

Bevezetés a részecskefizikába

*Előadássorozat fizikatanárok részére
(CERN, 2006)*

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

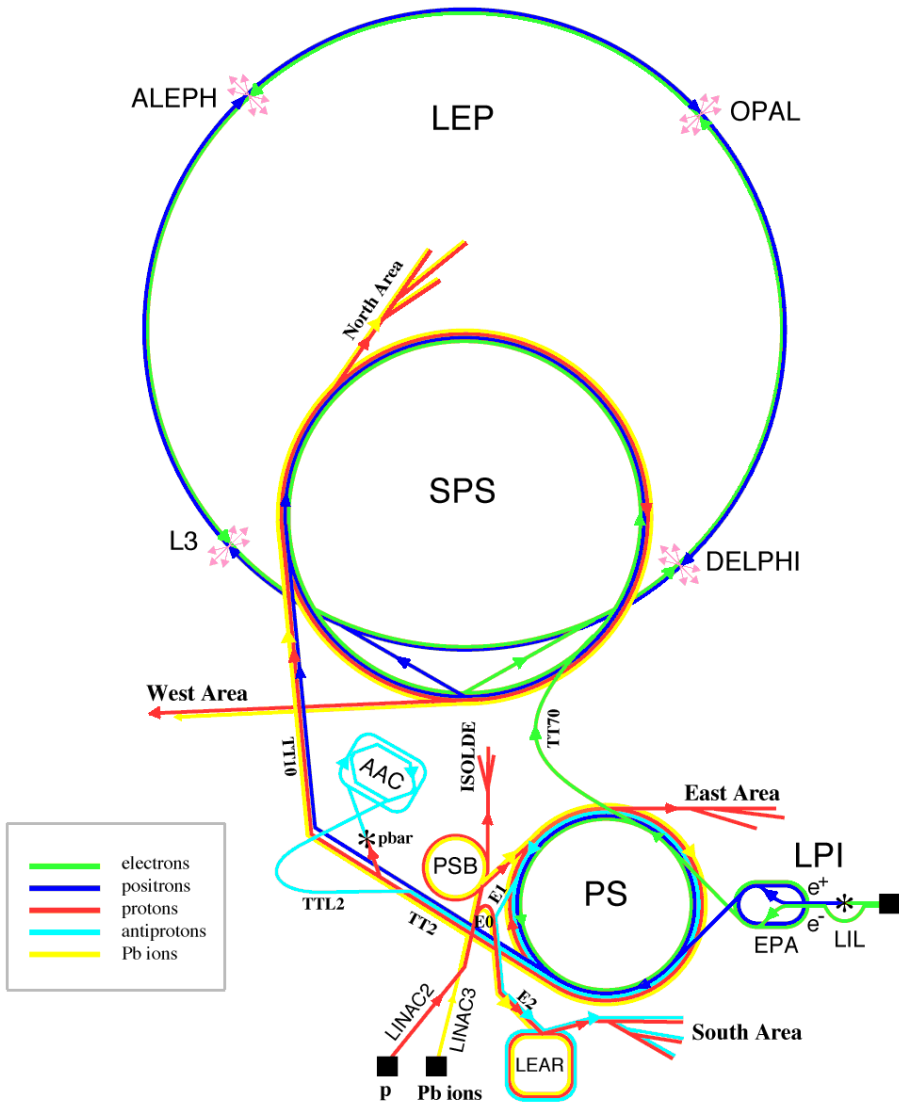
Quarks		Leptons		Bosons
 up	 down	 electron	 neutrino e	 photon
 charm	 strange	 muon	 neutrino μ	 gluon
 top	 beauty	 tau	 neutrino τ	 $Z^0 W^\pm$
				 Higgs

The Standard Model

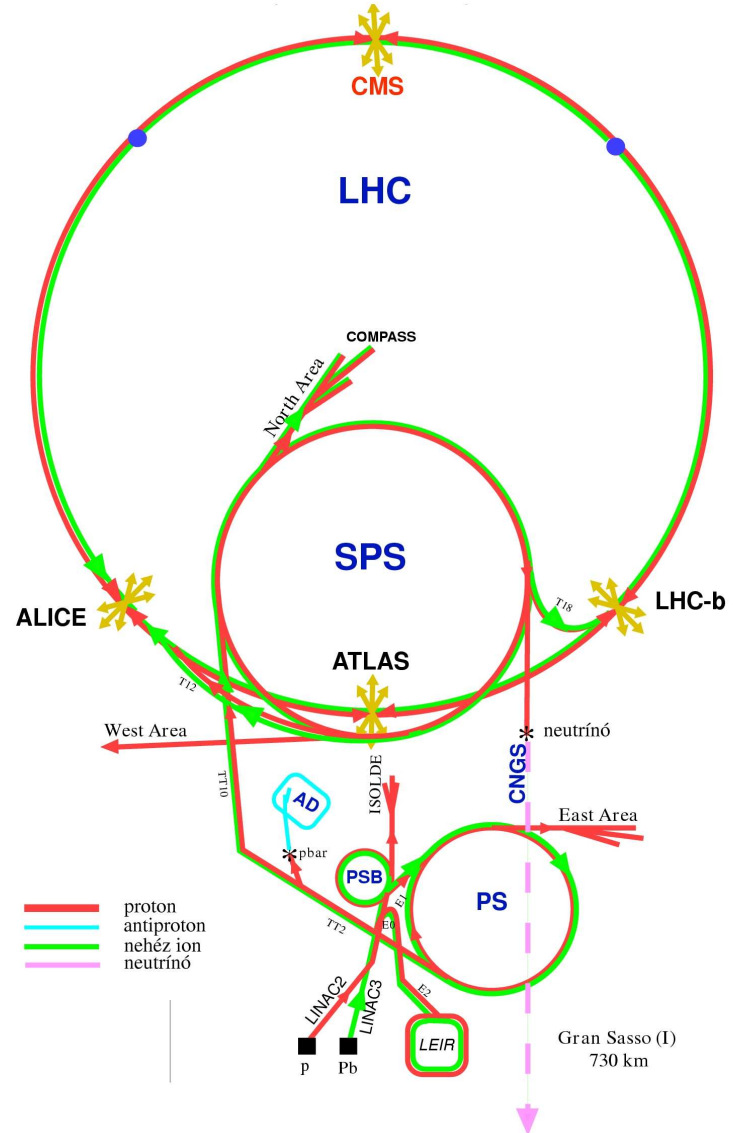
A. Pich - CERN Summer Lectures 2005

A CERN gyorsítói

LEP 2000-ig



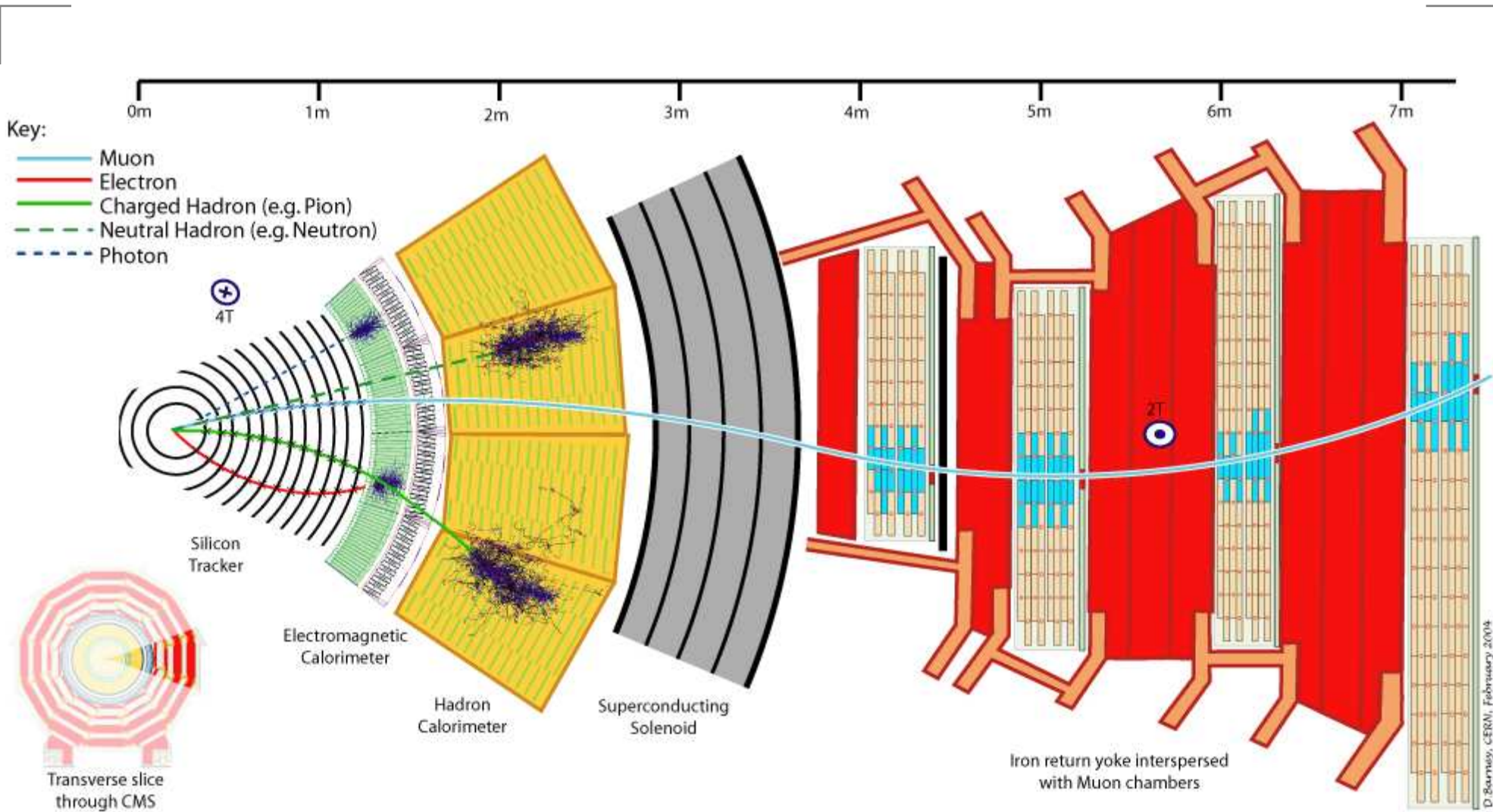
LHC 2007-től?



A néhai LEP-gyorsító



Kalorimetria: a CMS-detektor szelete

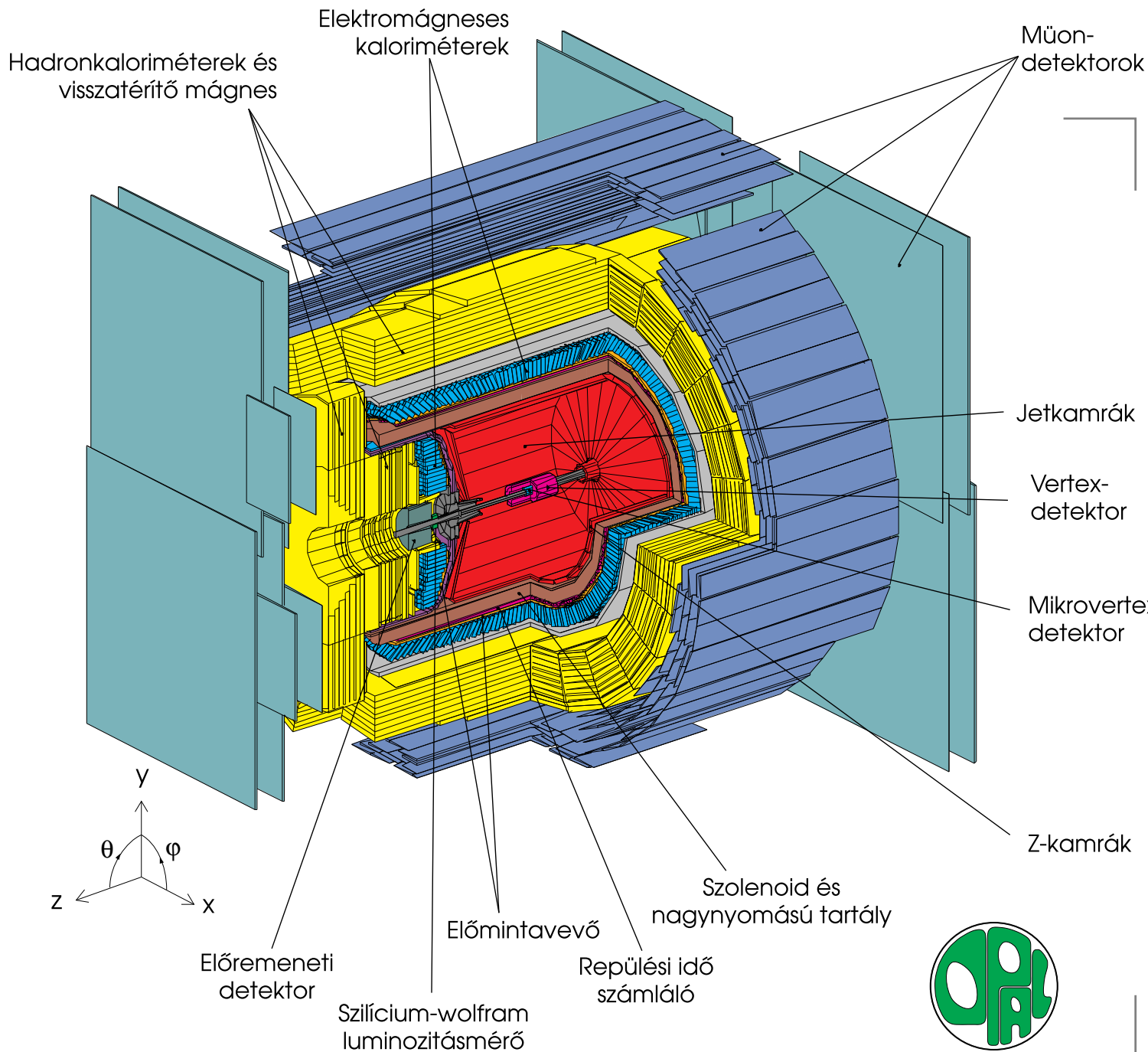


A néhai **OPAL**
detektor

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

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



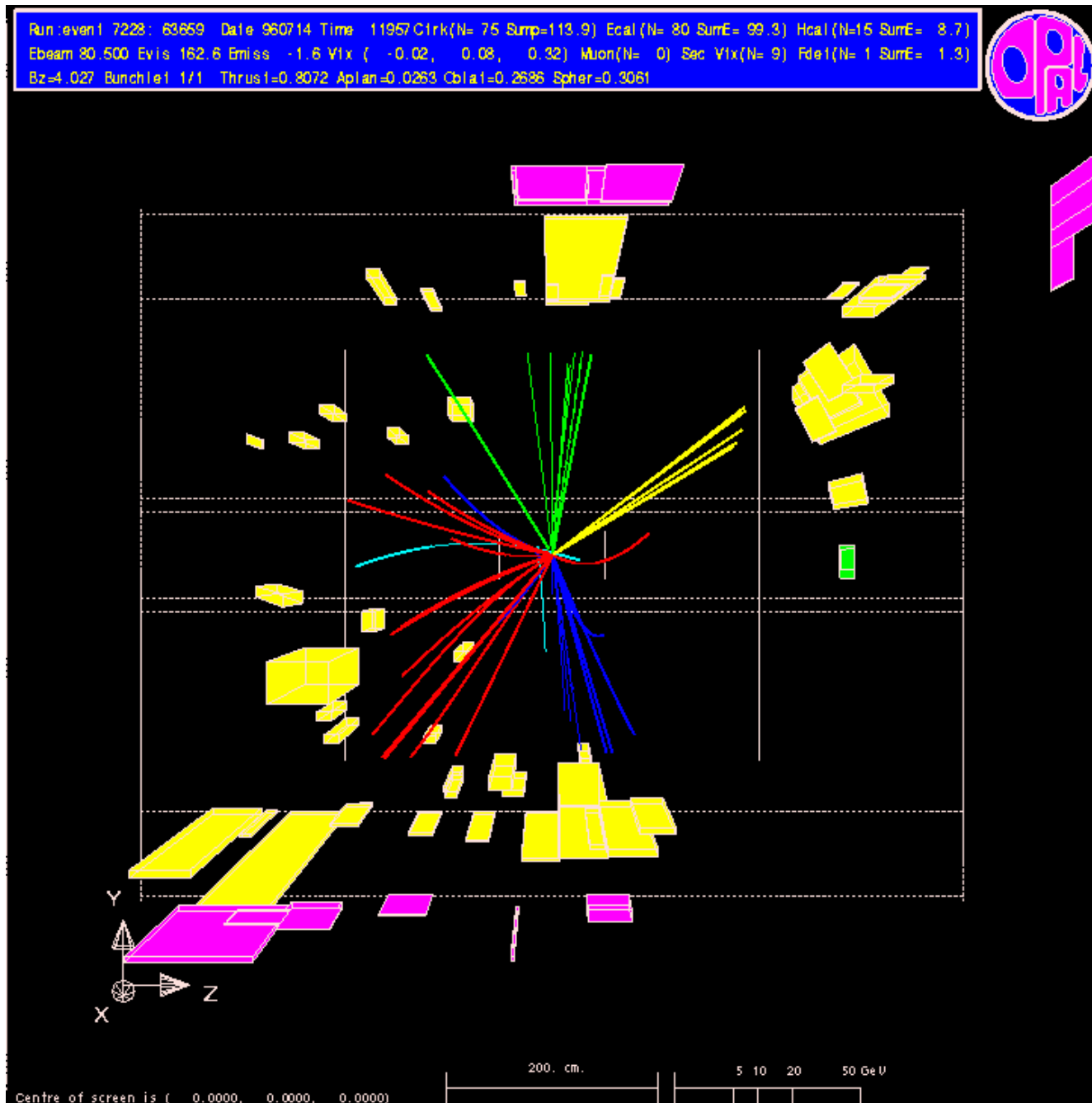
4 kvark



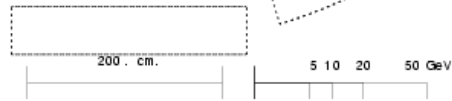
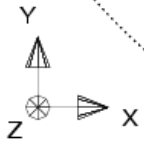
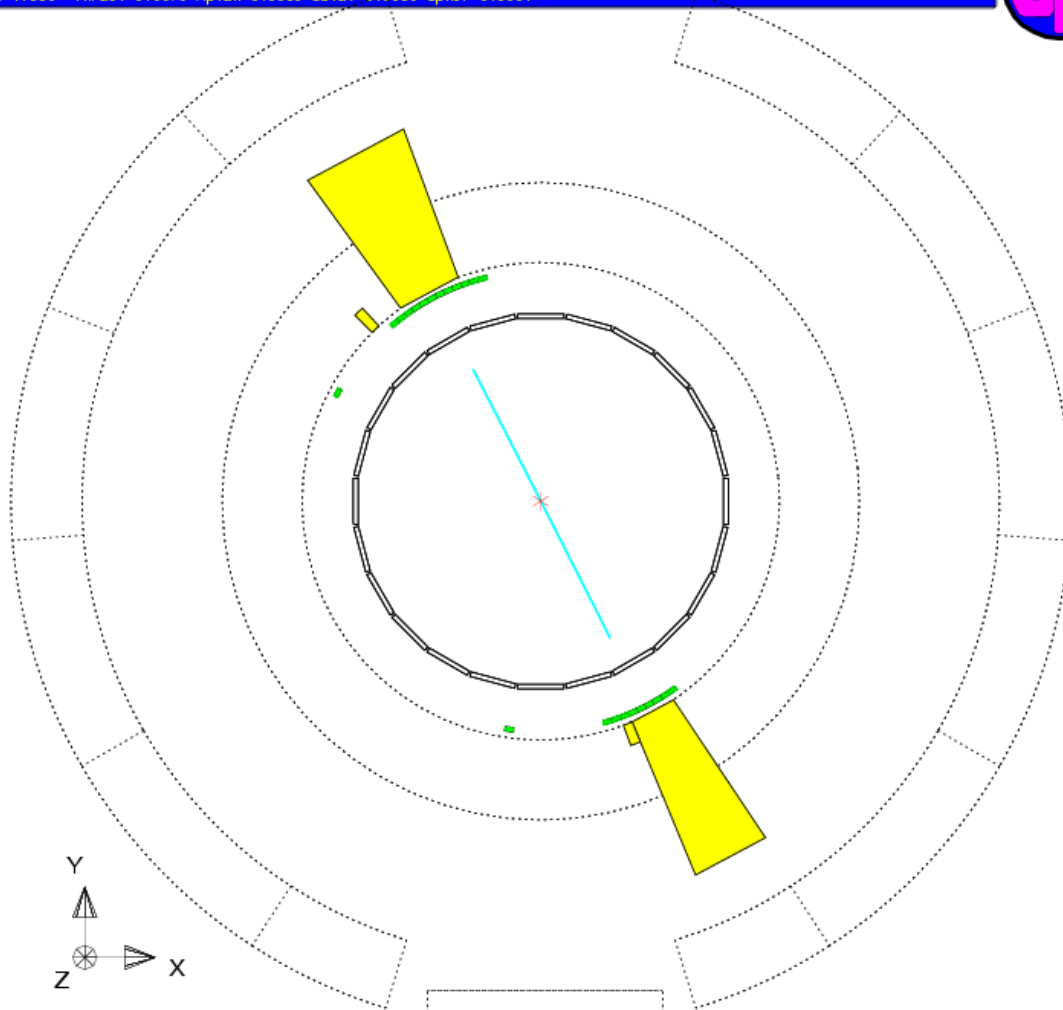
4 hadronzár



75 töltött részecske



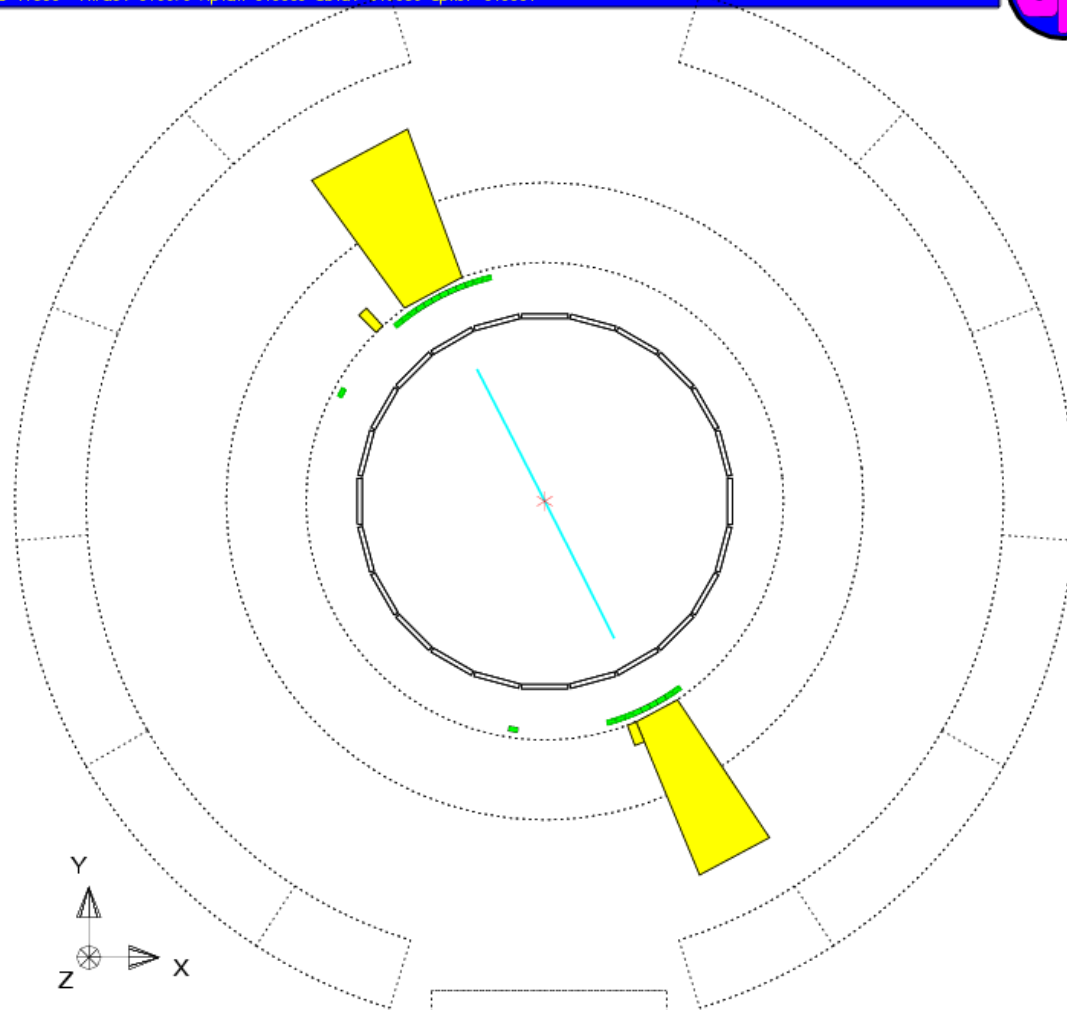
Run: event 4093: 1150 Date 930527 Time 20751 Ctrk (N= 2 Sump= 92.4) Ecal (N= 9 SumE= 90.5) Hcal (N= 0 SumE= 0.0)
Ebeam 45.658 Evis 94.4 Emis -3.1 Vtx (-0.05, 0.08, 0.36) Muon(N= 0) Sec Vtx(N= 0) Fdet (N= 1 SumE= 0.0)
Bz=4.350 Thrust=0.9979 Aplan=0.0000 Oblat=0.0039 Spher=0.0001



Centre of screen is (0.0000, 0.0000, 0.0000)



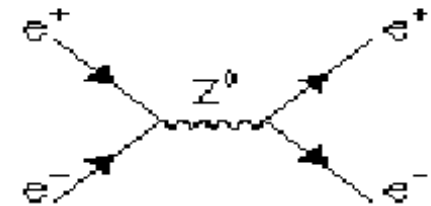
Run: event 4093: 1150 Date 930527 Time 20751 Ctrk (N= 2 Sump= 92.4) Ecal (N= 9 SumE= 90.5) Hcal (N= 0 SumE= 0.0)
 Ebeam 45.658 Evis 94.4 Emiss -3.1 Vtx (-0.05, 0.08, 0.36) Muon (N= 0) Sec Vtx (N= 0) Fdet (N= 1 SumE= 0.0)
 Bz=4.350 Thrust=0.9979 Aplan=0.0000 Oblat=0.0039 Spher=0.0001



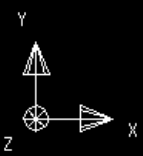
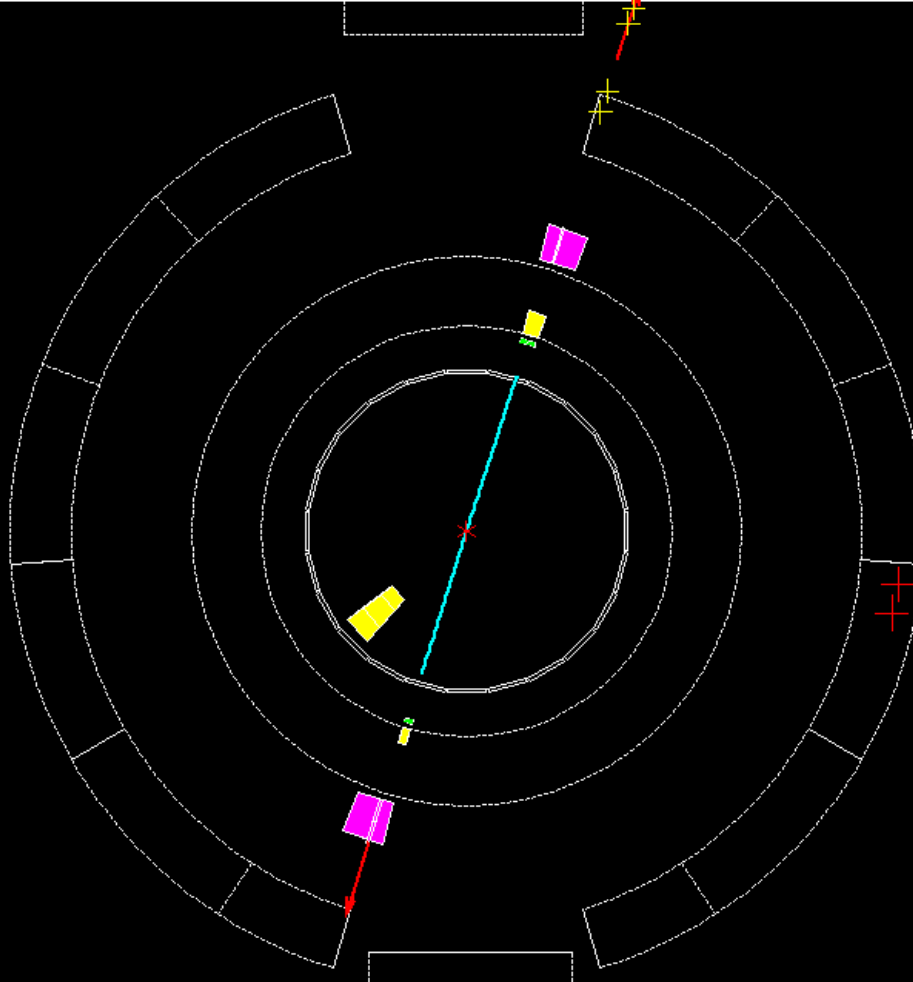
Centre of screen is (0.0000, 0.0000, 0.0000)

OPAL

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



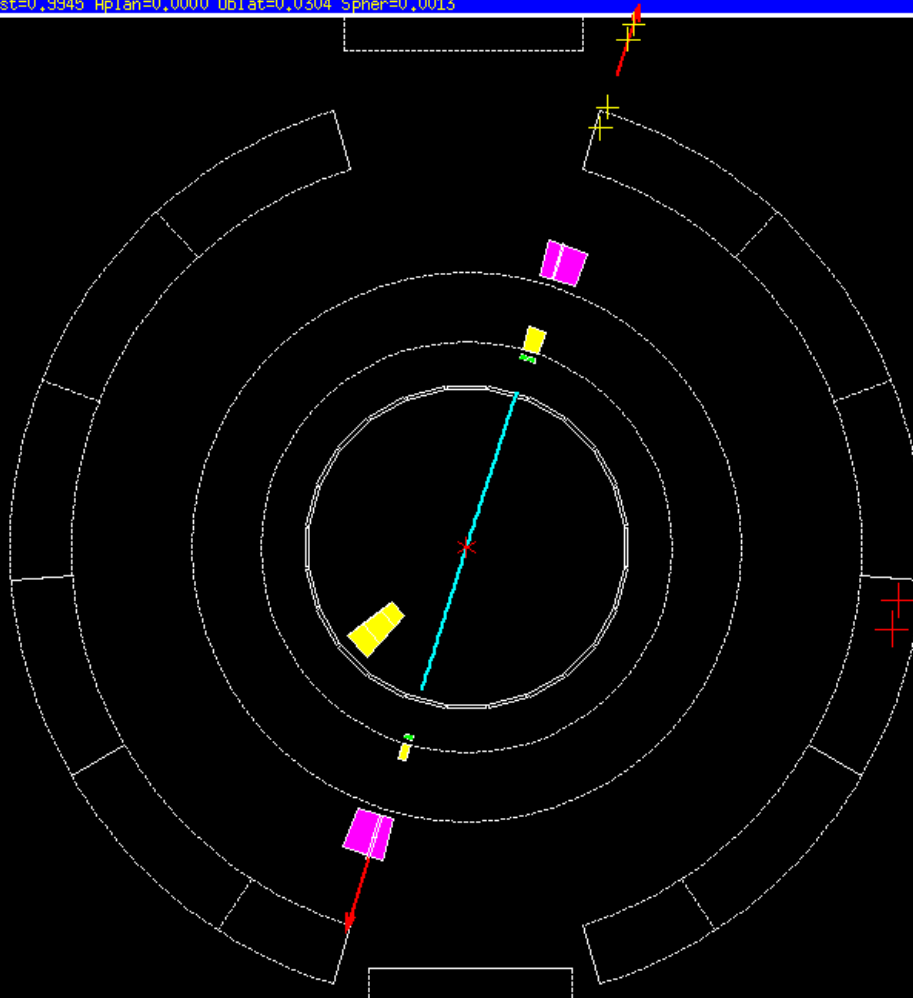
Run: event 4093; 1042 Date 930527 Time 20724 Ctrk(N= 2 Sump= 91.4) Ecal(N= 8 SumE= 5,0) Hcal(N= 4 SumE= 6,9)
Ebeam 45,658 Evis 101,0 Emiss -9,6 Vtx (-0,05, 0,08, 0,36) Muon(N= 2) Sec Vtx(N= 0) Fdet(N= 1 SumE= 0,0)
Bz=4,350 Thrust=0,9945 Aplan=0,0000 Oblat=0,0304 Spher=0,0013



Centre of screen is (0,000, 0,000, 0,000)

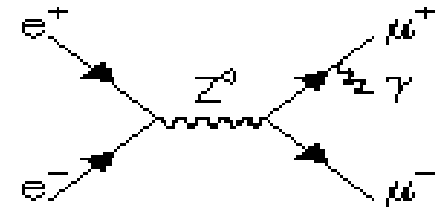
200. cm. 510 20 50 GeV

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

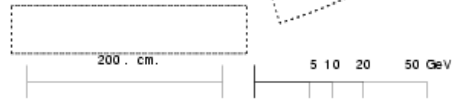
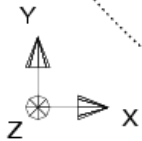
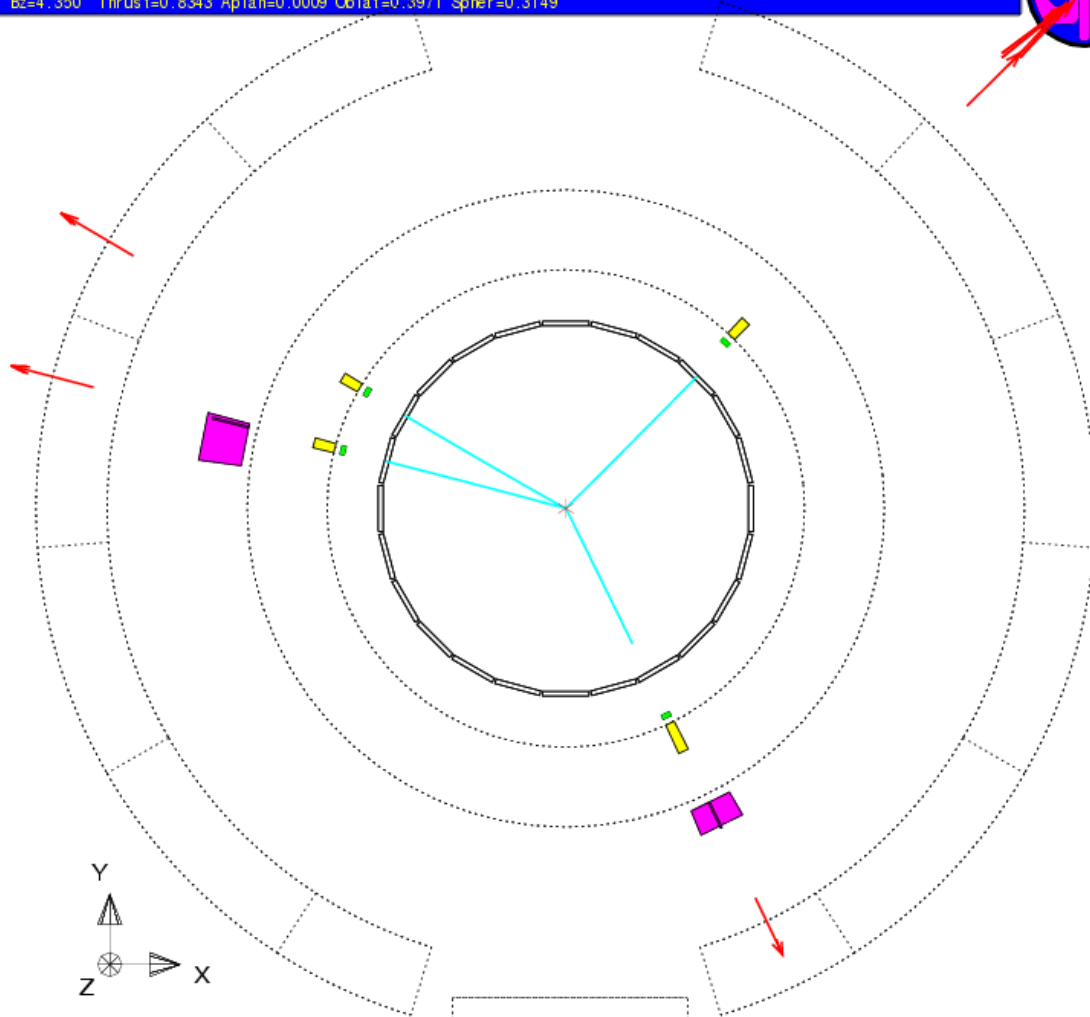


OPAL

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



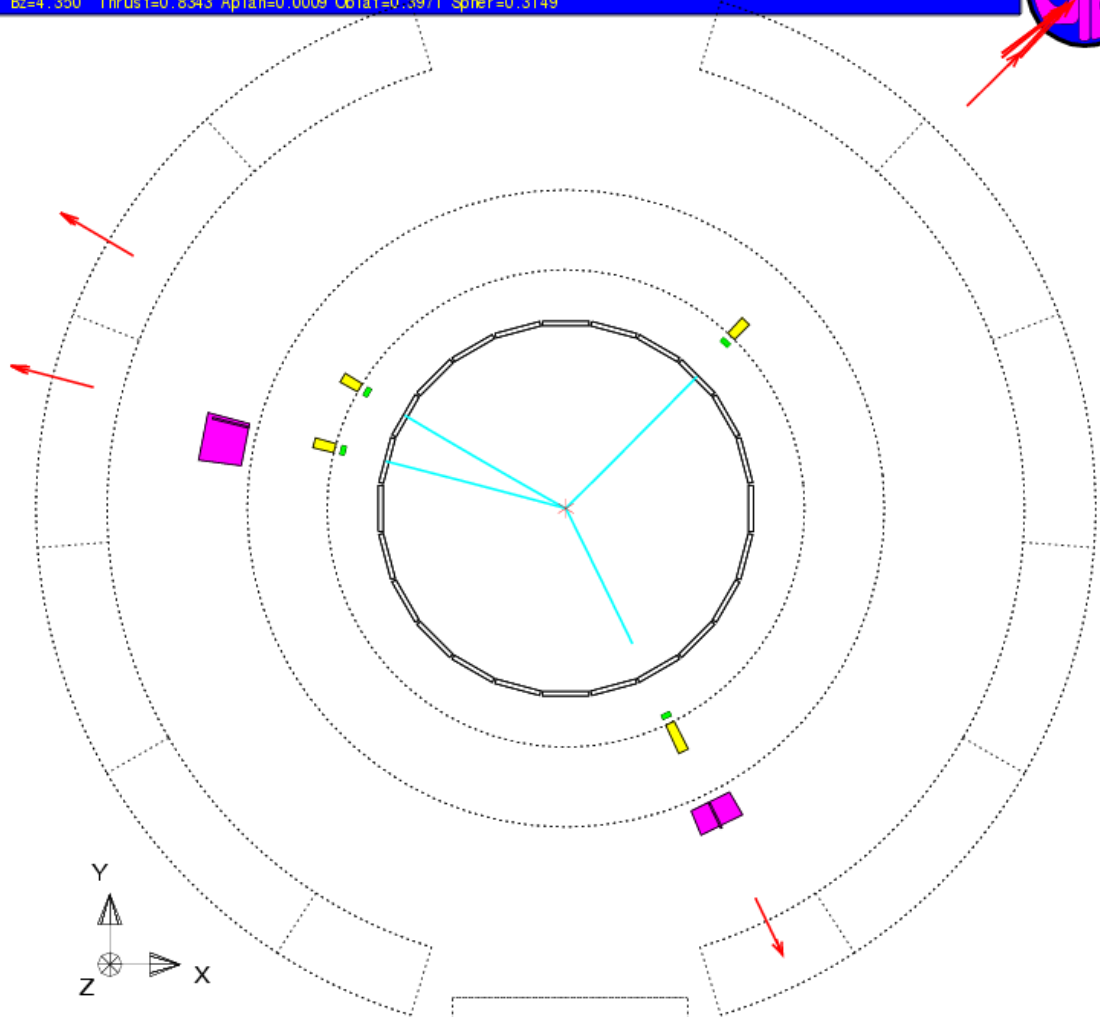
Run: event 3223: 7994 Date 920708 Time 10856 Ctrk (N= 4 Sump= 91.9) Ecal (N= 6 SumE= 4.0) Hcal (N= 4 SumE= 4.3)
Ebeam 45.652 Evis 96.2 Emiss -4.9 Vtx (0.02, 0.06, 0.44) Muon(N= 11) Sec Vtx(N= 0) Fdet(N= 0 SumE= 0.0)
Bz=4.350 Thrust=0.8343 Aplan=0.0009 Oblat=0.3971 Spher=0.3149



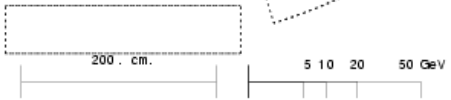
Centre of screen is (0.0000, 0.0000, 0.0000)



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

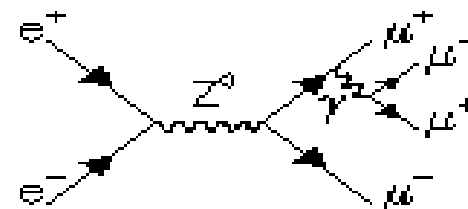


Centre of screen is (0.0000, 0.0000, 0.0000)

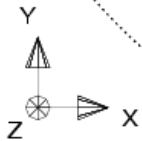
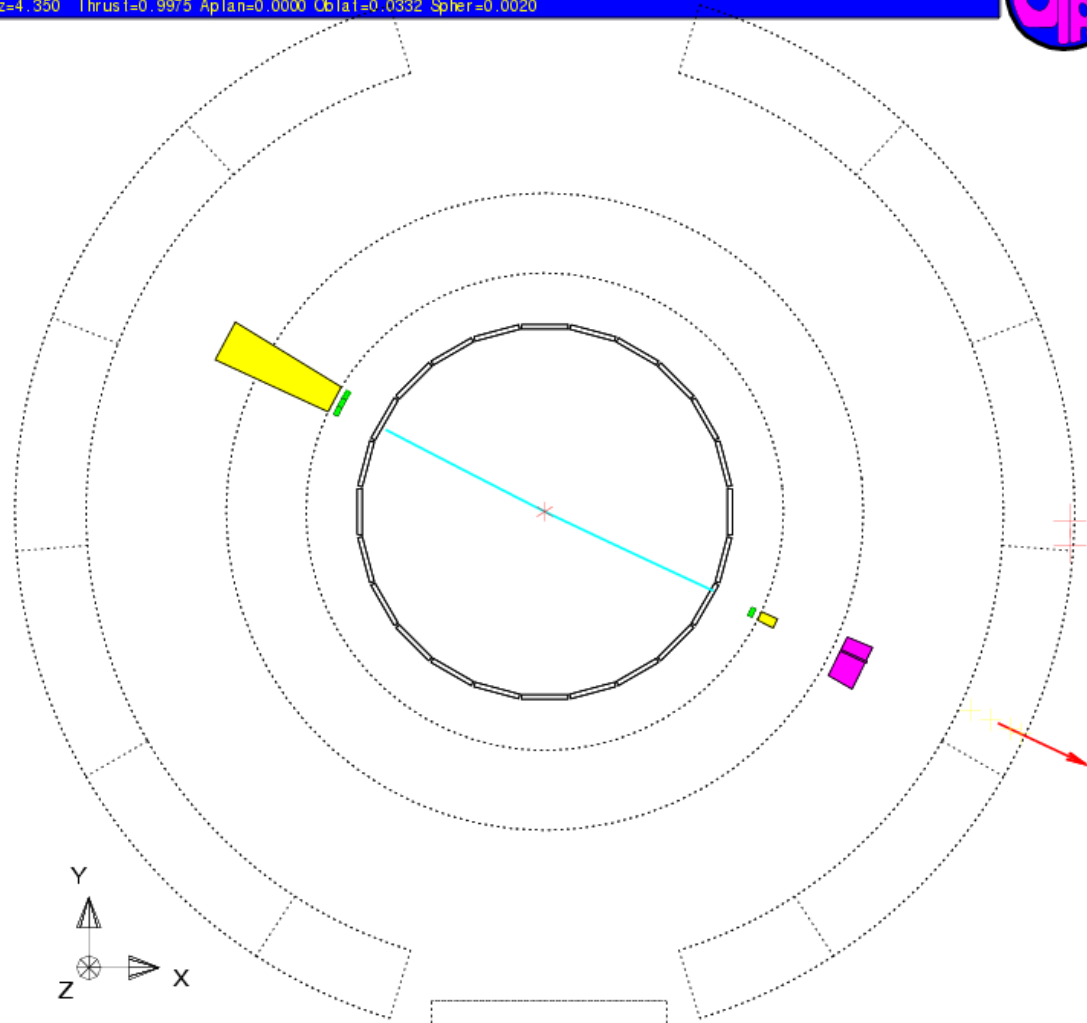


OPAL

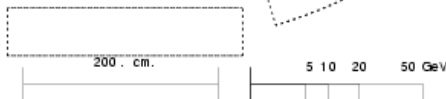
$$e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-\mu^+\mu^-$$



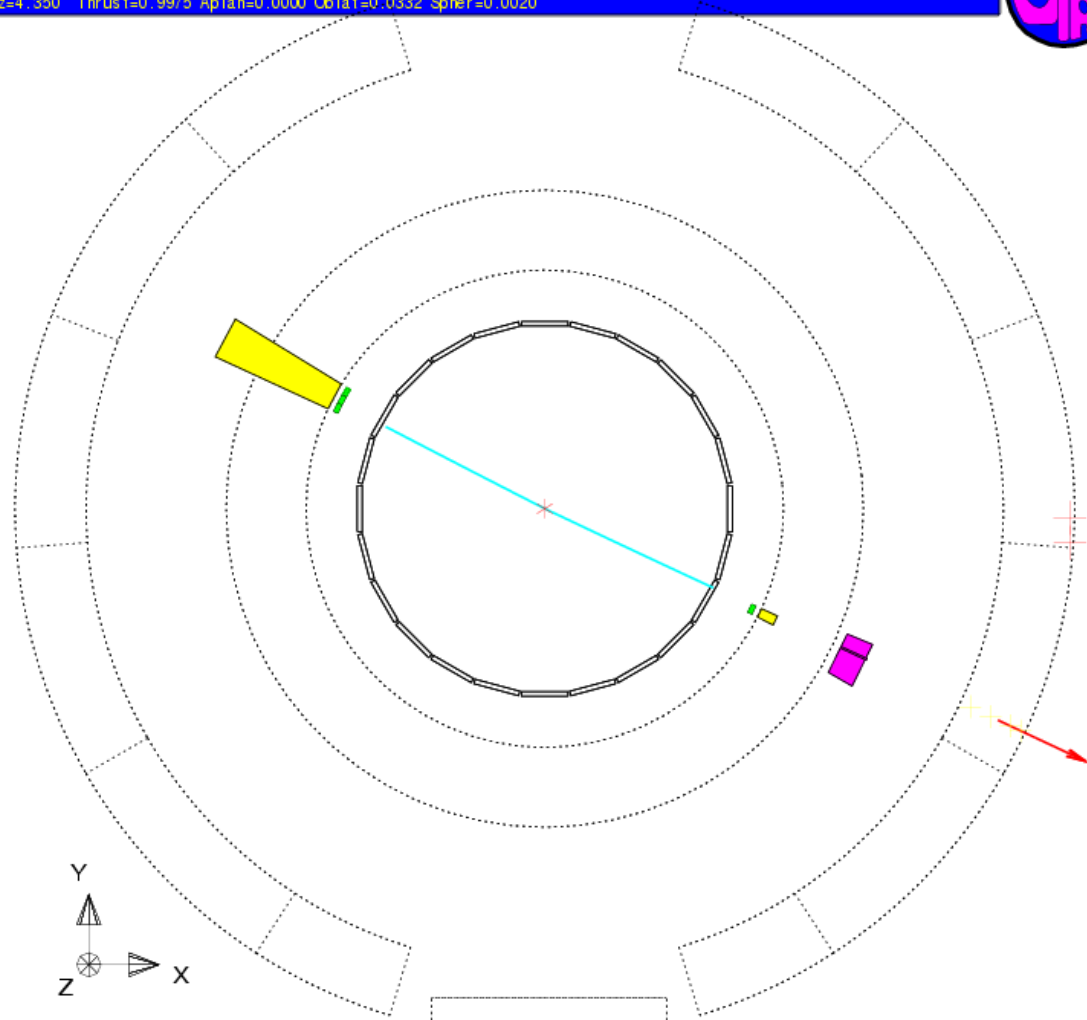
Run: event 4177: 49573 Date 930611 Time 203852 Ctrk (N= 2 Sump= 50.6) Ecal (N= 4 SumE= 26.8) Hcal (N= 2 SumE= 1.3)
Ebeam 45.661 Evis 52.1 Emiss 39.3 Vtx (-0.03, 0.08, 0.45) Muon(N= 1) Sec Vtx(N= 0) Fdet(N= 0) SumE= 0.0
Bz=4.350 Thrust=0.9975 Aplan=0.0000 Oblat=0.0332 Spher=0.0020



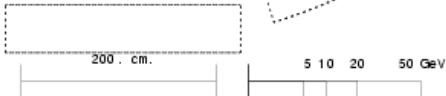
Centre of screen is (0.0000, 0.0000, 0.0000)



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

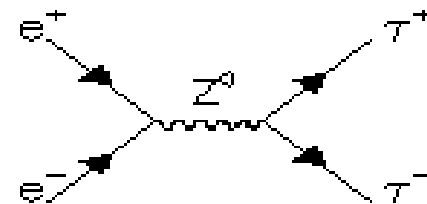


Centre of screen is (0.0000, 0.0000, 0.0000)

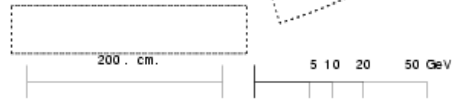
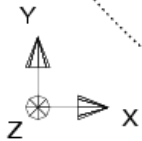
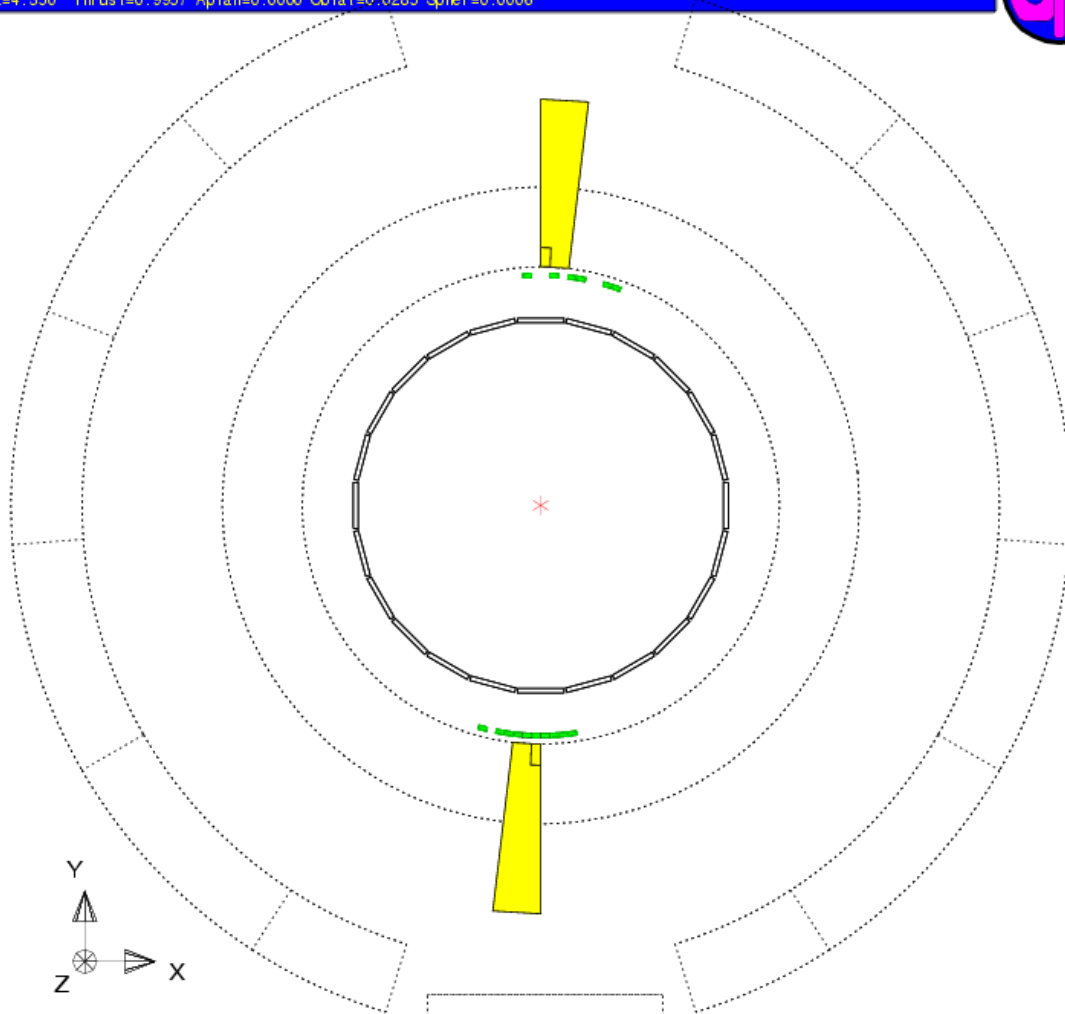


OPAL

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



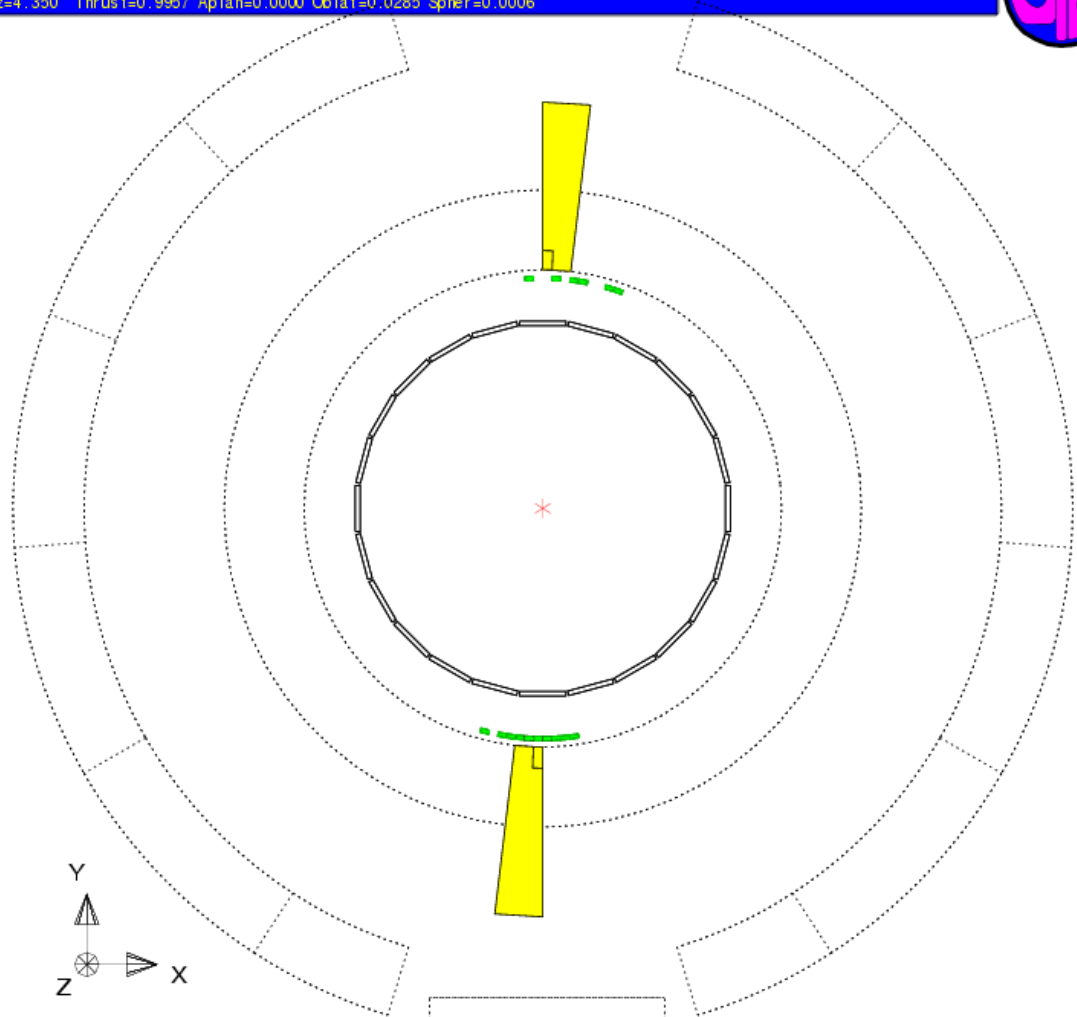
Run: event 4177:115034 Date 930612 Time 10314 Ctrk (N= 0 Sump= 0.0) Ecal (N= 8 SumE= 97.4) Hcal (N= 1 SumE= 2.5)
Ebeam 45.661 Evis 99.6 Emiss -8.3 Vtx (-0.04, 0.08, 0.45) Muon(N= 0) Sec Vtx(N= 0) Fdet(N= 0 SumE= 0.0)
Bz=4.350 Thrust=0.9957 Aplan=0.0000 Oblat=0.0285 Spher=0.0006



Centre of screen is (0.0000, 0.0000, 0.0000)

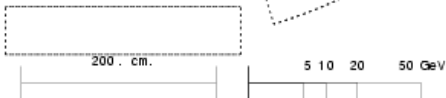
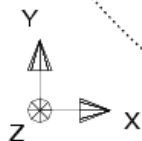


Run: event 4177:115034 Date 930612 Time 10314 Ctrk(N= 0 Sump= 0.0) Ecal(N= 8 SumE= 97.4) Hcal(N= 1 SumE= 2.5)
 Ebeam 45.661 Evis 99.6 Emiss -8.3 Vtx (-0.04, 0.08, 0.45) Muon(N= 0) Sec Vtx(N= 0) Fdet(N= 0 SumE= 0.0)
 Bz=4.350 Thrust=0.9957 Aplan=0.0000 Oblat=0.0285 Spher=0.0006



OPAL

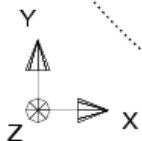
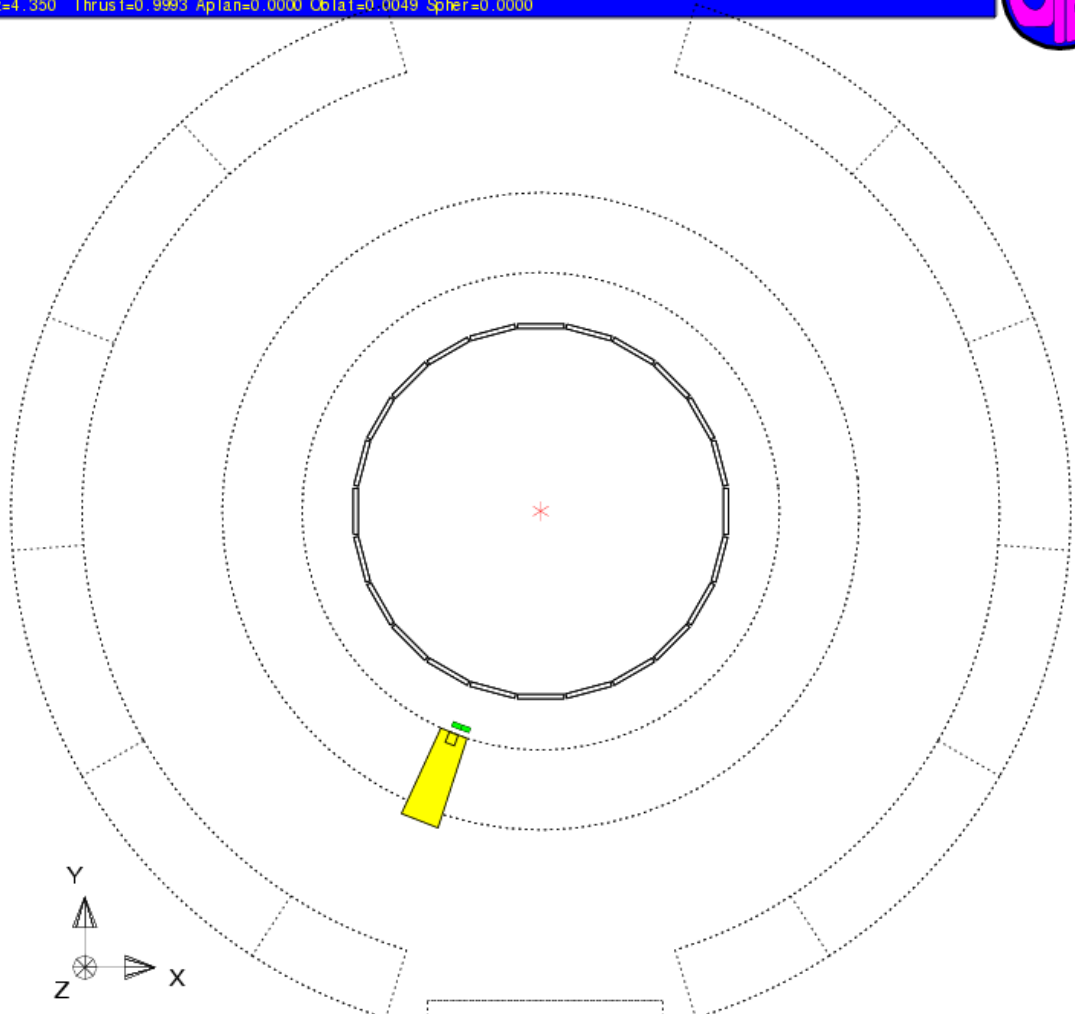
$$e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$$



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

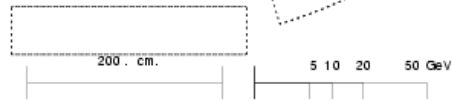
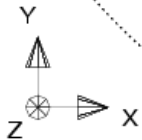
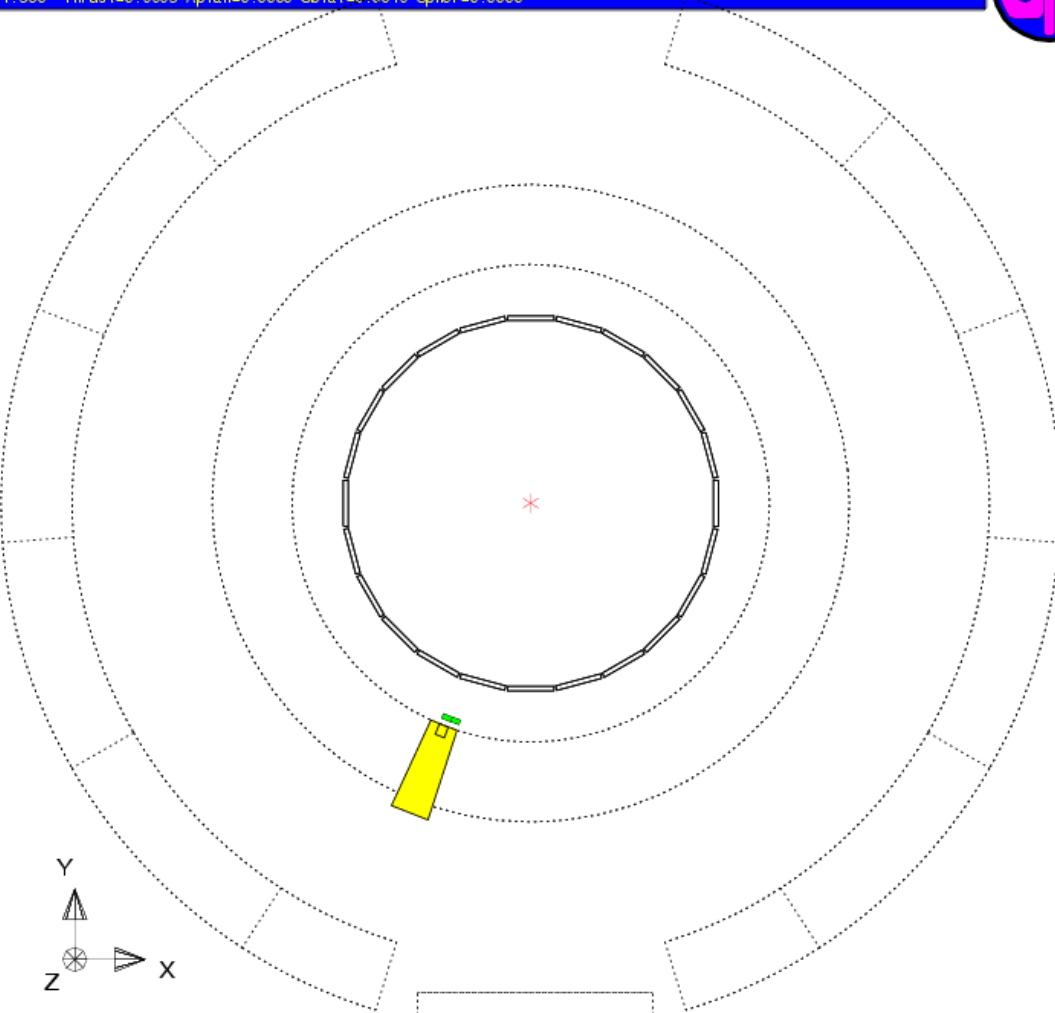


5 10 20 50 GeV

Centre of screen is (0.0000, 0.0000, 0.0000)



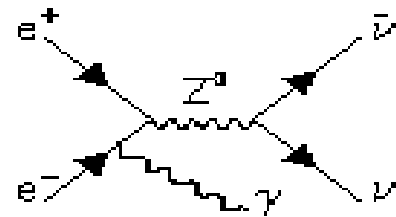
Run: event 2468: 66487 Date 910819 Time 91037 Ctrk (N= 0 Sump= 0.0) Ecal (N= 4 SumE= 15.3) Hcal (N= 0 SumE= 0.0)
 Ebeam 45.613 Evis 15.3 Emiss 75.9 Vtx (-0.12, 0.12, 0.19) Muon (N= 0) Sec Vtx (N= 0) Fdet (N= 0 SumE= 0.0)
 Bz=4.350 Thrust=0.9993 Aplan=0.0000 Oblat=0.0049 Spher=0.0000



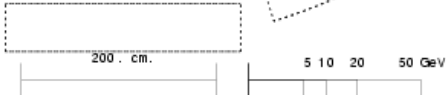
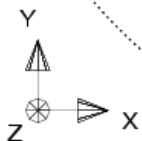
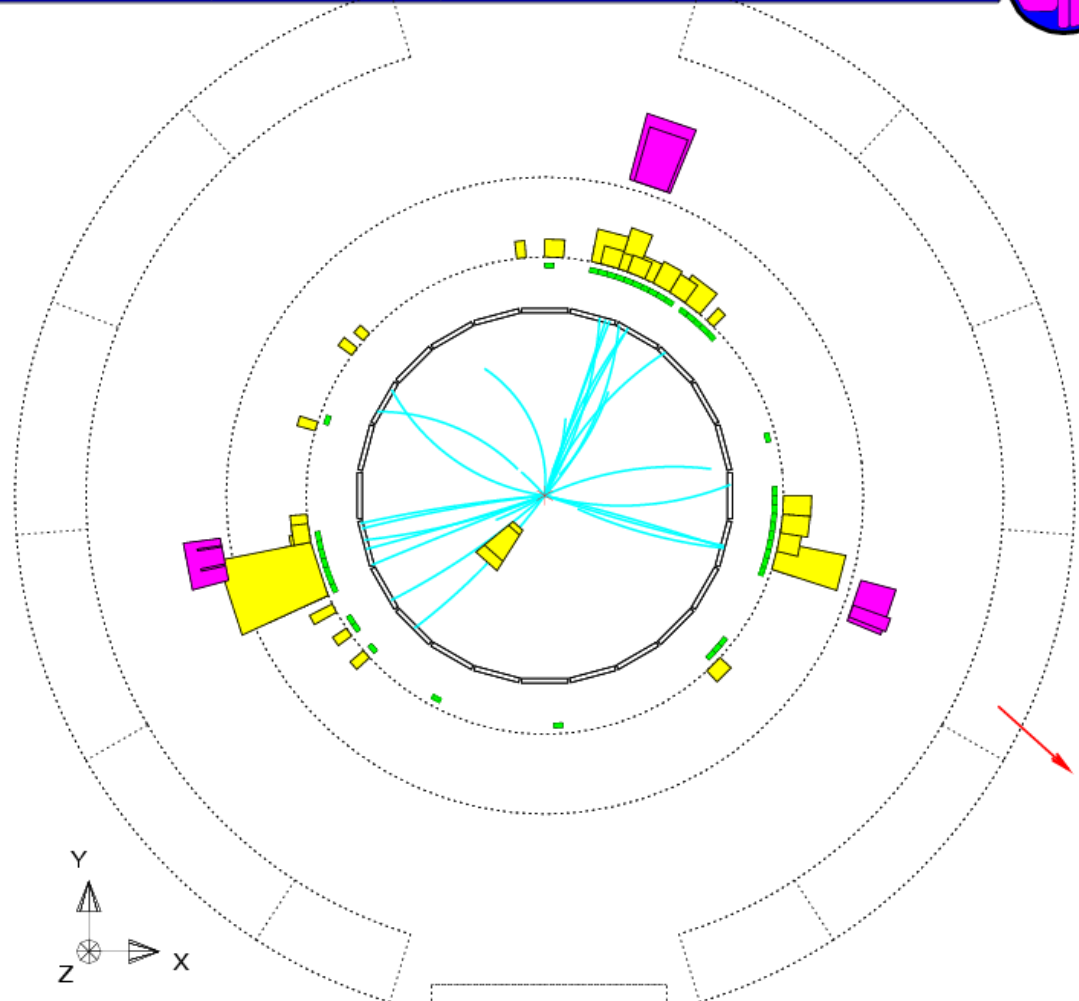
Centre of screen is (0.0000, 0.0000, 0.0000)

OPAL

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



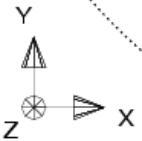
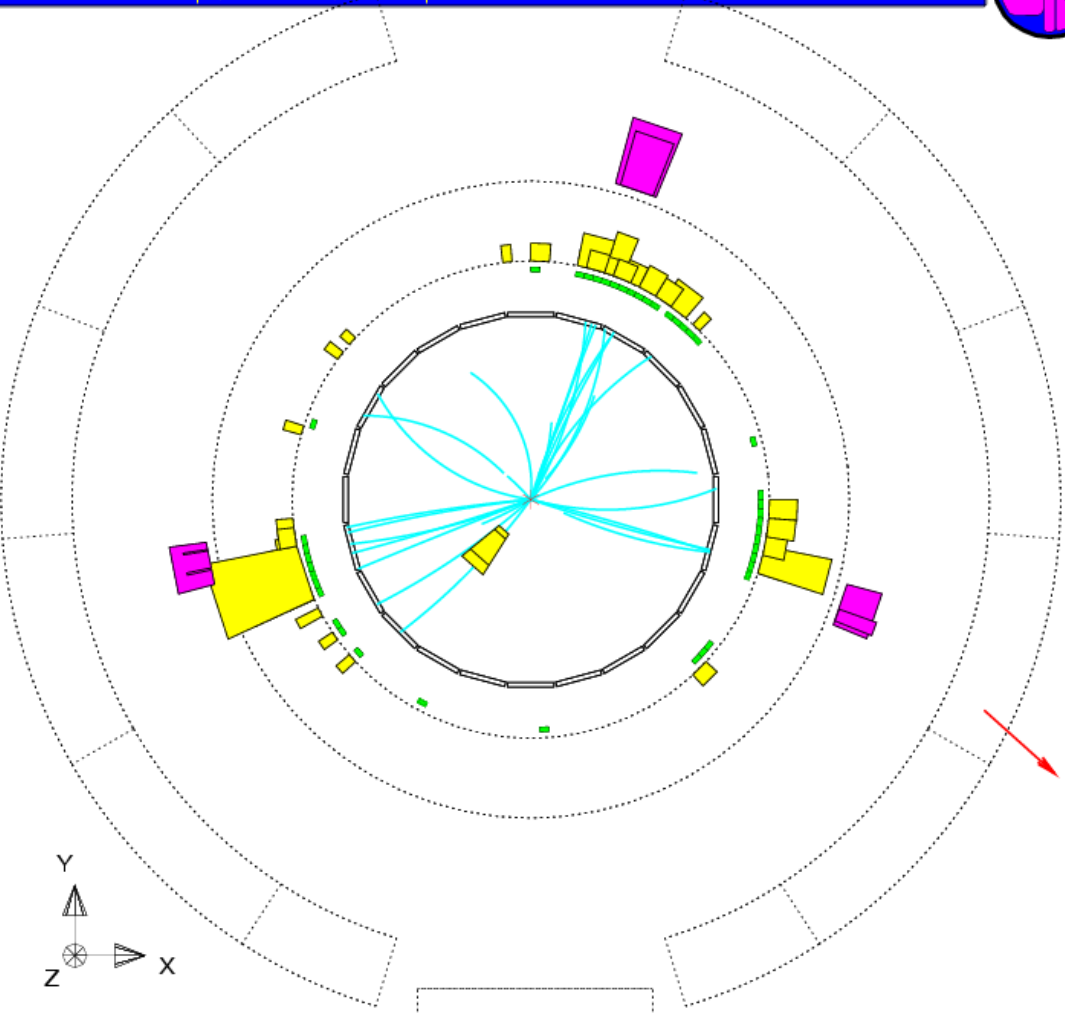
Run: event 2542: 63750 Date 911014 Time 35925 Ctrk (N= 28 Sump= 42.1) Ecal (N= 42 SumE= 59.8) Hcal (N= 8 SumE= 12.7)
 Ebeam 45.609 Evis 86.2 Emiss 5.0 Vtx (-0.05, 0.12, -0.90) Muon(N= 1) Sec Vtx(N= 0) Fdet(N= 2 SumE= 0.0)
 Bz=4.350 Thrust=0.8223 Aplan=0.0120 Oblat=0.3338 Spher=0.2463



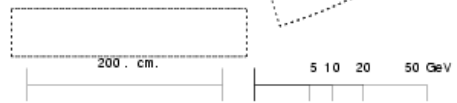
Centre of screen is (0.0000, 0.0000, 0.0000)



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

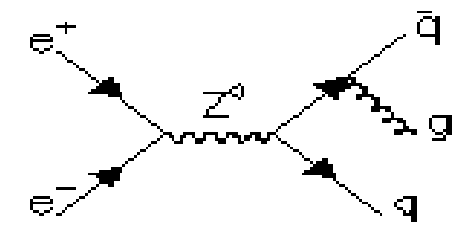


Centre of screen is (0.0000, 0.0000, 0.0000)



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

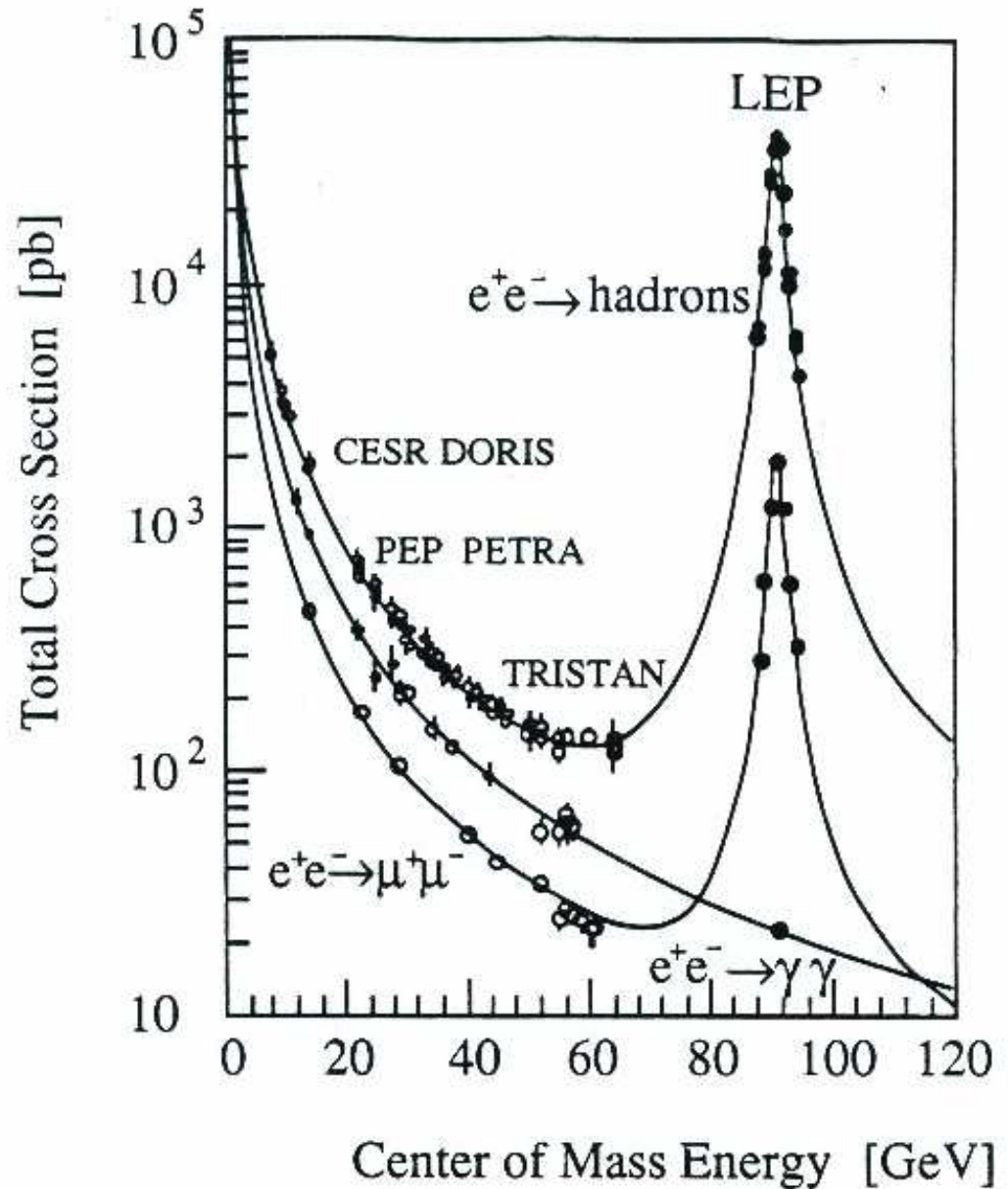
Illesztés LEP-adatokhoz \Rightarrow

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

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

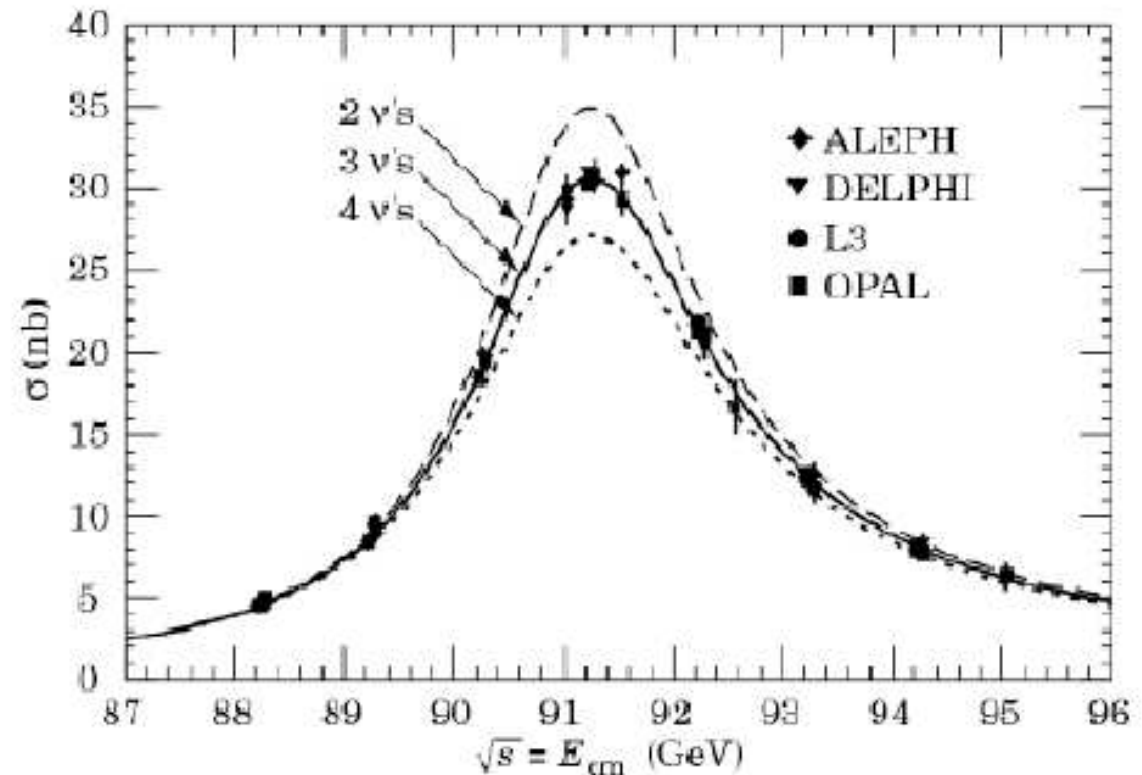
$$\Gamma_{\nu\bar{\nu}} = 1,979 \Gamma_{\ell^+\ell^-}$$

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 $\sigma(H \rightarrow f\bar{f}) \sim m_f^2 / m_W^2$

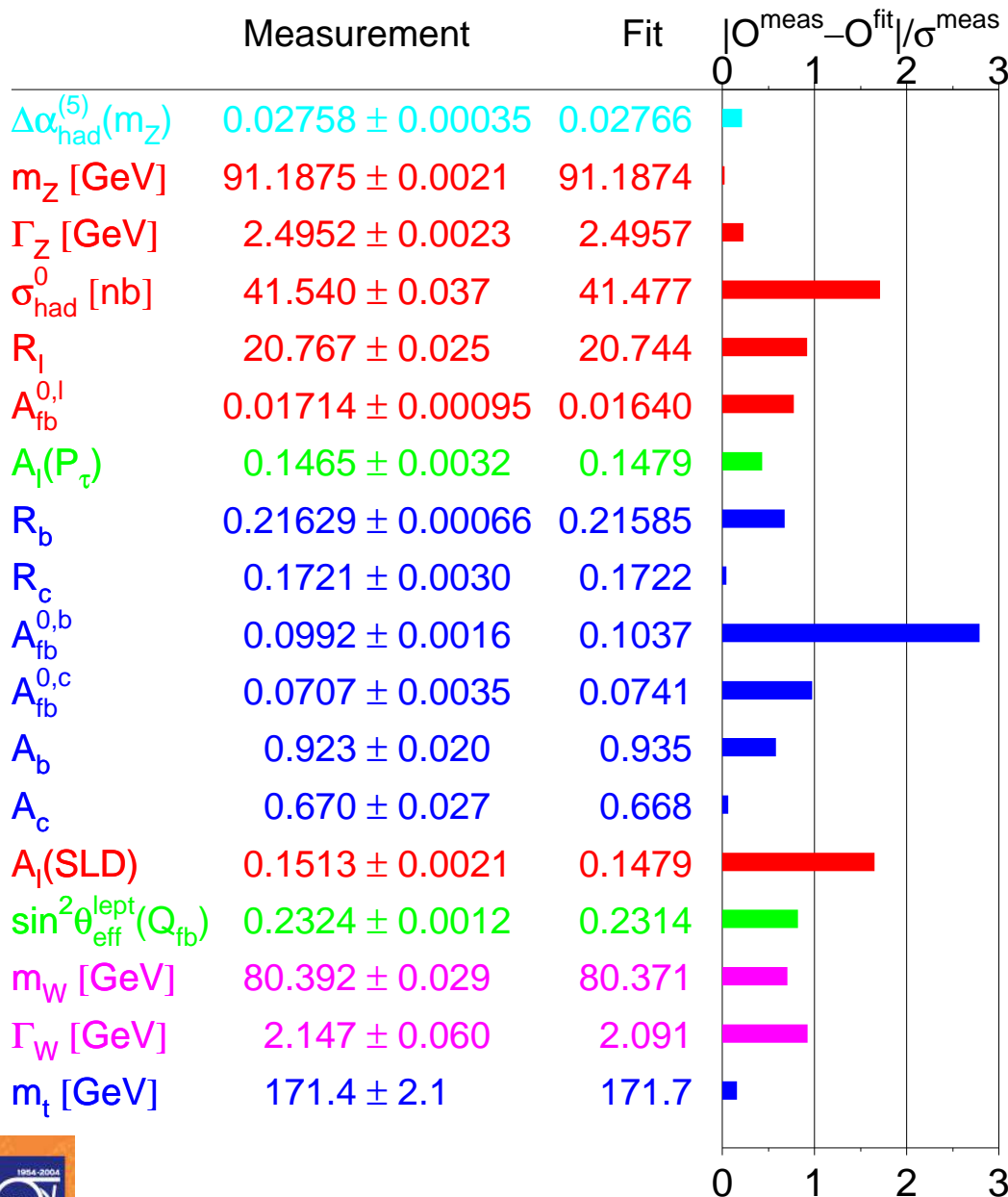
Tömeget a SM nem jósol, csak limitál:

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

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

Létezik? SM: muszáj léteznie

A Standard Modell diadalmenete



2006 nyári állapot

Valamennyi kísérlet
sokszáz mérésének
analízise:

$|Mért\text{-számolt}|/szórás$

Kilógó adat változik

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

LEP Electogyenge munkacsoport:

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



A SM érzékenysége Higgs-tömegre

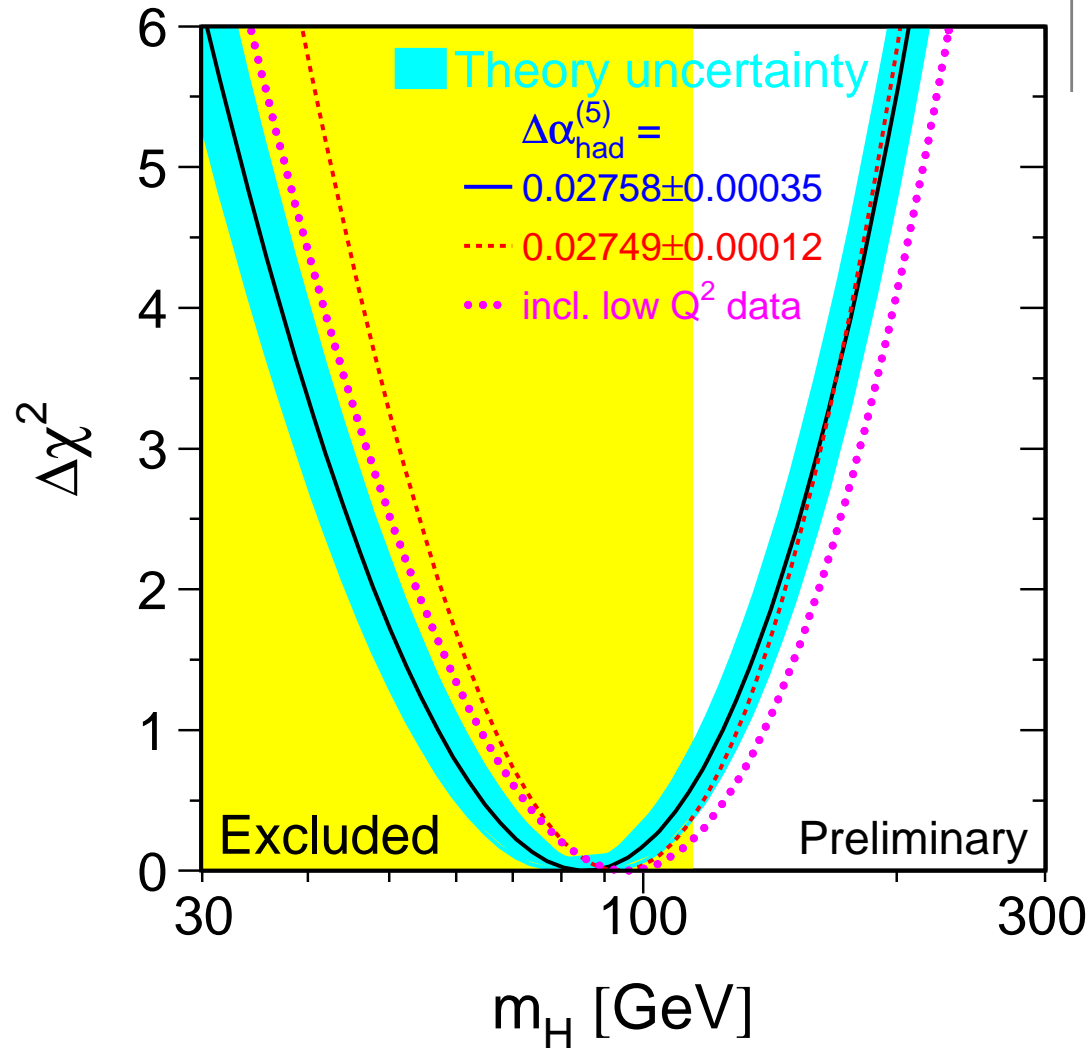
Illesztés jósága
Higgs-tömeg függvényében

különböző elméleti
becslésekre

Legjobb: $m_H \approx 85$ GeV

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

Illesztés: $M_H < 166 \text{ GeV}$
(95 % konfidencia)

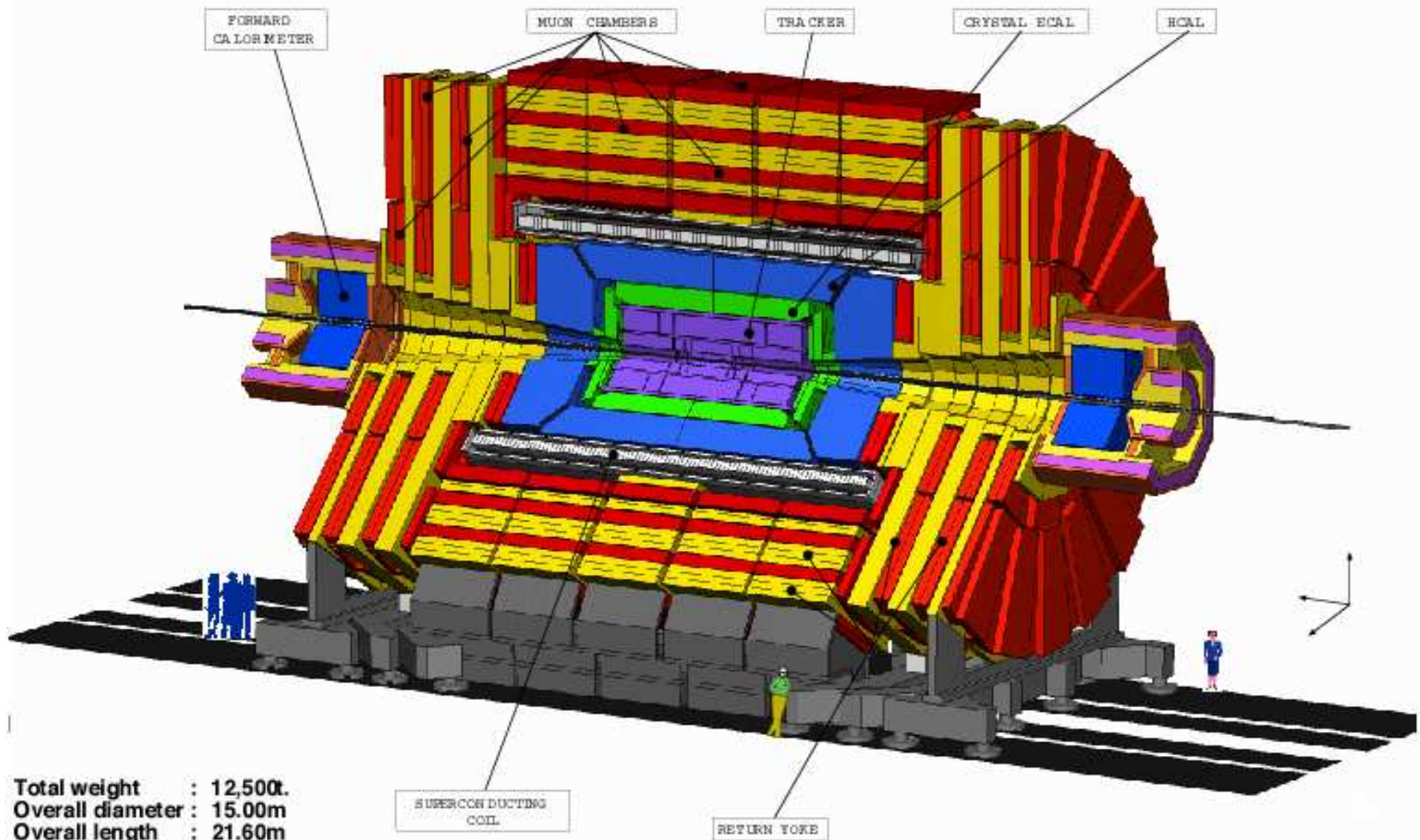


Ha mégsem létezik, a SM összeomlik, dacára a kiváló
kísérleti egyezésnek

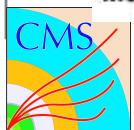


Az LHC CMS–detektora

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:
átmérő ~ 8 m, $B = 4$ Tesla

Detektorépítésben magyar részvétel:

Müondetektor pozicionáló rendszere: DE Kisérleti Fizika
Tanszék és ATOMKI

Very Forward Calorimeter: RMKI

Eseménytárolás: ≈ 10 PB/év adat, 10 PB/év MC

Adatkezelés: LHC Computing Grid
RMKI (BUDAPEST): 100 PC, 7 TB HD



D. Szimmetriák és sértésük

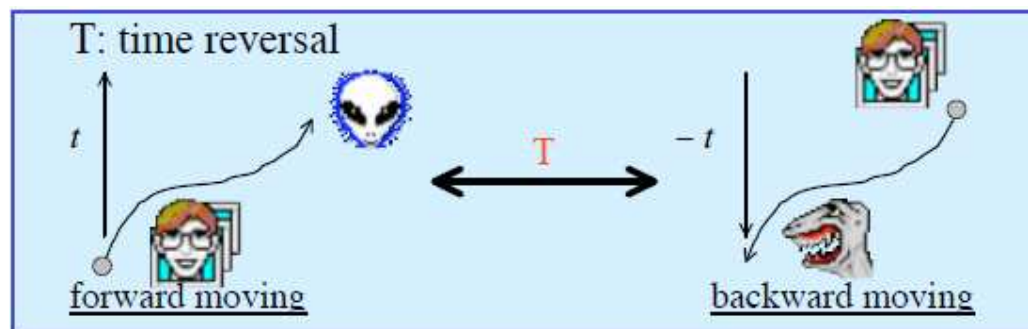
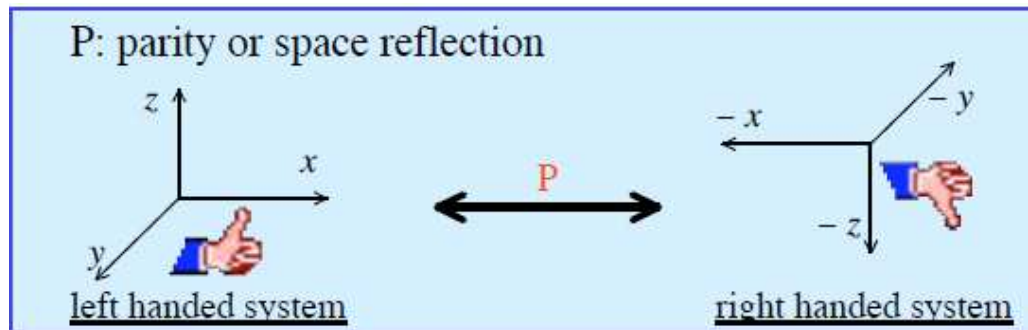
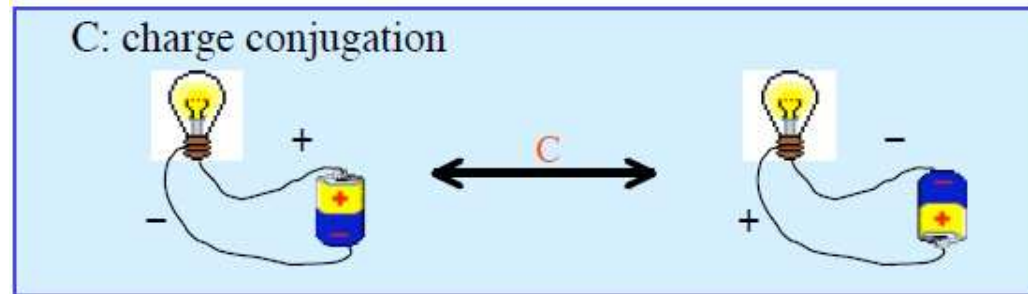
- Tükrözési szimmetriák
- A paritássértés felfedezése
- Kaonfizika és CP-sértés
- CPT-invariancia és ellenőrzése

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

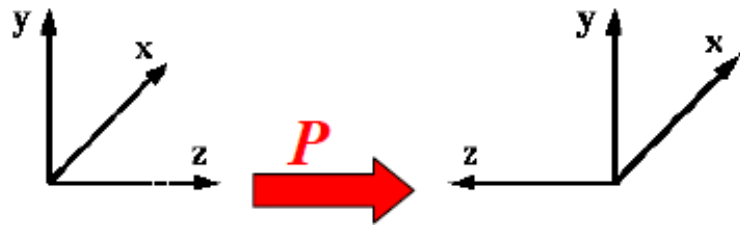
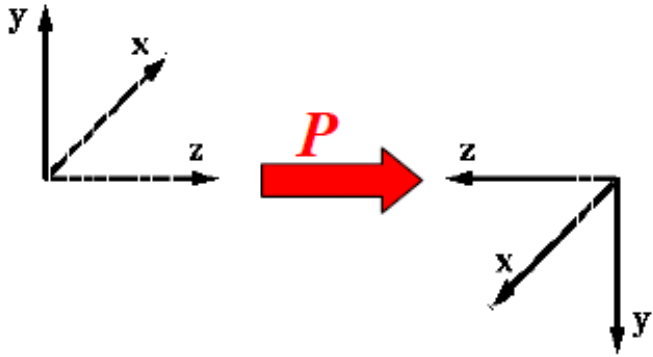
P paritás: erős és e-m kh.: gömbszimm. potenciál

T időtükrözés: miért bántana?

Gyenge kölcsönhatás???

T. Nakada, CERN

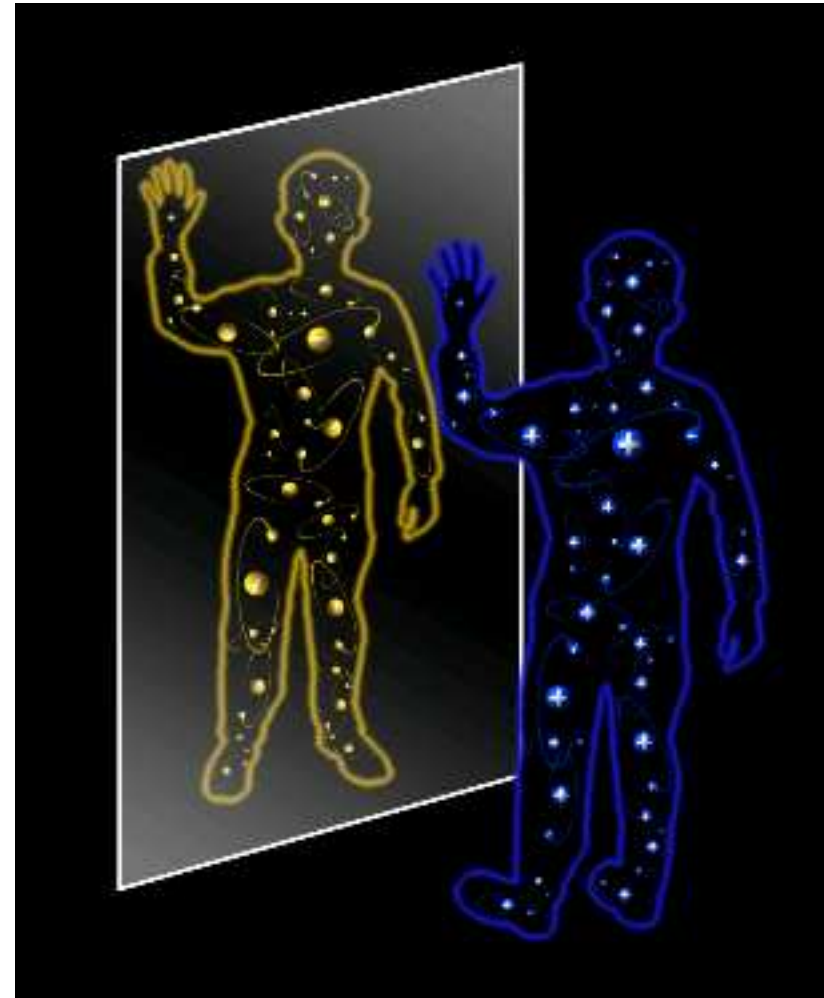
Térbeli tükrözés: paritás



Koordinátarendszer

valamennyi tengelyének tükrözése:

jobbkezes \Rightarrow balkezes
rendszer



D. Kirkby, APS, 2003

Paritássértés β -bomlásban

A $\tau - \theta$ paradoxon:

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

Tsung-Dao Lee és Chen-Ning Yang:

Question of Parity Conservation in Weak Interactions

Phys. Rev. 104 (1956) 254-258. (50-éves évforduló!)

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

Kísérleti igazolás:

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

Nobel-díj: Lee és Yang, 1957



A Wu-kísérlet

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

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



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



Tükörszimmetria maximális sérülése

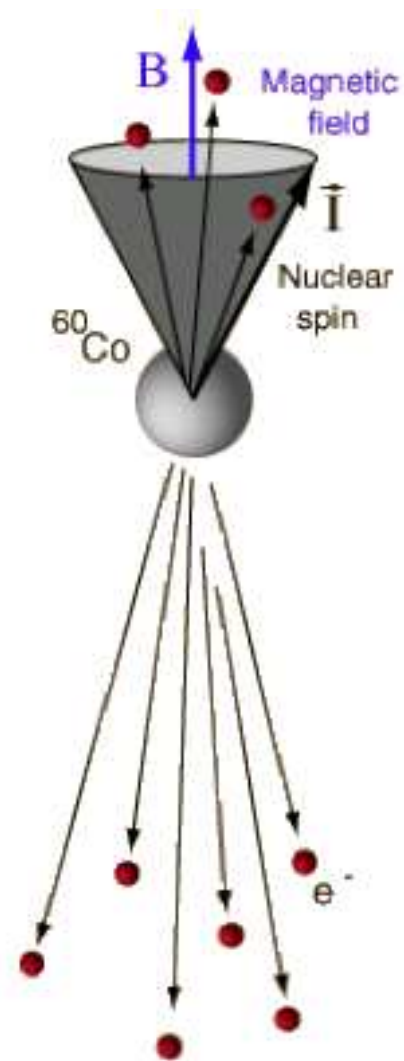


Maximális paritássértés



balra polarizált részecskék \Leftrightarrow jobbkezes antirészecskék

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

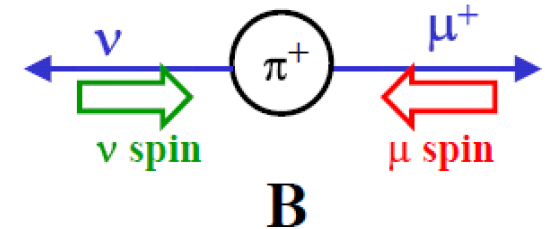
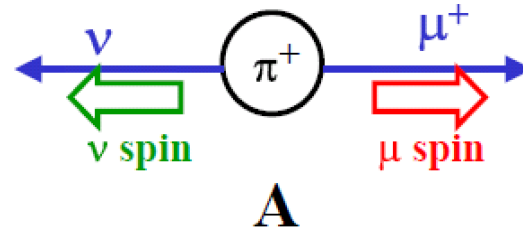


A Lederman-kísérlet

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

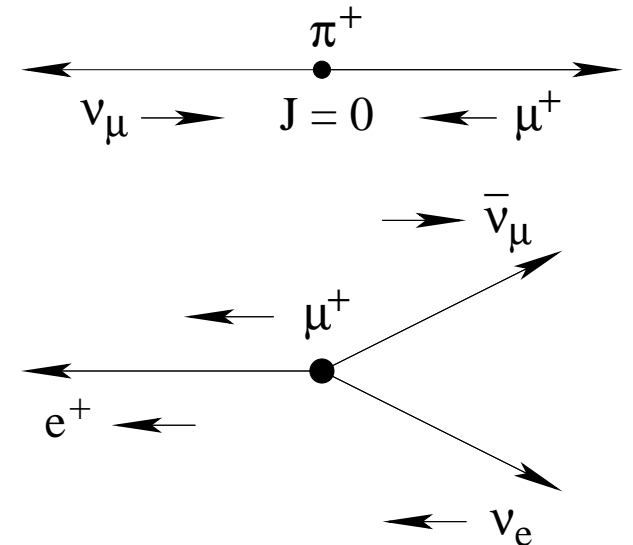
Müonkeletkezés:

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

Müonbomlás:

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

μ 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.

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. Wu⁶ for reports of her preliminary results in the Columbia discussions immediately preceding this experiment.

Phys. Rev. 105 (1957) 1413-1414

Phys. Rev. 105 (1957) 1415-1417

A tudományos etika és kollegialitás gyönyörű példája:

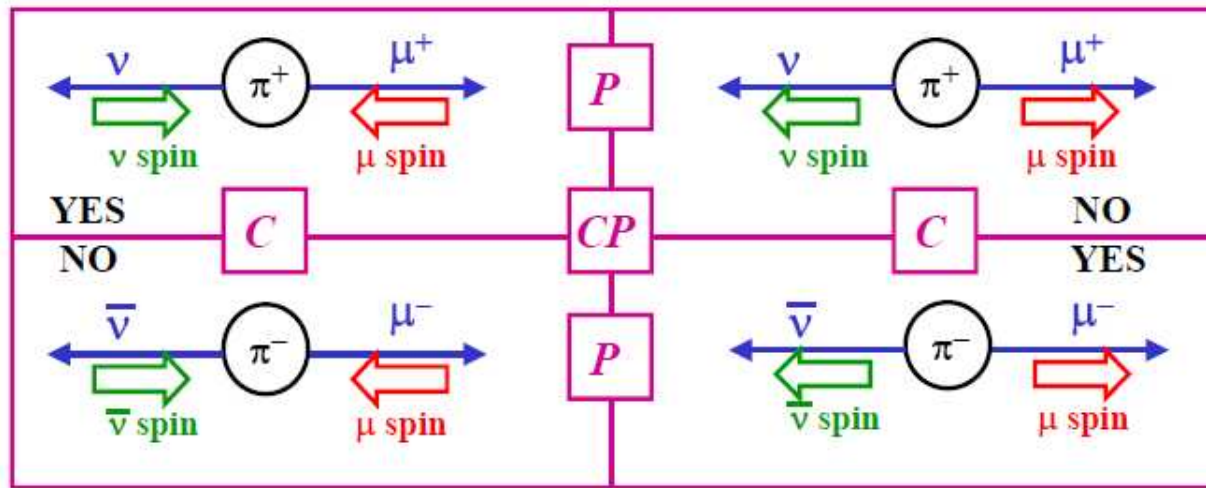
Wu csoportja hónapokig dolgozott a kísérleten.

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:

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

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

CPT sérülése sértené:

- a kölcsönhatások **lokálisát** 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, μ összehasonlítása)
- **hidrogén** \sim **antihidrogén**? ($2S - 1S$)

Kétfotonos
spektr.

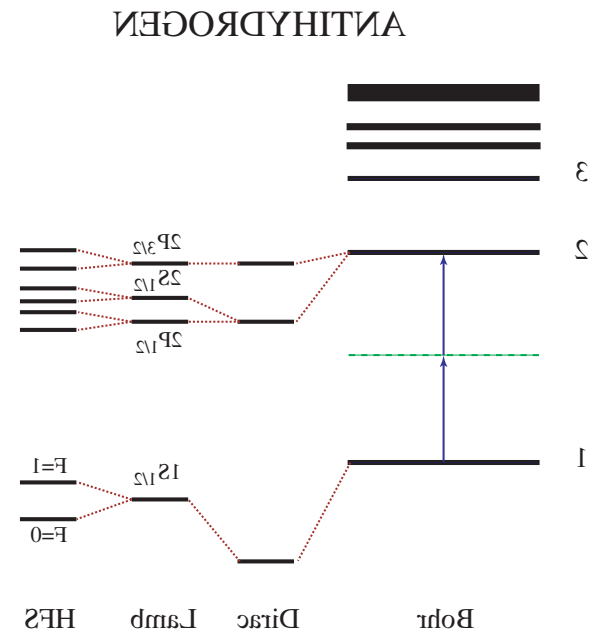
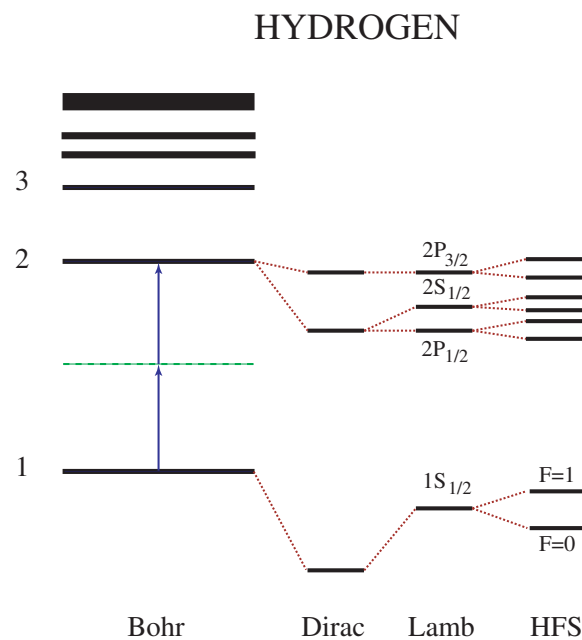


keskeny vonal

ellentétes irányú
lézerek



Doppler-mentes



A CERN antiproton-lassítója (AD)

a *CPT*-invariancia ellenőrzésére épült



Három *CPT*-kísérlet az AD-nál:

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

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

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, CERN, Budapest, Debrecen



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:

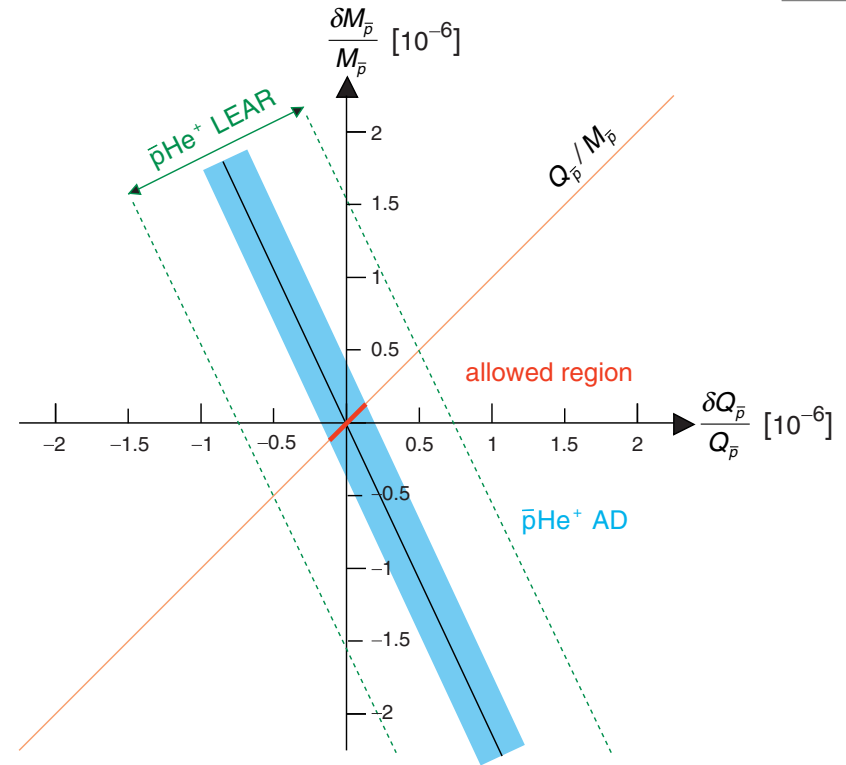
$$E_n \approx -m_{\text{red}} c^2 (Z\alpha)^2 / (2n^2) \rightarrow m \cdot q^2$$

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

Felső határ CPT -sértésre: 2 ppb (2×10^{-9})

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

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



Tokió
Asakusa-
negyede
télen

