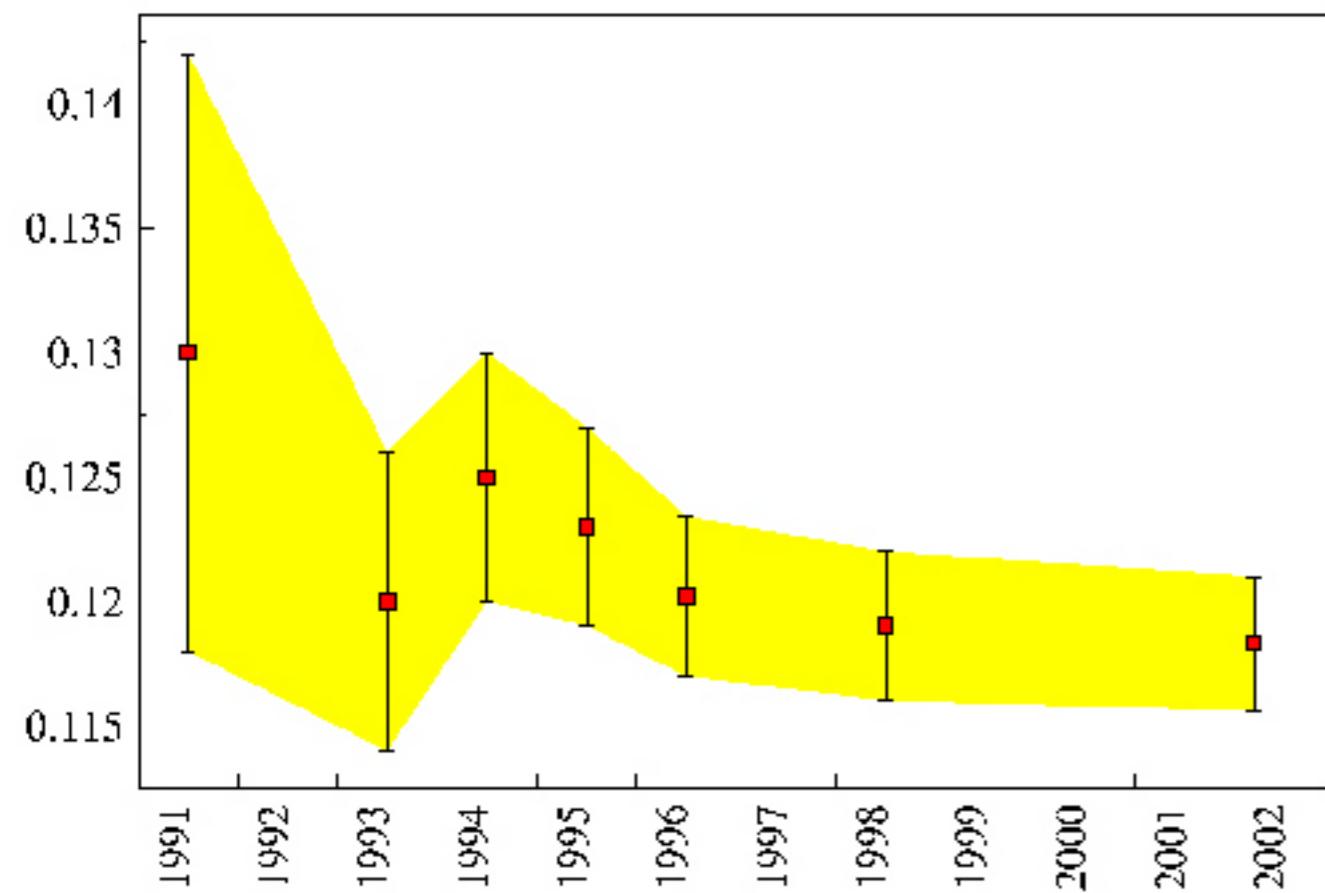


RI

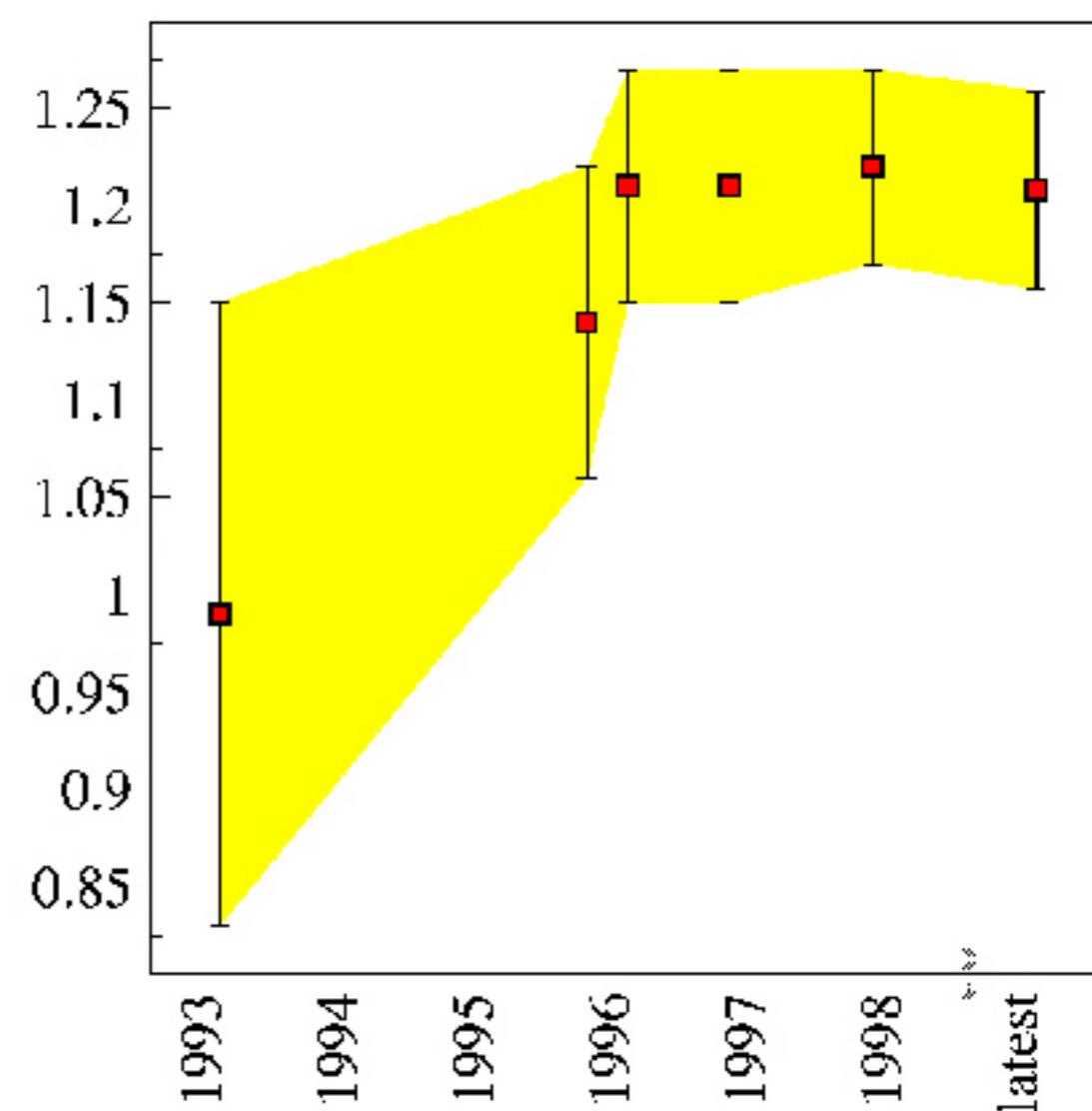


EL MODELO ESTÁNDAR: PRECISIÓN

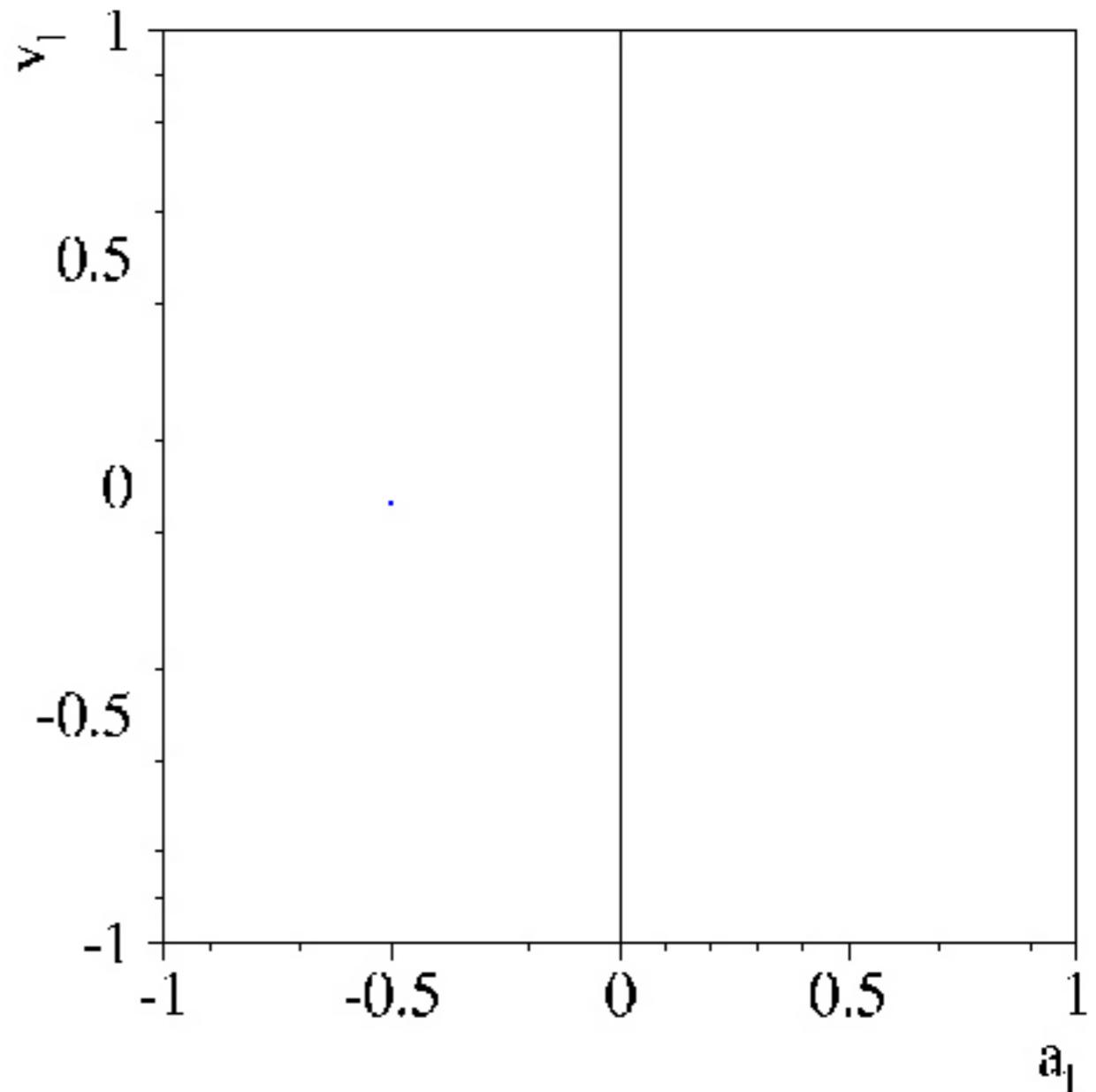
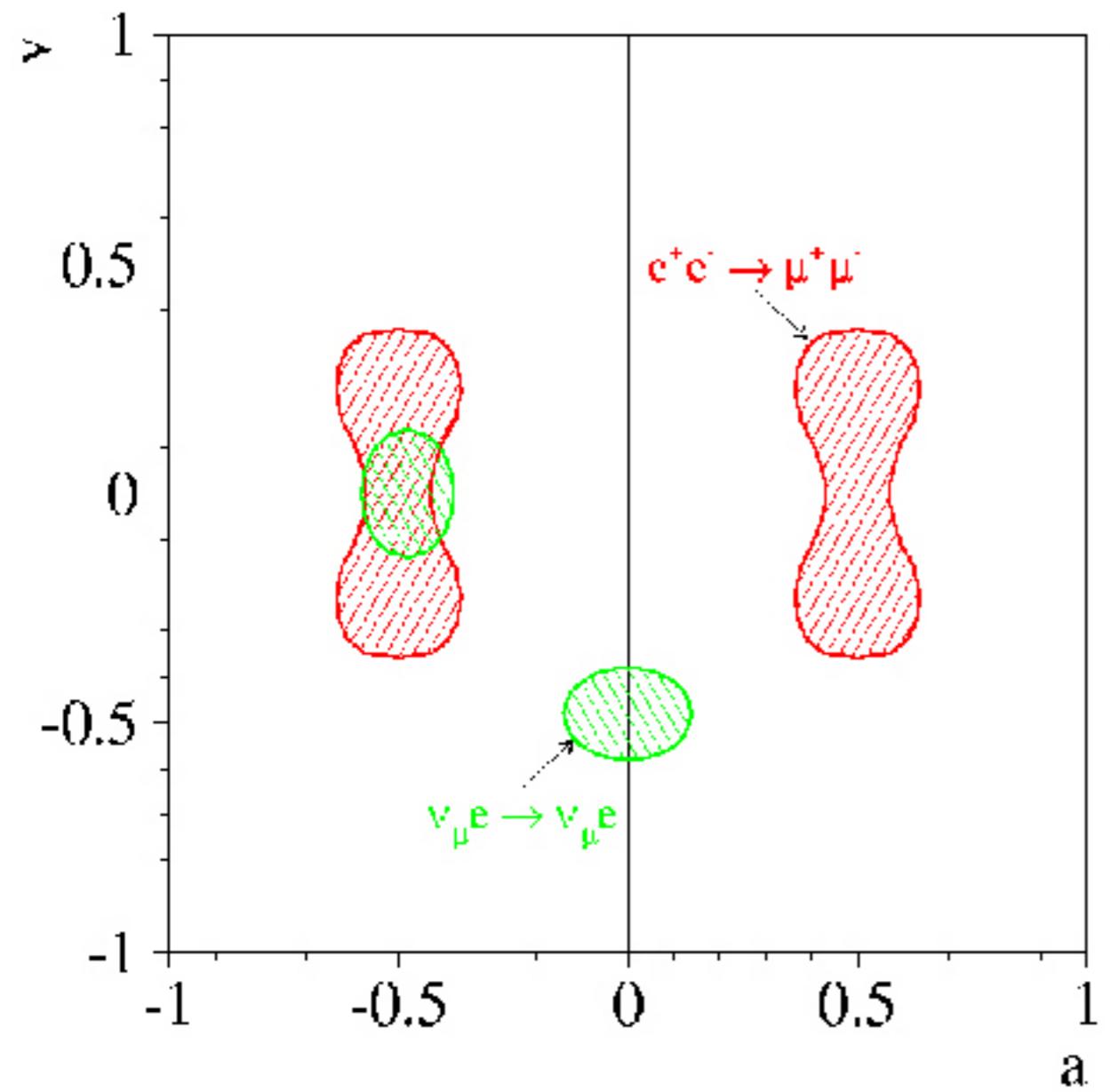
α_s



Vida media del barión B



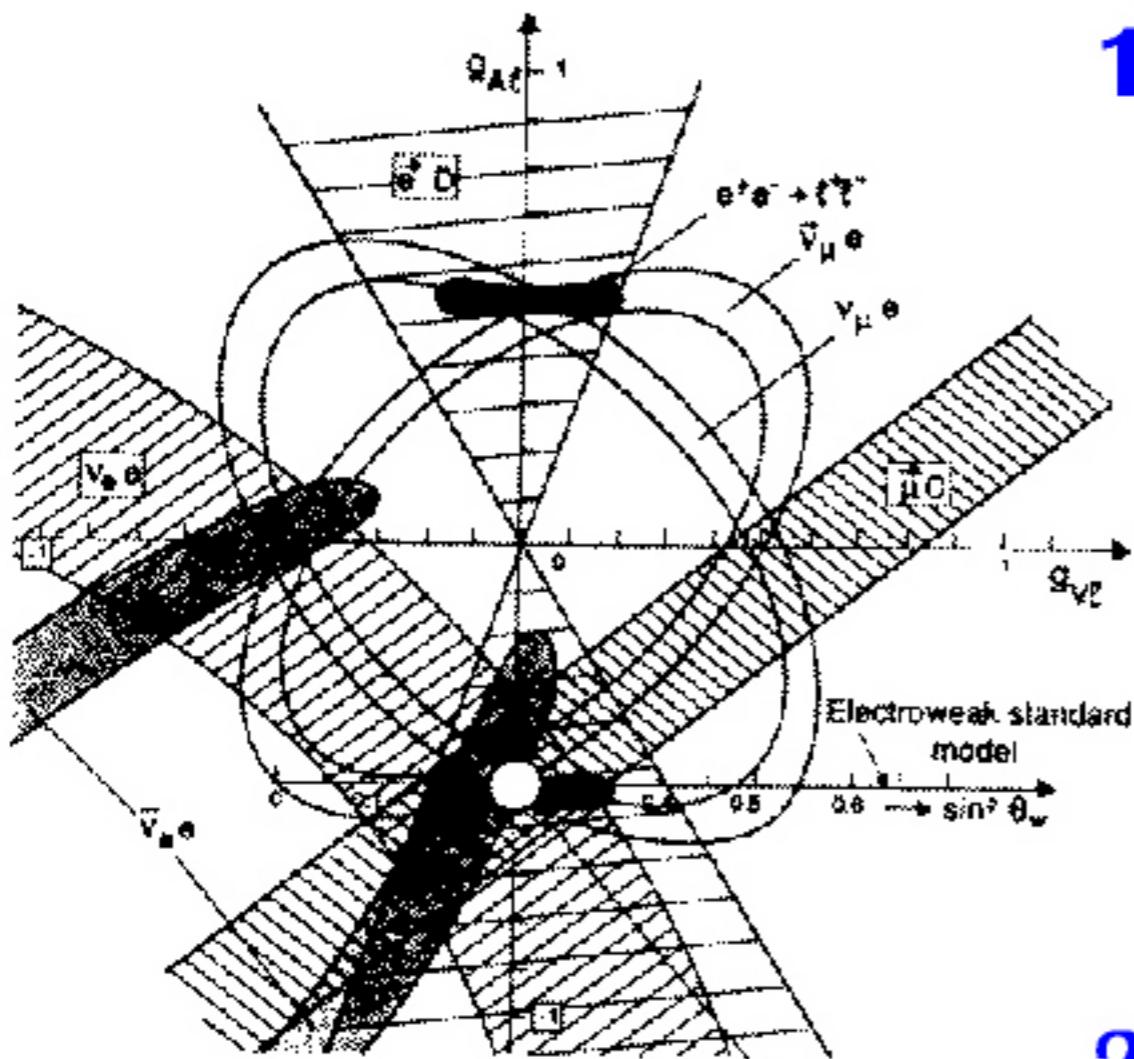
EL MODELO ESTÁNDAR: PRECISIÓN



Precisión asombrosa en los parámetros medidos

EL MODELO ESTÁNDAR: PRECISIÓN

1989



2000

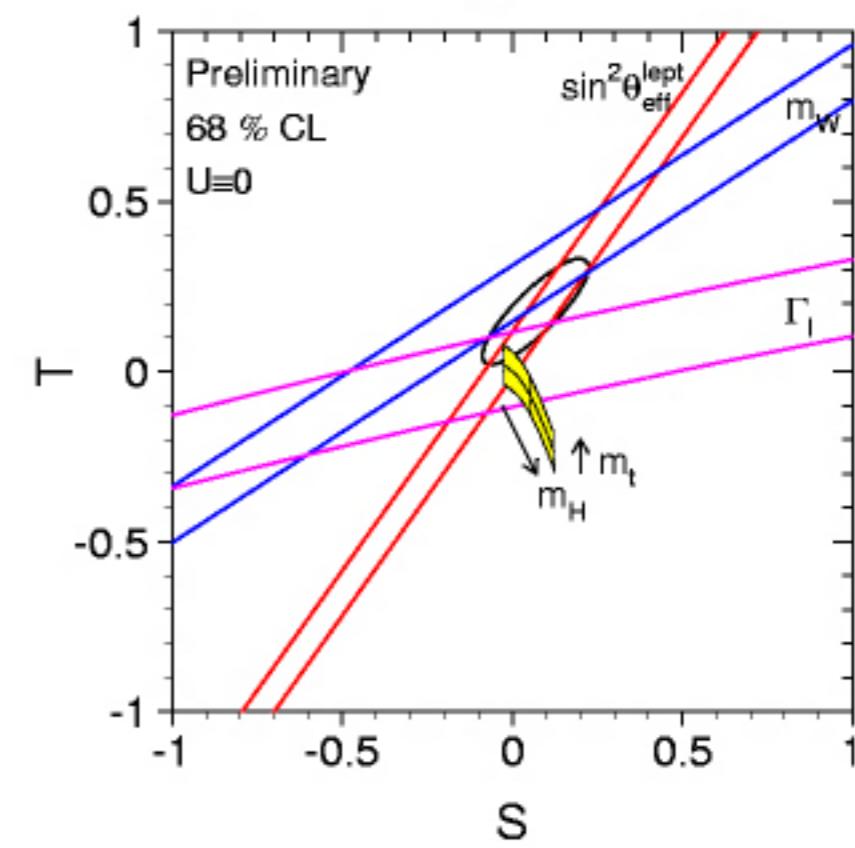
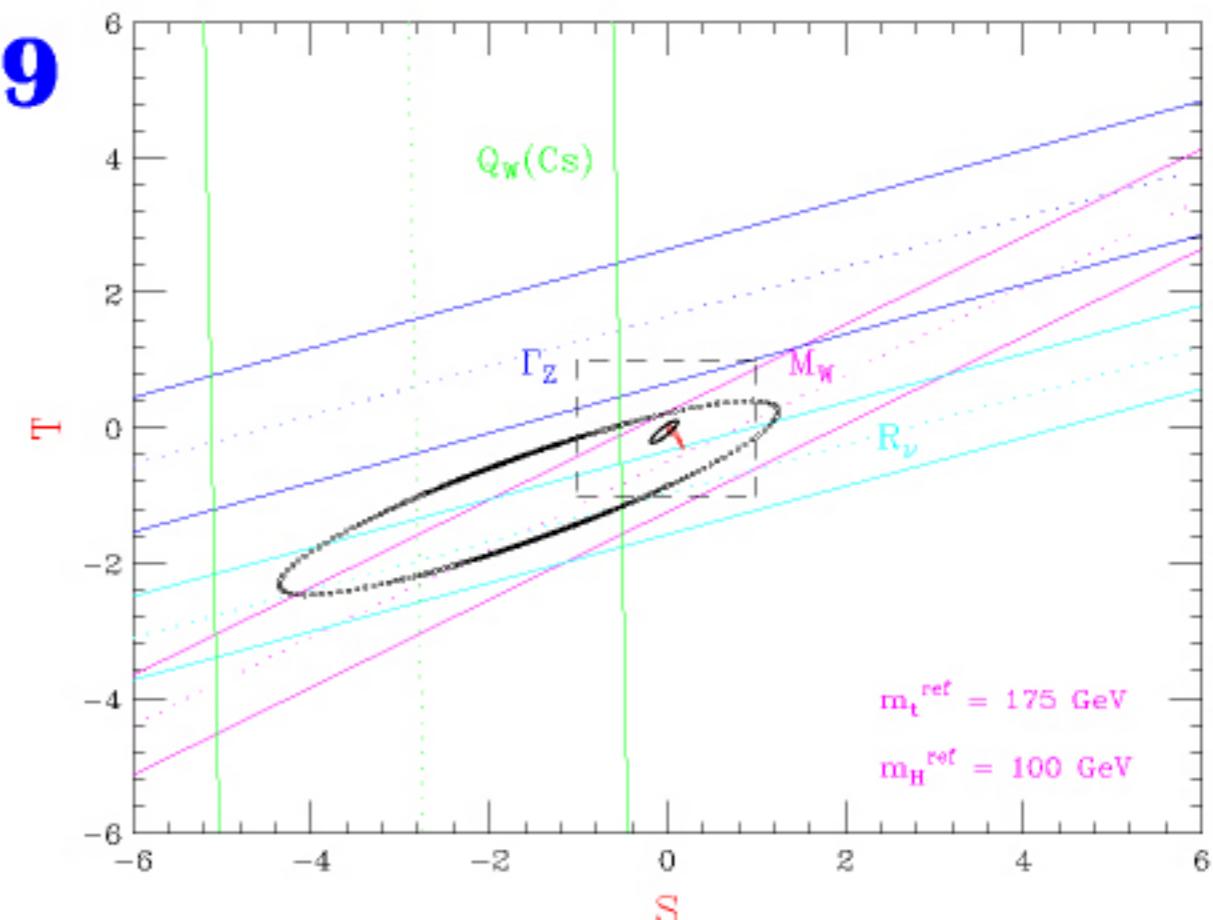
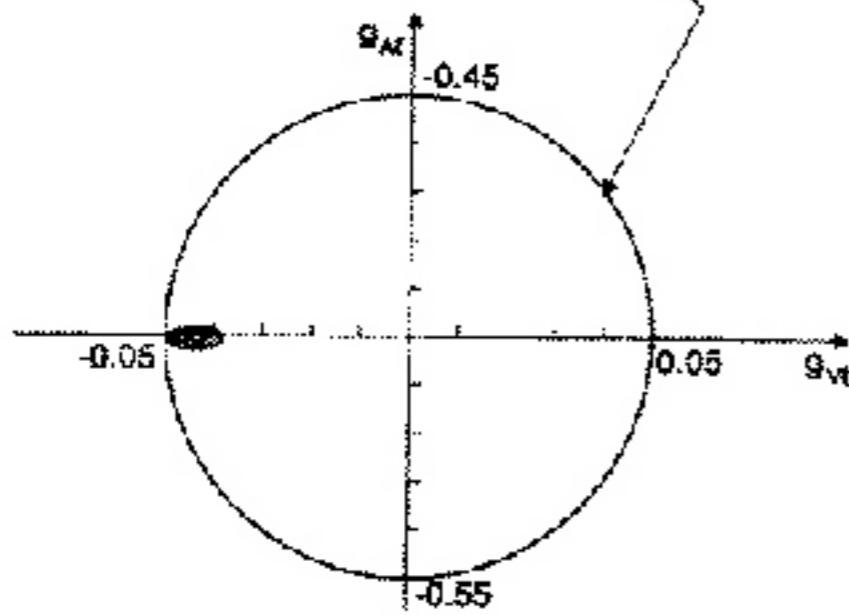
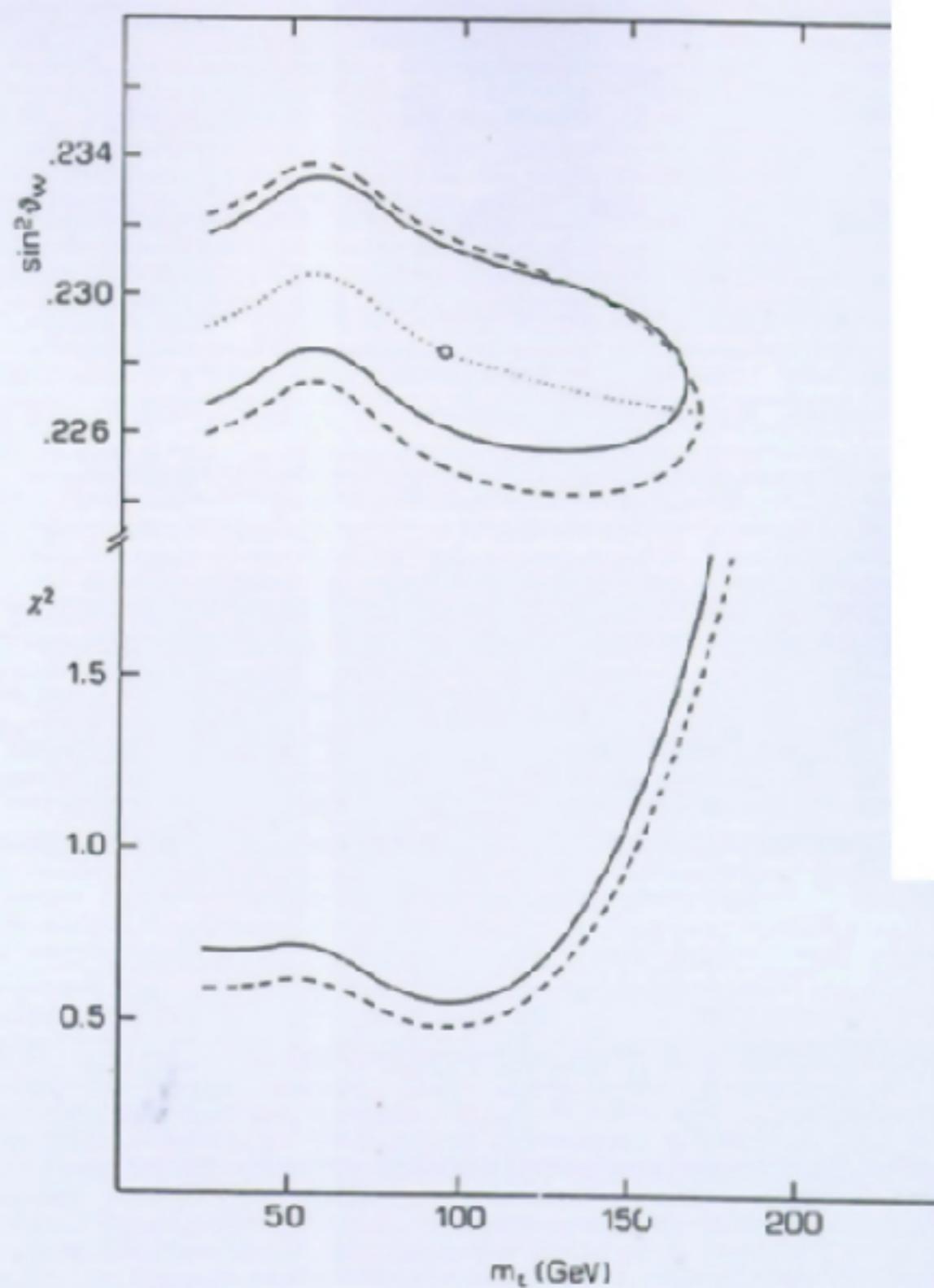


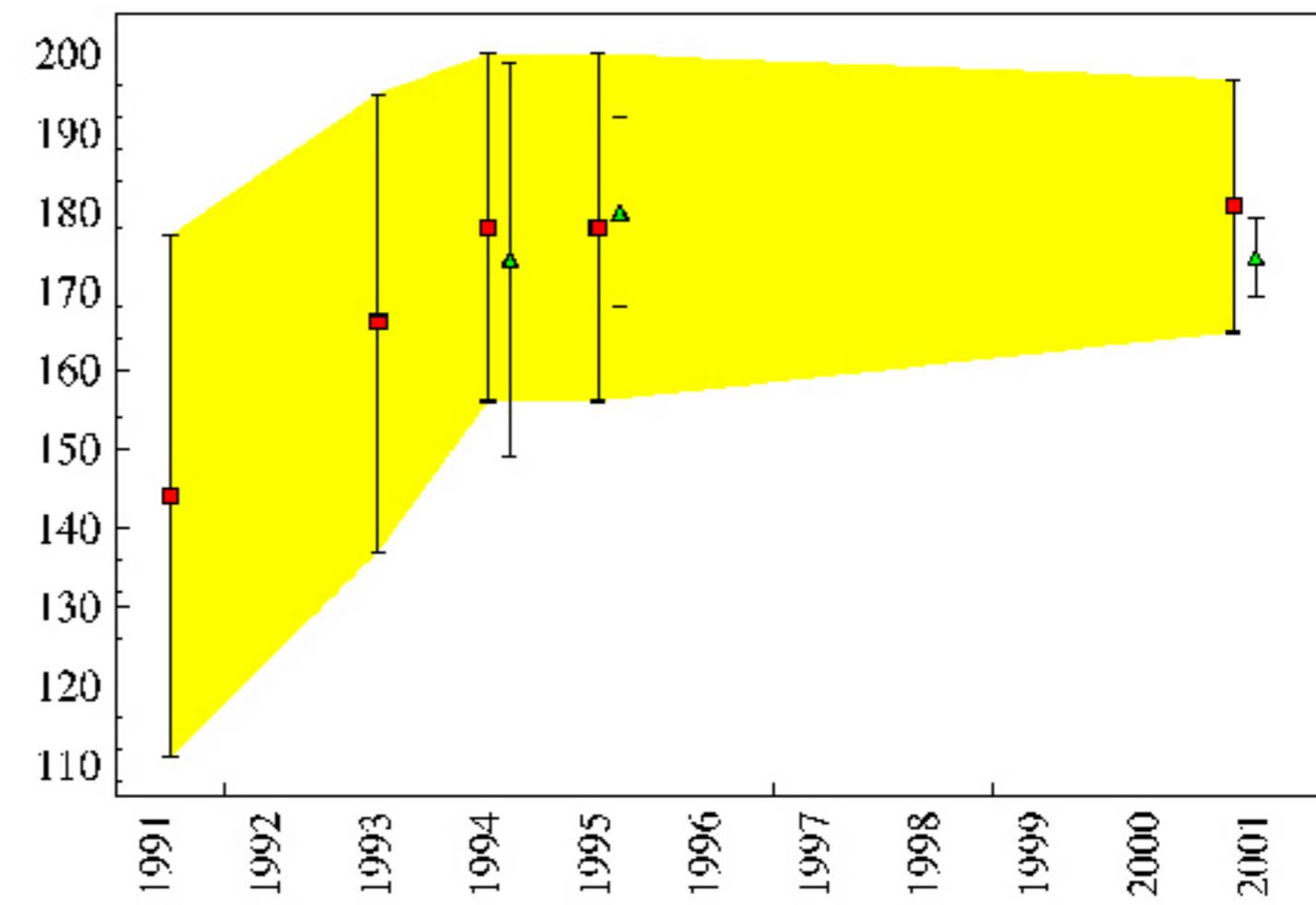
Figure 22: The knowledge of \bar{g}_{VI} and \bar{g}_{AI} from

MASA DEL QUARK TOP

$M_t > 40 \text{ GeV}$ (1989)



$M_t = 176 \pm 5 \text{ GeV}$ (2000)



Quantity	Expected error	Achieved
m_Z	50 to 20 MeV	2.1 MeV
m_W	100 MeV	39 MeV
N_v	0.3	0.008
$A_{^0,\mu}^{FB}$	0.0035	0.0013
$A_{^0,b}^{FB}$	0.0050	0.0017
A_τ	0.0110	0.0043

¿Por qué?

El excelente rendimiento del acelerador y del grupo dedicado a su mantenimiento

Las excelentes prestaciones de los detectores, desde el inicio hasta el final de la toma de datos

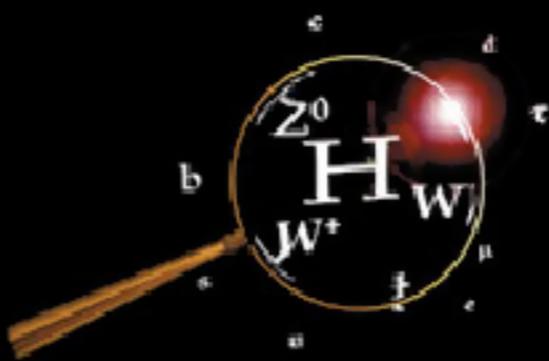
La división del trabajo entre el CERN y otros laboratorios en otros lugares del mundo

La cooperación entre los 4 experimentos y también con otros aceleradores, con el grupo del acelerador y con los teóricos

¿QUÉ HEMOS APRENDIDO DE LEP?

LEP ha consolidado el Modelo Estándar como la teoría de las partículas elementales. Y lo ha sometido a los tests más exigentes a los que jamás ha sido sometida una teoría física.

Falta por encontrar el bosón de Higgs



¿Nueva física, nuevos descubrimientos?

Mayores aceleradores (LHC)

... O mirar en otros lugares (cosmología)