

# Bevezetés a részecskefizikába

*Előadássorozat fizikatanárok részére  
(CERN, 2007)*

**Horváth Dezső**

horvath@rmki.kfki.hu.

MTA KFKI Részecske– és Magfizikai Kutatóintézet, Budapest  
és ATOMKI, Debrecen



# Bevezetés a részecskefizikába 2

## Vázlat

### C. A Standard Modell ellenőrzése
















- LEP és LHC
- Kalorimetria
- Jellegzetes események
- Z-szélesség és a 3 család
- Higgs-keresés

### D. Szimmetriák és sértésük

- Tükrözési szimmetriák
- A paritássértés felfedezése
- Kaonfizika és CP-sértés
- CPT-invariancia és ellenőrzése



# A Standard Modell állatkertje

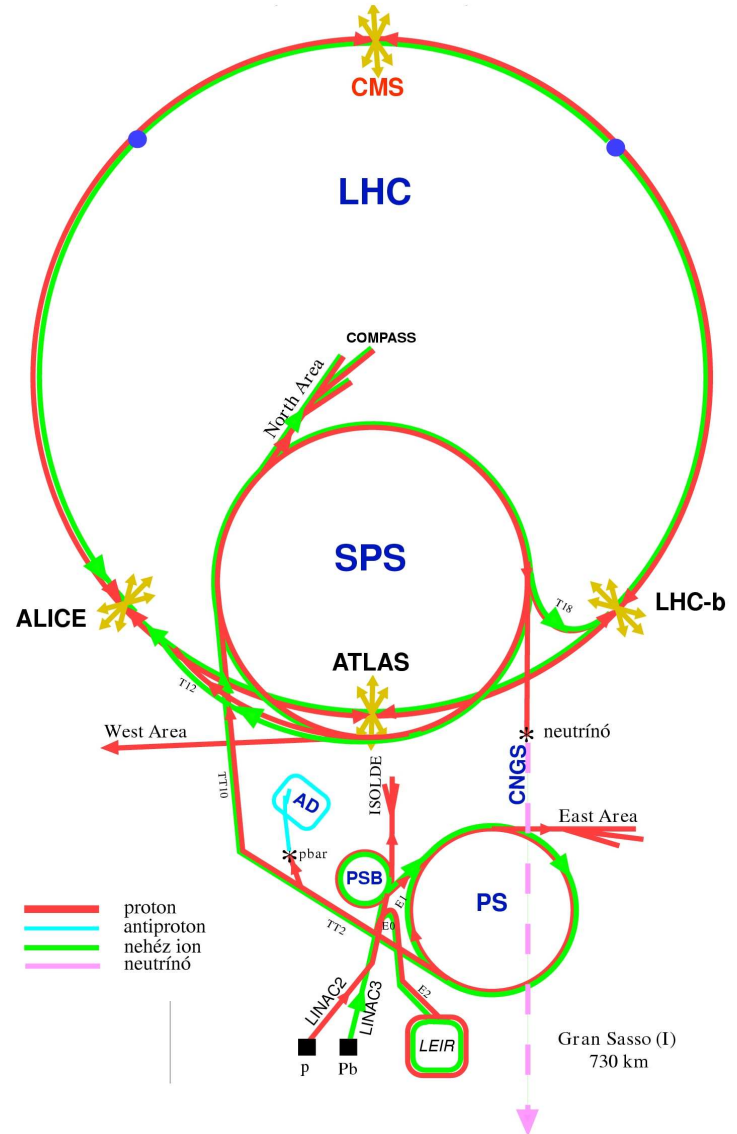
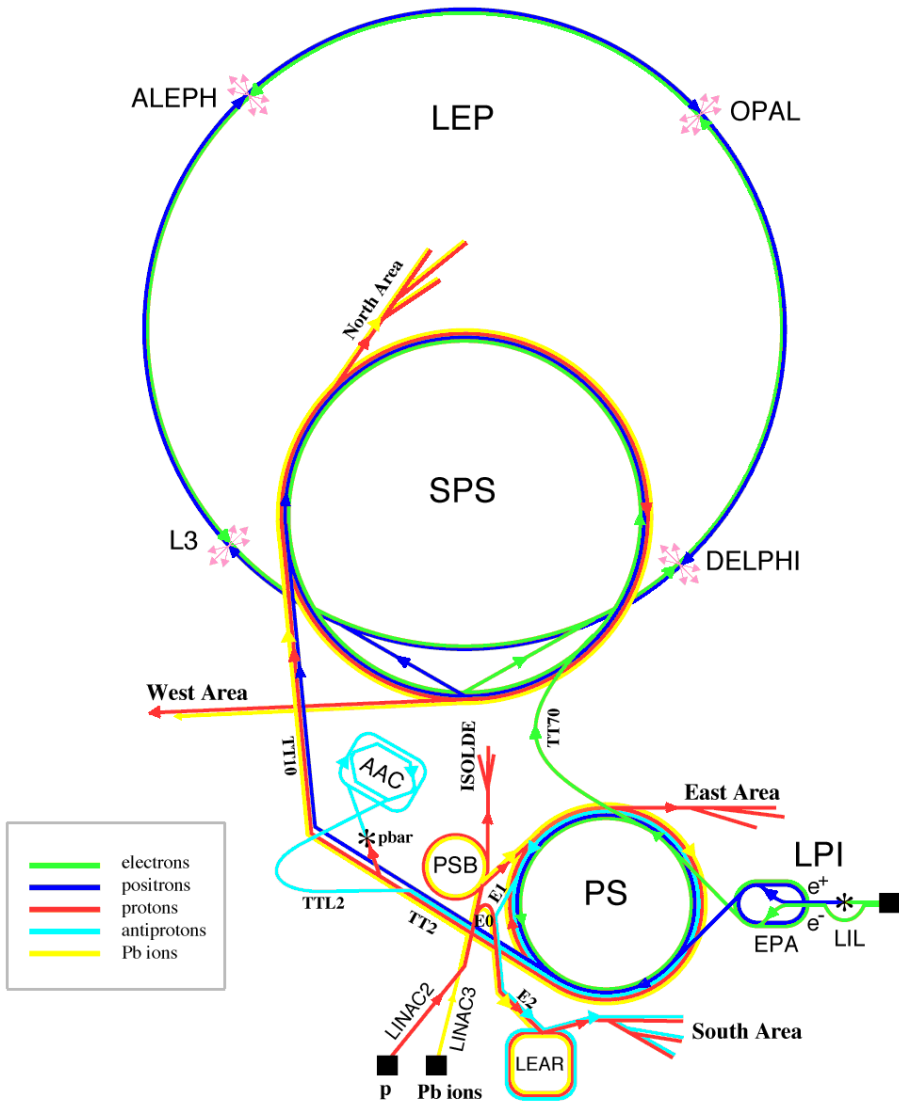
Quarks		Leptons		Bosons
 up	 down	 electron	 neutrino $e$	 photon
 charm	 strange	 muon	 neutrino $\mu$	 gluon
 top	 beauty	 tau	 neutrino $\tau$	 $Z^0 W^\pm$
The Standard Model		A. Pich - CERN Summer Lectures 2005		



# A CERN gyorsítói

LEP 2000-ig

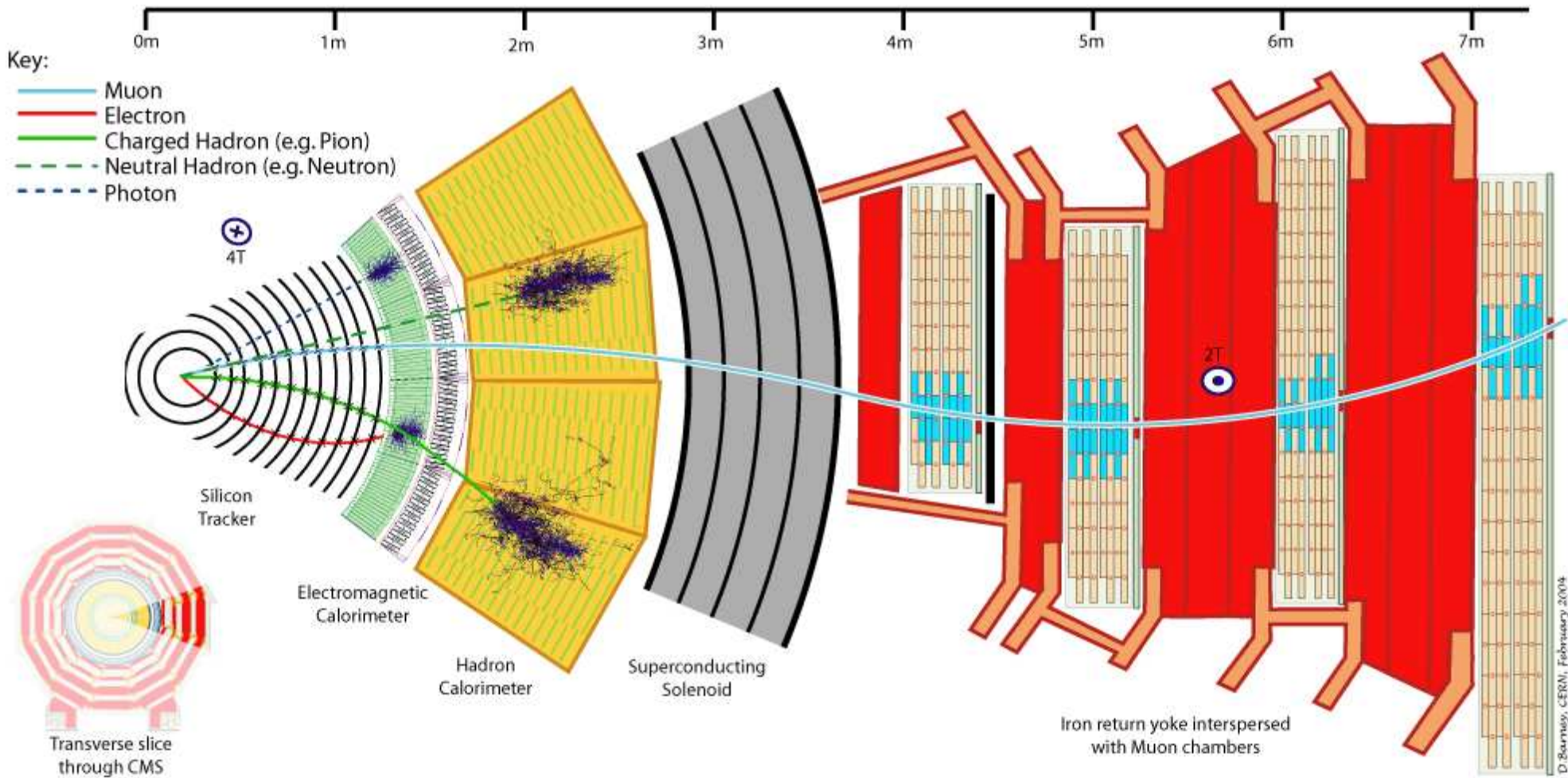
LHC 2007-től



# A néhai LEP-gyorsító



# Kalorimetria: a CMS-detektor szelete

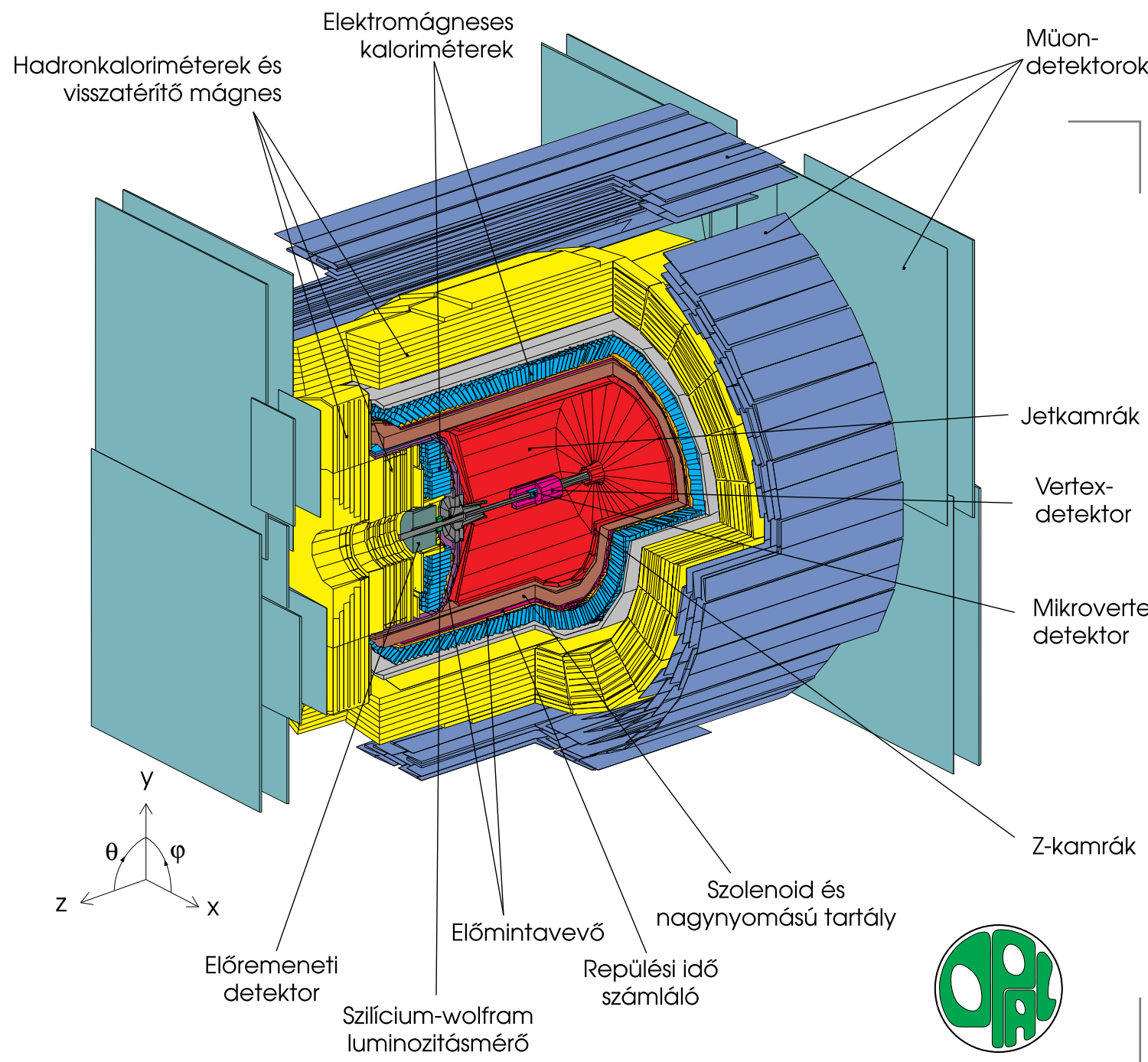


A néhai **OPAL** detektor

Omni-Purpose Apparatus for LEP

Large Electron Positron collider, 1989–2000

10 m  
×  
Ø10 m



## LEP-események:

$$e^+e^- \rightarrow Z^* \rightarrow \dots$$

pontszerű leptonok  
ütközése

tiszta folyamatok

## Tipikus OPAL-esemény

$$e^+e^- \rightarrow W^+W^-$$



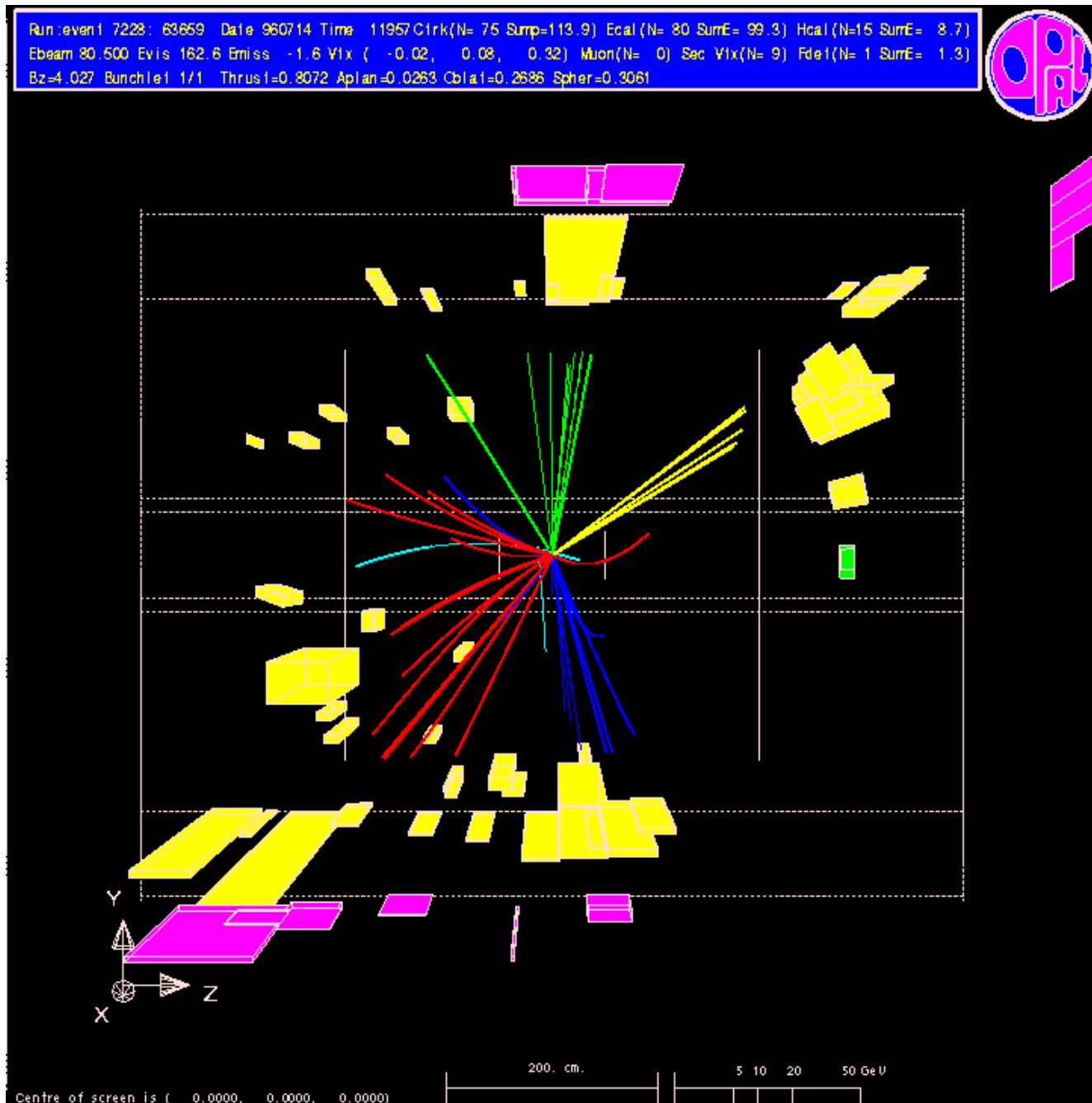
4 kvark



4 hadronzár

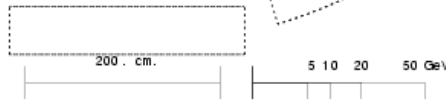
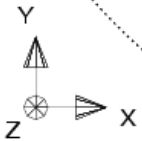
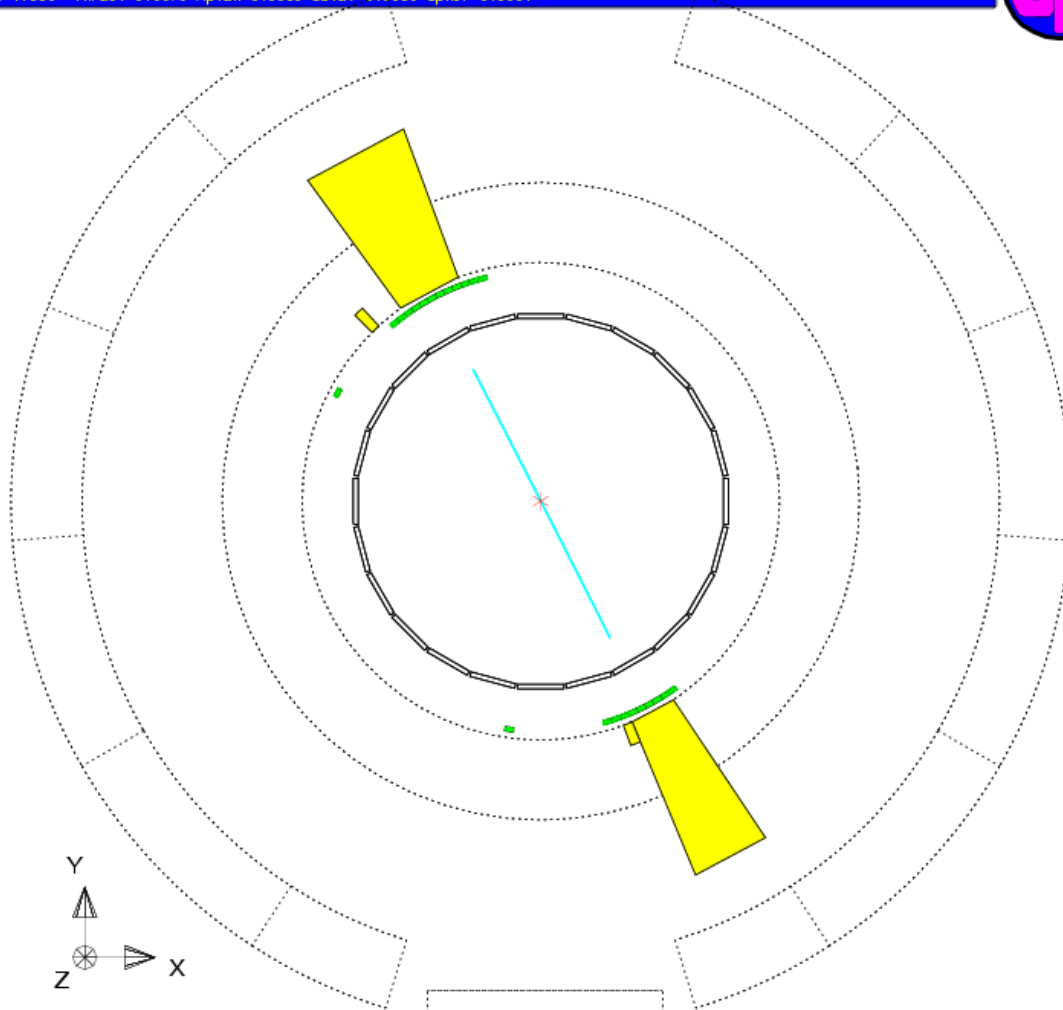


75 töltött részecske





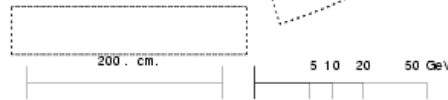
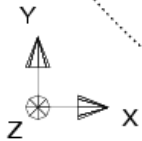
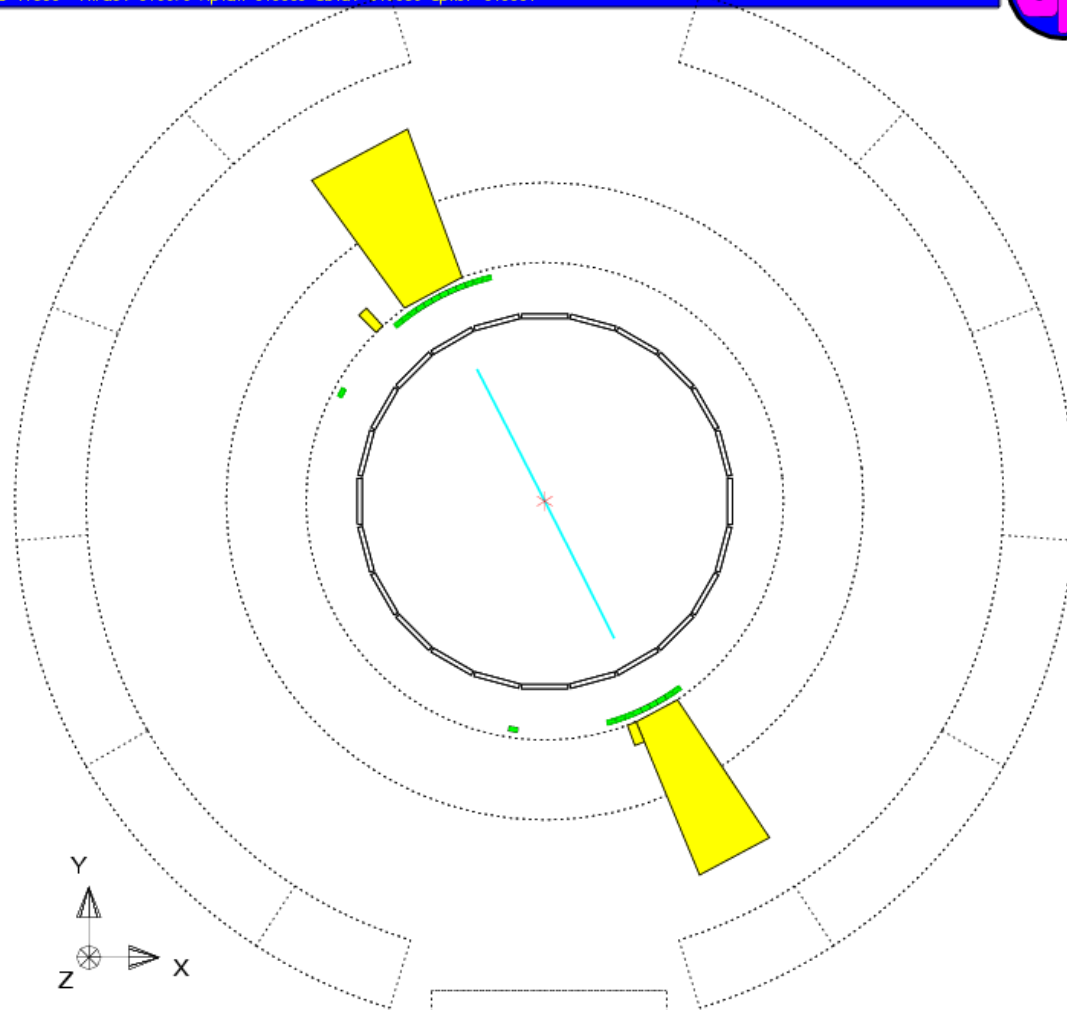
Run: event 4093: 1150 Date 930527 Time 20751 Ctrk (N= 2 Sump= 92.4) Ecal (N= 9 SumE= 90.5) Hcal (N= 0 SumE= 0.0)  
Ebeam 45.658 Evis 94.4 Emis -3.1 Vtx ( -0.05, 0.08, 0.36) Muon (N= 0) Sec Vtx (N= 0) Fdet (N= 1 SumE= 0.0)  
Bz=4.350 Thrust=0.9979 Aplan=0.0000 Oblat=0.0039 Spher=0.0001



Centre of screen is ( 0.0000, 0.0000, 0.0000)



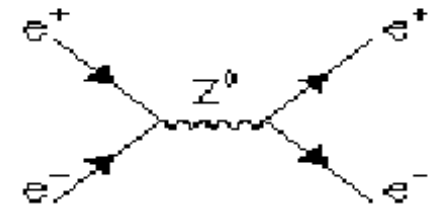
Run: event 4093: 1150 Date 930527 Time 20751 Ctrk (N= 2 Sump= 92.4) Ecal (N= 9 SumE= 90.5) Hcal (N= 0 SumE= 0.0)  
 Ebeam 45.658 Evis 94.4 Emiss -3.1 Vtx ( -0.05, 0.08, 0.36) Muon (N= 0) Sec Vtx (N= 0) Fdet (N= 1 SumE= 0.0)  
 Bz=4.350 Thrust=0.9979 Aplan=0.0000 Oblat=0.0039 Spher=0.0001



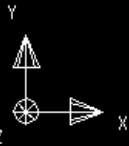
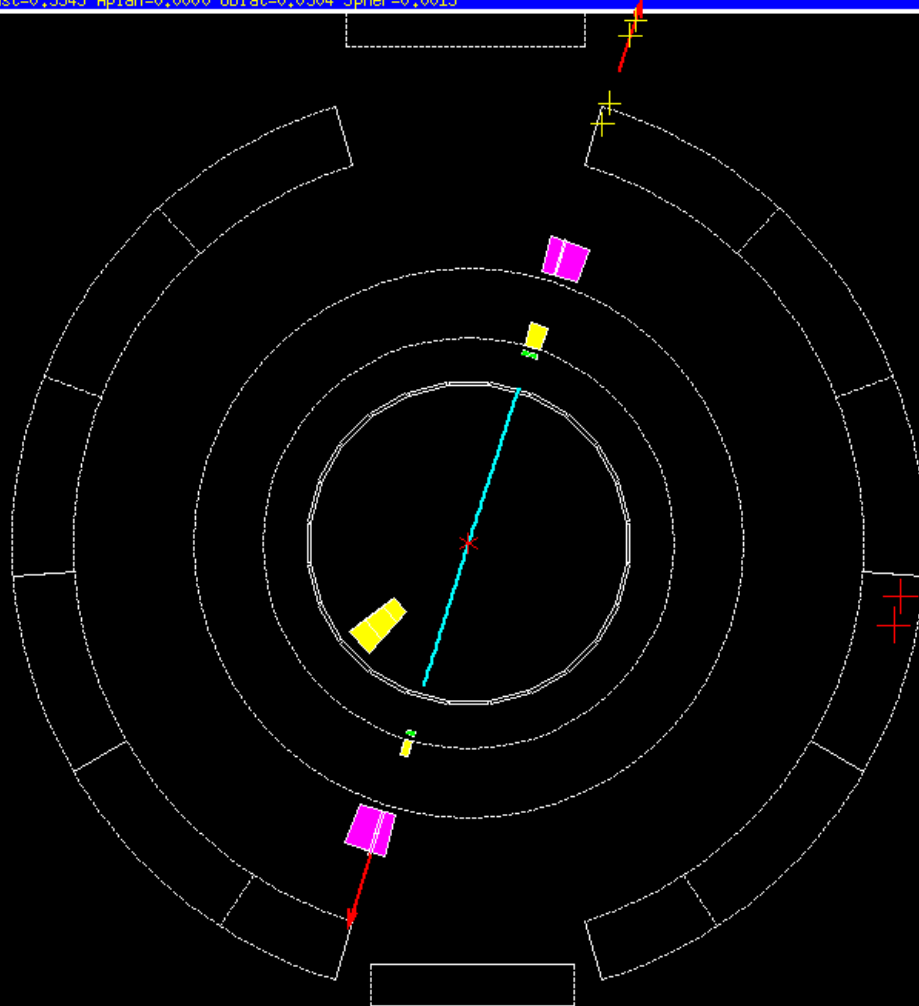
Centre of screen is ( 0.0000, 0.0000, 0.0000)

# OPAL

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



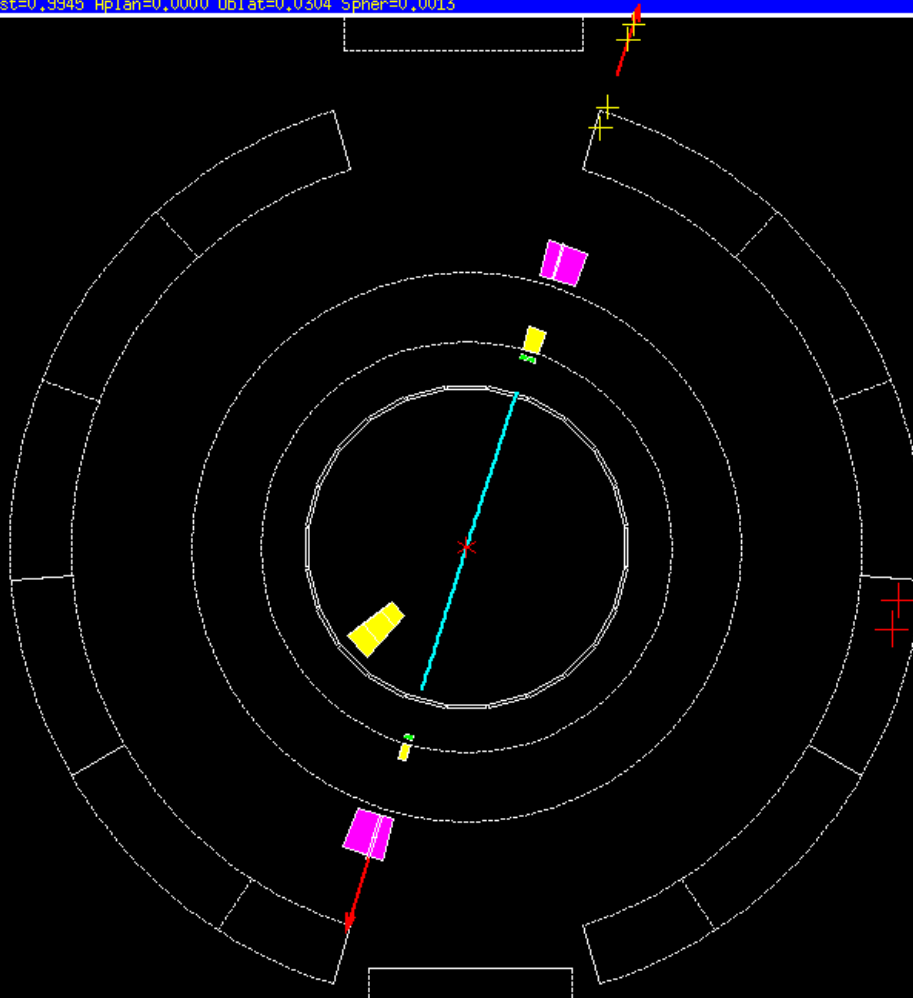
Run: event 4093; 1042 Date 930527 Time 20724 Ctrk(N= 2 Sump= 91.4) Ecal(N= 8 SumE= 5,0) Hcal(N= 4 SumE= 6,9)  
Ebeam 45,658 Evis 101,0 Emiss -9,6 Vtx ( -0,05, 0,08, 0,36) Muon(N= 2) Sec Vtx(N= 0) Fdet(N= 1 SumE= 0,0)  
Bz=4,350 Thrust=0,9945 Aplan=0,0000 Oblat=0,0304 Spher=0,0013



Centre of screen is ( 0,0000, 0,0000, 0,0000)

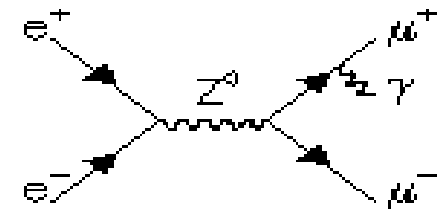
200. cm. 510 20 50 GeV

Run: event 4093; 1042 Date 930527 Time 20724 Ctrk(N= 2 Sump= 91.4) Ecal(N= 8 SumE= 5,0) Hcal(N= 4 SumE= 6,9)  
 Ebeam 45,658 Evis 101,0 Emiss -9,6 Vtx ( -0,05, 0,08, 0,36) Muon(N= 2) Sec Vtx(N= 0) Fdet(N= 1 SumE= 0,0)  
 Bz=4,350 Thrust=0,9945 Aplan=0,0000 Oblat=0,0304 Spher=0,0013

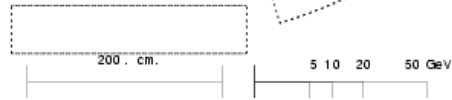
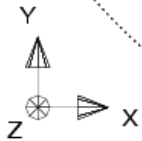
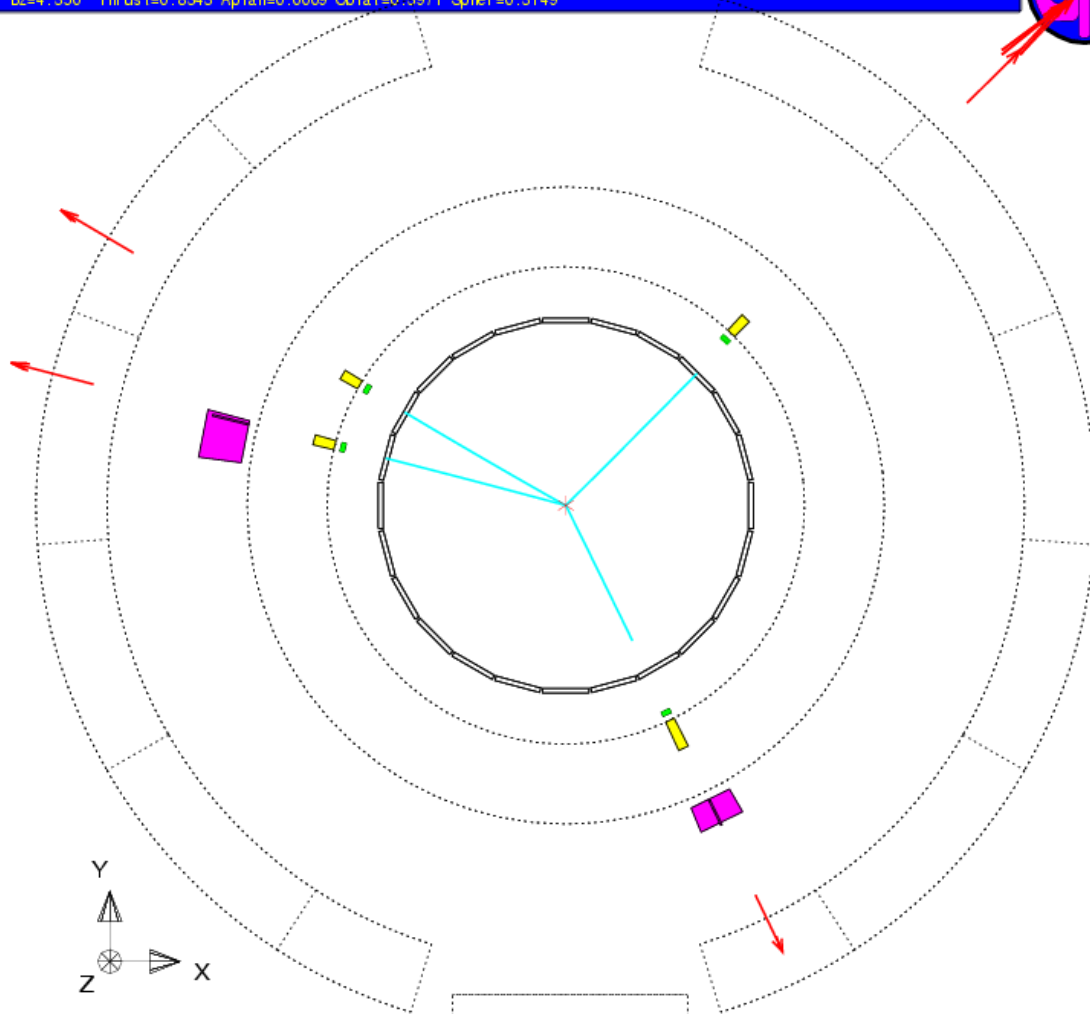


# OPAL

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



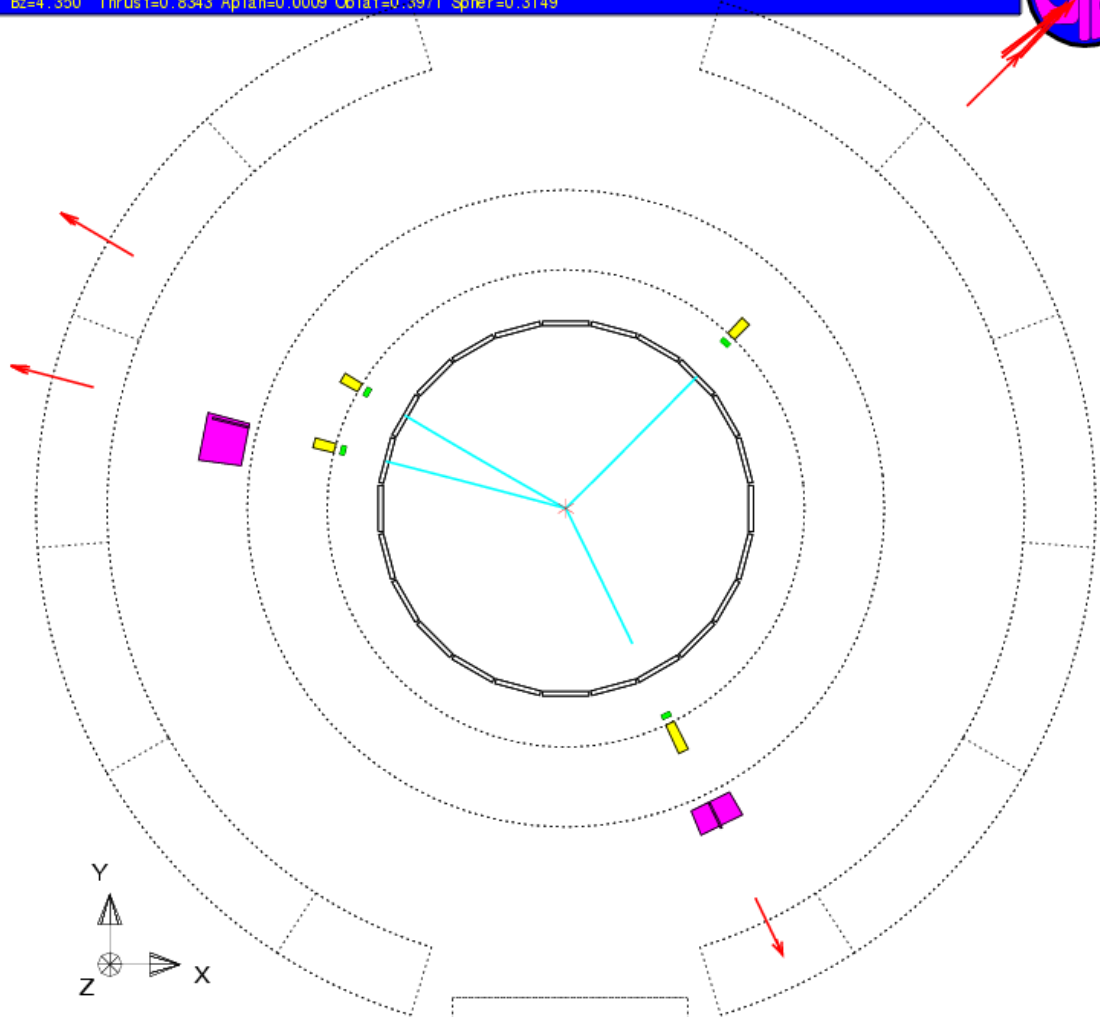
Run: event 3223: 7994 Date 920708 Time 10856 Ctrk (N= 4 Sump= 91.9) Ecal (N= 6 SumE= 4.0) Hcal (N= 4 SumE= 4.3)  
Ebeam 45.652 Evis 96.2 Emiss -4.9 Vtx ( 0.02, 0.06, 0.44) Muon(N= 11) Sec Vtx(N= 0) Fdet(N= 0 SumE= 0.0)  
Bz=4.350 Thrust=0.8343 Aplan=0.0009 Oblat=0.3971 Spher=0.3149



Centre of screen is ( 0.0000, 0.0000, 0.0000)

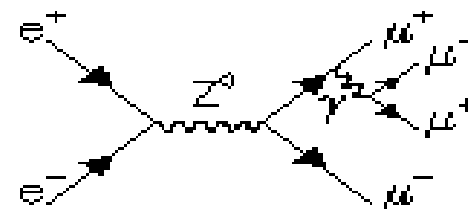


Run: event 3223: 7994 Date 920708 Time 10856 Ctrk (N= 4 Sump= 91.9) Ecal (N= 6 SumE= 4.0) Hcal (N= 4 SumE= 4.3)  
 Ebeam 45.652 Evis 96.2 Emiss -4.9 Vtx ( 0.02, 0.06, 0.44) Muon (N= 11) Sec Vtx (N= 0) Fdet (N= 0 SumE= 0.0)  
 Bz=4.350 Thrust=0.8343 Aplan=0.0009 Oblat=0.3971 Spher=0.3149

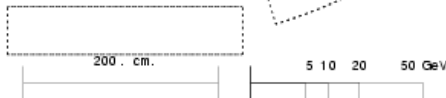


# OPAL

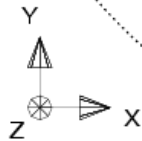
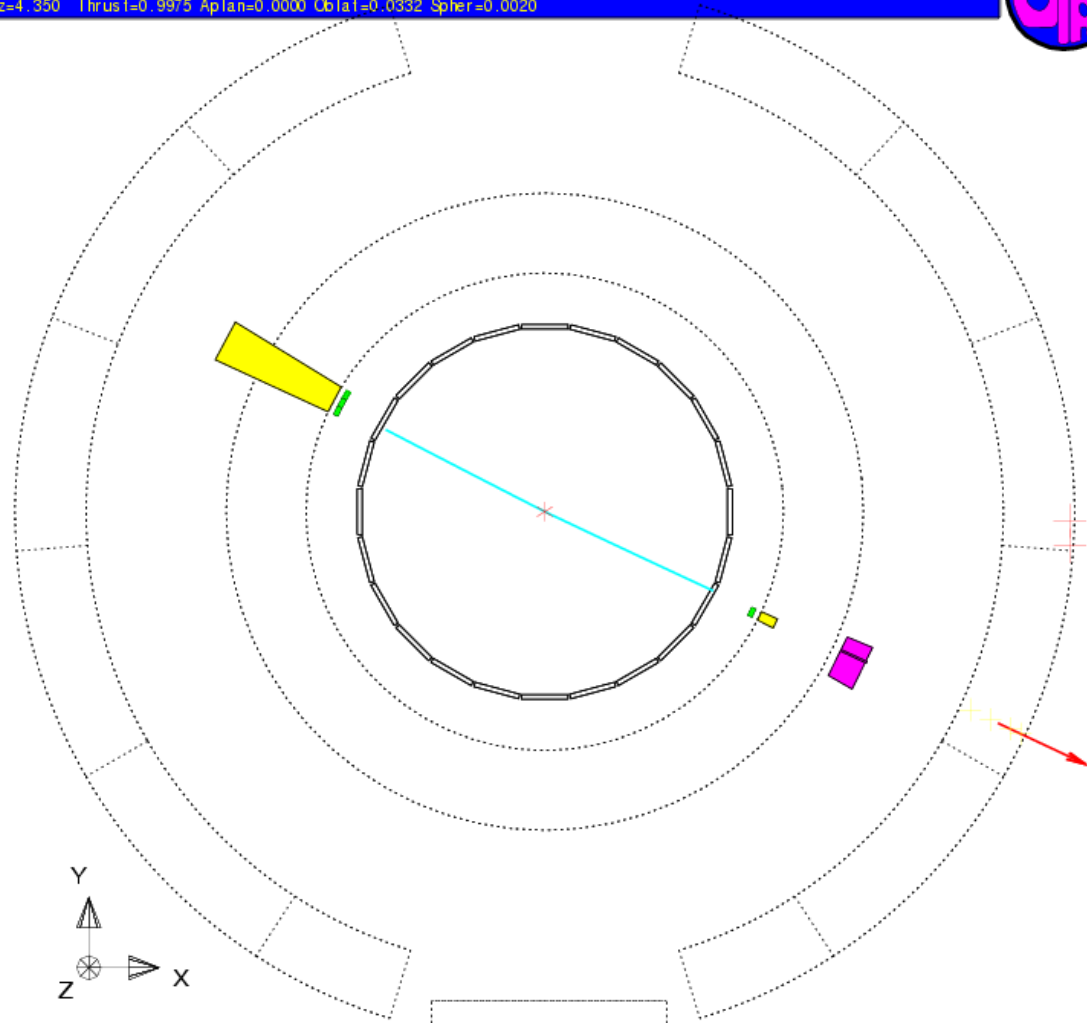
$$e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-\mu^+\mu^-$$



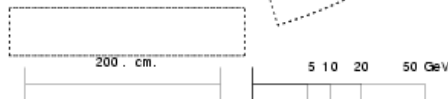
Centre of screen is ( 0.0000, 0.0000, 0.0000)



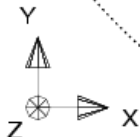
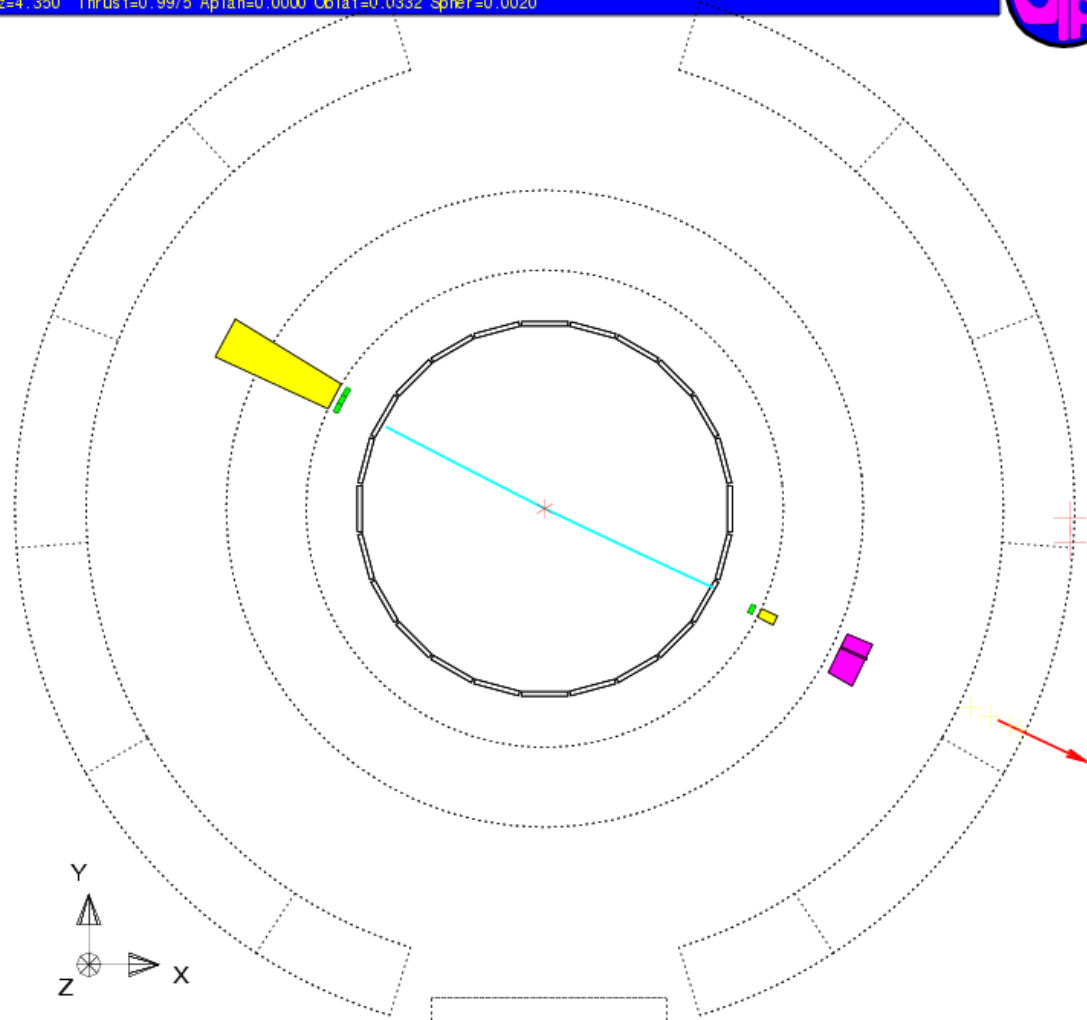
Run: event 4177: 49573 Date 930611 Time 203852 Ctrk (N= 2 Sump= 50.6) Ecal (N= 4 SumE= 26.8) Hcal (N= 2 SumE= 1.3)  
Ebeam 45.661 Evis 52.1 Emiss 39.3 Vtx ( -0.03, 0.08, 0.45) Muon (N= 1) Sec Vtx (N= 0) Fdet (N= 0 SumE= 0.0)  
Bz=4.350 Thrust=0.9975 Aplan=0.0000 Oblat=0.0332 Spher=0.0020



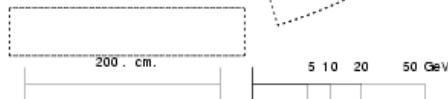
Centre of screen is ( 0.0000, 0.0000, 0.0000)



Run: event 4177: 49573 Date 930611 Time 203852 Ctrk (N= 2 Sump= 50.6) Ecal (N= 4 SumE= 26.8) Hcal (N= 2 SumE= 1.3)  
 Ebeam 45.661 Evis 52.1 Emiss 39.3 Vtx ( -0.03, 0.08, 0.45) Muon (N= 1) Sec Vtx (N= 0) Fdet (N= 0 SumE= 0.0)  
 Bz=4.350 Thrust=0.9975 Aplan=0.0000 Oblat=0.0332 Spher=0.0020

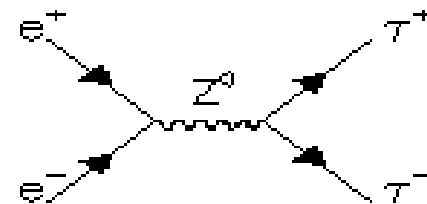


Centre of screen is ( 0.0000, 0.0000, 0.0000)



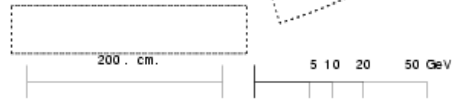
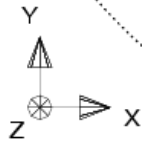
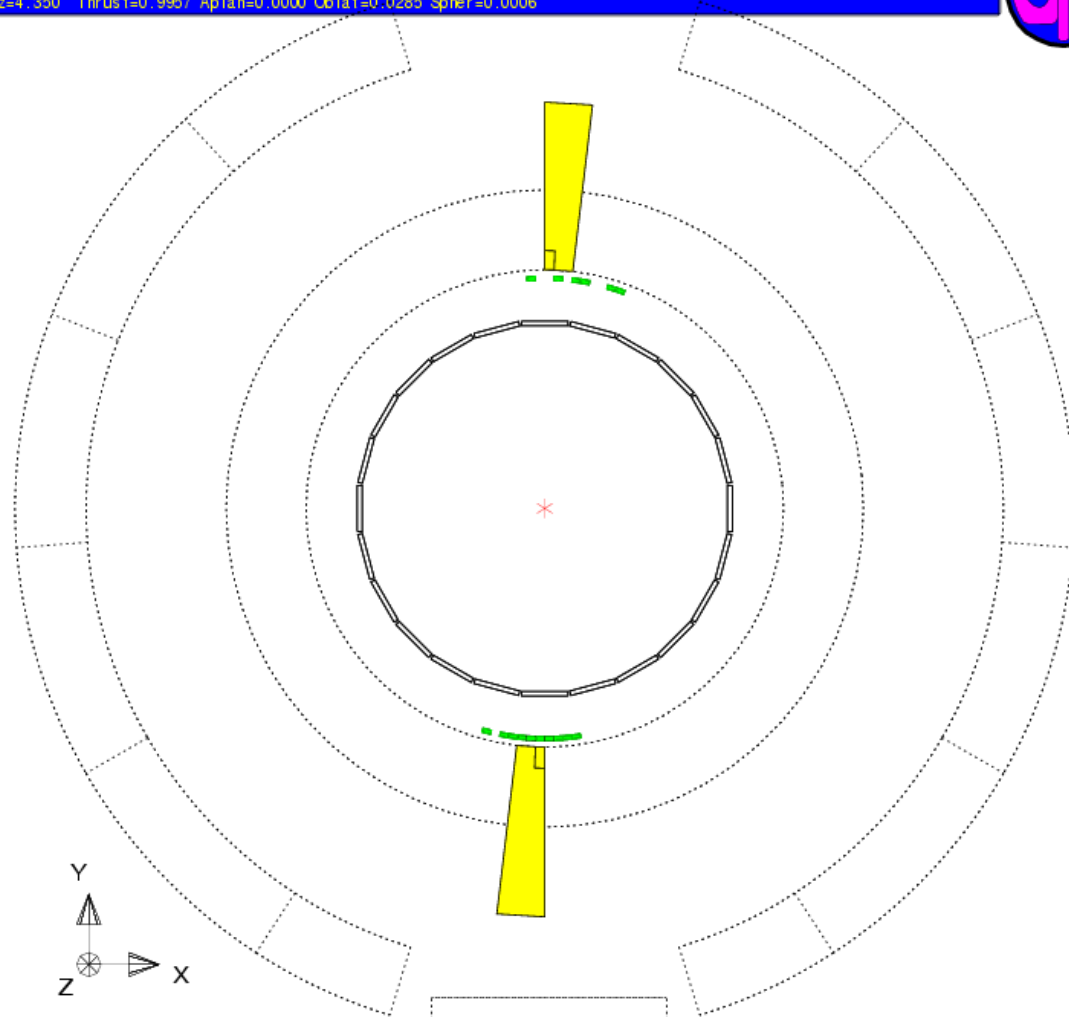
# OPAL

$$e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^- \rightarrow \mu\nu e\nu$$





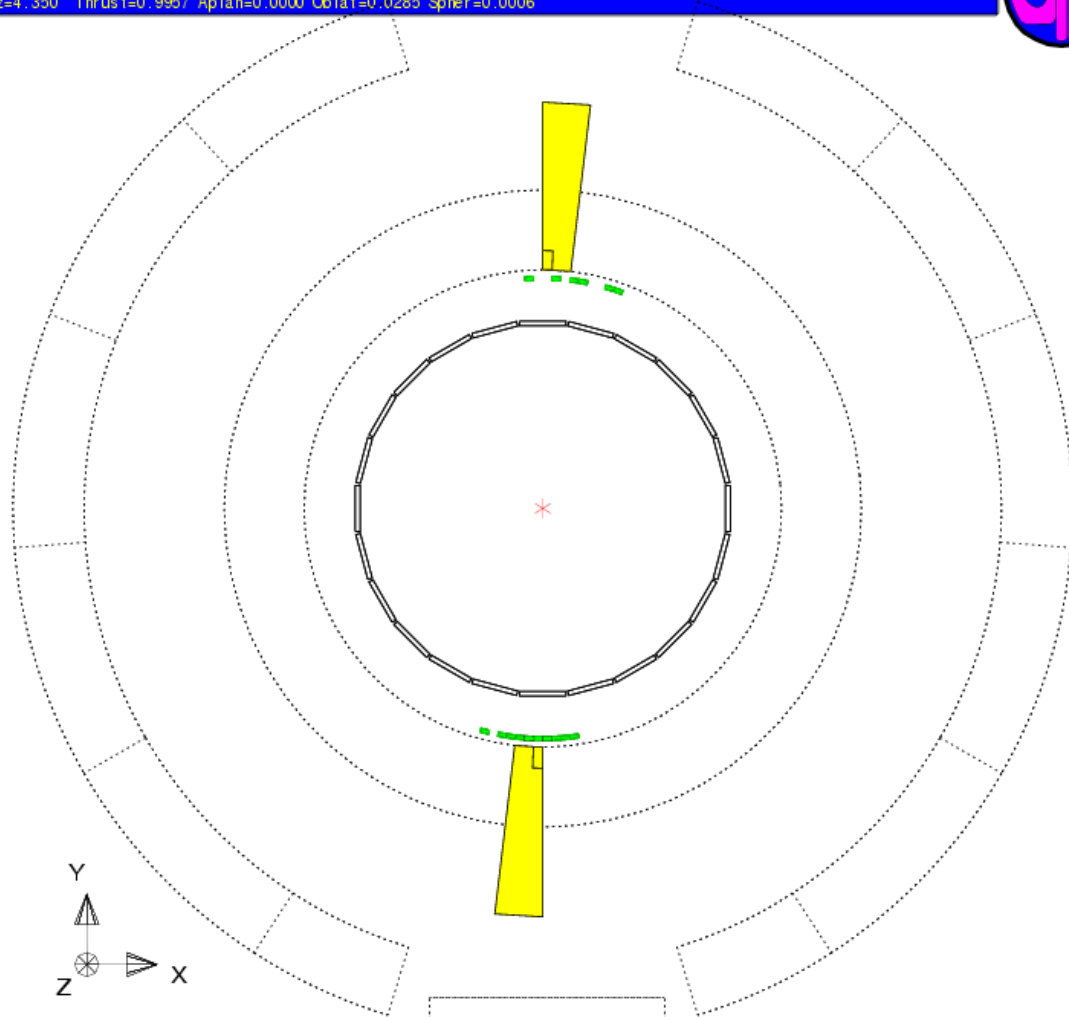
Run: event 4177:115034 Date 930612 Time 10314 Ctrk (N= 0 Sump= 0.0) Ecal (N= 8 SumE= 97.4) Hcal (N= 1 SumE= 2.5)  
 Ebeam 45.661 Evis 99.6 Emiss -8.3 Vtx ( -0.04, 0.08, 0.45) Muon(N= 0) Sec Vtx(N= 0) Fdet(N= 0 SumE= 0.0)  
 Bz=4.350 Thrust=0.9957 Aplan=0.0000 Oblat=0.0285 Spher=0.0006



Centre of screen is ( 0.0000, 0.0000, 0.0000)

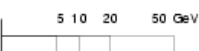
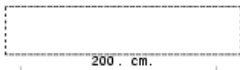
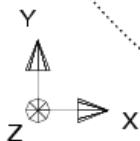


Run: event 4177:115034 Date 930612 Time 10314 Ctrk(N= 0 Sump= 0.0) Ecal(N= 8 SumE= 97.4) Hcal(N= 1 SumE= 2.5)  
 Ebeam 45.661 Evis 99.6 Emiss -8.3 Vtx ( -0.04, 0.08, 0.45) Muon(N= 0) Sec Vtx(N= 0) Fdet(N= 0 SumE= 0.0)  
 Bz=4.350 Thrust=0.9957 Aplan=0.0000 Oblat=0.0285 Spher=0.0006



OPAL

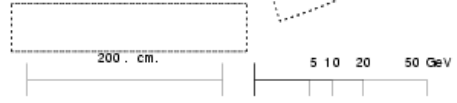
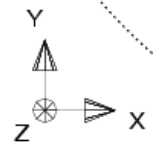
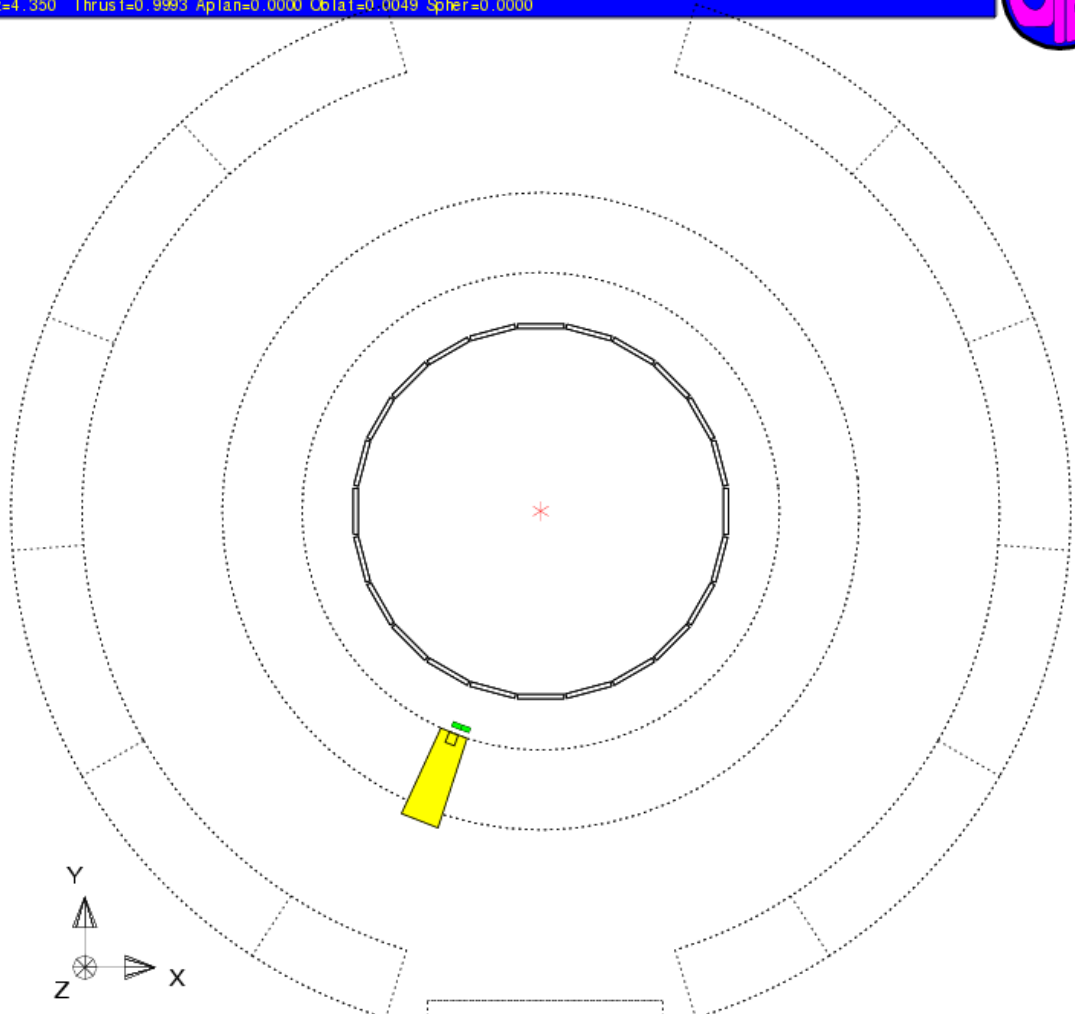
$$e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$$



Centre of screen is ( 0.0000, 0.0000, 0.0000)



Run: event 2468: 66487 Date 910819 Time 91037 Ctrk (N= 0 Sump= 0.0) Ecal (N= 4 SumE= 15.3) Hcal (N= 0 SumE= 0.0)  
Ebeam 45.613 Evis 15.3 Emis 75.9 Vtx ( -0.12, 0.12, 0.19) Muon (N= 0) Sec Vtx (N= 0) Fdet (N= 0 SumE= 0.0)  
Bz=4.350 Thrust=0.9993 Aplan=0.0000 Oblat=0.0049 Spher=0.0000



Centre of screen is ( 0.0000, 0.0000, 0.0000)

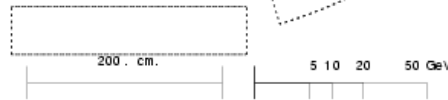
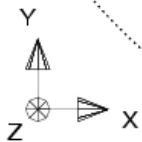
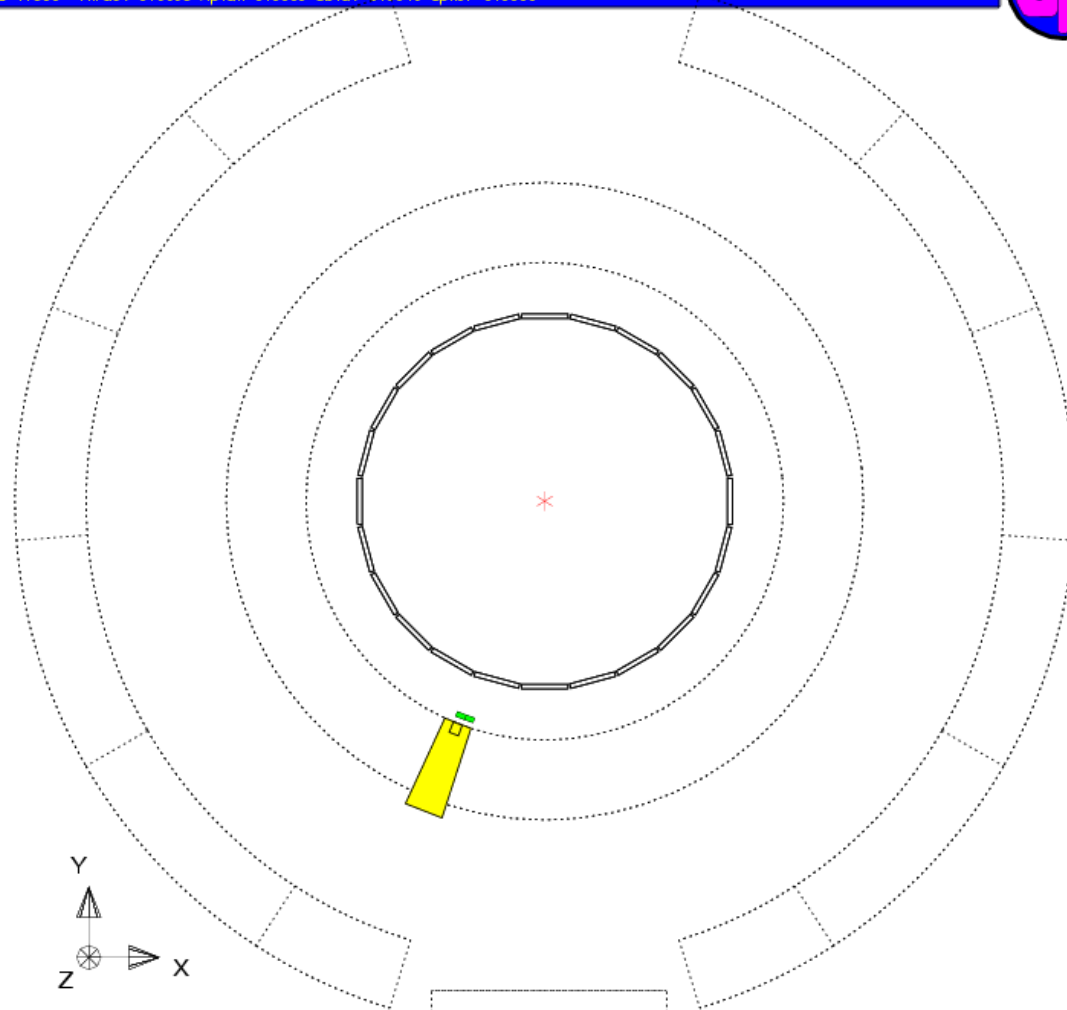
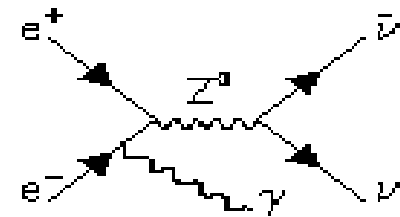


Run:event 2468: 66487 Date 910819 Time 91037 Ctrk (N= 0 Sump= 0.0) Ecal (N= 4 SumE= 15.3) Hcal (N= 0 SumE= 0.0)  
 Ebeam 45.613 Evis 15.3 Emiss 75.9 Vtx ( -0.12, 0.12, 0.19) Muon(N= 0) Sec Vtx(N= 0) Fdet (N= 0 SumE= 0.0)  
 Bz=4.350 Thrust=0.9993 Aplan=0.0000 Oblat=0.0049 Spher=0.0000



# OPAL

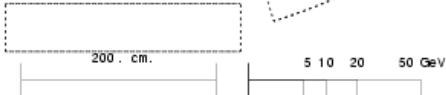
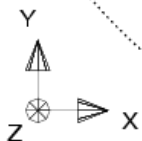
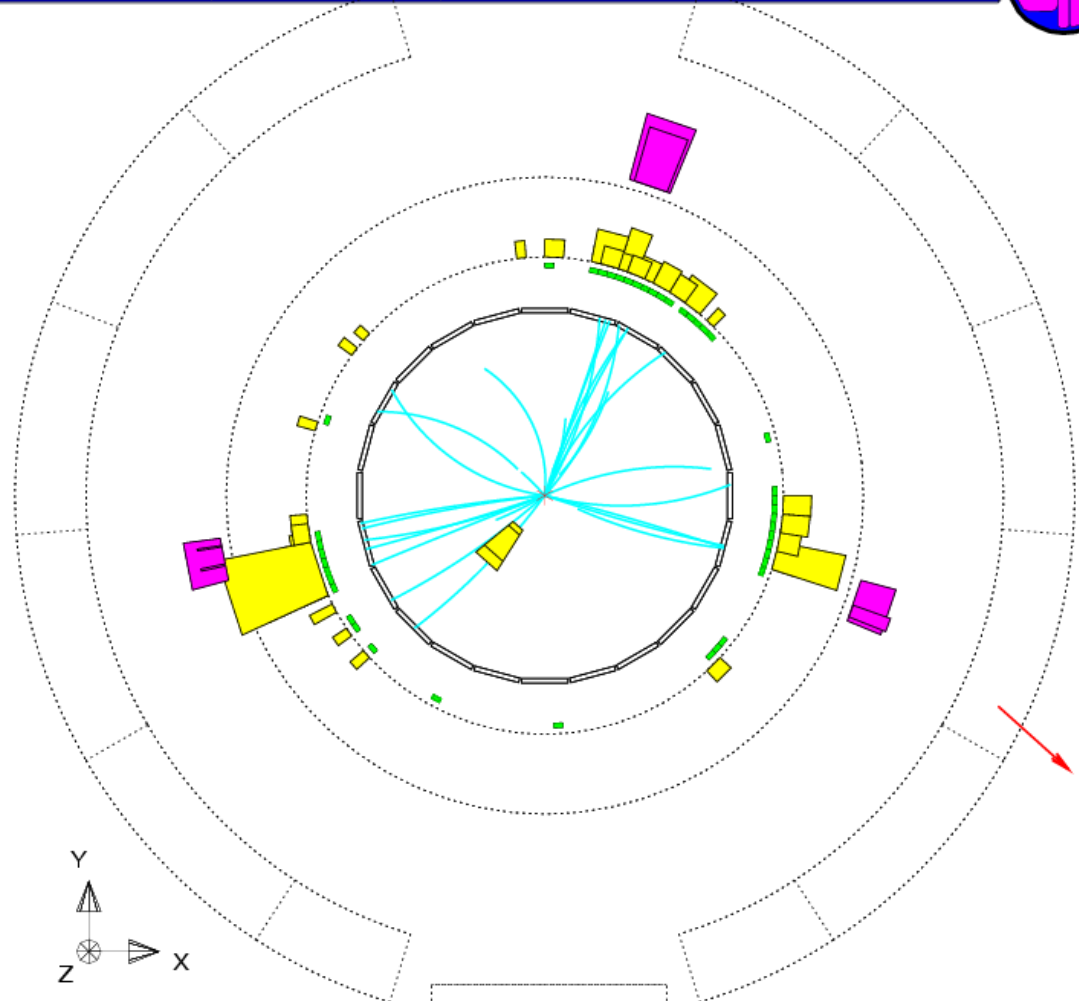
$$e^+e^- \rightarrow \nu\nu\gamma$$



Centre of screen is ( 0.0000, 0.0000, 0.0000)



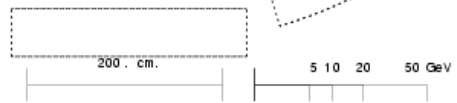
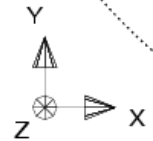
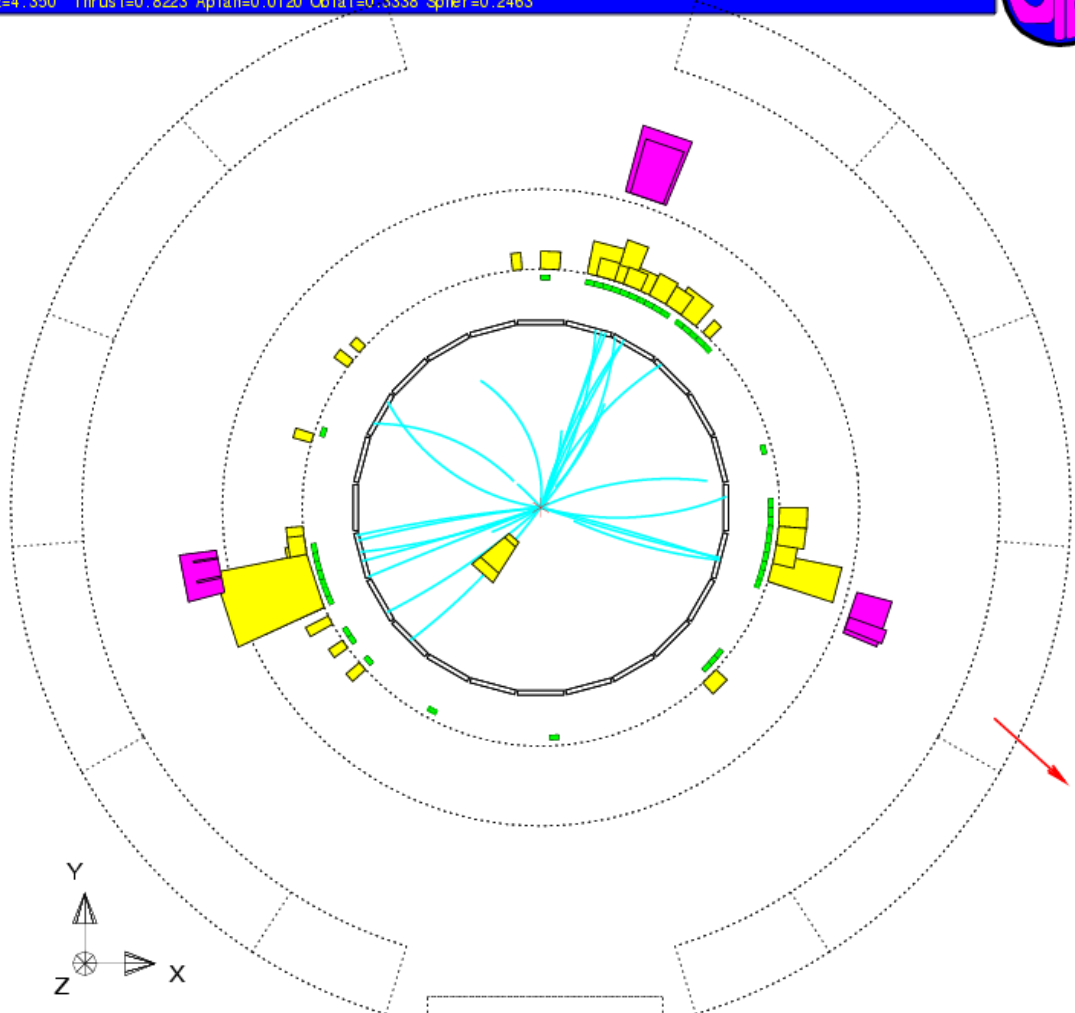
Run: event 2542: 63750 Date 911014 Time 35925 Ctrk (N= 28 Sump= 42.1) Ecal (N= 42 SumE= 59.8) Hcal (N= 8 SumE= 12.7)  
Ebeam 45.609 Evis 86.2 Emiss 5.0 Vtx ( -0.05, 0.12, -0.90) Muon(N= 1) Sec Vtx(N= 0) Fdet(N= 2 SumE= 0.0)  
Bz=4.350 Thrust=0.8223 Aplan=0.0120 Oblat=0.3338 Spher=0.2463



Centre of screen is ( 0.0000, 0.0000, 0.0000)



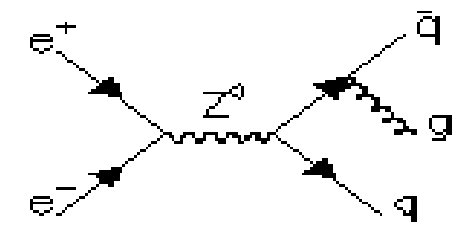
Run: event 2542: 63750 Date 911014 Time 35925 Cirk(N= 28 Sump= 42.1) Ecal(N= 42 SumE= 59.8) Hcal(N= 8 SumE= 12.7)  
 Ebeam 45.609 Evis 86.2 Emiss 5.0 Vtx ( -0.05, 0.12, -0.90) Muon(N= 1) Sec Vtx(N= 0) Fdet(N= 2 SumE= 0.0)  
 Bz=4.350 Thrust=0.8223 Aplan=0.0120 Oblat=0.3338 Spher=0.2463



Centre of screen is ( 0.0000, 0.0000, 0.0000)

# OPAL

$$e^+ e^- \rightarrow q \bar{q} g$$



# A Z-csúcs ( $e^+e^- \rightarrow Z \rightarrow \dots$ )

Rezonancia:  $E_{CM}^2 = M_Z^2$



$$M_Z = 91.1875 \pm 0.0021 \text{ GeV}$$

Bomlási szélesség:  $\Gamma_Z =$

$$\Gamma_{e^+e^-} + \Gamma_{\mu^+\mu^-} + \Gamma_{\tau^+\tau^-} + \Gamma_{\text{had}} + \Gamma_{\text{inv}}$$

SM mindegyiket megjósolja

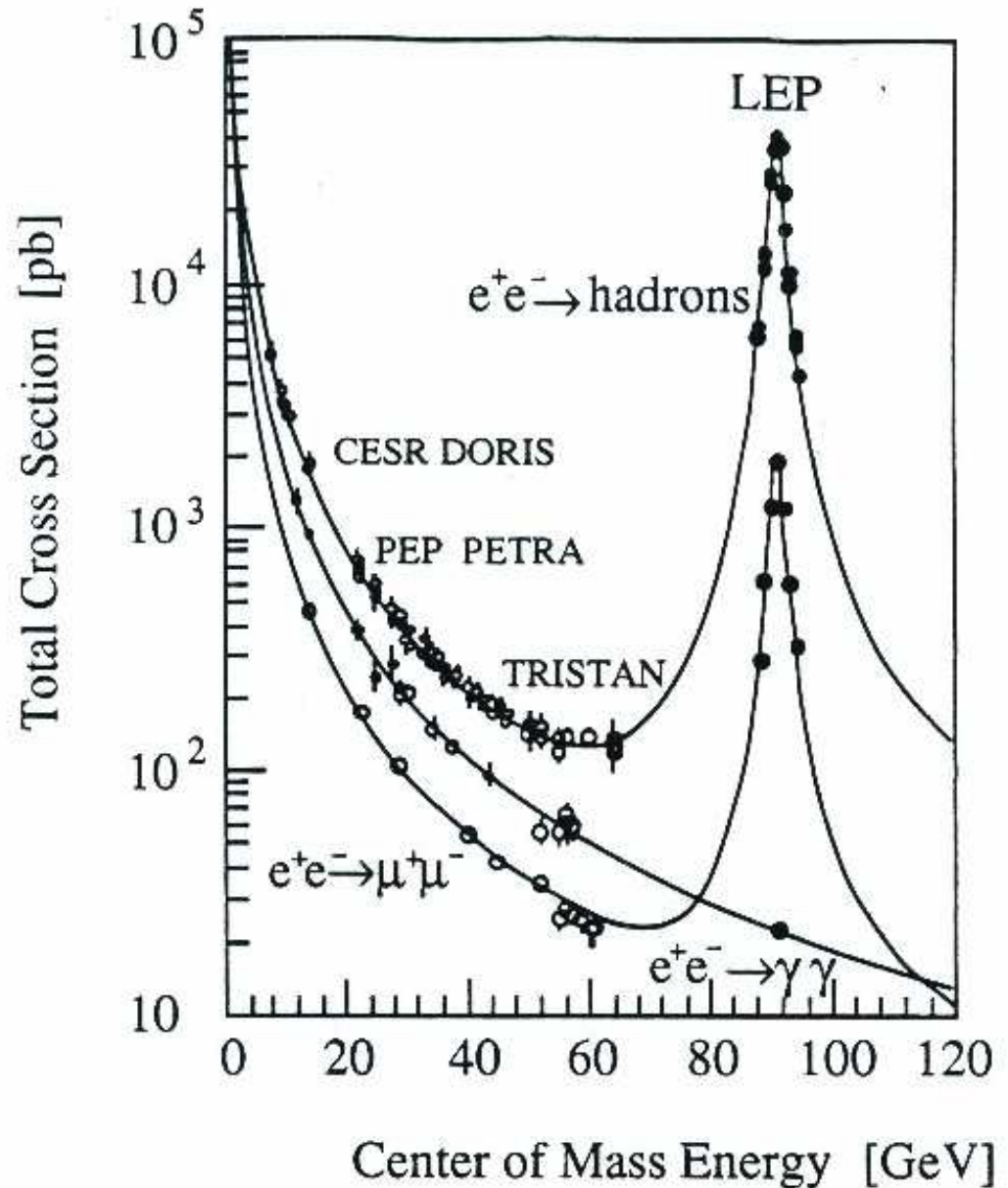
Illesztés LEP-adatokhoz  $\Rightarrow$

$$M_Z, \Gamma_Z, \Gamma(Z \rightarrow \dots) \text{ vs. } E_{CM}$$

**A láthatatlan szélesség:**

$$\Gamma_{\text{inv}} / \Gamma_Z =$$

$$1 - \Gamma_{\text{had}} / \Gamma_Z - 3 \times \Gamma_{\ell^+\ell^-} / \Gamma_Z \\ = (20,0 \pm 0.6)\%$$



# A 3 fermioncsalád

**A láthatatlan szélesség:**

$$\begin{aligned}\Gamma_{\text{inv}}/\Gamma_Z &= \\ 1 - \Gamma_{\text{hadr}}/\Gamma_Z - 3 \times \Gamma_{\ell^+\ell^-}/\Gamma_Z & \\ &= (20,0 \pm 0.6)\%\end{aligned}$$

**Standard Modell: neutrínók**

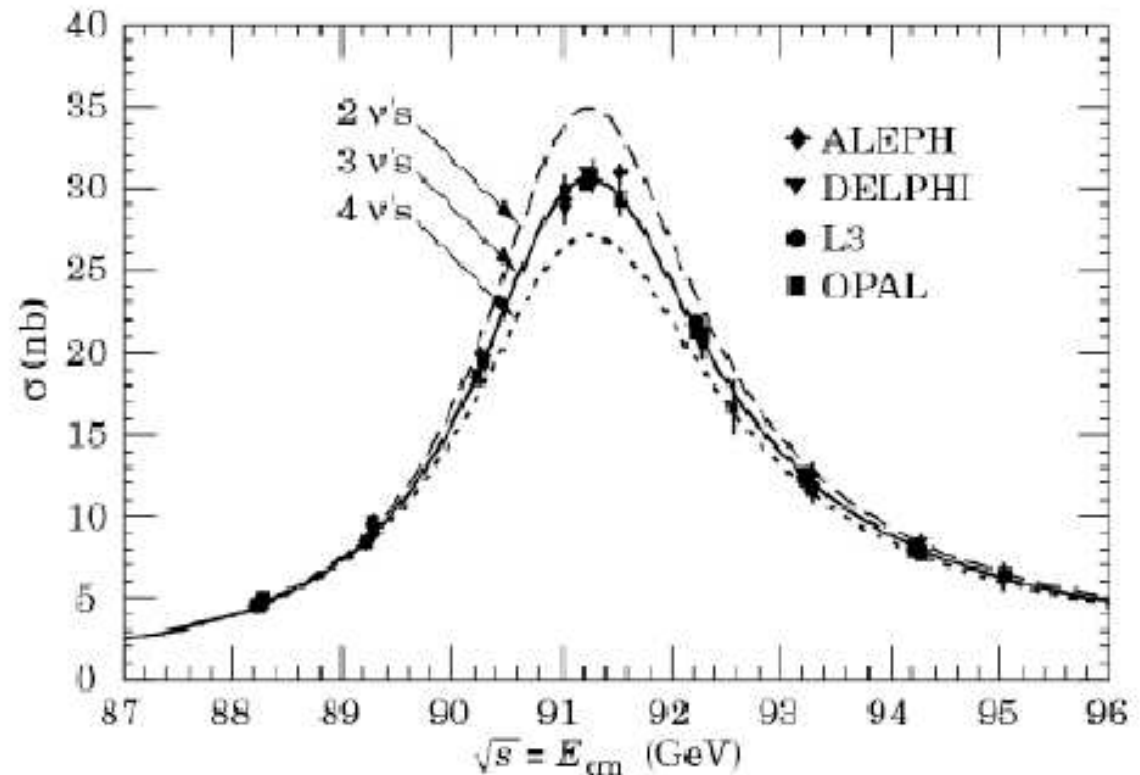
$$\Gamma_{\nu\bar{\nu}} = 1,979 \Gamma_{\ell^+\ell^-}$$

**Könnyű neutrínók száma:**

$$N_\nu = \Gamma_{\text{inv}}/\Gamma_{\nu\bar{\nu}} = 2,994 \pm 0.012$$

SM-ben 3 leptoncsalád  $\Rightarrow$   
3 kvarkcsalád (össztöltés 0!)

$\sigma(Z \rightarrow \text{hadrons})$





# A SM Higgs–bozonja

Spin nélküli, semleges, nehéz részecske

Renormálás (divergenciák eltávolítása) skalár részecskéje,  
kvantumszámok nélkül

A SM megadja a keletkezési és bomlási valószínűségeit.

Tömegfüggő, pl. fermion–párra bomlásé  $\sigma(H \rightarrow f\bar{f}) \sim m_f^2 / m_W^2$

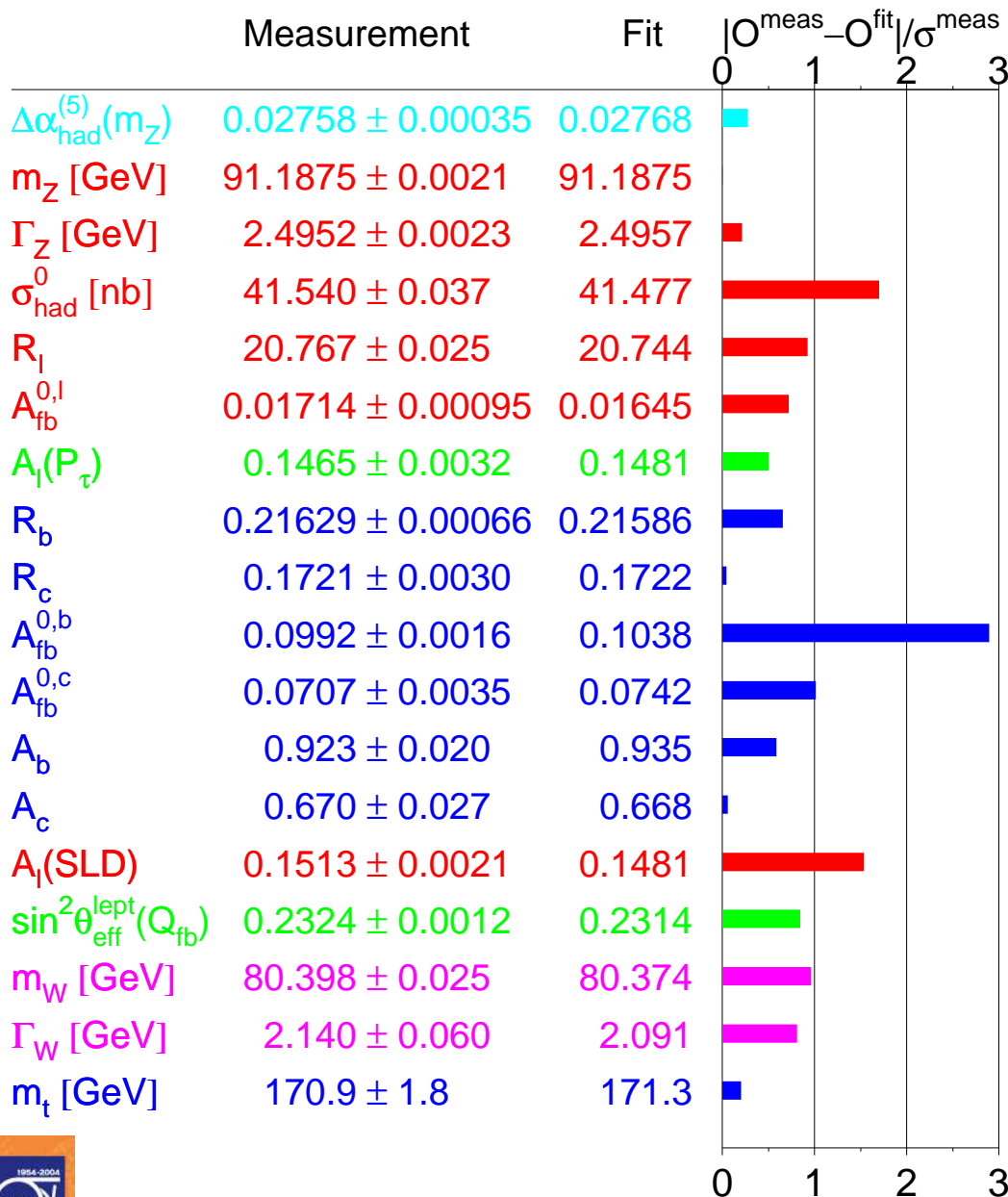
Tömeget a SM nem jósol, csak limitál:

$$30 \text{ GeV} < m_H < 500 \text{ GeV}$$

Megfigyelnünk nem sikerült. LEP:  $m_H > 114.4 \text{ GeV}$

Létezik? SM: muszáj léteznie

# A Standard Modell diadalmenete



2007-es állapot

Valamennyi kísérlet  
sokszáz mérésének  
analízise:

$|Mért - számolt| / szórás$

Kilógó adat változik

Most a  $e^+e^- \rightarrow Z \rightarrow b\bar{b}$   
előre-hátra aszimmetriája

LEP Electroyenge munkacsoport:

<http://lepewwg.web.cern.ch/>



# A SM érzékenysége Higgs-tömegre

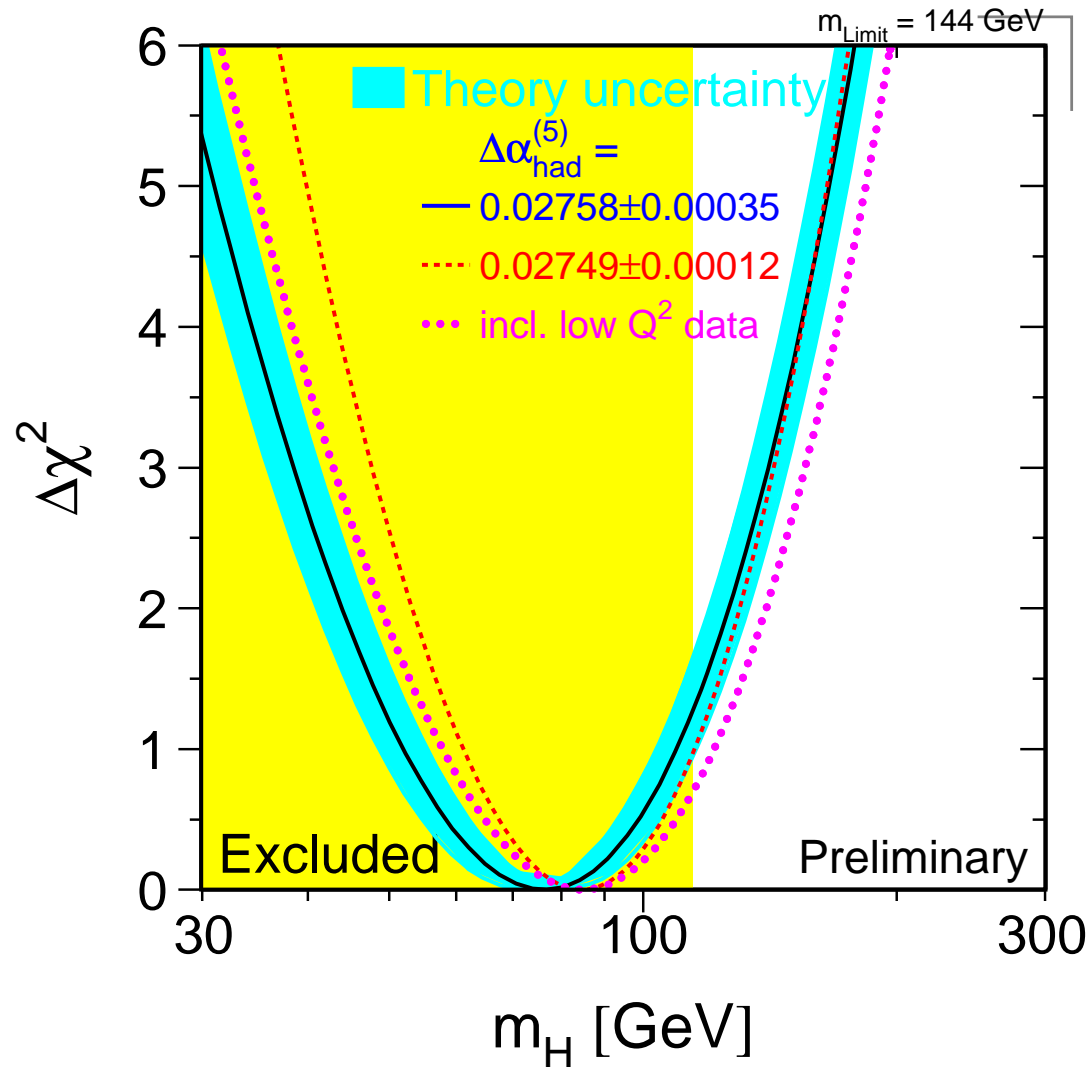
Illesztés jósága  
Higgs-tömeg függvényében

különböző elméleti  
becslésekre

Legjobb:  $m_H \approx 85 \text{ GeV}$

De LEP:  $114 \text{ GeV} < M_H$   
(sárga)

Illesztés:  $M_H < 144 \text{ GeV}$   
(95 % konfidencia  
 $\sim \Delta\chi^2 = 2,7$ )

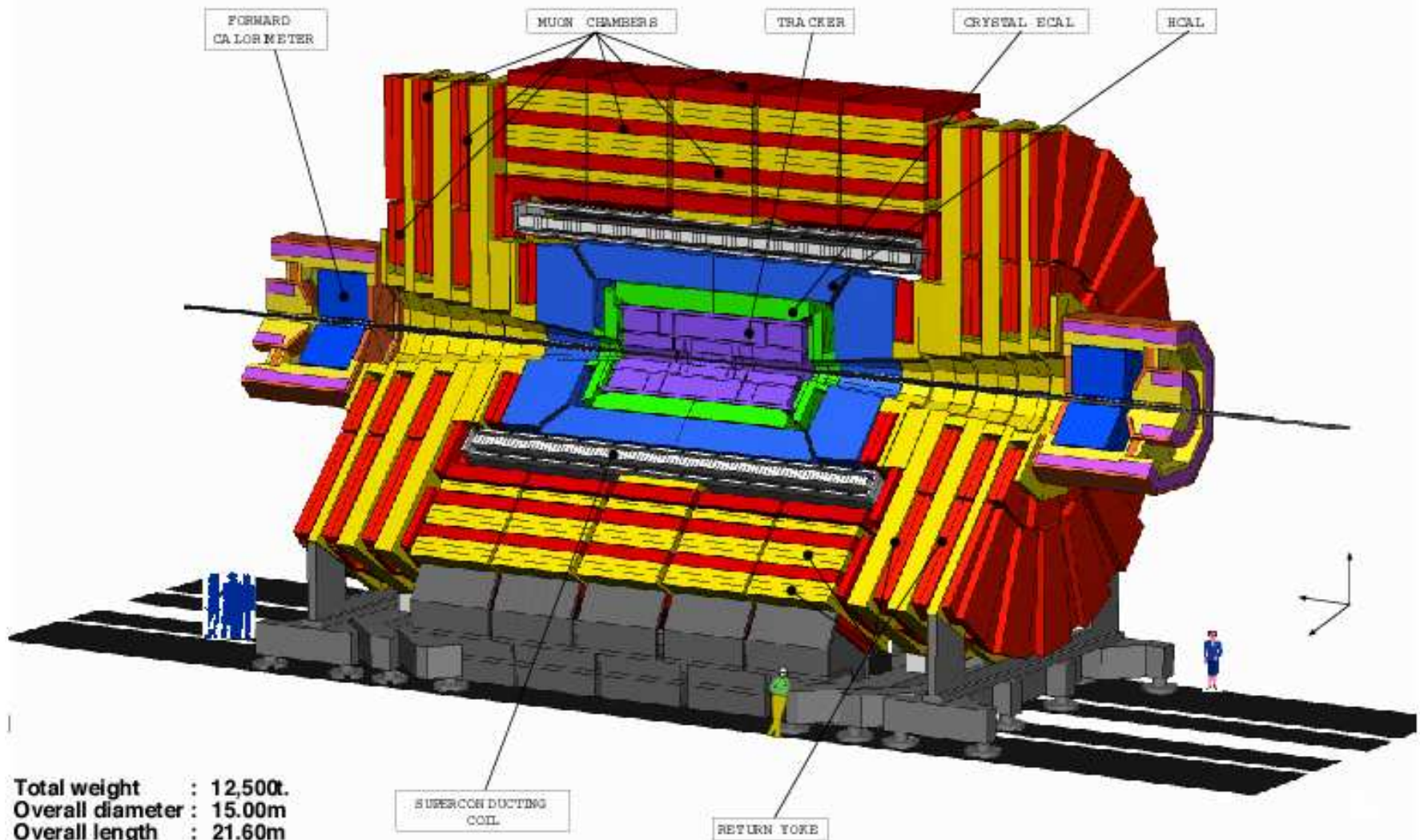


Ha mégsem létezik, a SM összeomlik, dacára a kiváló  
kísérleti egyezésnek



# Az LHC CMS–detektora

## CMS A Compact Solenoidal Detector for LHC



Total weight : 12,500t.  
Overall diameter : 15.00m  
Overall length : 21.60m  
Magnetic field : 4 Tesla



# Az LHC CMS–detektora

(Compact Muon Solenoid)

**Súly:** 12500 tonna, több vas, mint Eiffel–toronyban

> 2000 résztvevő a világ minden tájáról

A világ legnagyobb (szupravezető) szolenoidja:  
belső átmérő  $\sim 6$  m,  $B = 4$  Tesla

Detektorépítésben magyar részvétel:

Müondetektor pozicionáló rendszere: DE Kisérleti Fizika  
Tanszék és ATOMKI

Very Forward Calorimeter: RMKI

Eseménytárolás:  $\approx 10$  PB/év adat, 10 PB/év MC

Adatkezelés: LHC Computing Grid

RMKI (BUDAPEST): 200 CPU, 40 TB HD



# D. Szimmetriák és sértésük

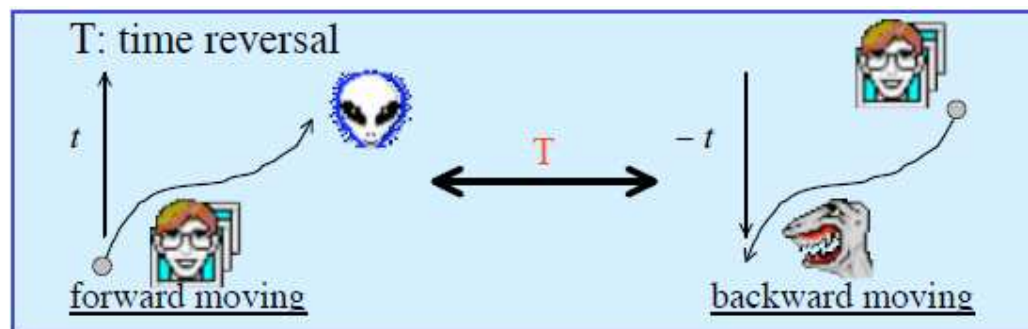
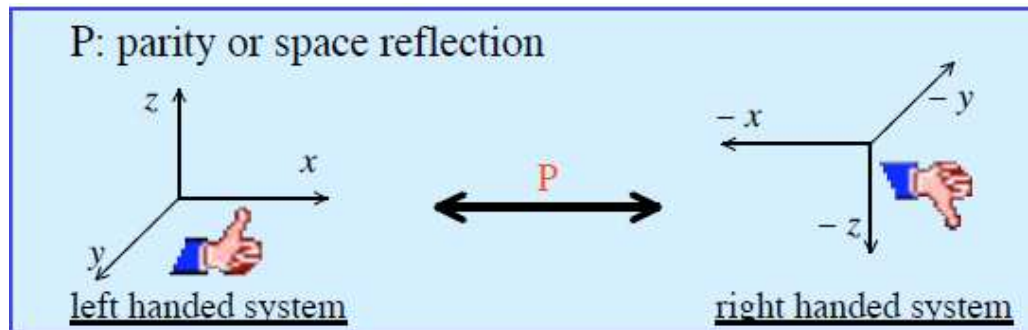
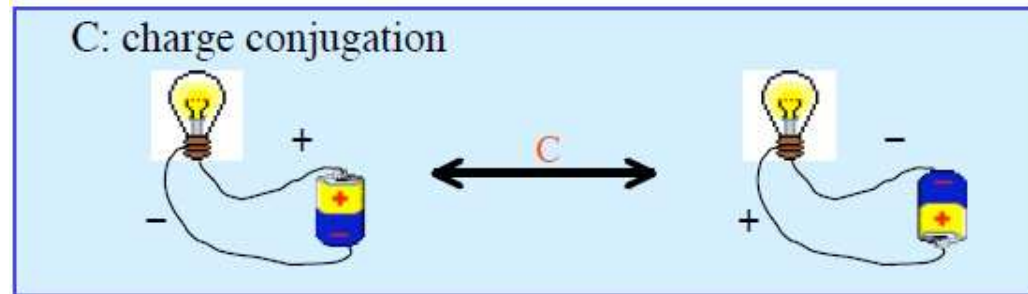
- Tükrözési szimmetriák
- A paritássértés felfedezése
- Kaonfizika és CP-sértés
- CPT-invariancia és ellenőrzése

# Tükrözési szimmetriák

Töltéstükrözés:  $C|p(r,t)\rangle = |\bar{p}(r,t)\rangle$

Tértükrözés:  $P|p(r,t)\rangle = |p(-r,t)\rangle$

Időtükrözés:  $T|p(r,t)\rangle = |p(r,-t)\rangle$



Mindhárom szimmetria triviális ...

**C töltés:** elektromágneses és erős kölcsönhatás invariáns

**P paritás:** erős és e-m kh.: megőrzi

**T időtükrözés:** miért bántana?

Gyenge kölcsönhatás???

T. Nakada, CERN

# Paritás

Bármely fv = páros + páratlan

$$f(x) = \frac{1}{2}[f(x) + f(-x)] + \frac{1}{2}[f(x) - f(-x)]$$

vagy

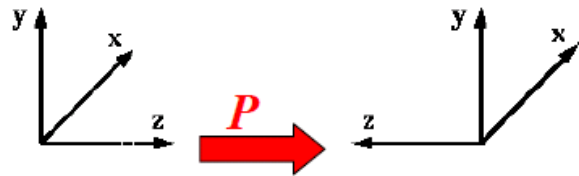
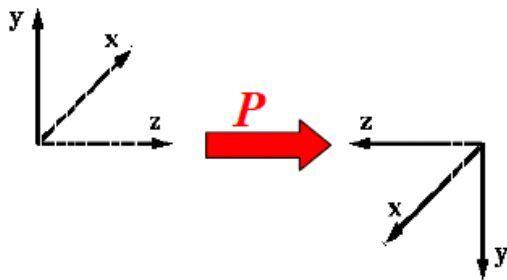
sorfejtésből páros  $x^{2k}$  és páratlan  $x^{2k+1}$  tagok

Állapotfüggvény páros vagy páratlan

Kölcsönhatások általában nem bántják



# Térbeli tükrözés: paritás

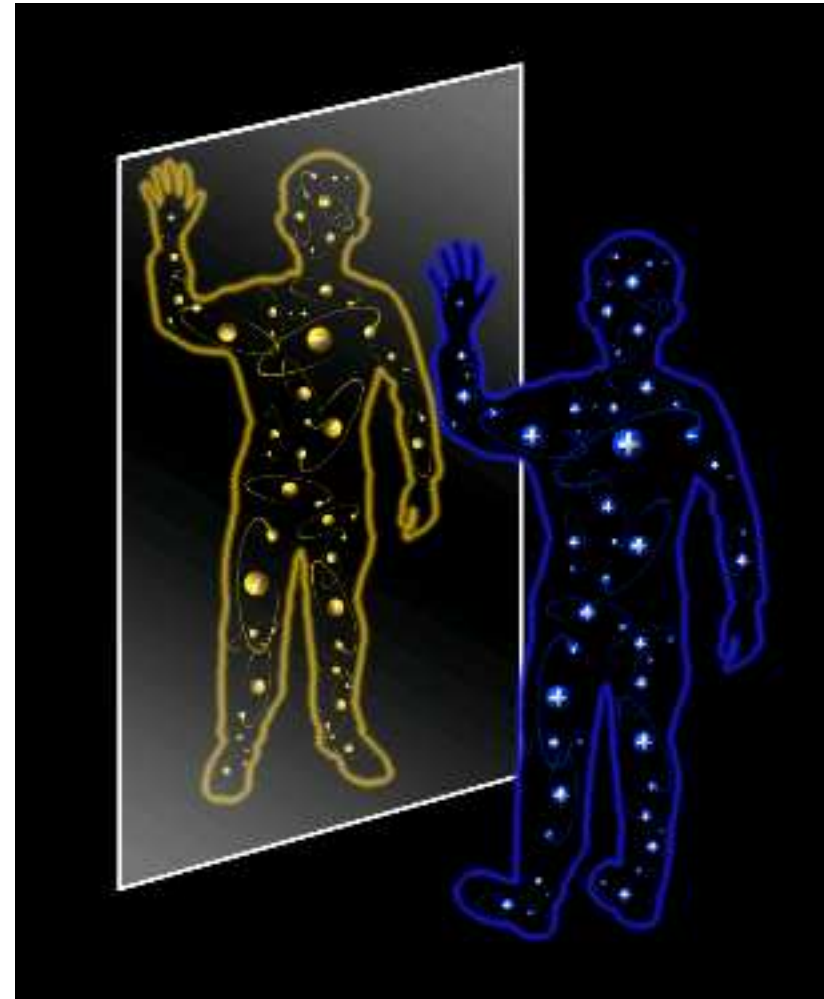


Koordinátarendszer

valamennyi tengelyének tükrözése:

jobbkezes  $\Rightarrow$  balkezes  
rendszer

paritás előjelet vált



D. Kirkby, APS, 2003

# Paritássértés $\beta$ -bomlásban

## A $\tau - \theta$ paradoxon:

Két részecske azonos tulajdonságokkal, csak a paritásuk különböző:  $\tau^+ \rightarrow 2\pi \Leftrightarrow \theta^+ \rightarrow 3\pi$  ( $J^P(\pi) = 1^-$ )

## Tsung-Dao Lee és Chen-Ning Yang:

*Question of Parity Conservation in Weak Interactions*

*Phys. Rev.* 104 (1956) 254-258. (50-éves évforduló 2006-ban)

- Paritásmegmaradás kísérleti bizonyítékai mind elektromágneses jelenségekre
- Gyenge kh. sérti paritást?  $\tau^+ \equiv \theta^+ (\equiv K^+)$
- Javaslatok kísérleti ellenőrzésre

## Kísérleti igazolás:

Chien-Shiung Wu *et al.* (és Richard L. Garwin *et al.*), 1957

Nobel-díj: Lee és Yang, 1957

(Hány cikk kell hozzá? Egy, ha elég jó...)



# A Wu-kísérlet

C.S. Wu és társai: *Phys. Rev.* 105 (1957) 1413-1414

$^{60}\text{Co}$  bomlása mágneses térben ( $T < 0,1 \text{ K}$ )



$$J = 5 \Rightarrow J = 4 + \frac{1}{2} + \frac{1}{2}$$



Tükörszimmetria maximális sérülése

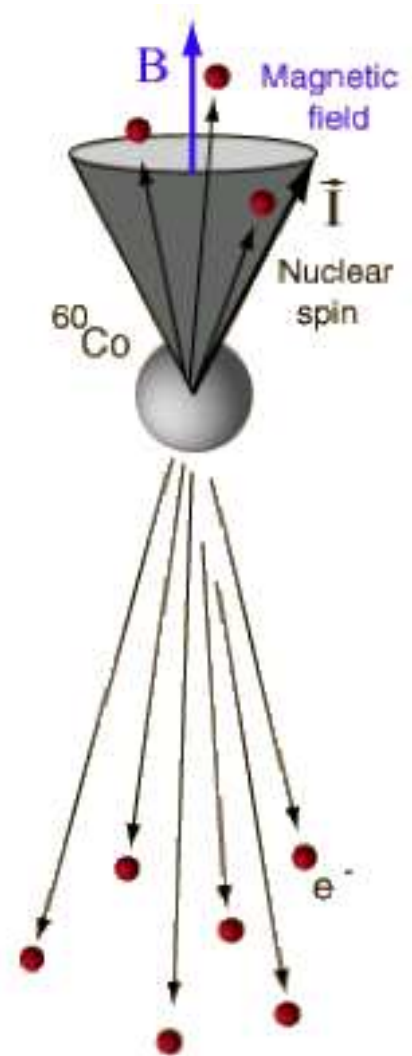


Maximális paritássértés



balra polarizált részecskék  $\Leftrightarrow$  jobbkezes antirészecskék

„Nem tudom elhinni, hogy Isten balkezes” (Wolfgang Pauli)

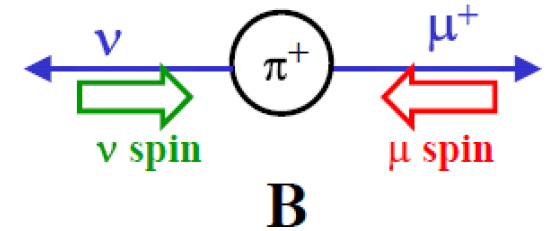
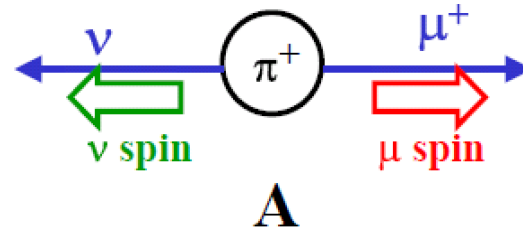


# A Lederman-kísérlet

R.L. Garwin, L.M. Lederman, M. Weinrich: *Phys. Rev.* 105 (1957) 1415-1417

Pionbomlás:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$$



Csak B realizálódik  $\Rightarrow$  maximális paritássértés

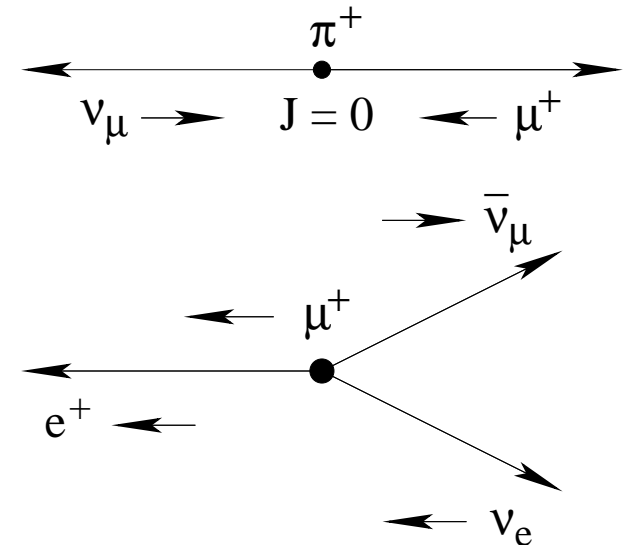
Müonkeletkezés:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$$

Müonbomlás:

$$\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu$$

$\mu$ SR-módszer: lokális  $B$  mérése  
(szilárdtestfizika, kémia)



# A paritásértés felfedezése: kísérlet

## Experimental Test of Parity Conservation in Beta Decay\*

C. S. WU, *Columbia University, New York, New York*

AND

E. AMBLER, R. W. HAYWARD, D. D. HOPPE, AND R. P. HUDSON,  
*National Bureau of Standards, Washington, D. C.*

(Received January 15, 1957)

The inspiring discussions held with Professor T. D. Lee and Professor C. N. Yang by one of us (C. S. Wu) are gratefully acknowledged.

*Phys. Rev.* 105 (1957) 1413-1414

## Observations of the Failure of Conservation of Parity and Charge Conjugation in Meson Decays: the Magnetic Moment of the Free Muon\*

RICHARD L. GARWIN,† LEON M. LEDERMAN,  
AND MARCEL WEINRICH

*Physics Department, Nevis Cyclotron Laboratories,  
Columbia University, Irvington-on-Hudson,  
New York, New York*

(Received January 15, 1957)

The authors wish to acknowledge the essential role of Professor Tsung-Dao Lee in clarifying for us the papers of Lee and Yang. We are also indebted to Professor C. S. Wu<sup>6</sup> for reports of her preliminary results in the Columbia discussions immediately preceding this experiment.

*Phys. Rev.* 105 (1957) 1415-1417

A tudományos etika és kollegialitás gyönyörű példája:

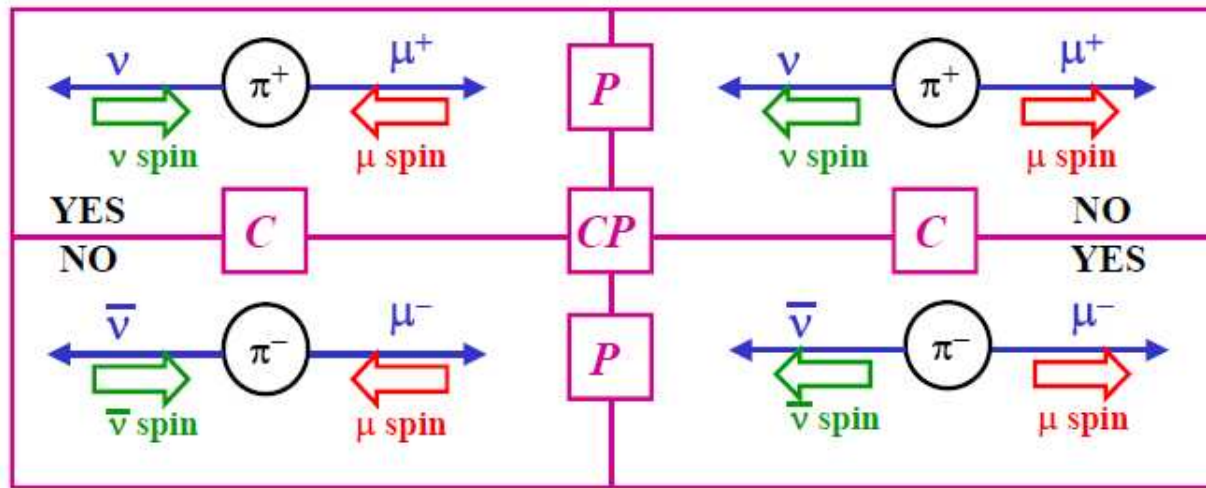
Wu csoportja hónapokig dolgozott a kísérleten.

Garwinék 1 napot mértek, 1 hetet értékelték, aztán vártak Wu-ra



# A CP-szimmetria és sértése

P és CP hatása



A CP-szimmetriában mindenki hitt, de a P-sértés felfedezése miatt ellenőrizni kellett

Christenson, Cronin, Fitch és Turlay, 1964:  
CP-sértés  $K^0$  bomlásában (kicsi:  $\sim 2,3 \times 10^{-3}$ )

Ezúttal kísérleti Nobel-díj: Cronin és Fitch, 1980

A CP-sértés vizsgálata azóta is a részecskefizika egyik fontos területe

# CPT-invariancia

A térelmélet alaptétele:

$$CPT |p(r,t)\rangle \sim |\bar{p}(-r,-t)\rangle \sim |p(r,t)\rangle$$

azaz szabad **antirészecske**  $\sim$  **részecske**,  
amely téridőben visszafelé mozog.

*CPT* sérülése sértené:

- a kölcsönhatások **lokalitását** azaz a **kauzalitást**, vagy
- **unitaritást**, az **anyag, információ, ...** megmaradását,
- vagy a Lorentz-invarianciát.

Elmélet általában: *CPT* nem sérül

De vannak *CPT*-sértő modellek  $\Rightarrow$  ellenőrizni

# Részecske = – antirészecske ?

- $[m(K^0) - m(\bar{K}^0)]/m(\text{átlag}) < 10^{-18}$
- **proton**  $\sim$  **antiproton**? ( $m, q, \mu$  összehasonlítása)
- **hidrogén**  $\sim$  **antihidrogén**? ( $2S - 1S$ )

Kétfotonos  
spektroszkópia

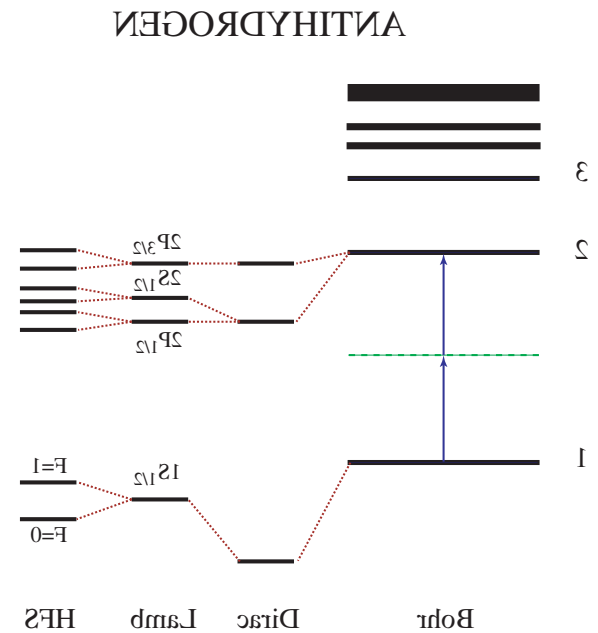
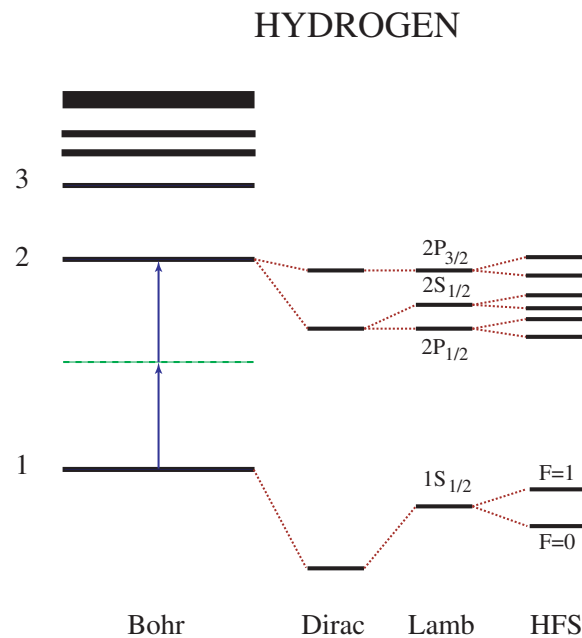


keskeny vonal

ellentétes irányú  
lézerek



Doppler-mentes





# A CERN antiproton–lassítója (AD)

a *CPT*–invariancia ellenőrzésére épült



Három *CPT*–kísérlet az AD-nál:

ATRAP:  $q(\bar{p})/m(\bar{p}) \leftrightarrow q(p)/m(p)$   
 $\bar{H}(2S - 1S) \leftrightarrow H(2S - 1S)$

ALPHA:  $\bar{H}(2S - 1S) \leftrightarrow H(2S - 1S)$

ASACUSA:  $q(\bar{p})^2 m(\bar{p}) \leftrightarrow q(p)^2 m(p)$   
 $\mu_e(\bar{p}) \leftrightarrow \mu_e(p)$

Vörös: működik, zöld: tervben



ASACUSA: Atomic Spectroscopy And Collisions Using Slow Antiprotons  
Tokió, Bécs, Budapest, Debrecen + Aarhus + Brescia



# Az antiproton tömege és töltése

Protoné jól ismert:

$$m(p)/m(e) = 1836.15267261(85)$$

$$q(e) = 1.602176462(63) \text{ C}$$

$$\text{Pontosság: } 5 \cdot 10^{-10} \text{ és } 4 \cdot 10^{-8}$$

Relatív mérés: proton  $\Leftrightarrow$  antiproton

Ciklotron-frekvencia csapdában  $\rightarrow q/m$

TRAP (LEAR)  $\Rightarrow$  ATRAP (AD)

Harvard, Jülich, München, Szöul

Atomi átmenetek energiája  $\bar{p}$ -atomban:

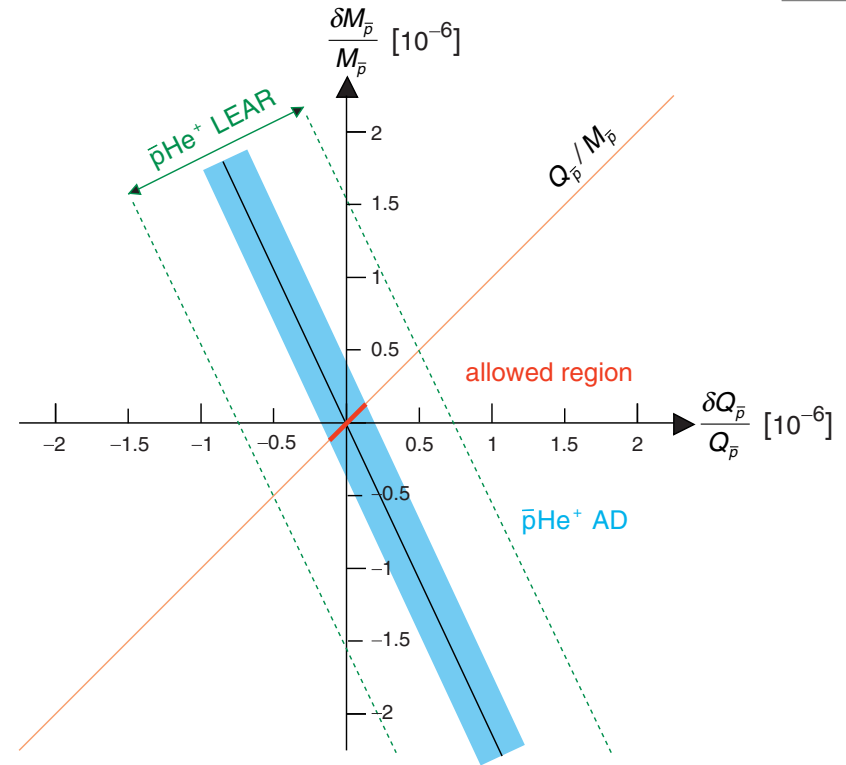
$$E_n \approx -m_{\text{red}} c^2 (Z\alpha)^2 / (2n^2) \rightarrow m \cdot q^2$$

PS-205 (LEAR)  $\Rightarrow$  ASACUSA (AD)

Felső határ  $CPT$ -sértésre: 2 ppb ( $2 \times 10^{-9}$ )

M. Hori, ... B. Juhász, D. Barna, D. Horváth:

Phys. Rev. Lett. 96 (2006) 243401.



Tokió  
Asakusa-  
negyede  
télen

