Bevezetés a részecskefizikába

Pásztor Gabriella

Gabriella.Pasztor@cern.ch

CERN Hungarian Teachers Programme

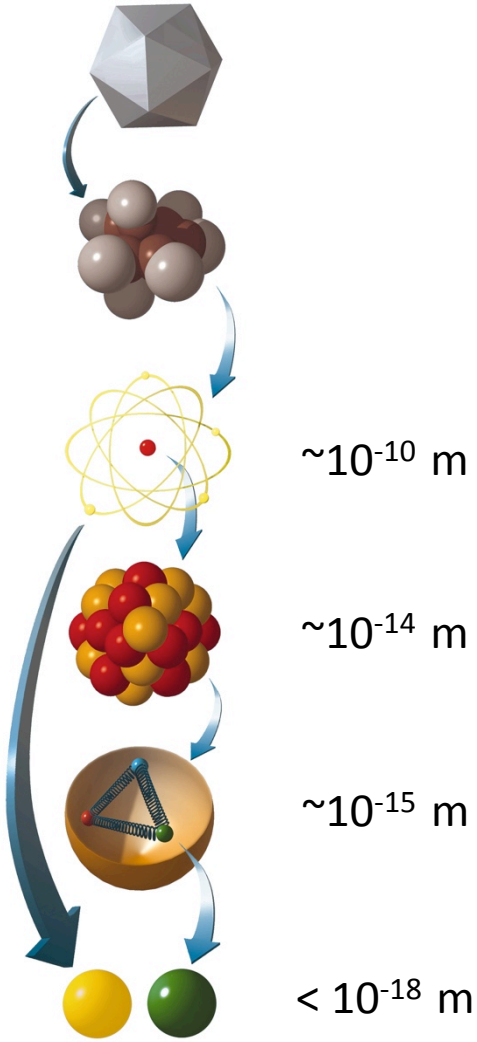
2011. augusztus 15-10.

1. RÉSZ

Mit vizsgál a részecskefizika és milyen eszközökkel?

Elemi részecskék és kölcsönhatásaik

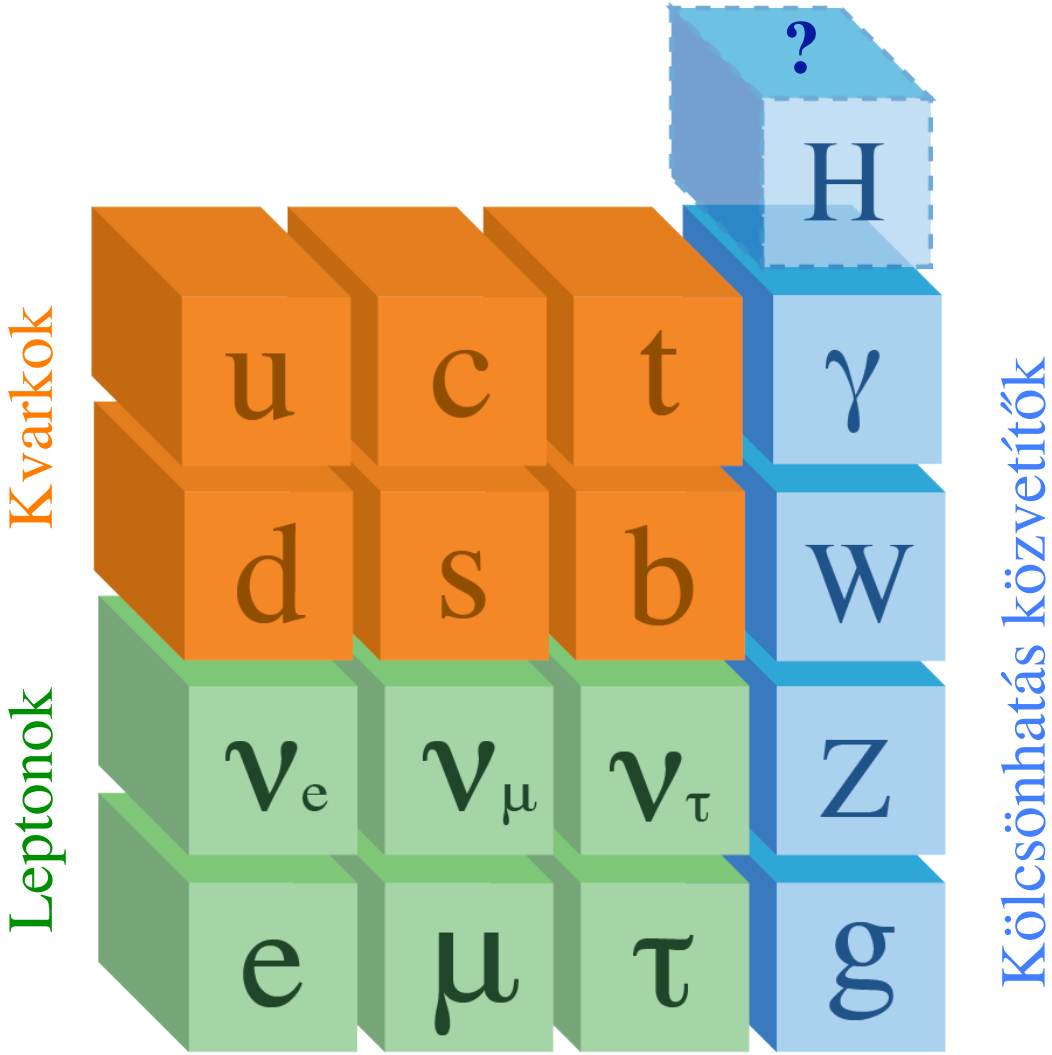
A KÉRDÉS



Mik a világegyetem elemi építőkövei?

- Részecskék
- Erők / kölcsönhatások

A válasz


?
H
u
c
t
γ
d
s
b
W
ν_e
ν_μ
ν_τ
Z
e
μ
τ
g
Kvarkok
Leptonok
Kölcsönhatás közvetítők

A válasz a matematika nyelvén

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F^a_{\mu\nu}F^{a\,\mu\nu}$$ *(Erők)*

$$+i\bar{\psi}D\psi + h.c.$$ *(Kölcsönhatások)*

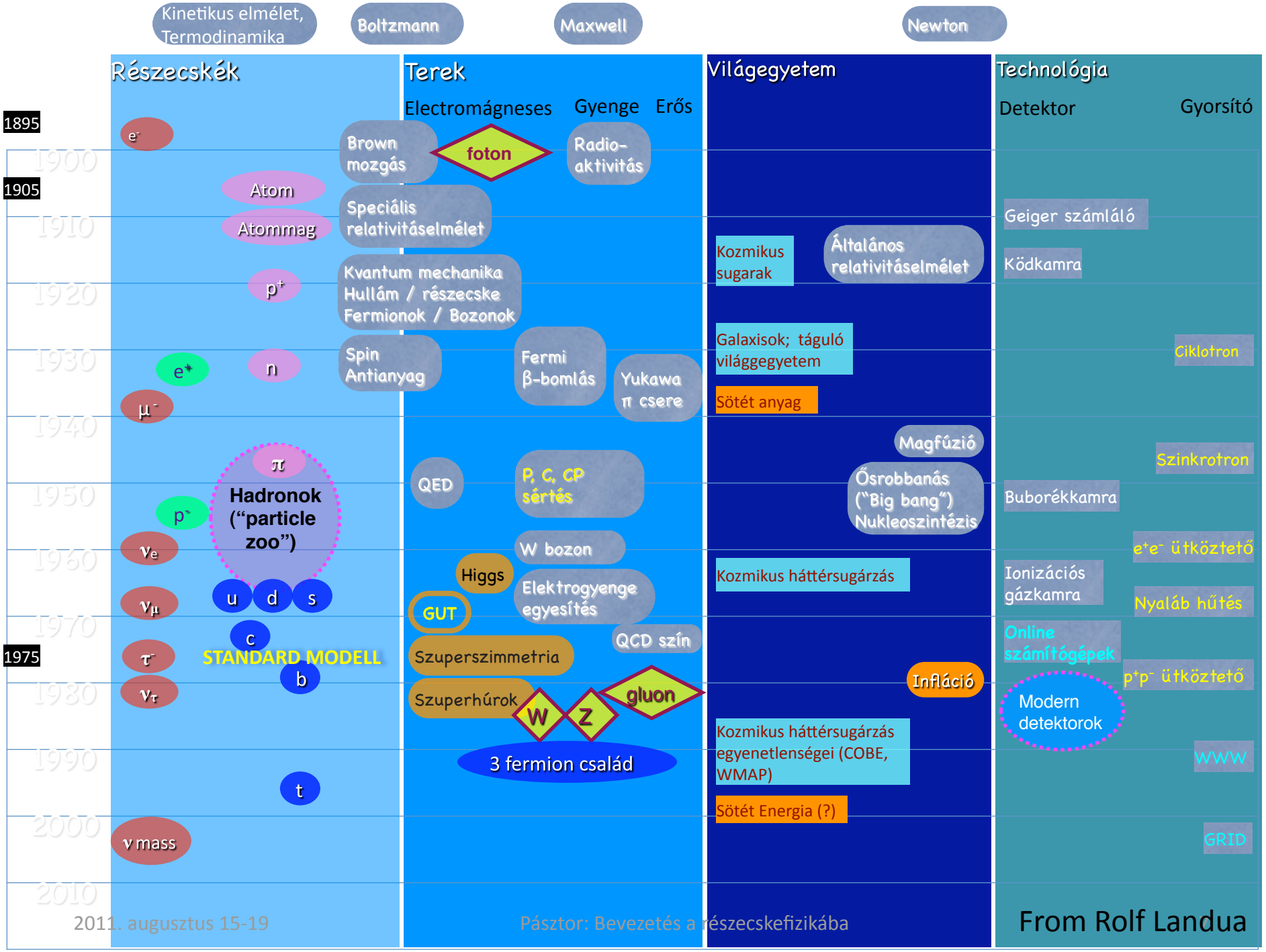
$$+\psi_i\lambda_{ij}\psi_j\Phi + h.c.$$ *(Fermionok tömege)*

$$+|D_\mu\Phi|^2 - V(\Phi)$$ *(Elektrogyenge szimmetriasértés)*

AZ ÚT

Több mint 100 ötletekkel, elméletekkel és kísérletekkel teli év

30 Nobel díj


Kinetikus elmélet, Termodinamika
Boltzmann
Maxwell
Newton
Részecskék
Terek
Világegyetem
Technológia
Electromágneses
Gyenge
Erős
Detektor
Gyorsító
1895
1900
1905
1910
1920
1930
1940
1950
1960
1970
1975
1980
1990
2000
2010
e⁻
Brown mozgás
foton
Radio-aktivitás
Atom
Atommag
Speciális relativitáselmélet
Kvantum mechanika
Hullám / részecske
Fermionok / Bozonok
p⁺
Spin
Antianyag
e⁺
n
Fermi β-bomlás
Yukawa π csere
μ⁻
π
Hadronok ("particle zoo")
QED
P, C, CP sértés
p⁻
νe
W bozon
Higgs
Elektrogyenge egyesítés
νμ
u
d
s
GUT
c
QCD szín
τ⁻
STANDARD MODELL
Szuperszimmetria
b
ντ
Szuperhúrok
W
Z
gluon
3 fermion család
t
ν mass
Kozmikus sugarak
Általános relativitáselmélet
Galaxisok; táguló világgegyetem
Sötét anyag
Magfúzió
Ősrobbanás ("Big bang") Nukleoszintézis
Kozmikus háttérsugárzás
Infláció
Kozmikus háttérsugárzás egyenetlenségei (COBE, WMAP)
Sötét Energia (?)
Geiger számláló
Ködkamra
Ciklotron
Szinkrotron
Buborékkamra
e⁺e⁻ ütköztető
Ionizációs gázkamra
Nyaláb hűtés
Online számítógépek
p⁺p⁻ ütköztető
Modern detektorok
WWW
GRID
From Rolf Landua

ELEMI RÉSZECSKE

Egyszerű, szerkezet nélküli, tovább nem bontható

…de nem feltétlenül stabil, azaz elbomolhat más részecskékre

AZ ATOM FOGALMÁNAK FEJLŐDÉSE

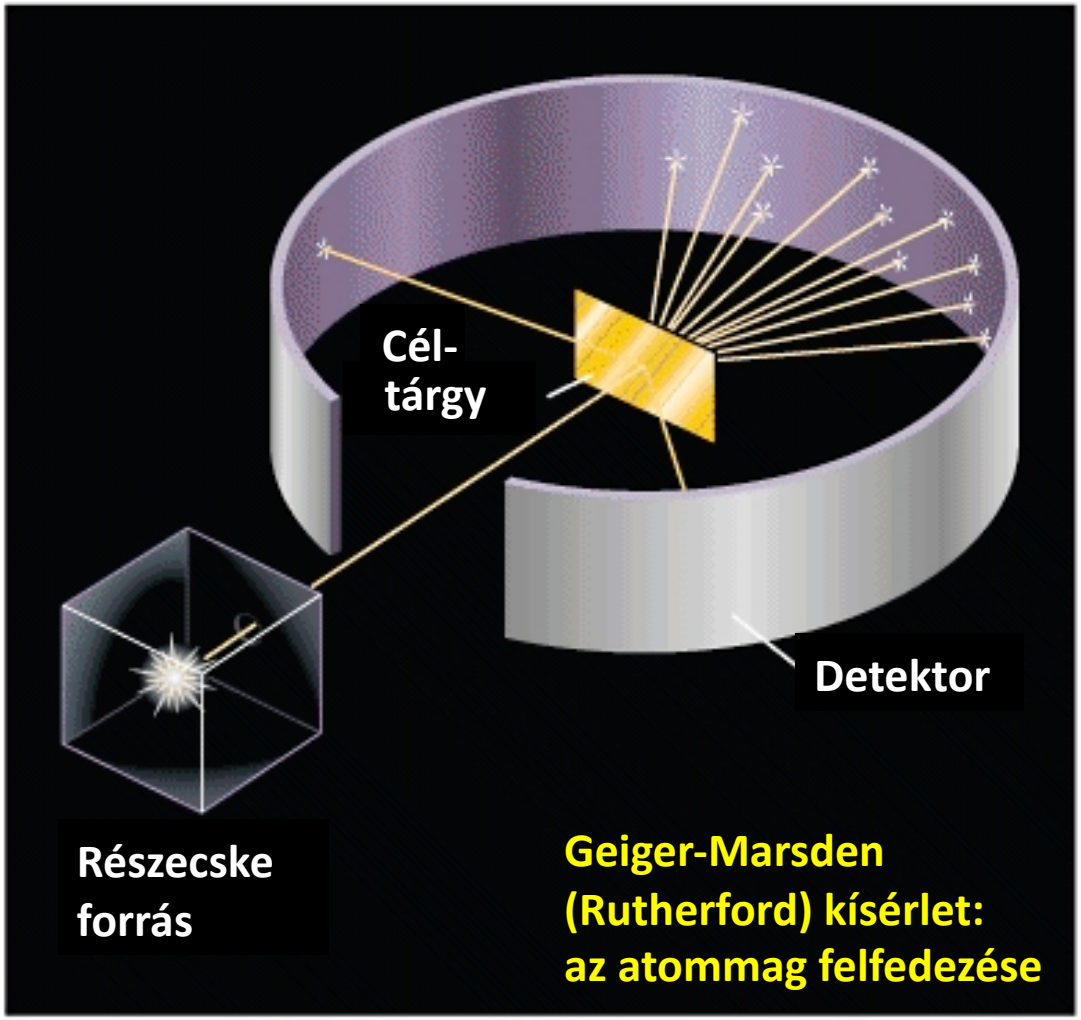
- I.e. 6. évszázad, India
- I.e. 5. évszázad, Leukipposz, majd i.e. 450, Démokritész
- 1805, John Dalton: modern *atom*elmélet
- 1827, Robert Brown: kis részecskék véletlenszerű mozgása folyadékban
  1905, Albert Einstein: molekulák lökdösik
- 1869, Dmitri Mengyelejev: kémiai elemek periódusos rendszere
- *1897*, J.J. Thomson: *katódsugárzás vizsgálata, q/m mérése* → *elektron*, minden atom része
- 1909, Ernest Rutherford: *α részecskék szórása arany fólián* → *atommag*
- 1913, Frederick Soddy: izotópok
- 1913, Henry Moseley: atommag töltés = periódusos rendszerbeli pozíció (Antonius van den Broek hipotézise)
- 1917 (1919), Rutherford, Hidrogén atommag minden más atommag része, *proton*
- 1919, Francis William Aston: tömeg spektrometer, izotóp tömegek, egész szám szabály
- 1932, James Chadwick: *neutron*
- 1913, Niels Bohr: atom model kvantált elektronpályákkal (színképvonalak)
- 1924, Louis de Broglie: részecske – hullám kettősség
- 1926, Erwin Schrödinger: atom matematikai modellje 3D elektron hullámokkal

A felfedezés módszerei

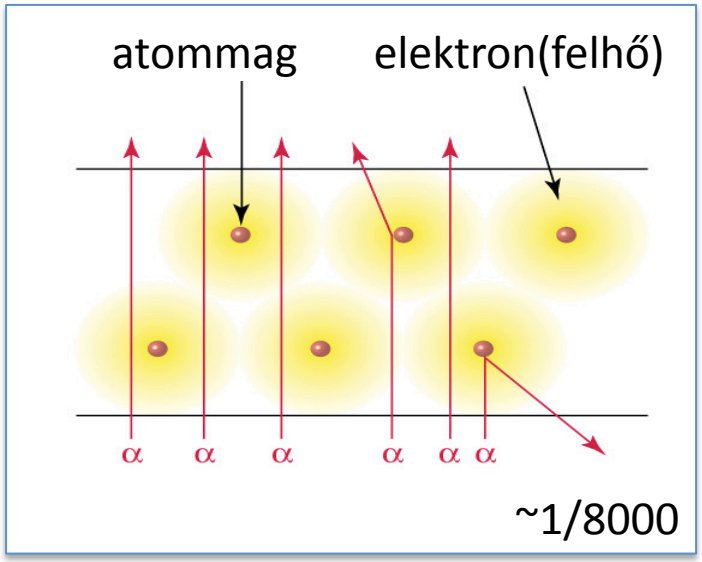
- Szórás kísérletek
  (példa: atommag felfedezése)

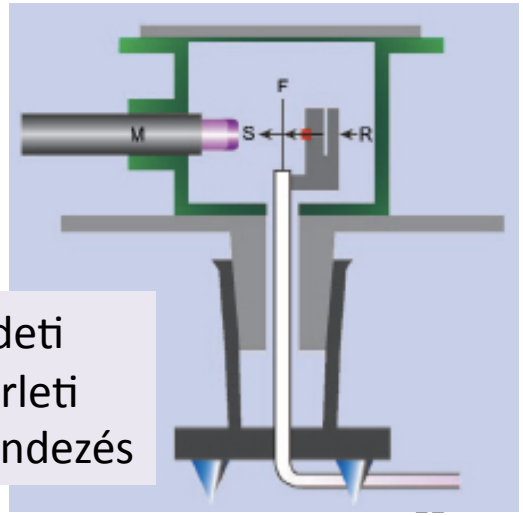
- Következtetés a megfigyelt rendszerek tulajdonságaiból: tömeg, spin, élettartam,…
  (példa: a kvark-modell megszületése)

RÉSZECSKE SZÓRÁS MINT MIKROSZKÓP: AZ ATOMMAG FELFEDEZÉSE



Az eredmény értelmezése

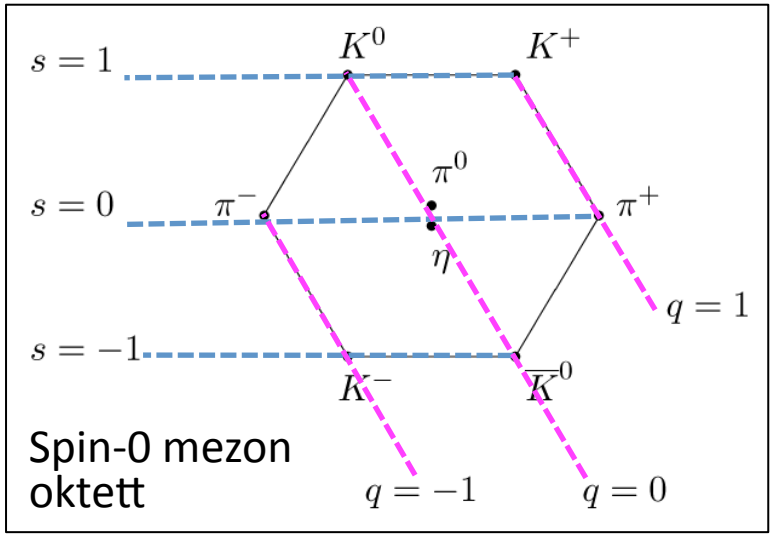


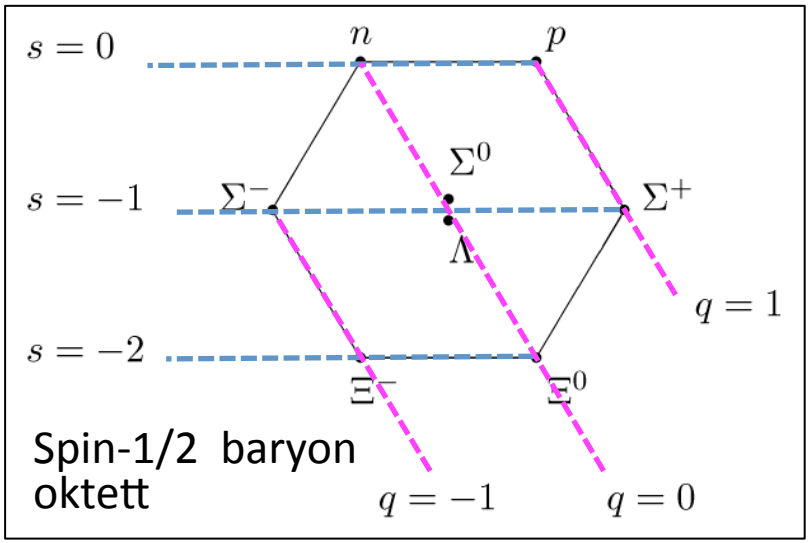


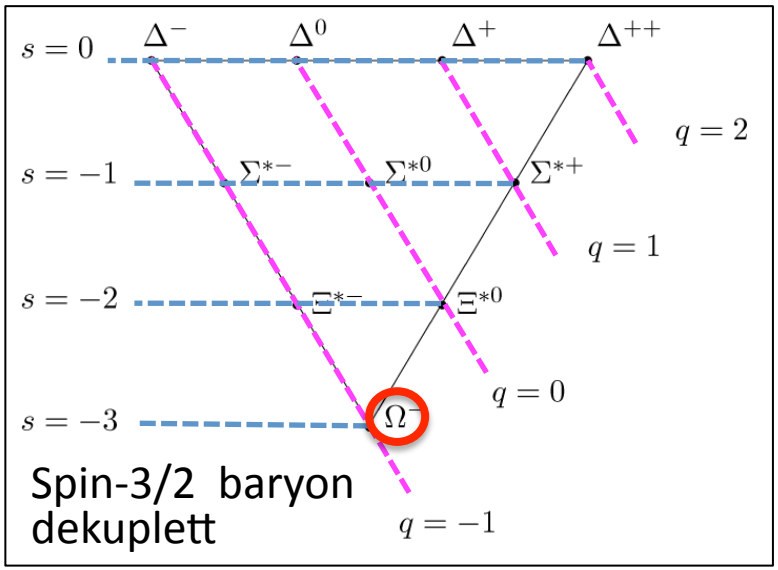
Eredeti kísérleti elrendezés

KÍSÉRLETI ADATOK RENDSZEREZÉSE: A KVARKOK FELFEDEZÉSE

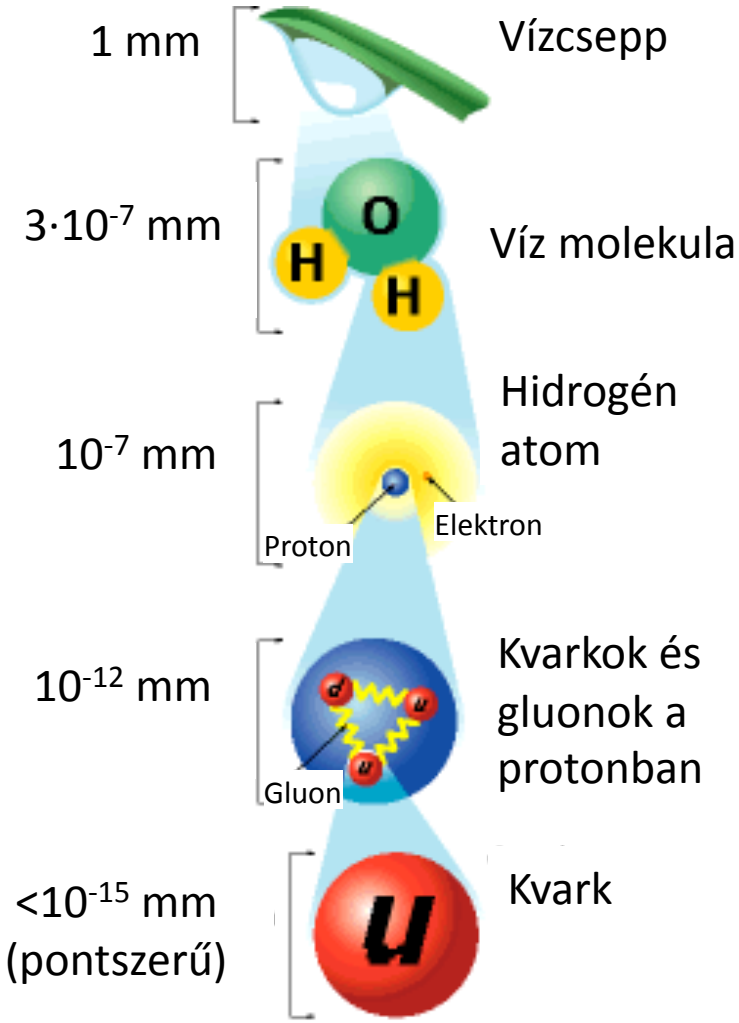
- A 1960-as évekre több száz erős kölcsönhatásban résztvevő részecskét fedeztek fel ("részecske állatkert")
- 1962, Murray Gell-Mann rendszerezi a részecskéket, és megjósolja az Ω^- létezését (1969, Nobel díj)
- A modern kvark modell megszületik
- 1964, Brookhaven, Ω^- felfedezése a megjósolt tulajdonságokkal







AZ ANYAG FELÉPÍTÉSE



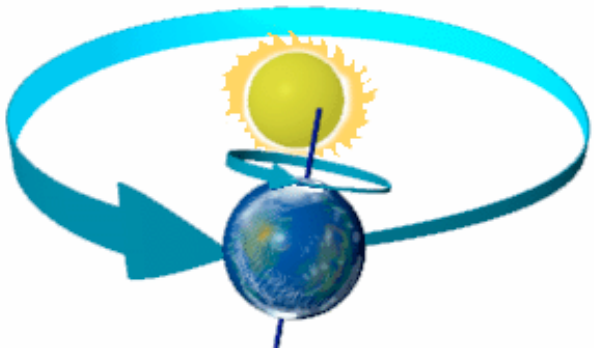
MÉRTÉKEGYSÉGEK

- Energia: 1 eV = $1.6 \bullet 10^{-19}$ J
  (elektron által felvett energia, amint áthalad 1V potencialkülönbségen)

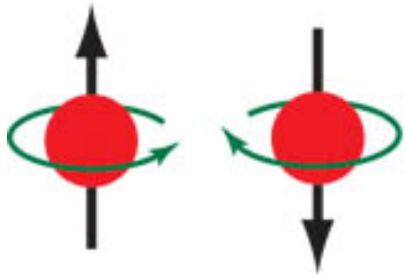
- Speciális relativitáselmélet: $E = mc^2$ és $E^2=p^2c^2+m_0^2c^4$
- Fénysebesség: $c = 3 \cdot 10^8$ m/s $\Rightarrow 1$
- Mértékegységek: [m] = [p] = [E] = eV (vagy keV, MeV, GeV, TeV)
- Elektron nyugalmi tömege: $m_e = 511$ keV/c^2 vagy röviden 511 keV

- Heisenberg határozatlansági reláció: $\Delta x \bullet \Delta p > h/4\pi$, $\Delta E \bullet \Delta t > h/4\pi$
- Planck állandó: $h/2\pi \approx 1.05 \bullet 10^{-34}$ J•s $\approx 6.6 \bullet 10^{-16}$ eV•s $\Rightarrow 1$
- p=100 GeV/c impulzusú részecske $>10^{-18}$ m felbontással lát

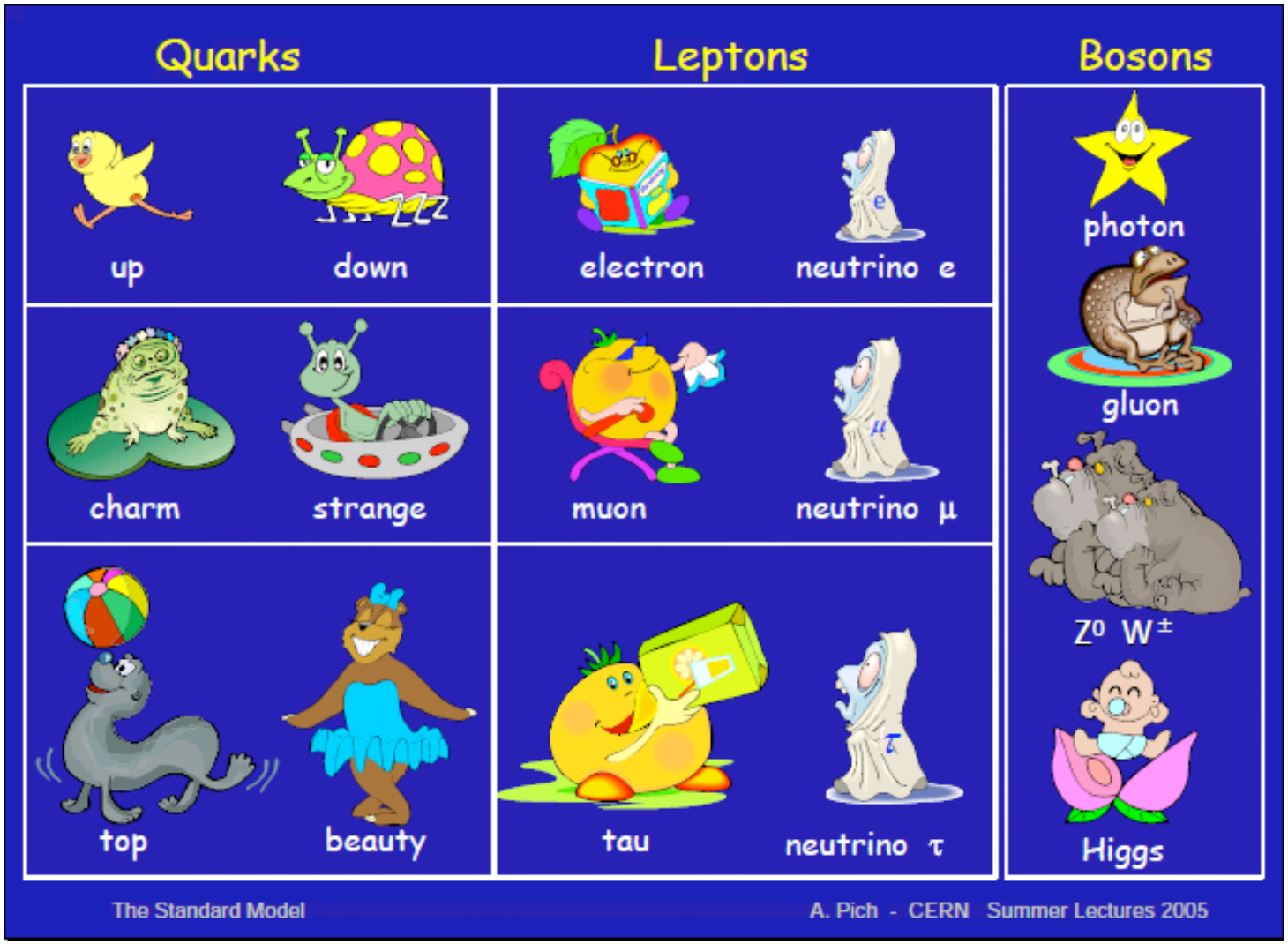
FERMIONOK ÉS BOZONOK



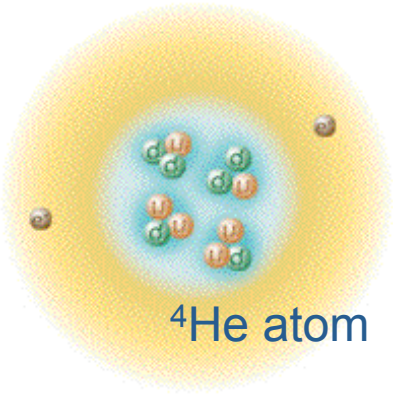
- **Spin**: belső impulzus-momentum
- Analógia:
  Föld forgása a tengelye körül → spin
  Föld keringése a Nap körül → pályamomentum
- Elemi részecskék esetében a spin nem köthető forgáshoz
  hanem egy belső tulajdonság!
- Kvantum-rendszerekben az impulzusmomentum kvantált:
  $h/2\pi \bullet \sqrt{[s\bullet(s+1)]}$, ahol s egész (0,1,2…) és fél-egész (1/2,3/2..) értékeket vehet fel
- **Fermionok**: fél-egész spinű részecskék
  (pl. az elektron, a proton, a neutron 1/2-spinű)
- **Bozonok**: egész spinű részecskék
  (pl. a foton, a pion 1-spinű)
- Fermionok és bozonok különbözően viselkednek
  - a fermionok Fermi-Dirac statisztikával írhatók le, a Pauli-féle kizárási-elvet követik,
  - a bozonok a Bose-Einstein statisztikát követik, és kondenzálódhatnak

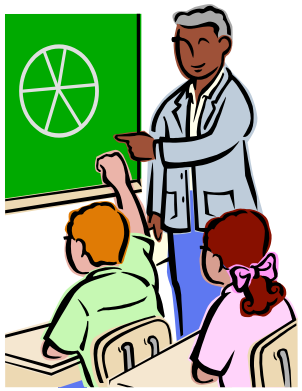


A Standard Modell elemi részecskéi



AZ ANYAG ÉPÍTŐKÖVEI: A FERMIONOK



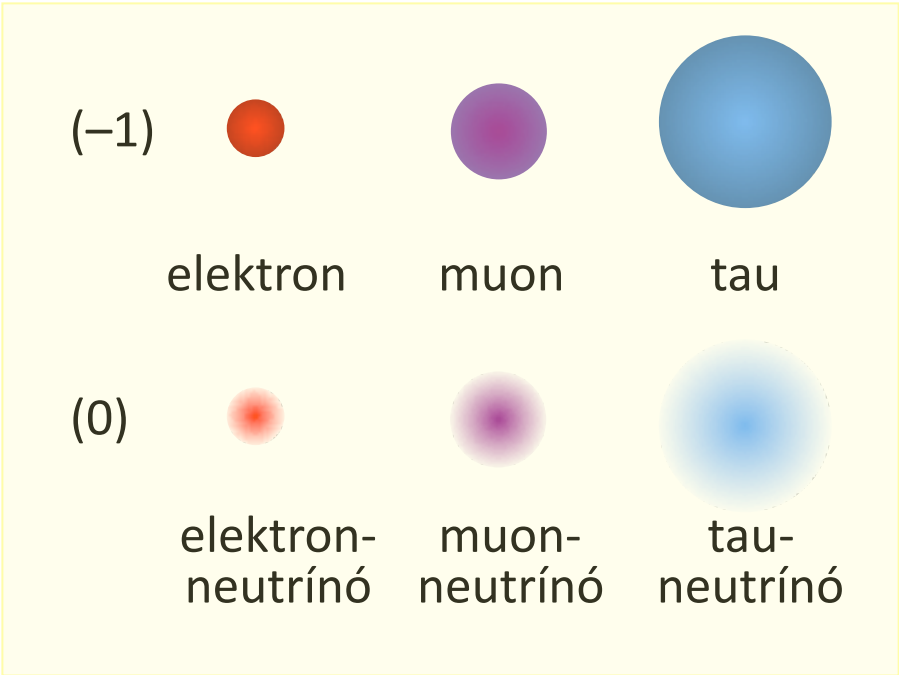


FERMIONS matter constituents spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...

Leptons spin = 1/2			Quarks spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c^2	Electric charge	Flavor	Approx. Mass GeV/c^2	Electric charge
ν_e electron neutrino	$<1\times10^{-8}$	0	u up	0.003	2/3
e electron	0.000511	–1	d down	0.006	–1/3
ν_μ muon neutrino	<0.0002	0	c charm	1.3	2/3
μ muon	0.106	–1	s strange	0.1	–1/3
ν_τ tau neutrino	<0.02	0	t top	175	2/3
τ tau	1.7771	–1	b bottom	4.3	–1/3

3 család, növekvő részecske tömeg

LEPTONOK

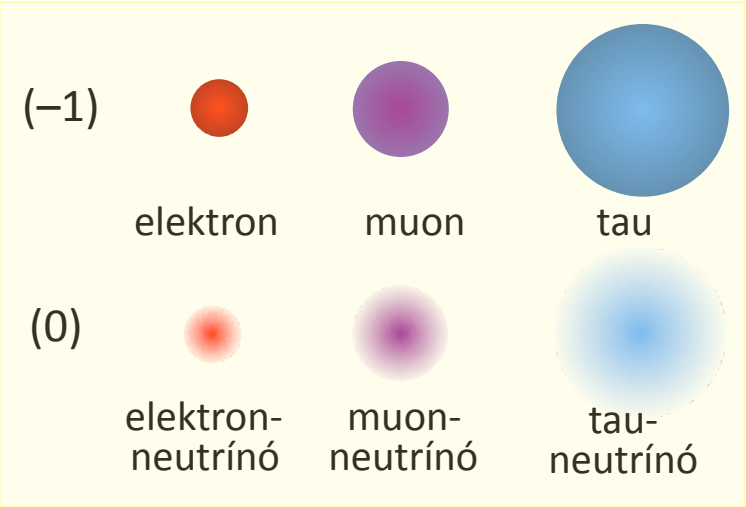


- Elektromosan töltött leptonok: a negatív töltésű elektron és nehezebb társai
- A nehéz töltött leptonok gyorsan elbomlanak, például

$$\underset{\text{muon}}{\mu} \rightarrow \underset{\text{muon neutrino}}{\nu_\mu} + \underset{\text{electron}}{e^-} + \underset{\text{antineutrino}}{\bar{\nu}_e}$$

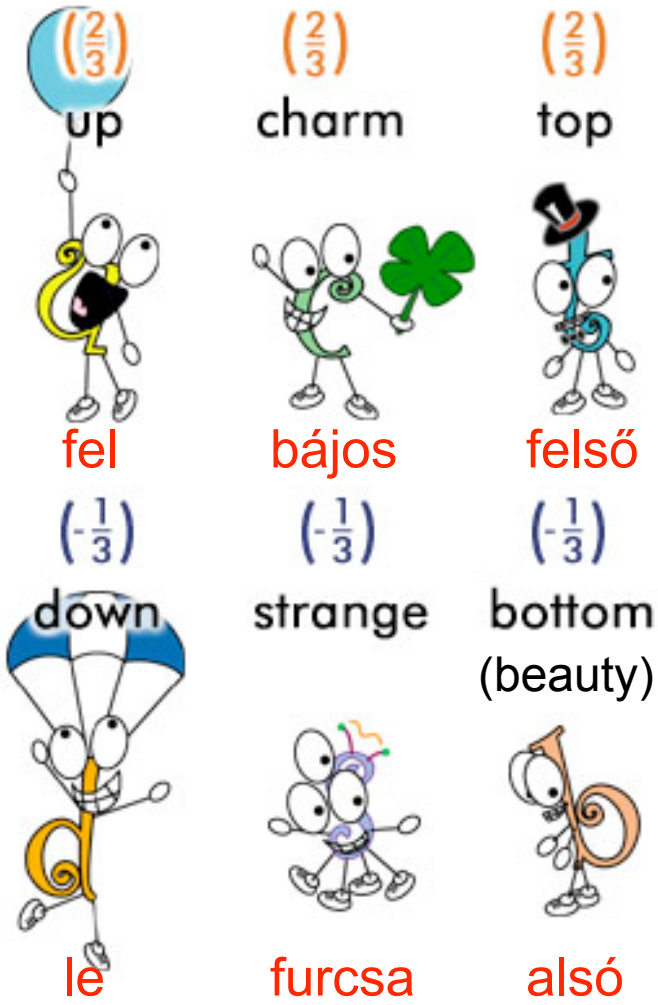
- Semleges neutrínók: nagyon könnyűek (0-tömegűnek tartották őket sokáig) és nehezen észlelhetők
- A neutrínók nagyon gyengén hatnak kölcsön, jelenlükre fizikai folyamatokban általában a hiányzó energia és impulzus utal (←energia és impulzus megmaradás!)

LEPTONOK



- 1897, J.J. Thomson, katódsugárzás vizsgálata: elektron NOBEL
- 1932, Carl Anderson, kozmikus sugarak vizsgálata ködkamrával: pozitron, az elektron anti-részecske társa NOBEL
- 1936, Carl Anderson, kozmikus sugarak vizsgálata ködkamrával: muon (eleinte "μ-mezon")
- 1930, Wolfgang Pauli, β-bomlás magyarázata: neutrínó hipotézis NOBEL
- 1956, C. Cowan & F. Reines, reaktor anti-ν_e kimutatása vízzel teli detektorral
  $\bar{\nu}_e\, p \rightarrow n\, e^+, \quad e^+ e^- \rightarrow \gamma\gamma$ NOBEL
- 1962, L.M. Lederman, M. Schwartz, J. Steinberger, Brookhaven AGS neutrínó nyaláb: muon neutrínó
- 1974-7, M.L. Perl et al. (SLAC-LBL), SPEAR e^+e^- ütköztetőnél $e^+e^- \rightarrow e^\pm\mu^\mp + E_{\text{hiányzó}}$ események: tau NOBEL NOBEL
- 2000, DONUT kollaboráció (FNAL): tau neutrínó

KVARKOK



- 1964: M. Gell-Mann és G. Zweig felismeri, hogy a rengeteg részecske-ütköztetésben megfigyelt új részecske, megmagyarázható csupán három elemi alkotórész az u, d és s kvarkok létével NOBEL
- 1970: S. Glashow, J. Iliopoulos, L. Maiani megjósolja a c kvark létezését az íz-váltó semleges áramok elnyomásának magyarázatául
- 1973: M. Kobayashi, T. Maskawa megjósolja a b kvark létezését a CP sértés magyarázatául NOBEL
- 1974: c kvark egyidejű felfedezése az USA BNL (S. Ting et al.) és SLAC (B. Richter et al.) laboratóriumaiban NOBEL
- 1977: b kvark felfedezése a FNAL-ban (USA)
- 1995: t kvark felfedezése a FNAL-ban
- Kvarkok nem figyelhetők meg szabadon, csupán kötött állapotban, részecskékbe zárva

A KVARKOK SZÍNE

Problémák a kvark modellel

- $\Delta^{++} = (u\uparrow u\uparrow u\uparrow)$
  3 azonos fermion, mi van a Pauli-kizárással?
- Mi tartja össze a hadronokat?
- Miért csak ($q\bar{q}$) és (qqq) hadronok vannak?
  Miért nincs szabad kvark?

Új kvantumszám, a "szín" bevezetése:
Red, **G**reen, **B**lue ⇨ szín-töltés

- Δ^{++} kvarkjai különböző (színű) kvantumállapotban vannak
- A kvarkok között erős szín-szín vonzás van (a szín az erős kcsh töltése)
- Csak színtelen állapotok szabadok (kvarkbezárás)

Analógia a színlátással: 3 erős kcsh-beli állapot ~ 3 alapszín
(anti-szín ~ kiegészítő szín, színtelen állapot ~ fehér)

HADRONOK: BARIONOK ÉS MEZONOK

Hadron tömeg = Kvarkok tömege (1%) + (mozgási és helyzeti energia)

Spin $J = (\Sigma_q \pm ½) +$ pályamomentum

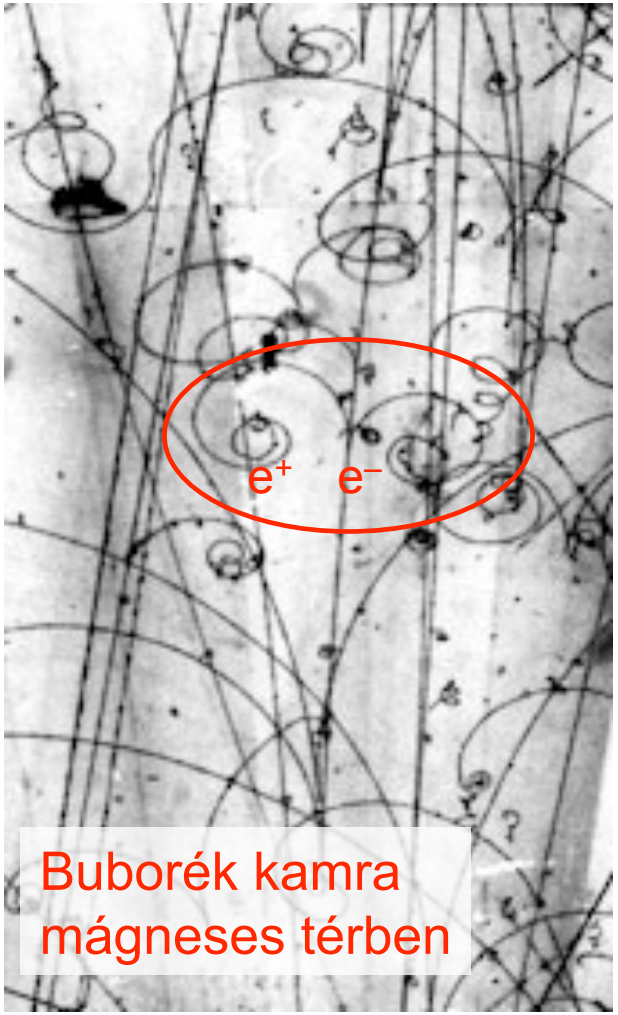
Baryons qqq and Antibaryons $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$ Baryons are fermionic hadrons. There are about 120 types of baryons.					
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c^2	Spin
p	proton	uud	1	0.938	1/2
$\bar{p}$	anti-proton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	–1	0.938	1/2
n	neutron	udd	0	0.940	1/2

Mesons $q\bar{q}$ Mesons are bosonic hadrons. There are about 140 types of mesons.					
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c^2	Spin
π^+	pion	$u\bar{d}$	+1	0.140	0
K^-	kaon	$s\bar{u}$	–1	0.494	0

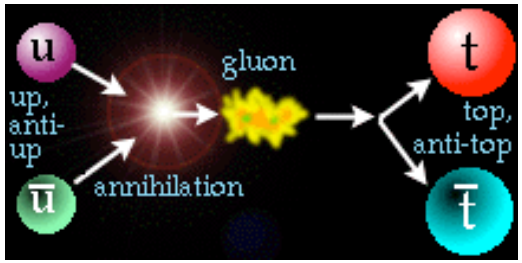
J = 1/2, 3/2, … (fermionok)
Q = 0, ±1, ±2
Nukleonok, J=1/2: p (uud), n (udd)

J = 0, 1, … (bozonok)
Q = 0, ±1
Pionok, J=0: π^- ($u\bar{d}$), π^- ($\bar{u}d$), π^0 ($u\bar{u}$-$d\bar{d}$)/√2

ANYAG ÉS ANTI-ANYAG



- Dirac-egyenlet negatív energiájú megoldása (1928)
- Minden részecskének van egy anti-részecske párja, amely mindenben megegyezik vele csak a töltése ellentétes:
  proton (+) ⇔ anti-proton (–)
  elektron (–) ⇔ pozitron (+)
- Gravitáció azonosan hat részecskékre és anti-részecskékre, mivel tömegük azonos
- A természetben β-bomlásban és kozmikus sugarak hatására a föld légkörében is keletkeznek
- Pozitron felfedezése kozmikus sugarak vizsgálatával (C. Anderson, 1932)
- Ha egy részecske és egy anti-részecske találkozik, energia felszabadulása közben megsemmisülnek

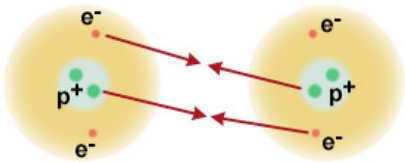


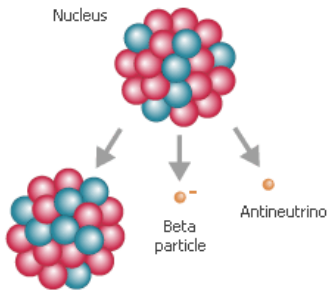
- Az univerzum születésekor azonos számban keletkeztek részecskék és anti-részecskék. Mi történt az anti-anyaggal?

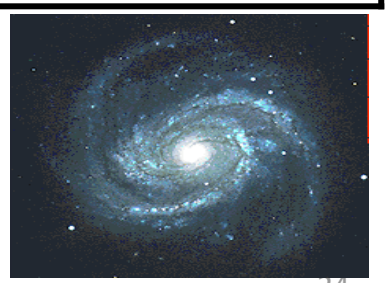
ELEMI KÖLCSÖNHATÁSOK, ERŐK

	Elektromágneses	*Erős*	*Gyenge*	*Gravitációs*
Példák	*Minden elektromosan töltött részecske* *Atomok, molekulák* *Optikai és elektromos berendezések* *Telekommunikáció*	*Kvarkok* *Nukleonok (és más hadronok)*	*Neutron bomlás* $n \to p^+ e^- \nu_e$ *Radioaktív* β*-bomlások* *Energiatermelés a csillagokban*	*Minden részecske* *Eső tárgyak* *Égitestek, galaxisok, fekete lyukak*
Potenciál	$\sim 1/r$	$-a/r + b\,r$	$\sim e^{-m_V r}/r$	$\sim 1/r$
Hatótávolság	∞ $(F \sim 1/r^2)$	*Rövid* $(1\ \text{fm} \sim 1/m_\pi)$	*Rövid* $(<1\ \text{fm})$	∞ $(F \sim 1/r)$
Élettartam	$10^{-20} - 10^{-16}$ s $\pi^0 \to \gamma\gamma$	10^{-23} s $\Delta \to p\pi$	$>10^{-12}$ s $\pi^+ \to \mu^+ \nu_\mu$	

1 fm = 10^{-15} m
R_{proton} = 0.8 fm







KÖZVETÍTŐ RÉSZECSKÉK: MÉRTÉK BOZONOK

Részecskék között ható erőket elemi részecskék, ú.n. mérték bozonok közvetítik

BOSONS force carriers spin = 0, 1, 2, ...

Unified Electroweak spin = 1		
Name	Mass GeV/c^2	Electric charge
γ photon	0	0
W^-	80.4	−1
W^+	80.4	+1
Z^0	91.187	0

Strong (color) spin = 1		
Name	Mass GeV/c^2	Electric charge
g gluon	0	0

PROPERTIES OF THE INTERACTIONS

Property \ Interaction	Gravitational	Weak (Electroweak)	Electromagnetic (Electroweak)	Strong: Fundamental	Strong: 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: 10^{-18} m	10^{-41}	0.8	1	25	Not applicable to quarks
Strength relative to electromag for two u quarks at: 3×10^{-17} m	10^{-41}	10^{-4}	1	60	
for two protons in nucleus	10^{-36}	10^{-7}	1	Not applicable to hadrons	20

"Hierarchia probléma": gravitációs erőnek a többi erőhöz viszonyított gyengesége

Pásztor: Bevezetés a részecskefizikába

FEYNMAN DIAGRAMMOK

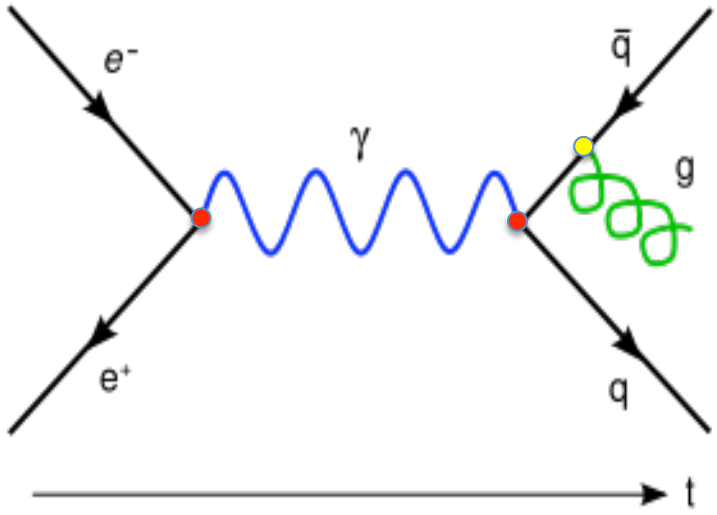
Képi megjelenítése a fizikai folyamatot leíró matematikai kifejezéseknek

- Minden részecskét más vonaltípus jelöl
- Szabad véggel rendelkező vonalak valódi részecskéket, egyik vertexből a másikba futók virtuális részecskéket jelölnek
- Fermionoknál a részecskéket és anti-részecskéket a nyíl iránya különbözteti meg
- Minden vertexhez (vonalak találkozási pontjához) tartozik egy csatolási állandó
- Minden vertex egy integrált hoz magával

A szórási folyamatok hatáskeresztmetszetének kiszámításához az összes lehetséges közbülső állapotra összegezni kell

Minden közbülső állapot ábrázolható egy Feynman gráffal, melyeket könnyebb áttekinteni mint a mögöttük lévő bonyolult számításokat

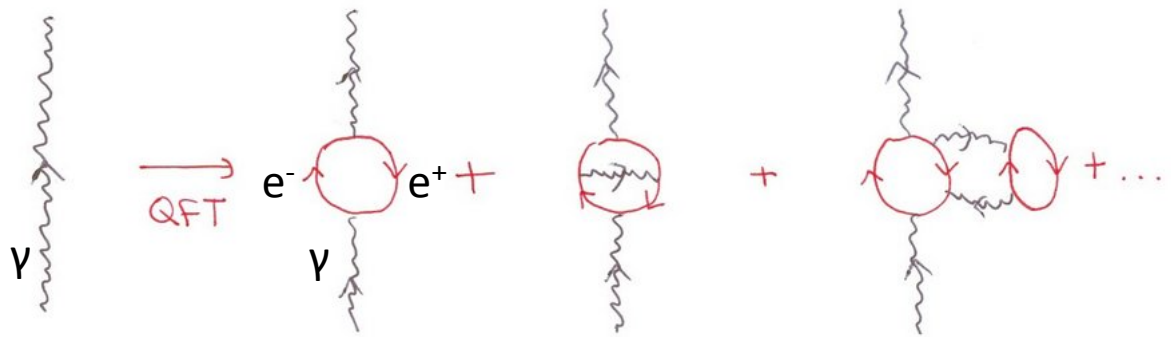
Csak perturbatív (sorba fejthető) folyamatokat ábrázolhatunk így (pl. az erős kölcsönhatás kötött állapotait nem)



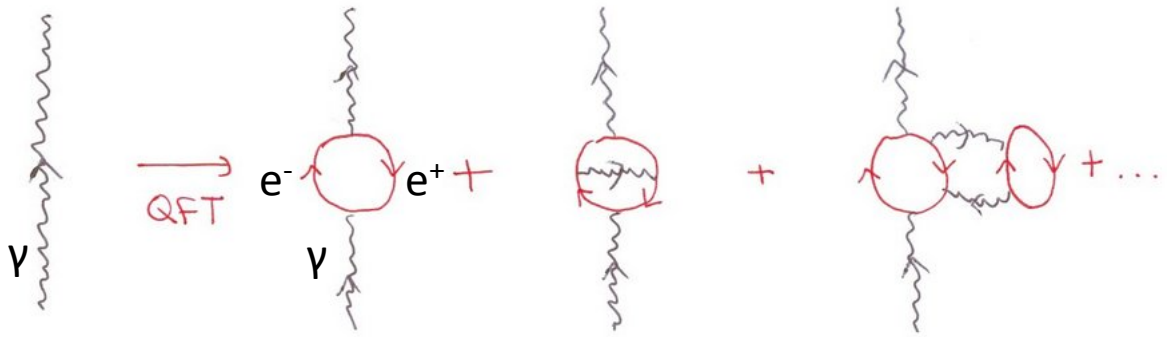
Pásztor: Bevezetés a részecskefizikába

VIRTUÁLIS RÉSZECSKÉK

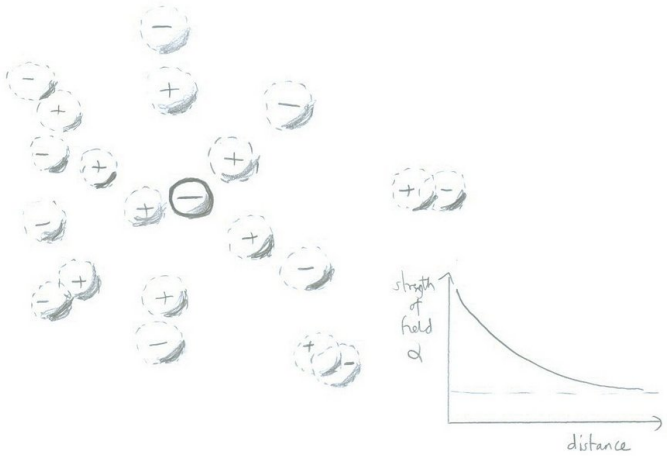
- Csupán nagyon rövid ideig léteznek
- Nem követik be a $E^2=p^2c^2+m_0^2c^4$ összefüggést
- … de a megmaradási törvényeket betartják!
- Energiájuk bizonytalan a Heisenberg-féle határozatlansági törvény szerint: $\Delta E \bullet \Delta t > h/4\pi$
- m=0 részecskék (pl. foton) virtuális formájának van tömege (a vákumtól kölcsönvett energiából)
- Közeli kapcsolatban állnak a kvantum fluktuáció fogalmával: tekinthetjük születésüket a kvantummechanikai mennyiségek várható érték körüli fluktuációjának



KÖLCSÖNHATÁSOK HATÓTÁVOLSÁGA ÉS A KÖZVETÍTŐ RÉSZECSKÉK TERMÉSZETE I.

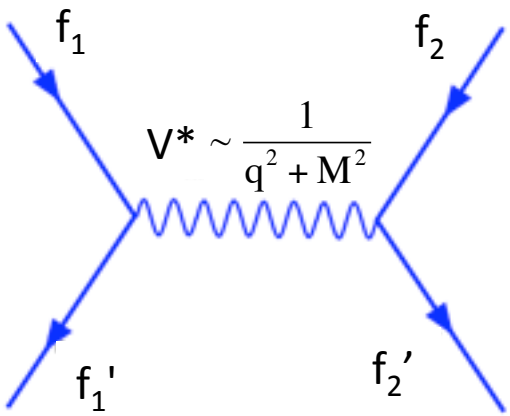


- Kvantummechanika szerint egy részecske összes lehetséges útját össze kell adni a megfelelő súlyokkal ahhoz, hogy egy fizikai jelenséget pontosan leírjunk
- Hogyan függ az EM kölcsönhatás erőssége a távolságtól?
- Minél messzebb van két töltés a köztük haladó foton annál több virtuális párt tud kelteni, melyek kis dipólokként árnyékolják a töltéseket → távolsággal az erő csökken



KÖLCSÖNHATÁSOK HATÓTÁVOLSÁGA ÉS A KÖZVETÍTŐ RÉSZECSKÉK TERMÉSZETE II.

- Miért "gyenge" a gyenge kölcsönhatás?
- A közvetítő részecskék (W, Z) nehezek, nagyobb energiára van szükség a létrehozásukhoz
- A részecskefizika nyelvén

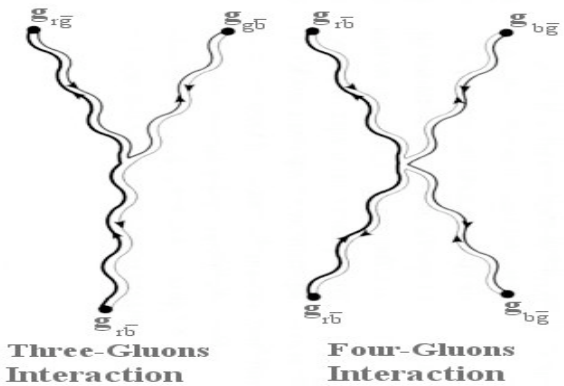


Kölcsönhatási potenciál:

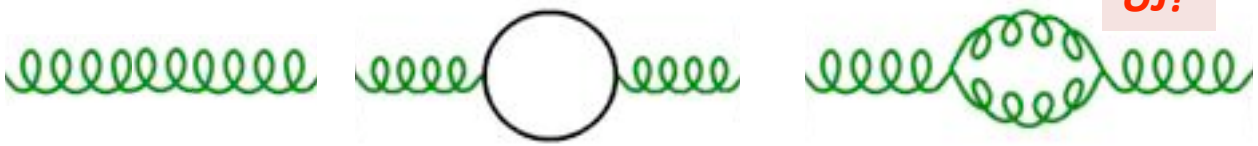
$$V(r) \sim \frac{e^{-m_V r}}{r}$$

Kölcsönhatások hatótávolsága és a közvetítő részecskék természete III.

- Miért erős az erős kölcsönhatás?
- A gluon tömege 0 (mint a fotoné)
- A gluon "töltött" (színes) az erős kölcsönhatás szempontjából
- Nemcsak virtuális fermion párok, hanem gluon párok is születhetnek a vákumban



ÚJ!

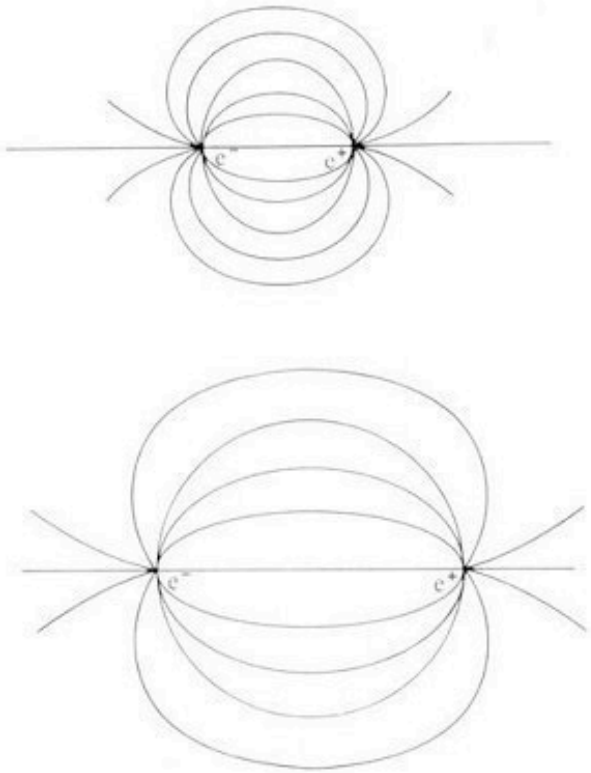


$$V(r) \sim -\frac{a}{r} + br$$

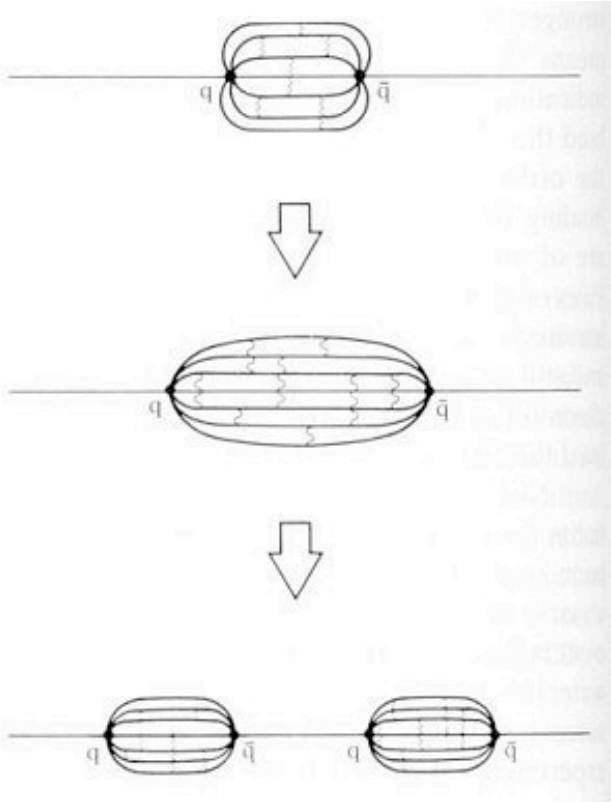
- Ezek a virtuális gluonok nem árnyékolják, hanem erősítik a kölcsönhatást!
- A fenti potenciál leírja mindkét megfigyelt jelenséget: a kvark-bezárást, és az aszimptotikus szabadságot

KVARK BEZÁRÁS

- Mi történik, ha két részecskét megpróbálunk eltávolítani egymástól?

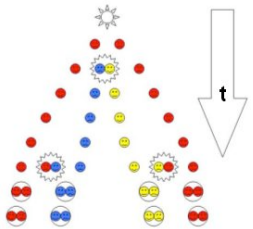


Elektromos tér (szétterjed)



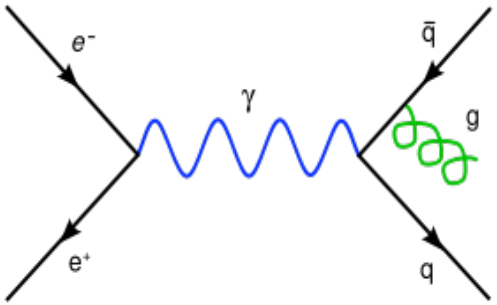
Színtér (szétszakad)

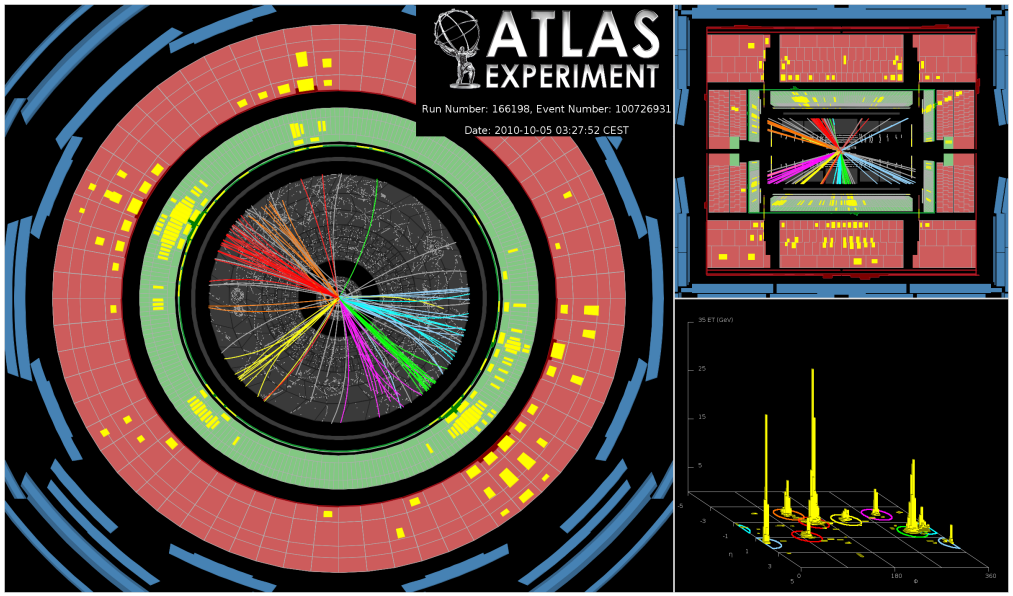
➜ kvark bezárás

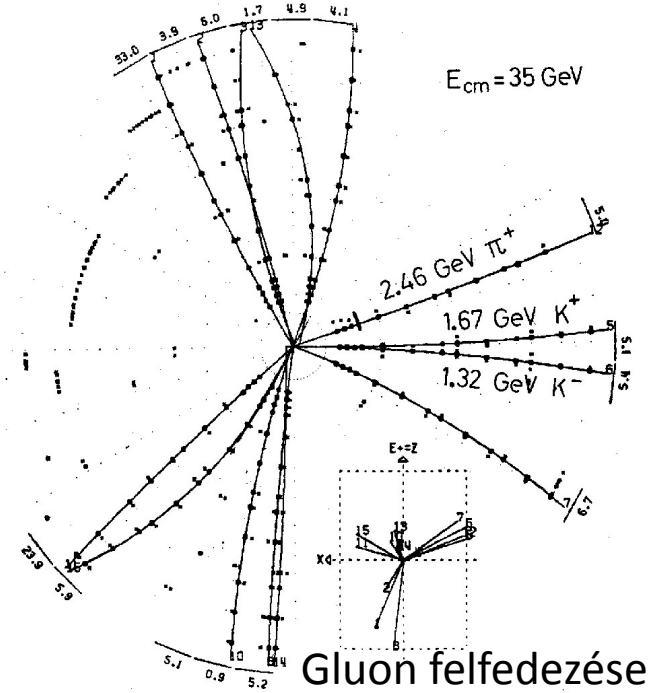


HADRONZÁPOROK

- Az ütközésben keletkező kvarkok távolodnak egymástól…
- … amíg energiájuk futja kvark párokat keltenek…
- kialakul egy részecske- vagy hadron-zápor (“jet”)
- A közeli kvark párok, kvark hármasok hadronokat hoznak létre (mezonok, barionok)
- Fragmentáció, hadronizáció

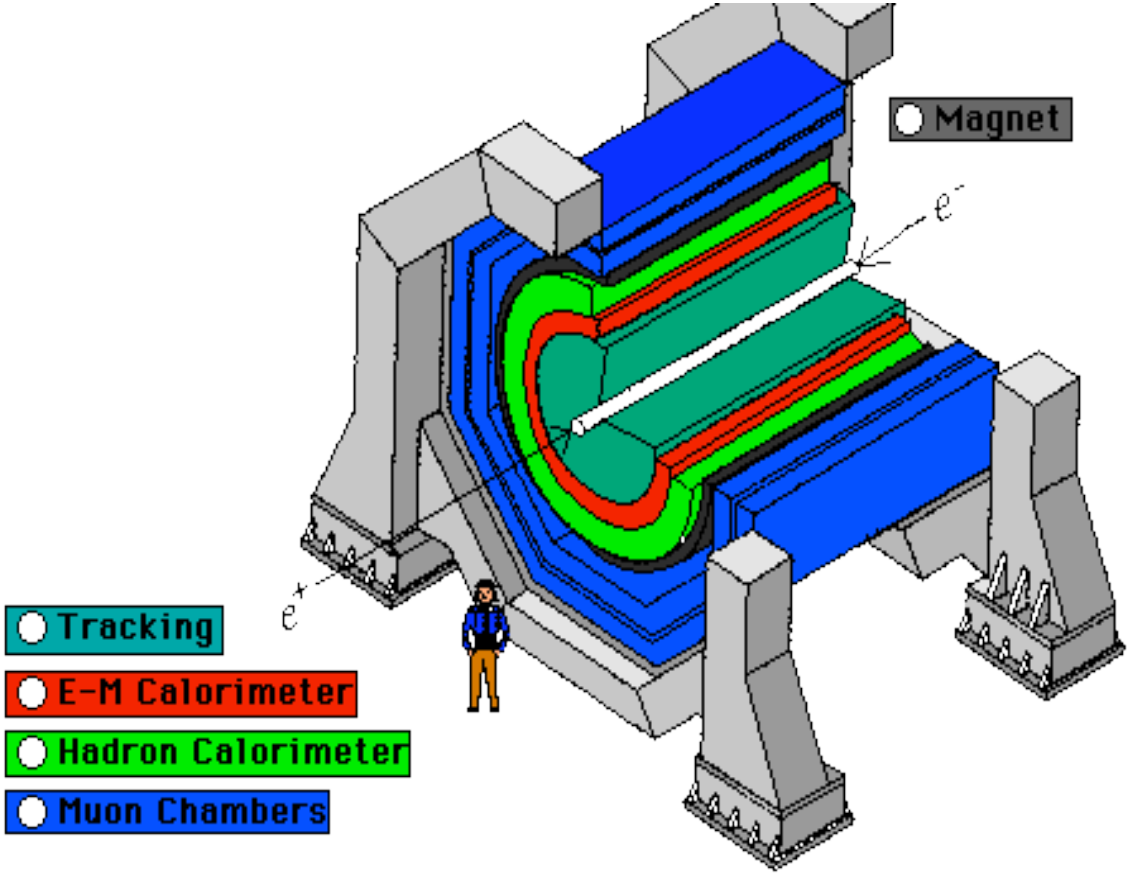




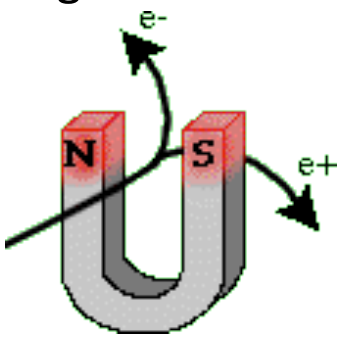


Gluon felfedezése (DESY PETRA)

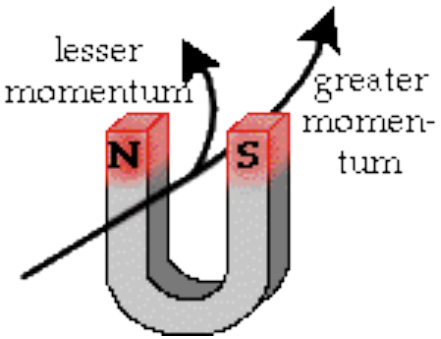
RÉSZECSKE DETEKTOROK



Töltés meghatározás



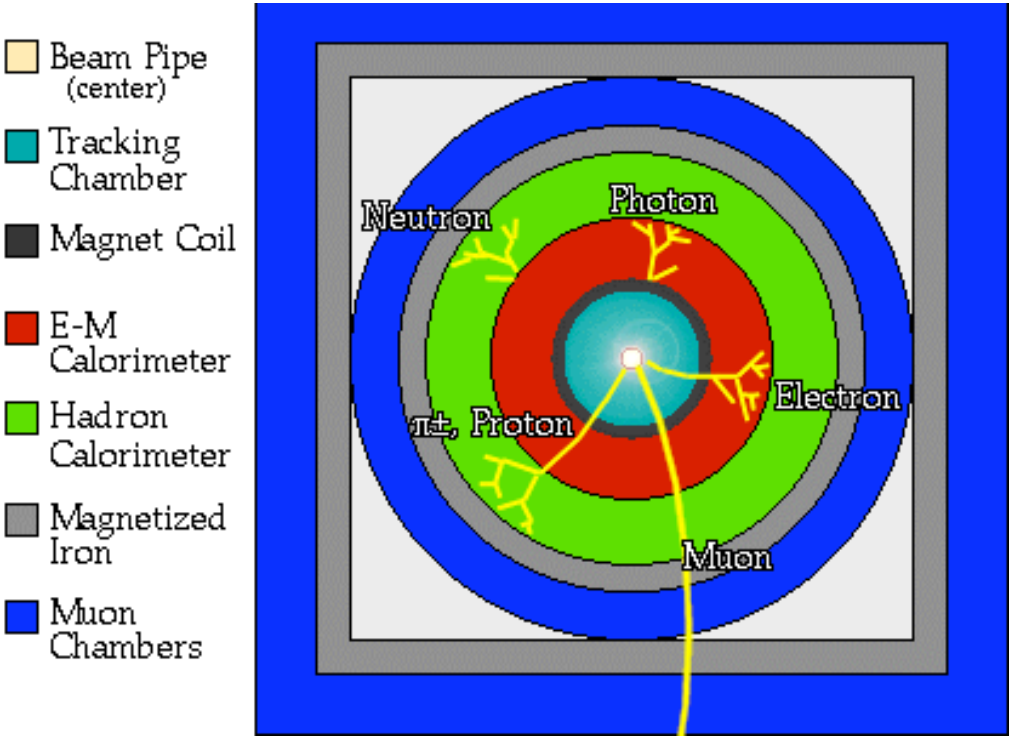
Impulzus mérés



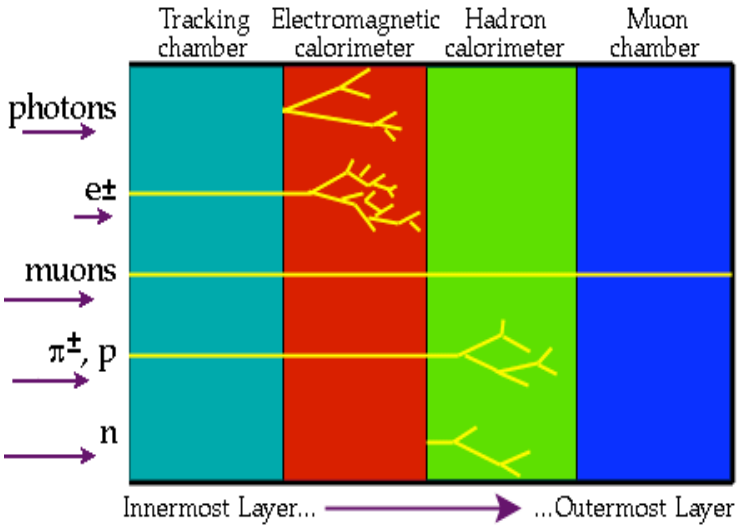
$$F = qv \times B = m\frac{v^2}{r} \quad \Rightarrow \quad r = \frac{mv}{qB}$$

RÉSZECSKE DETEKTOROK

- Detektor metszet, részecske nyomokkal

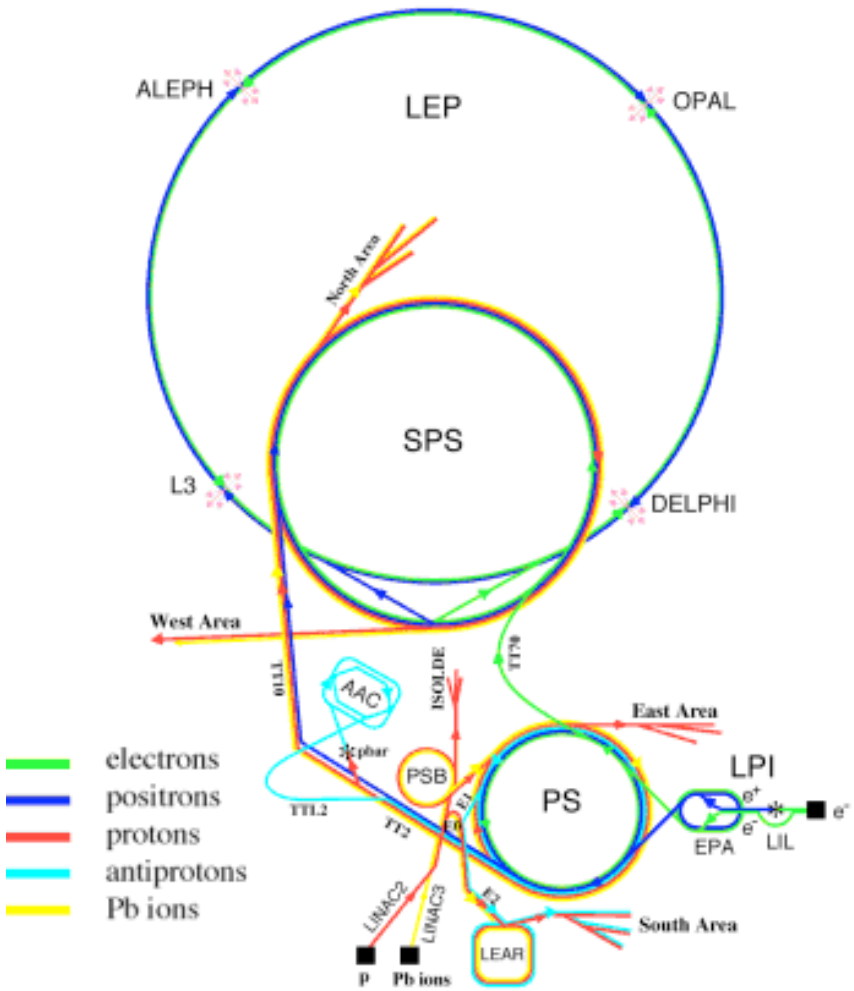


Részecskék nyoma a detektorban

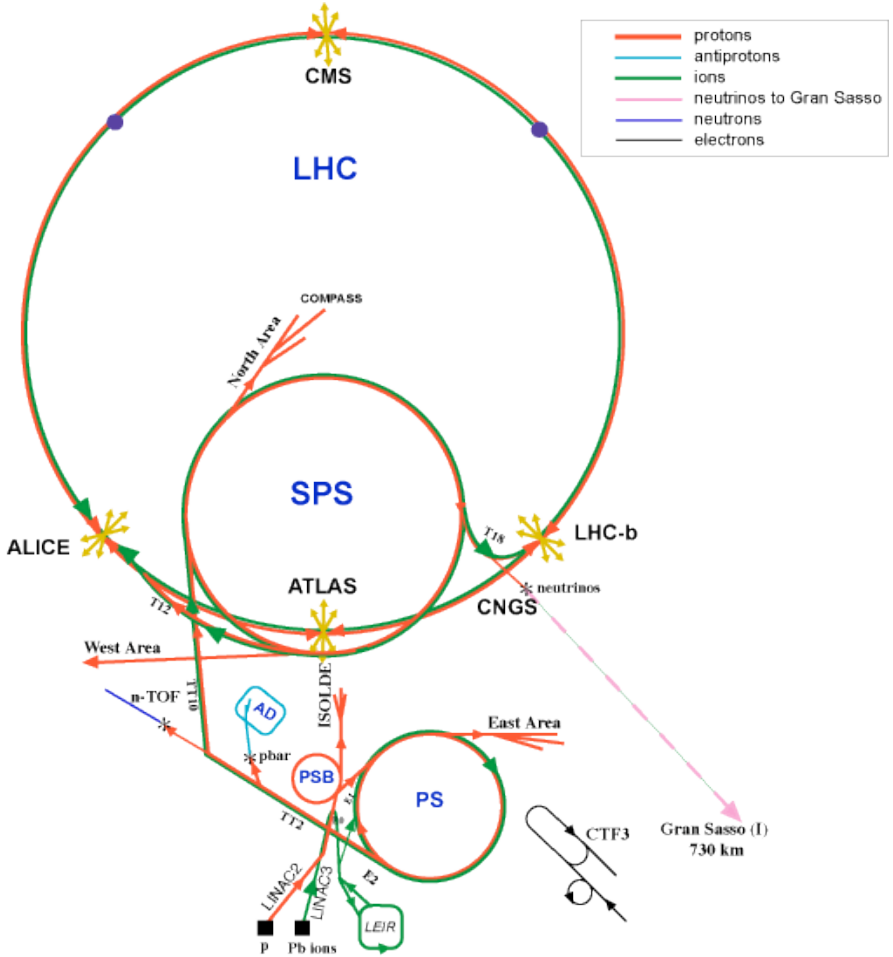


A CERN GYORSÍTÓI

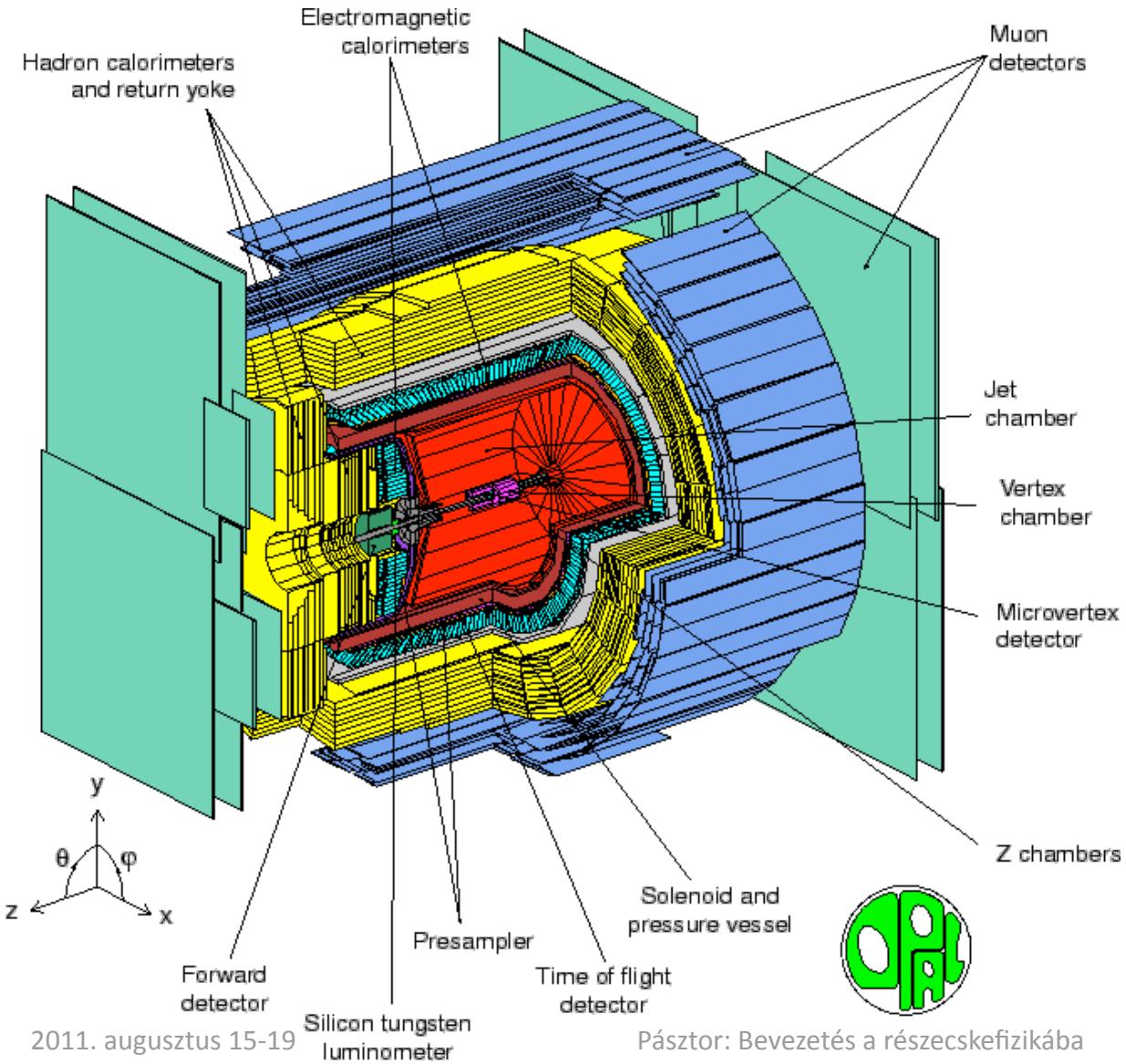
LEP éra (-2000)



LHC éra (2008-)



A néhai OPAL detektor



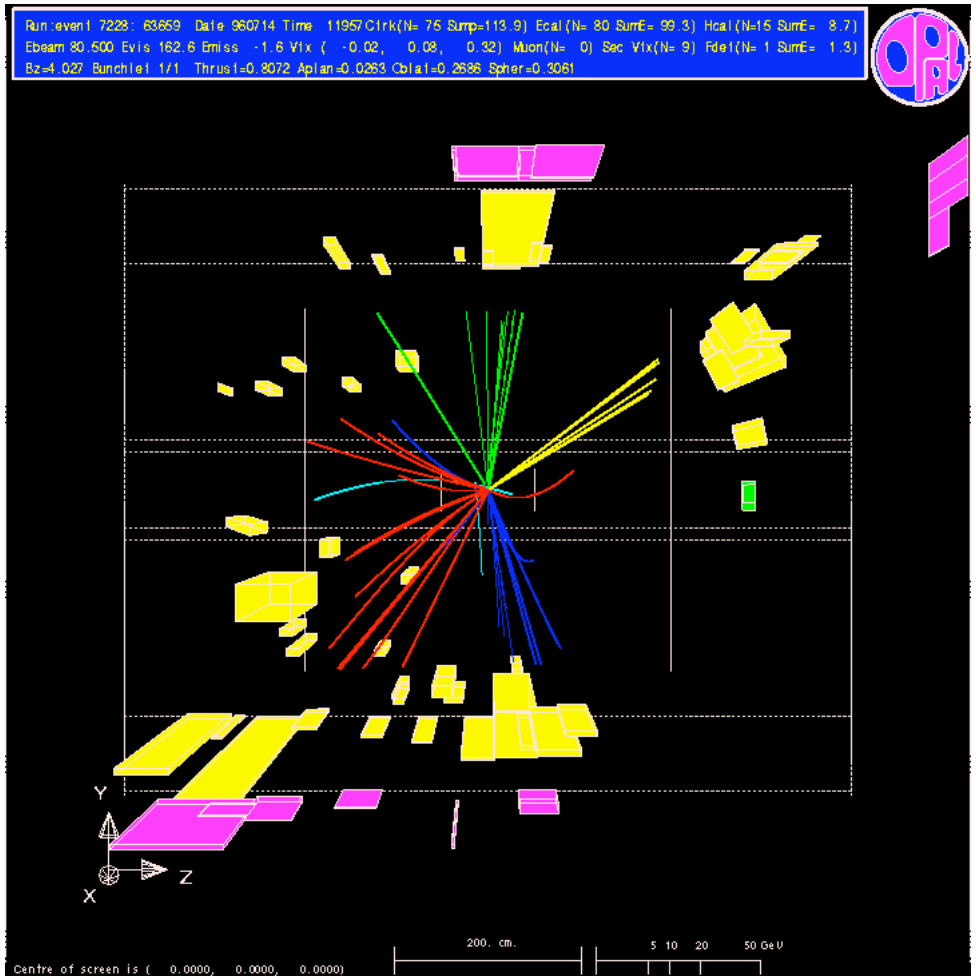
- LEP gyorsító 4 sok-célú detektorának (ALEPH, DELPHI, L3, OPAL) egyike
- Adatgyűjtés: 1989-2000
- Méret: 12 m x 12m x 12m

LEP

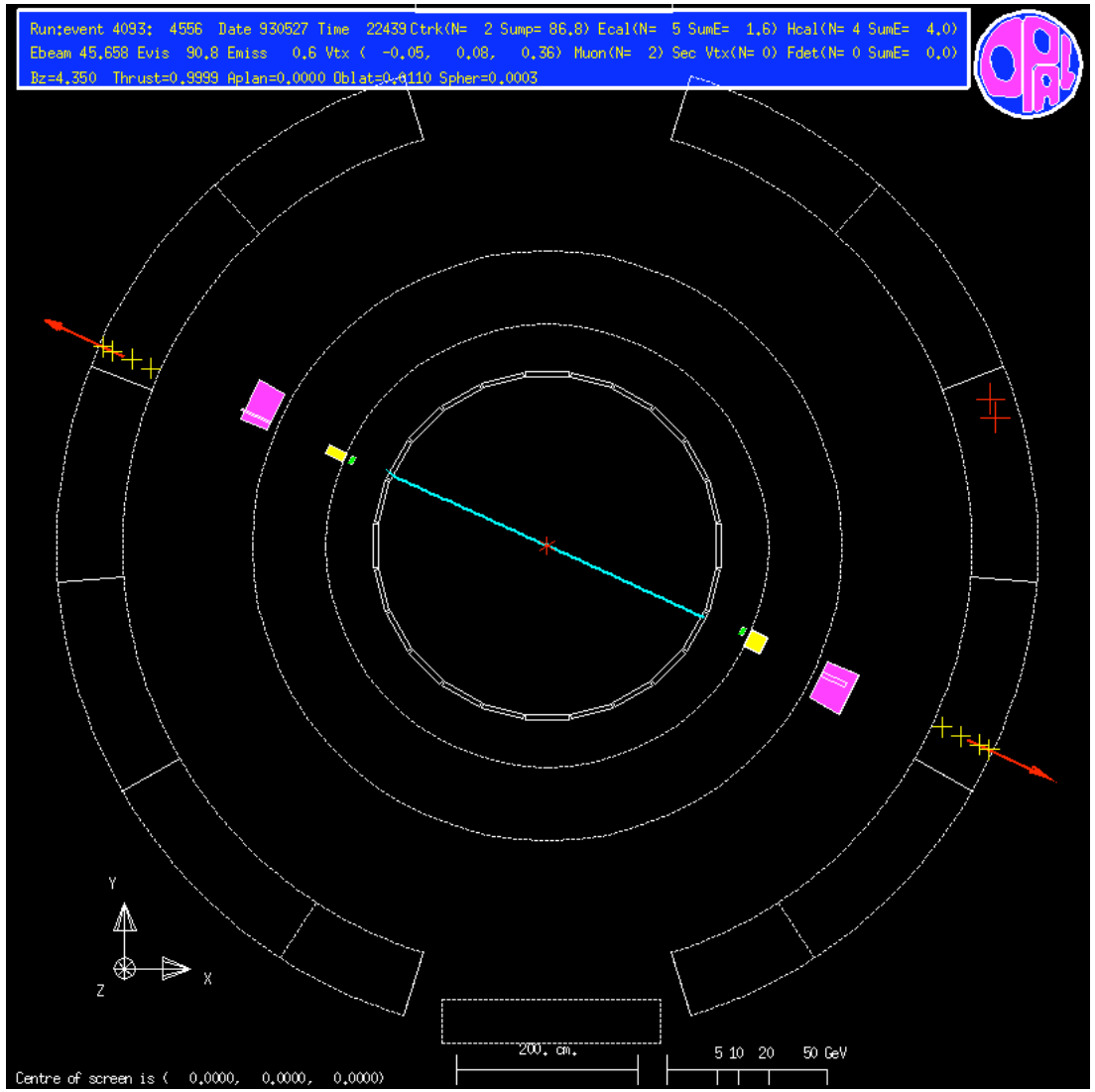
- LEP1, √s≈91 GeV:
  $e^+e^- \rightarrow Z \rightarrow ff$
- LEP2, √s≈200 GeV:
  $e^+e^- \rightarrow WW, ZZ, ff(\gamma),\ldots$

- Pontszerű leptonok ütközése
- Tiszta események

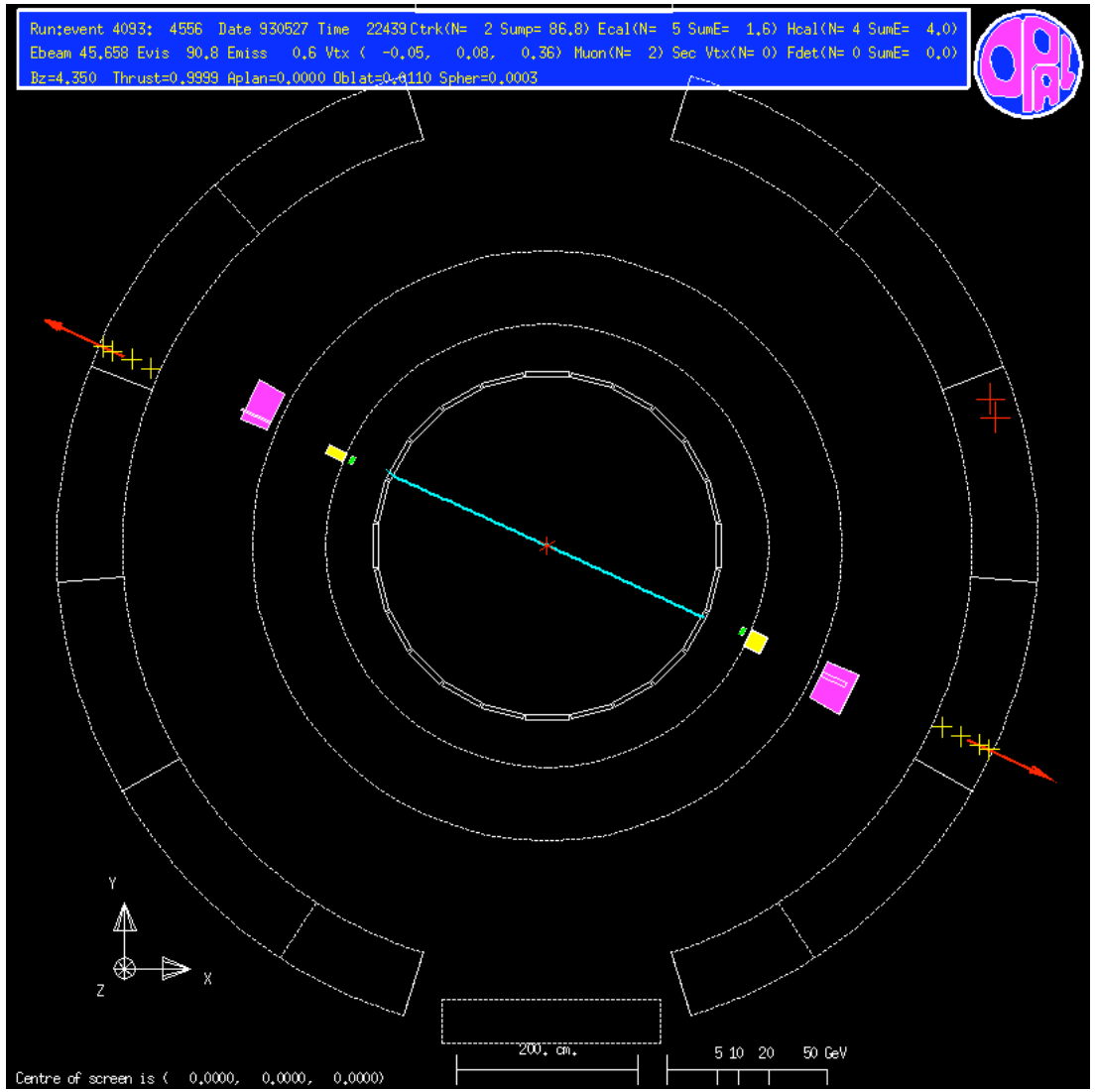
- Tipikus LEP2 esemény:
  $e^+e^- \rightarrow WW \rightarrow qqqq$
- 4 hadron zápor
- <100 töltött részecske



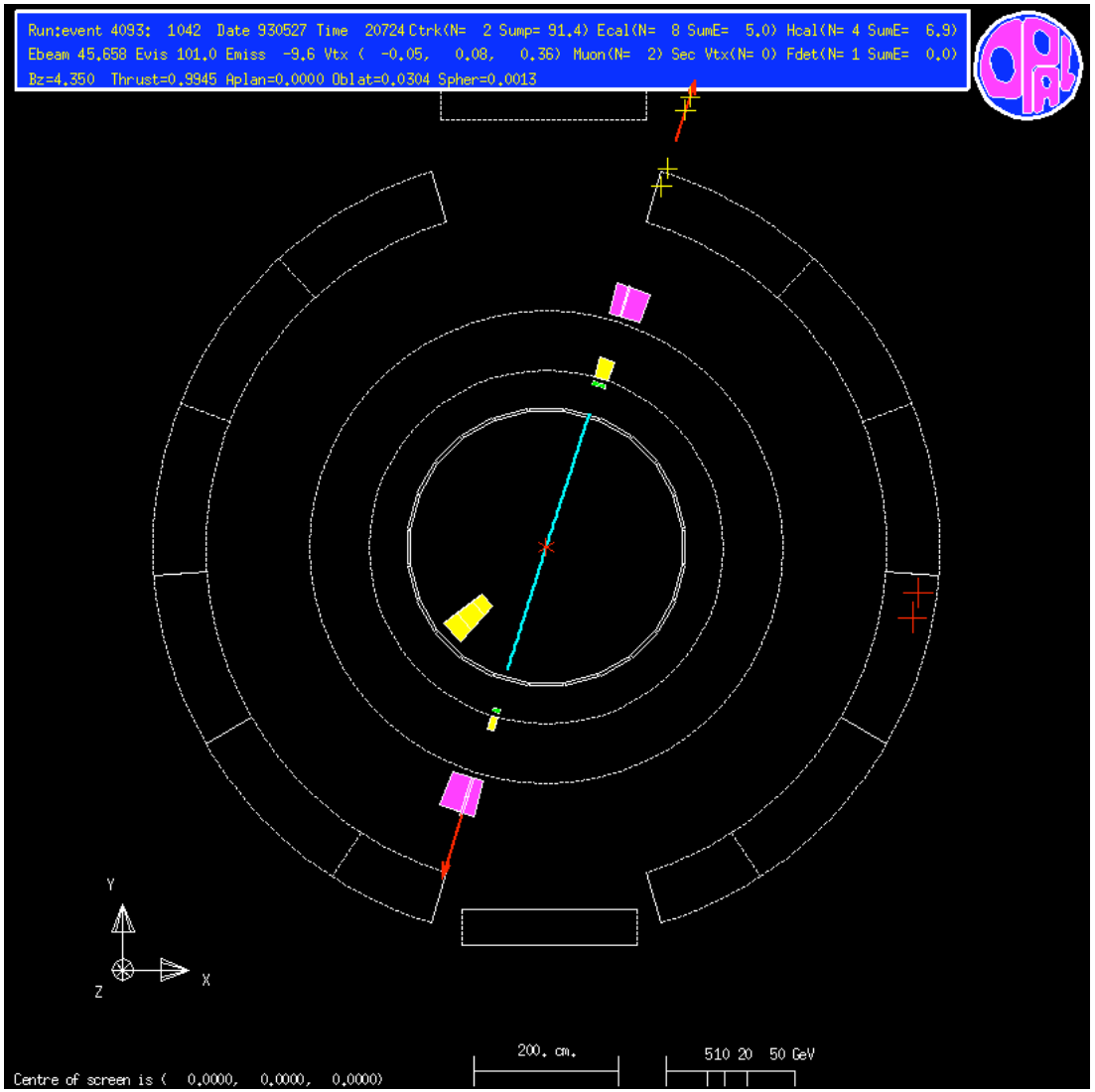
???


Run:event 4093: 4556 Date 930527 Time 22439 Ctrk(N= 2 Sump= 86.8) Ecal(N= 5 SumE= 1.6) Hcal(N= 4 SumE= 4.0)
Ebeam 45.658 Evis 90.8 Emiss 0.6 Vtx (-0.05, 0.08, 0.36) Muon(N= 2) Sec Vtx(N= 0) Fdet(N= 0 SumE= 0.0)
Bz=4.350 Thrust=0.9999 Aplan=0.0000 Oblat=0.0110 Spher=0.0003
Y
X
Z
200. cm.
5 10 20 50 GeV
Centre of screen is (0.0000, 0.0000, 0.0000)

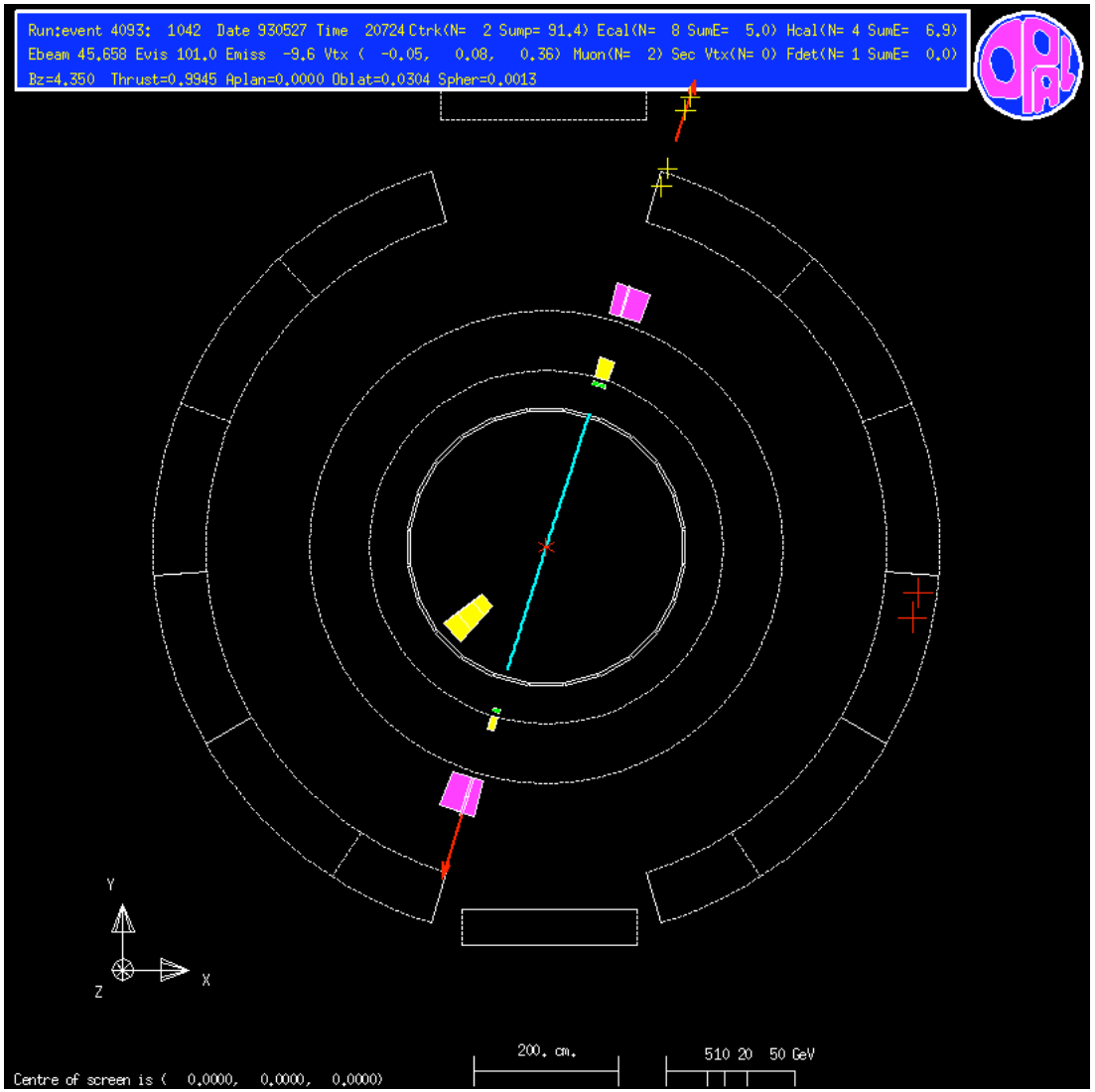
$Z \rightarrow \mu^+\mu^-$ AT LEP OPAL



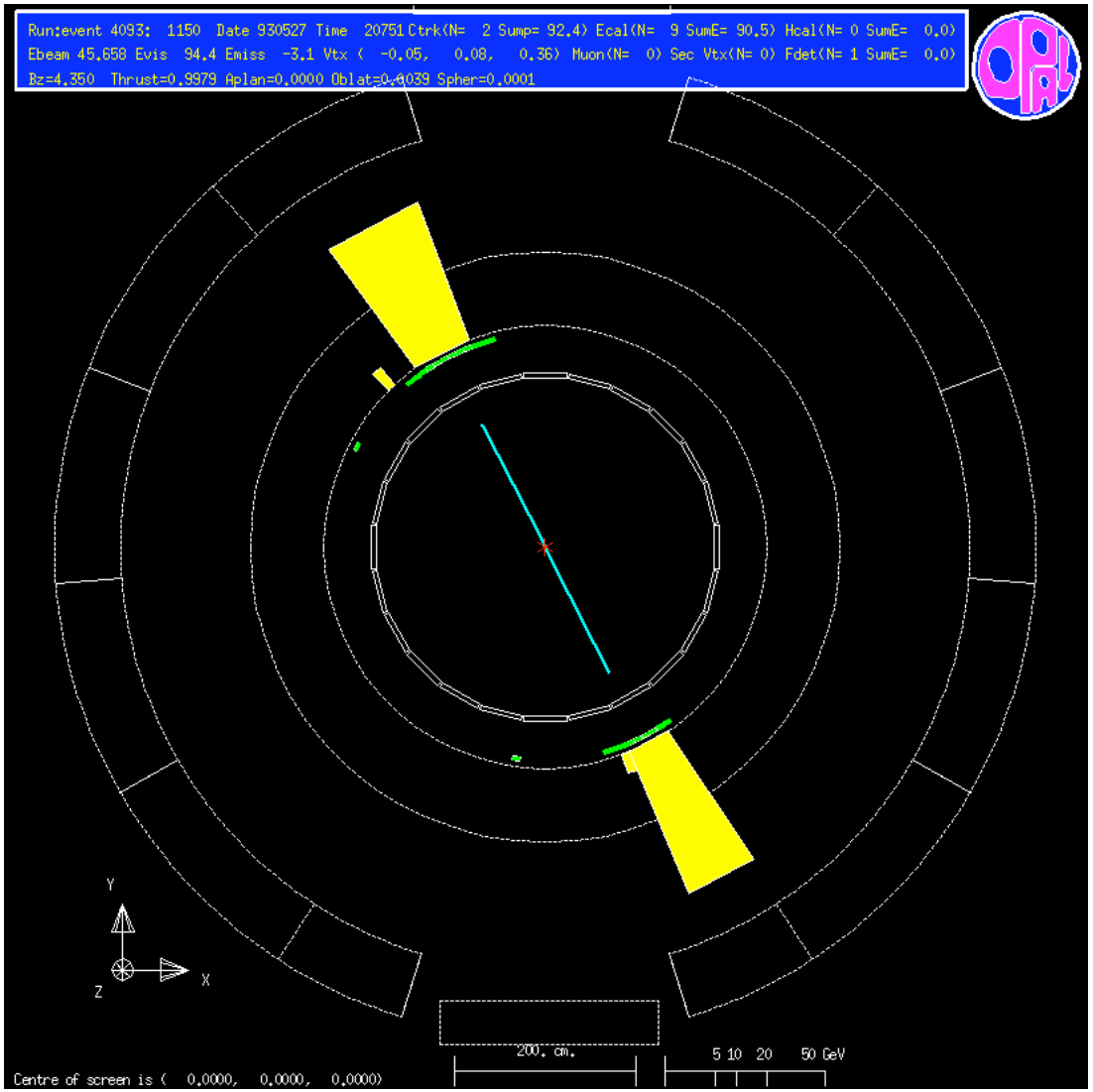
???


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
Y
X
Z
200. cm.
510 20 50 GeV
Centre of screen is (0.0000, 0.0000, 0.0000)

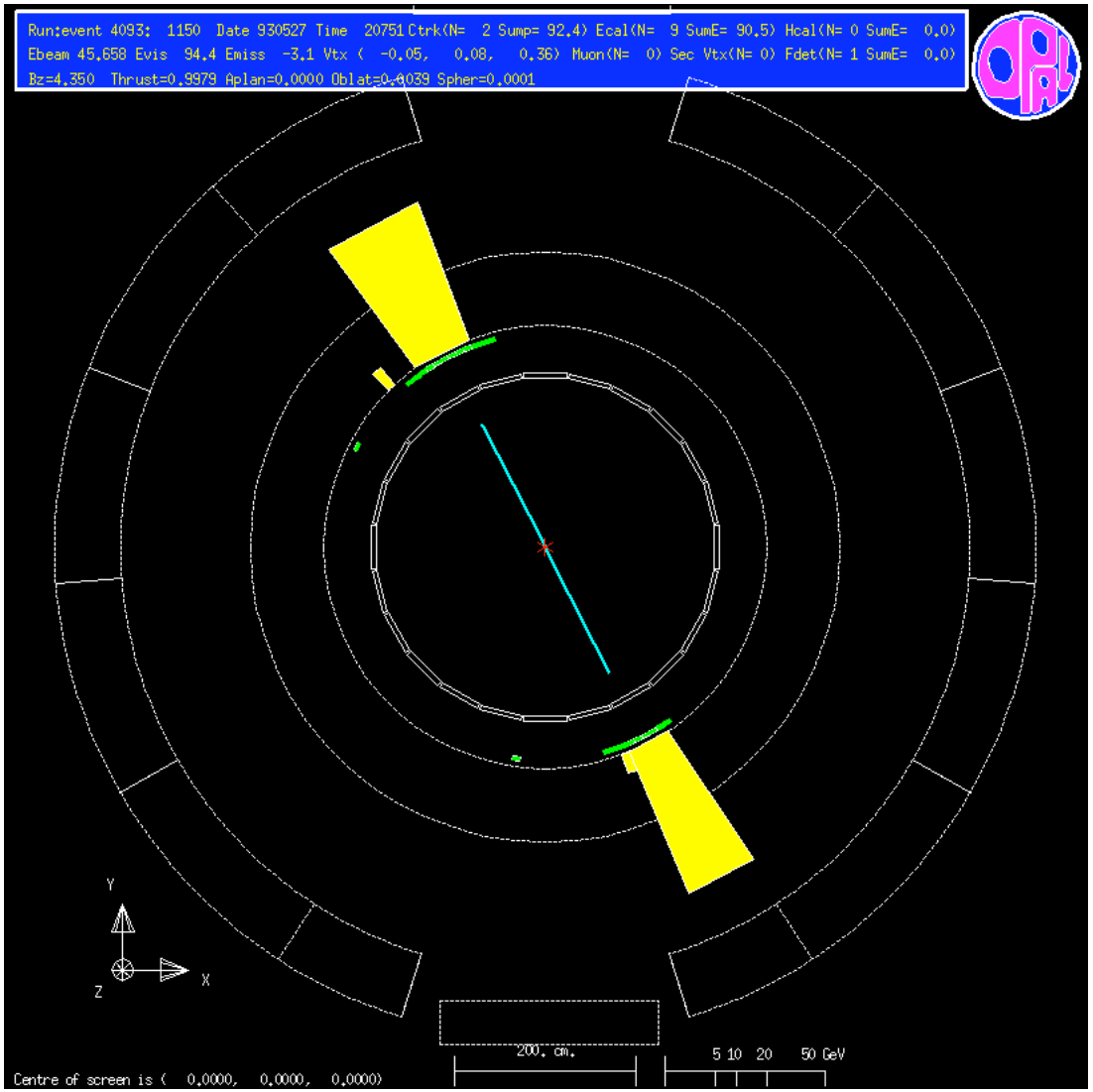
$Z \rightarrow \mu^+\mu^-\gamma$ AT LEP OPAL



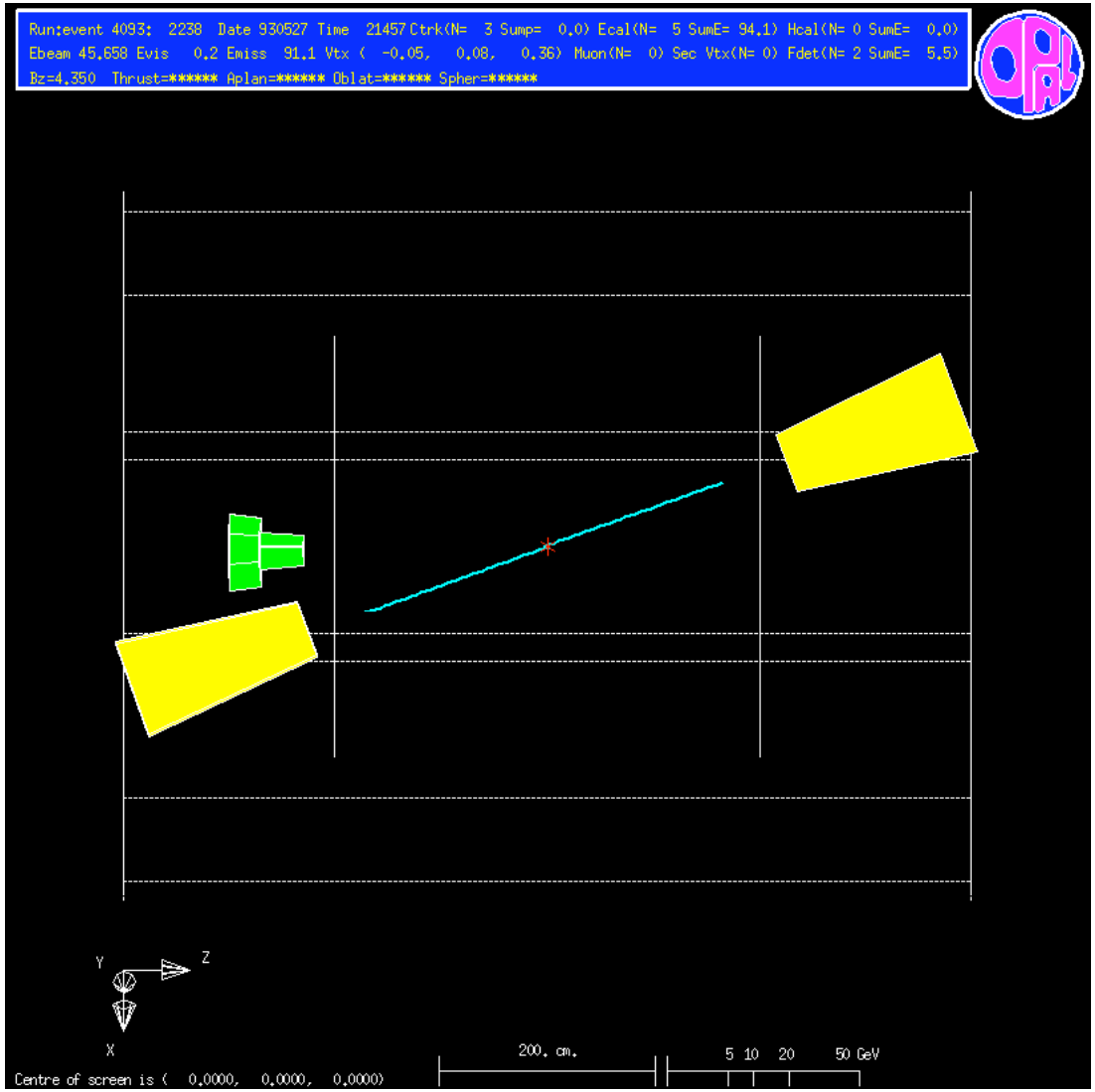
???


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
Y
X
Z
200. cm.
5 10 20 50 GeV
Centre of screen is (0.0000, 0.0000, 0.0000)

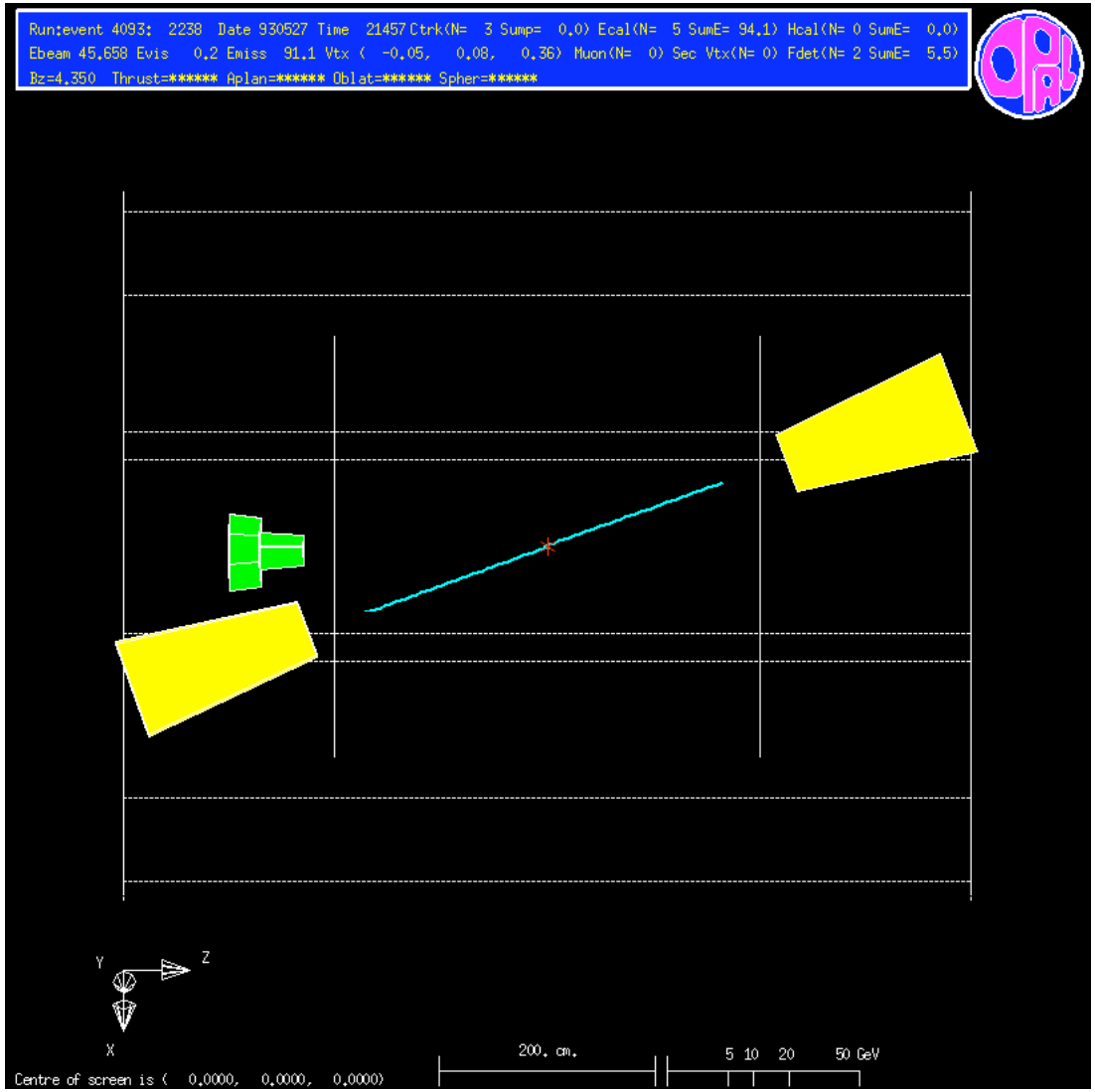
$Z \rightarrow e^+e^-$ AT LEP OPAL



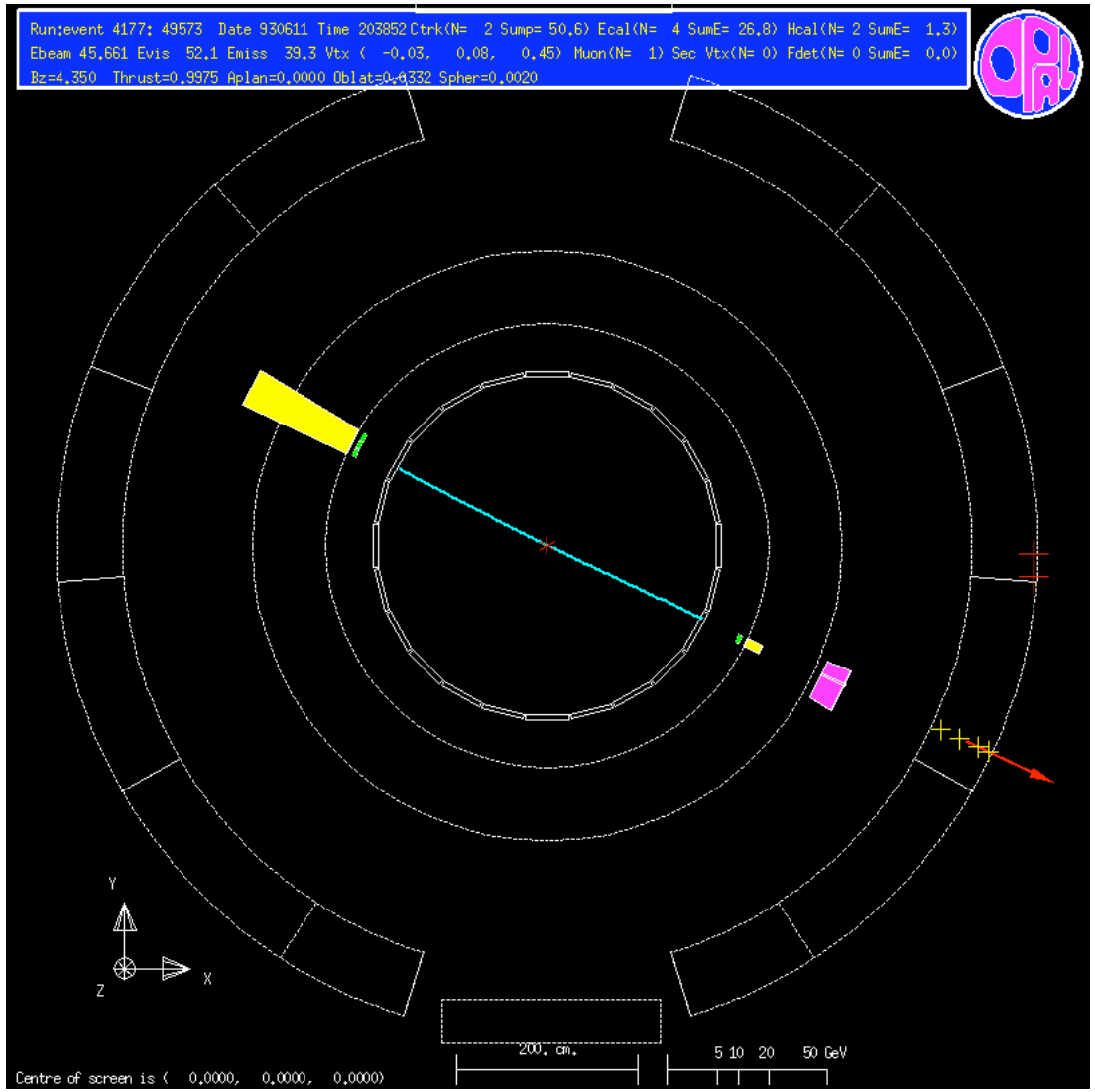
???


Run:event 4093: 2238 Date 930527 Time 21457 Ctrk(N= 3 Sump= 0.0) Ecal(N= 5 SumE= 94.1) Hcal(N= 0 SumE= 0.0)
Ebeam 45.658 Evis 0.2 Emiss 91.1 Vtx (-0.05, 0.08, 0.36) Muon(N= 0) Sec Vtx(N= 0) Fdet(N= 2 SumE= 5.5)
Bz=4.350 Thrust=****** Aplan=****** Oblat=****** Spher=******
Y
Z
X
200. cm.
5 10 20 50 GeV
Centre of screen is (0.0000, 0.0000, 0.0000)

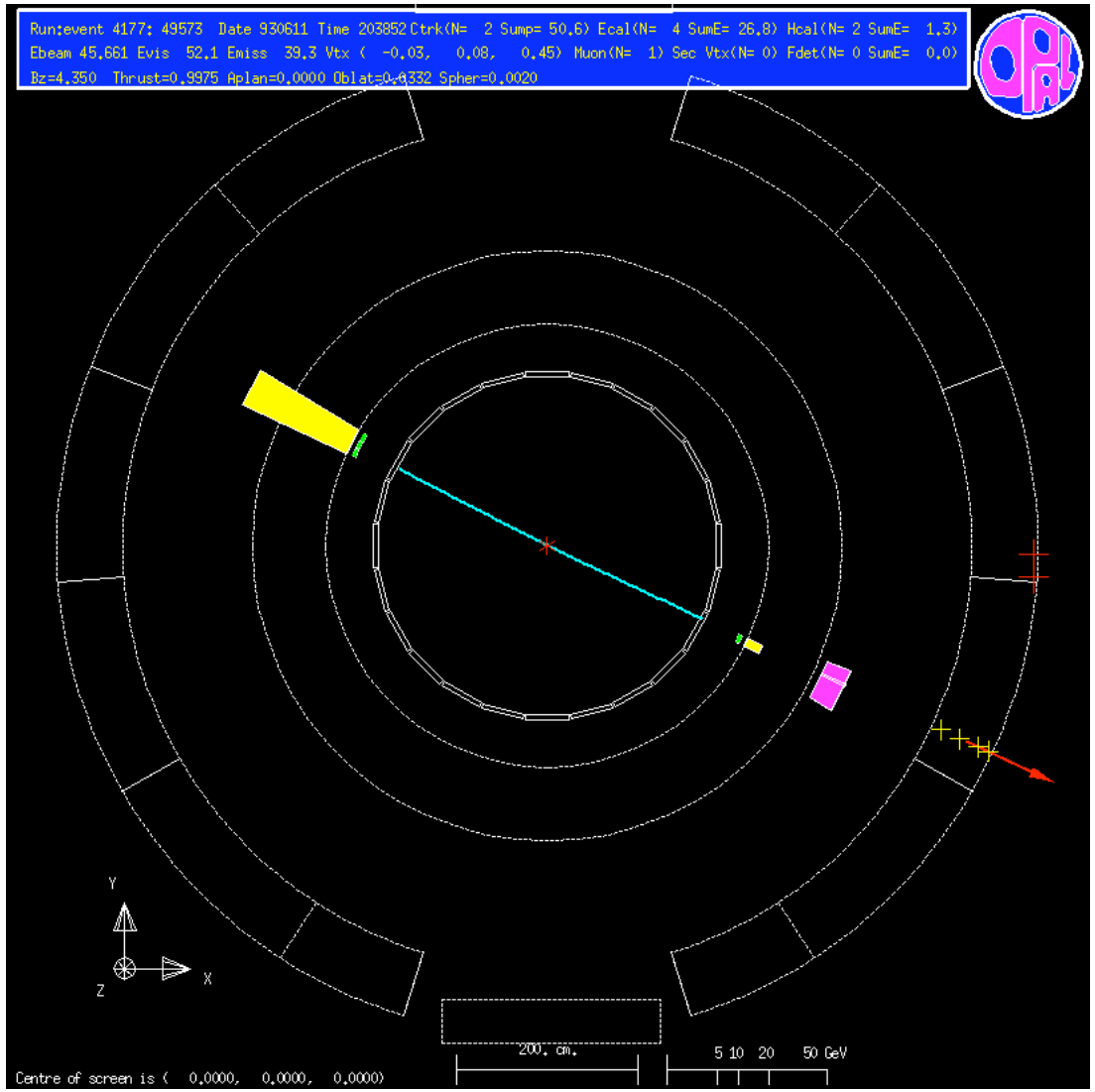
$Z \rightarrow e^+e^-\gamma$ AT LEP OPAL



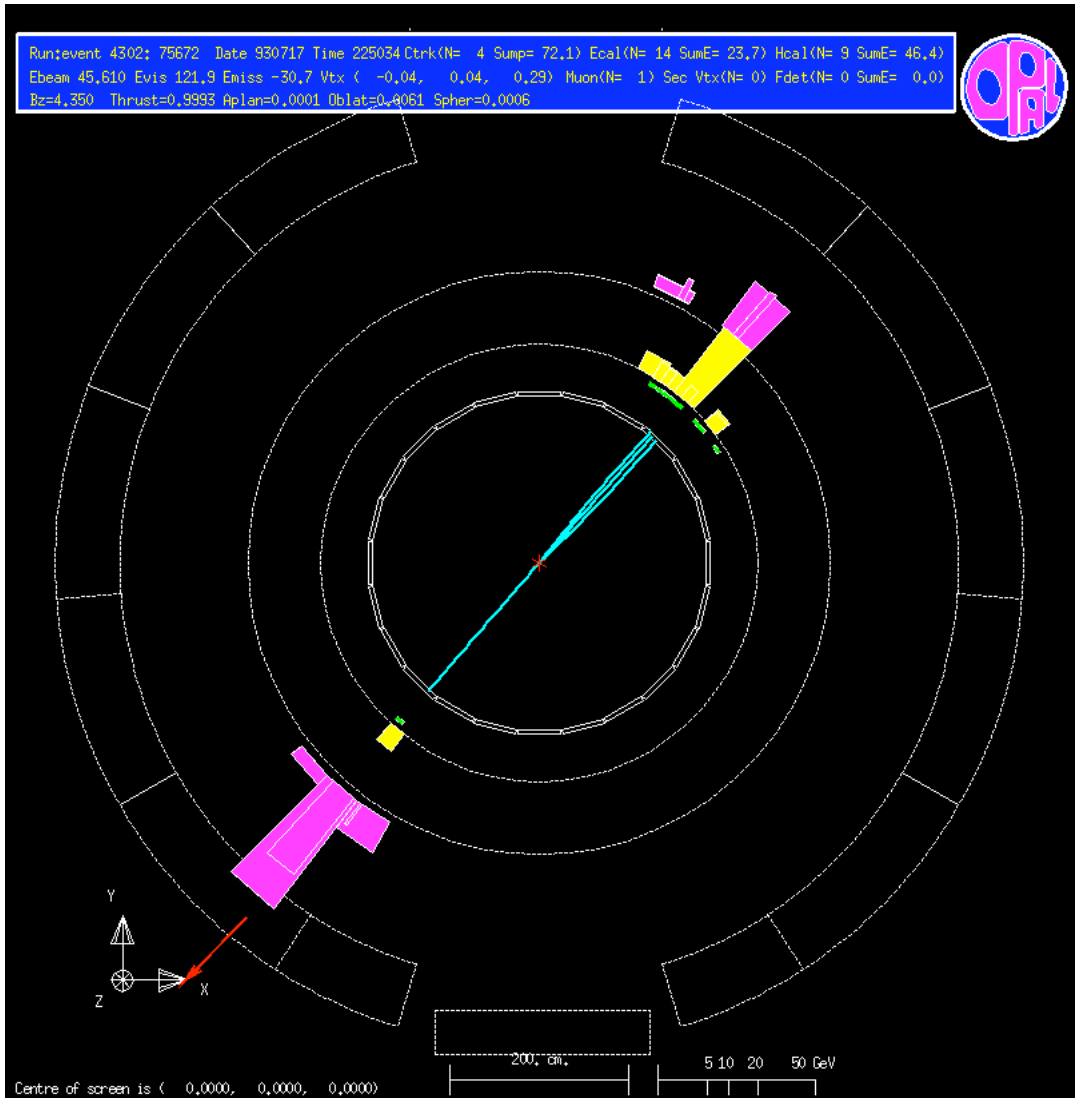
???


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
Y
X
Z
200. cm.
5 10 20 50 GeV
Centre of screen is (0.0000, 0.0000, 0.0000)

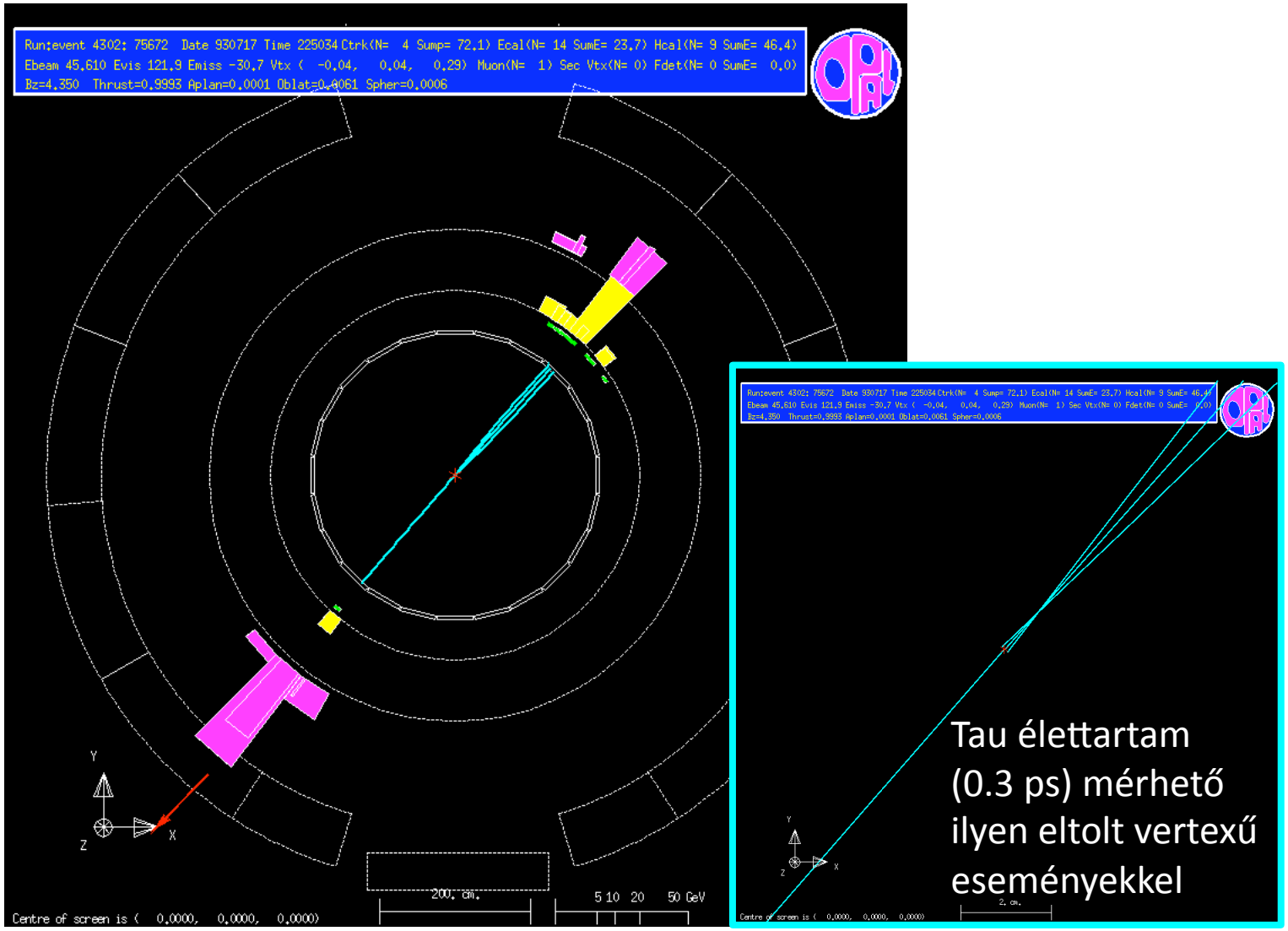
$Z \rightarrow \tau^+\tau^- \rightarrow \mu^+ e^- + E_{\text{hiányzó}}$ AT LEP OPAL



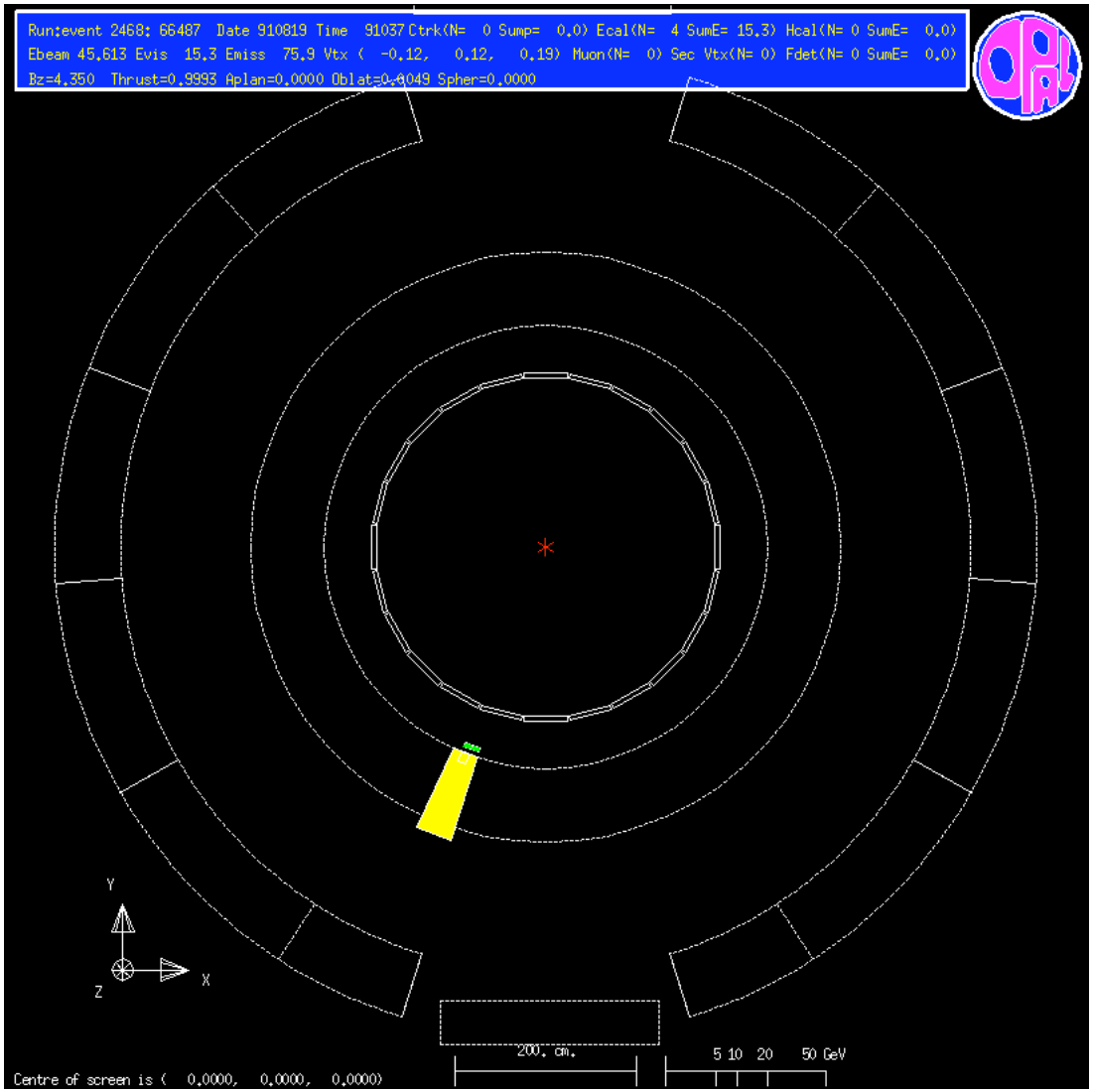
???


Run:event 4302: 75672 Date 930717 Time 225034 Ctrk(N= 4 Sump= 72.1) Ecal(N= 14 SumE= 23.7) Hcal(N= 9 SumE= 46.4)
Ebeam 45.610 Evis 121.9 Emiss -30.7 Vtx (-0.04, 0.04, 0.29) Muon(N= 1) Sec Vtx(N= 0) Fdet(N= 0 SumE= 0.0)
Bz=4.350 Thrust=0.9993 Aplan=0.0001 Oblat=0.4061 Spher=0.0006
Y
Z
X
200. cm.
5 10 20 50 GeV
Centre of screen is (0.0000, 0.0000, 0.0000)

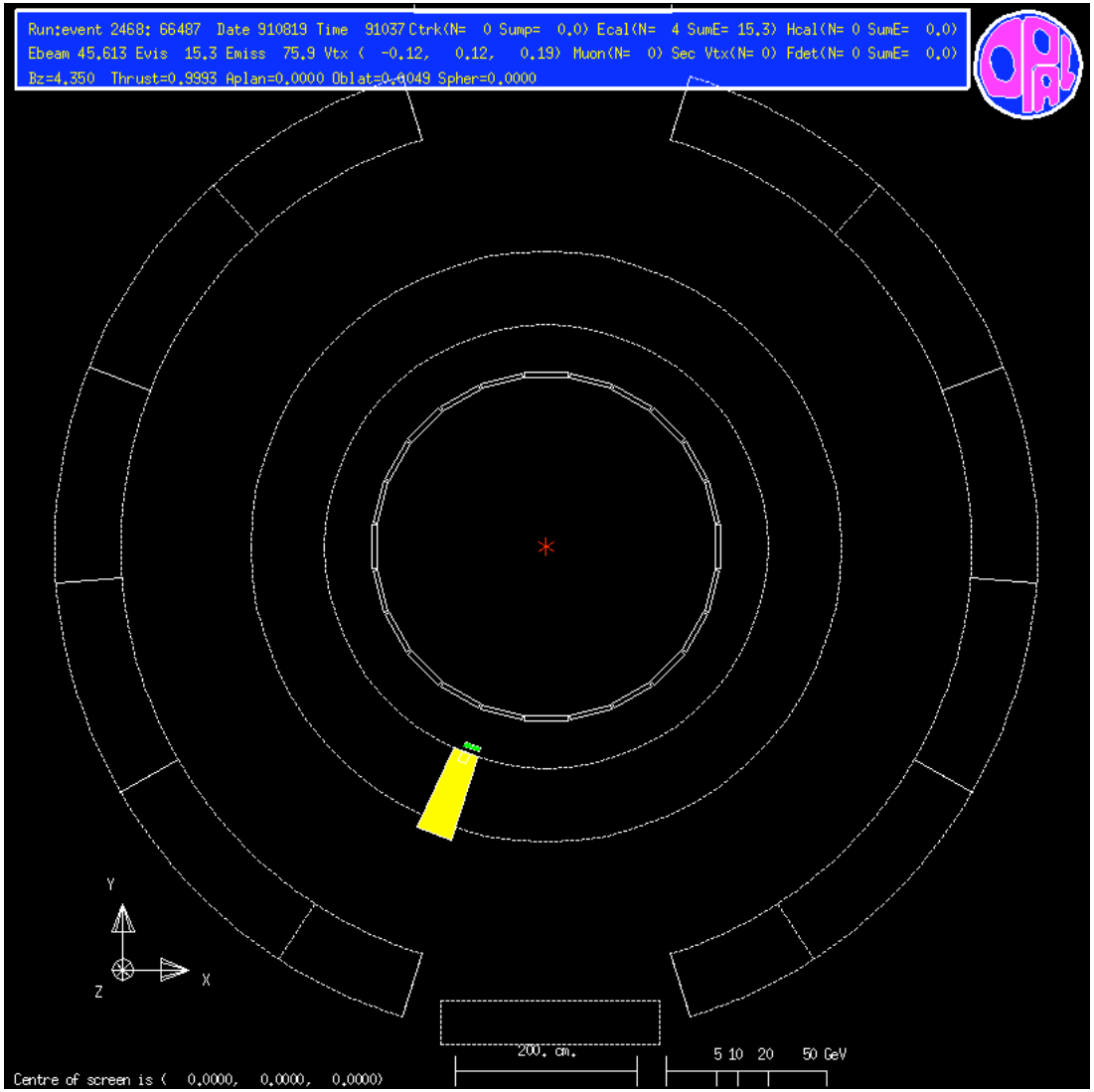
$Z \rightarrow \tau^+\tau^- \rightarrow h^+(h^-h^+h^-) + E_{\text{hiányzó}}$ AT LEP OPAL



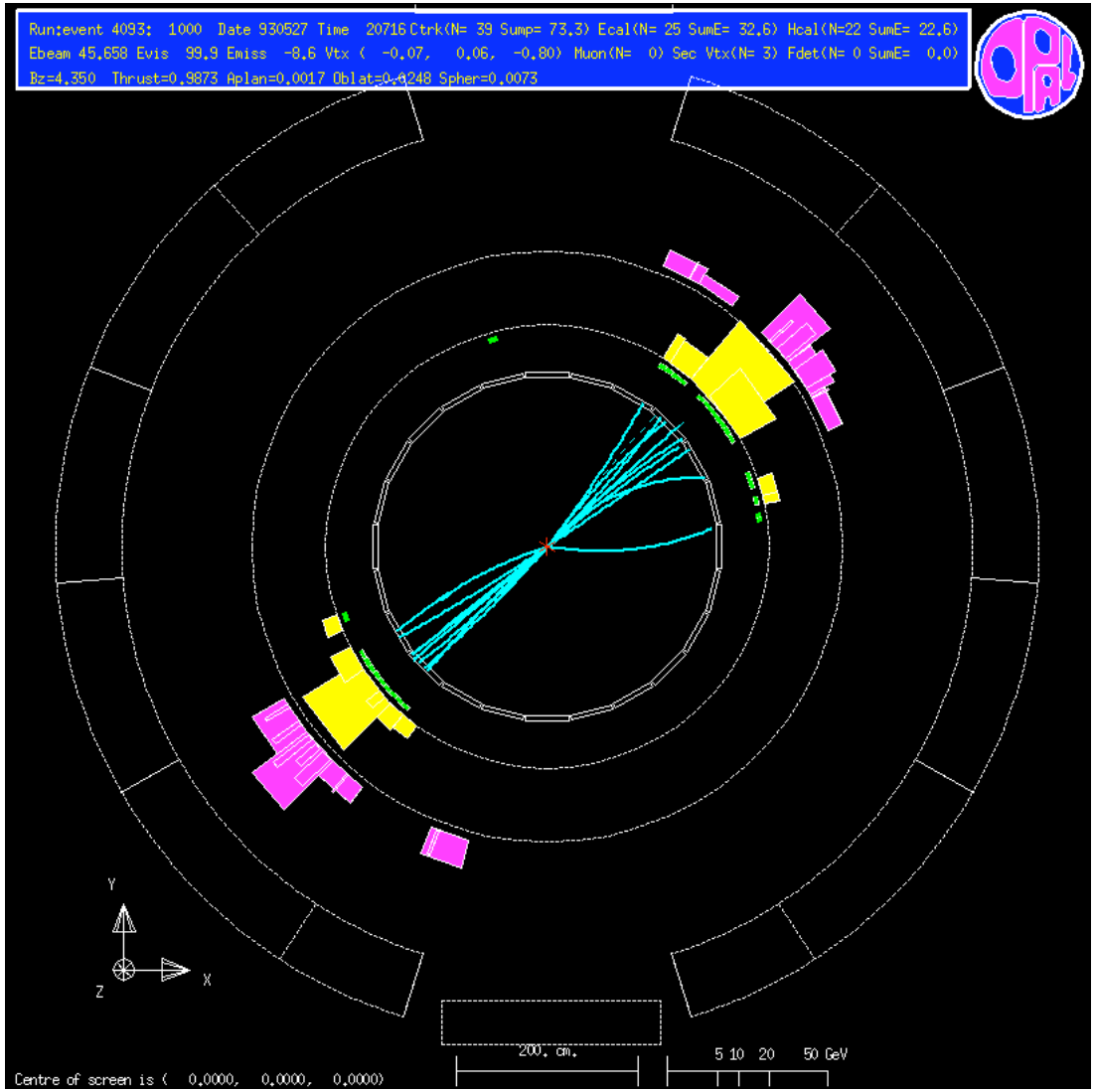
???


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
Y
Z
X
200. cm.
5 10 20 50 GeV
Centre of screen is (0.0000, 0.0000, 0.0000)

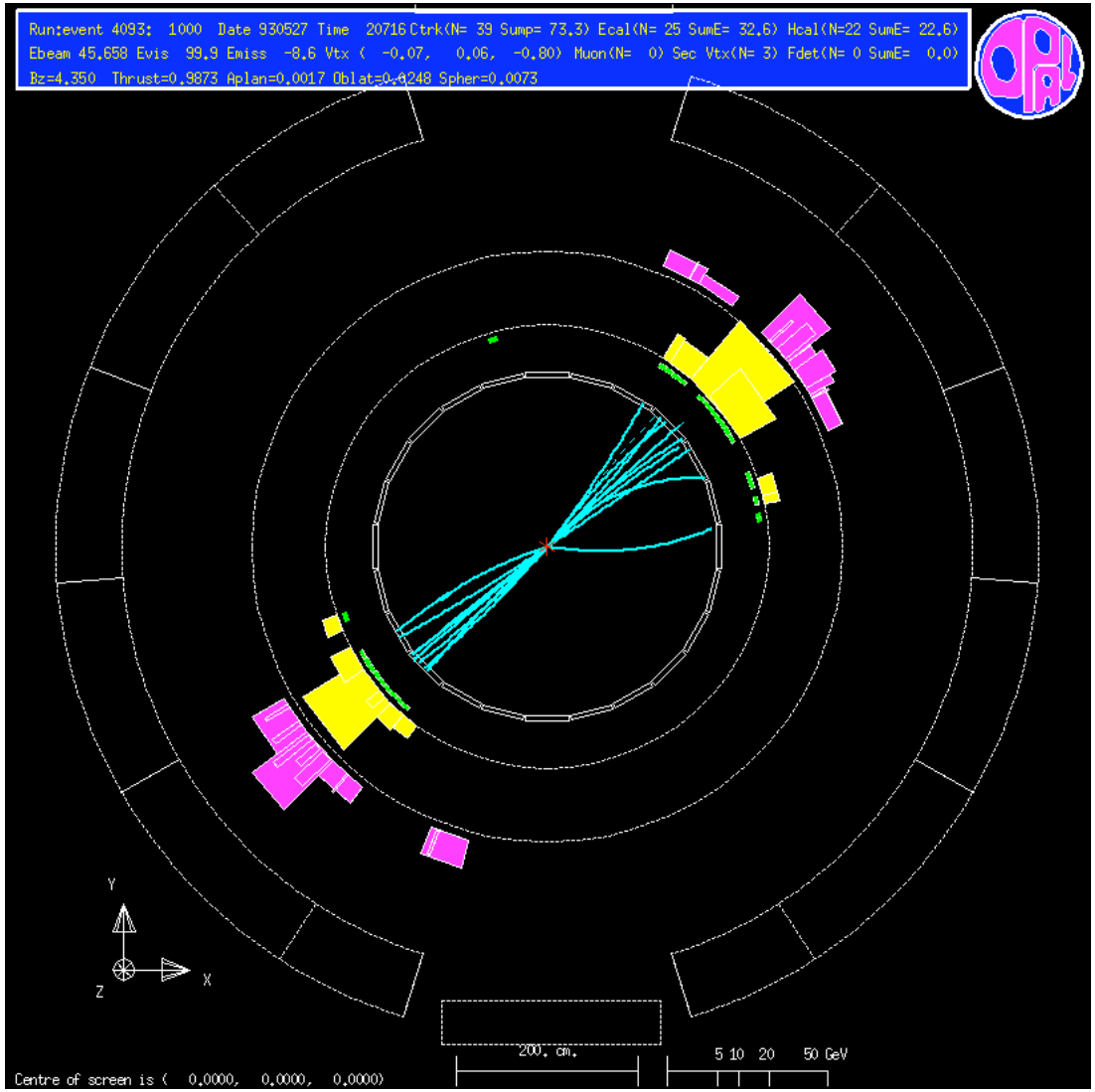
Z → νν̄γ AT LEP OPAL



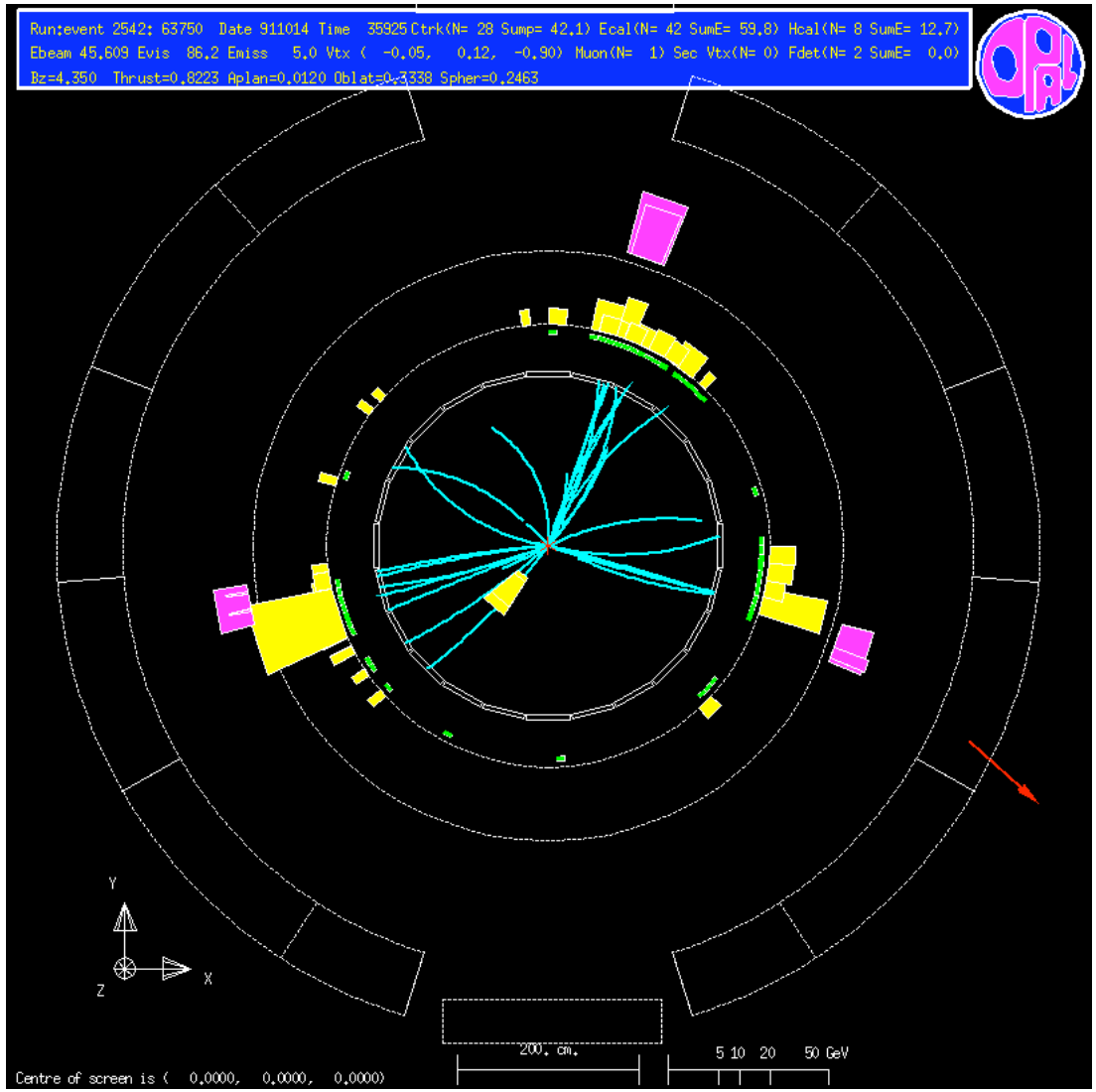
???


Run:event 4093: 1000 Date 930527 Time 20716 Ctrk(N= 39 Sump= 73.3) Ecal(N= 25 SumE= 32.6) Hcal(N=22 SumE= 22.6)
Ebeam 45.658 Evis 99.9 Emiss -8.6 Vtx (-0.07, 0.06, -0.80) Muon(N= 0) Sec Vtx(N= 3) Fdet(N= 0 SumE= 0.0)
Bz=4.350 Thrust=0.9873 Aplan=0.0017 Oblat=0.0248 Spher=0.0073
Y
X
Z
200. cm.
5 10 20 50 GeV
Centre of screen is (0.0000, 0.0000, 0.0000)

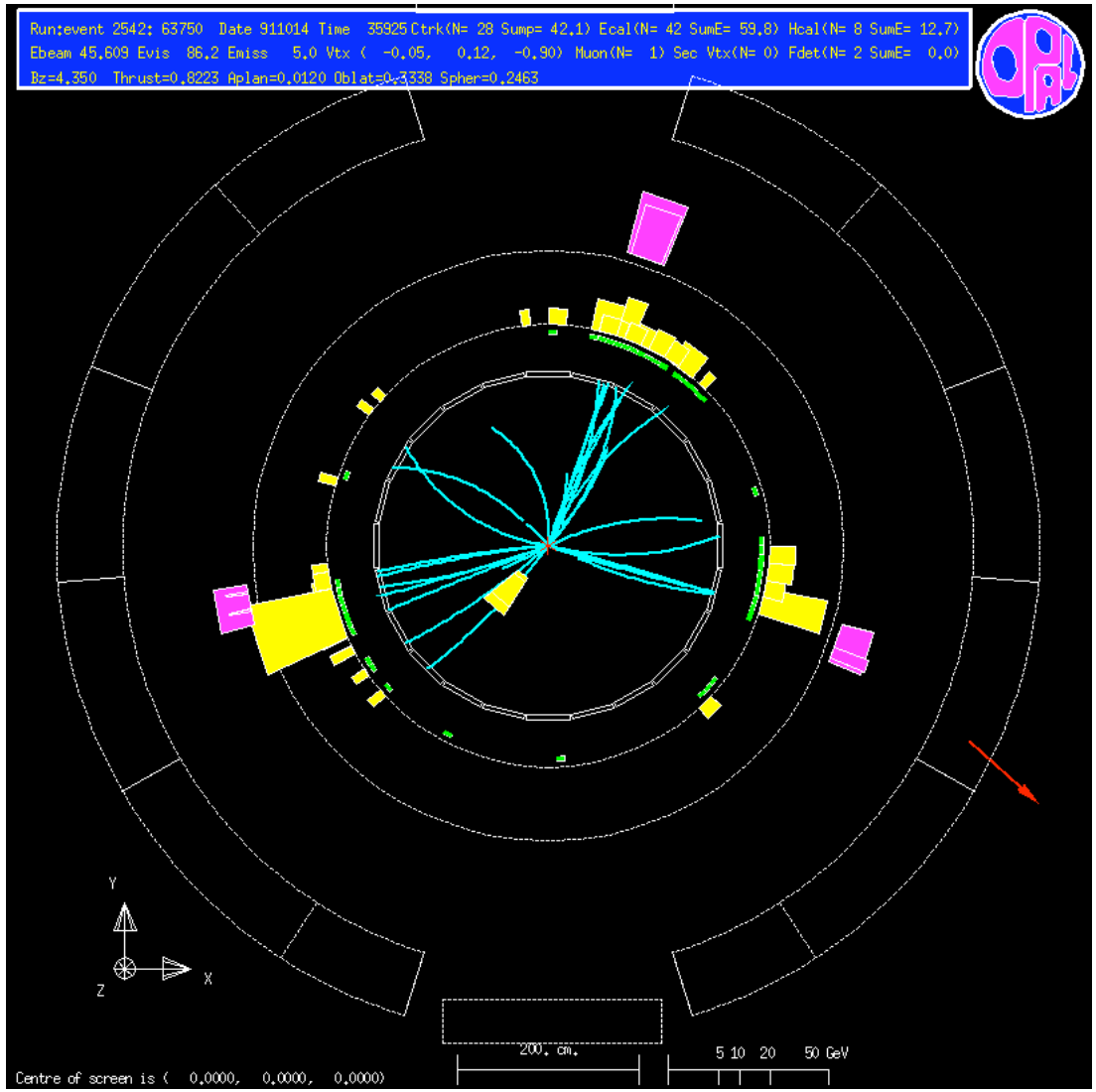
Z → qq AT LEP OPAL



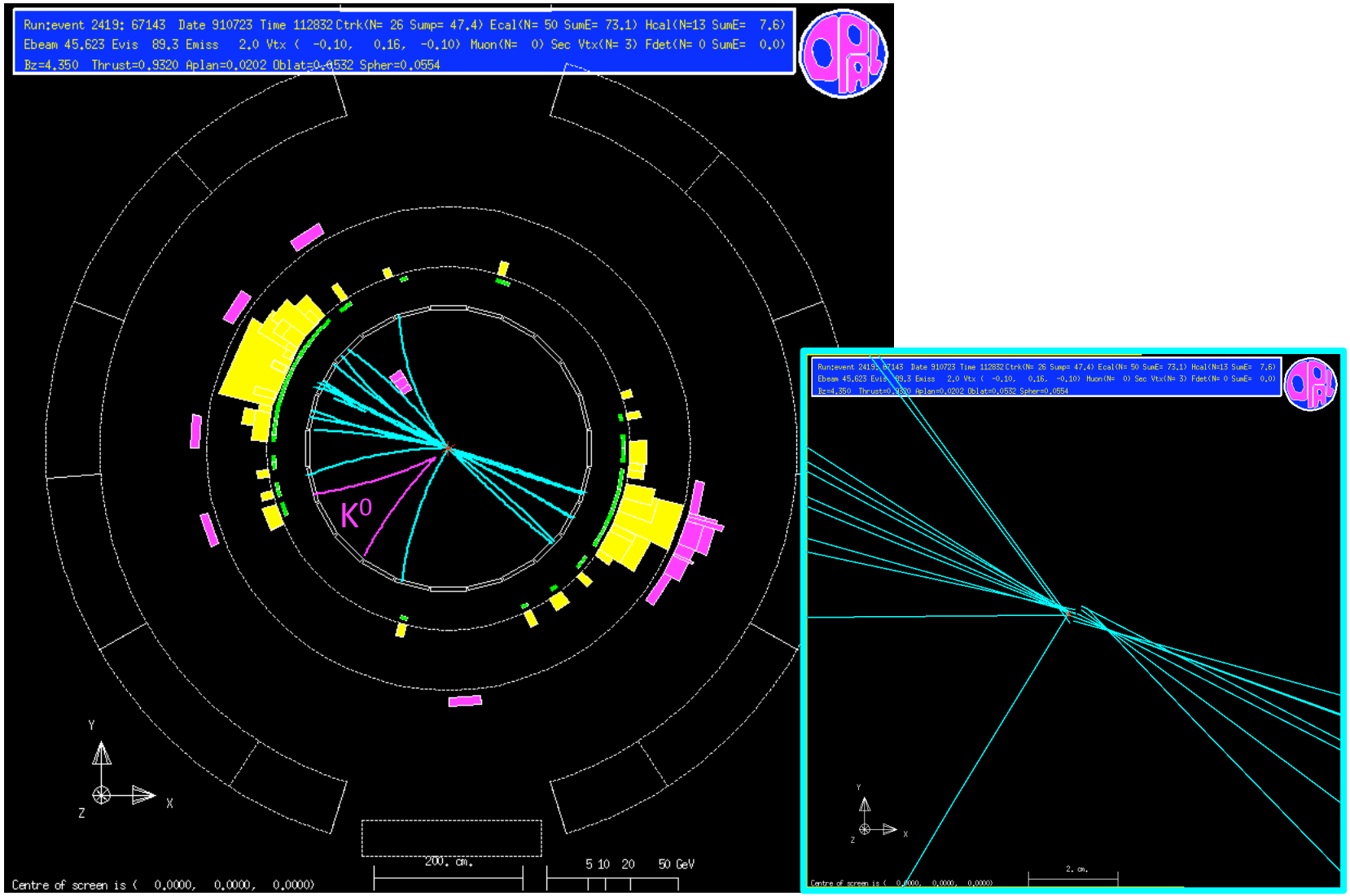
???


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
Y
Z
X
200. cm.
5 10 20 50 GeV
Centre of screen is (0.0000, 0.0000, 0.0000)

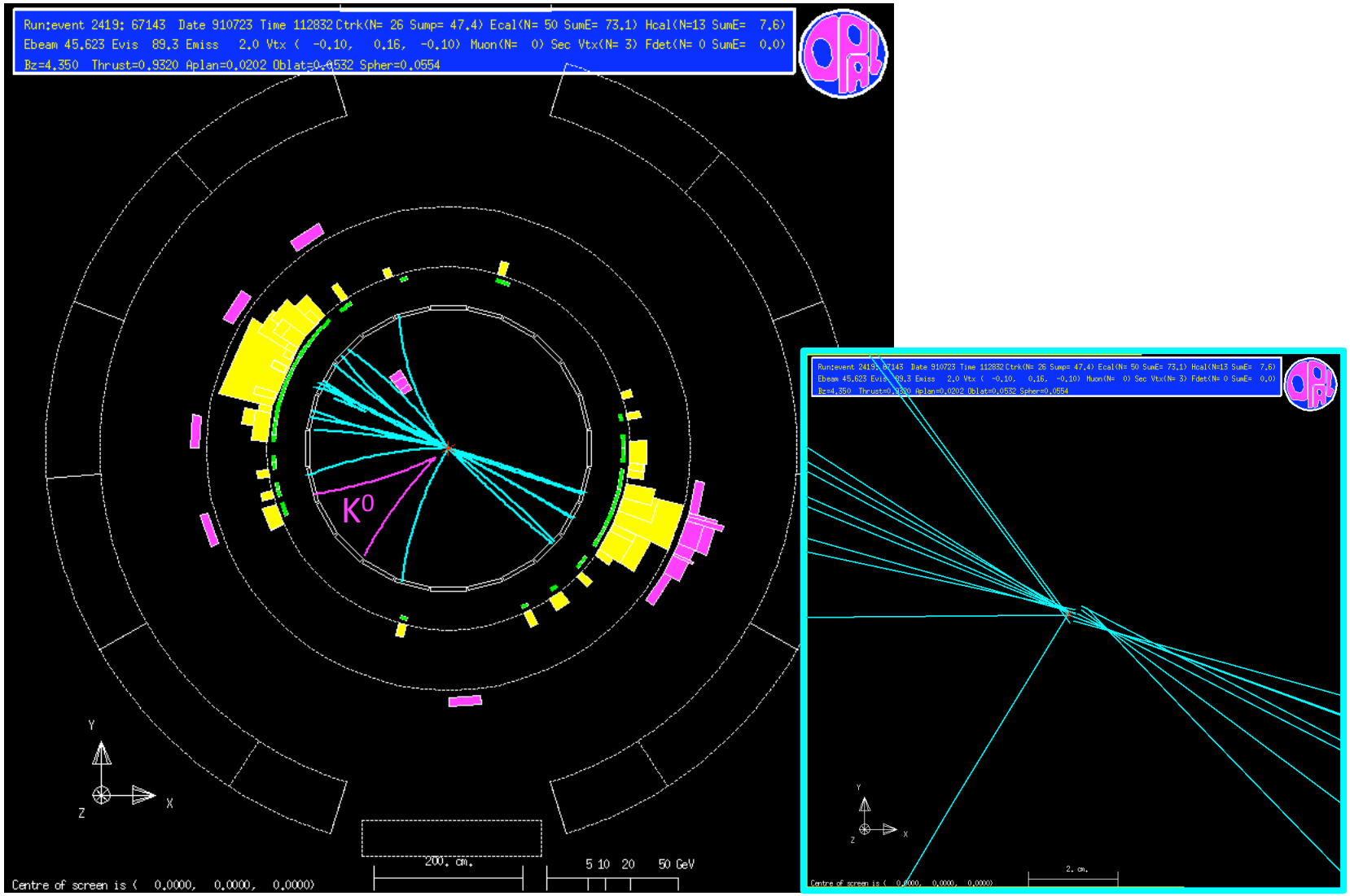
Z → qqg AT LEP OPAL



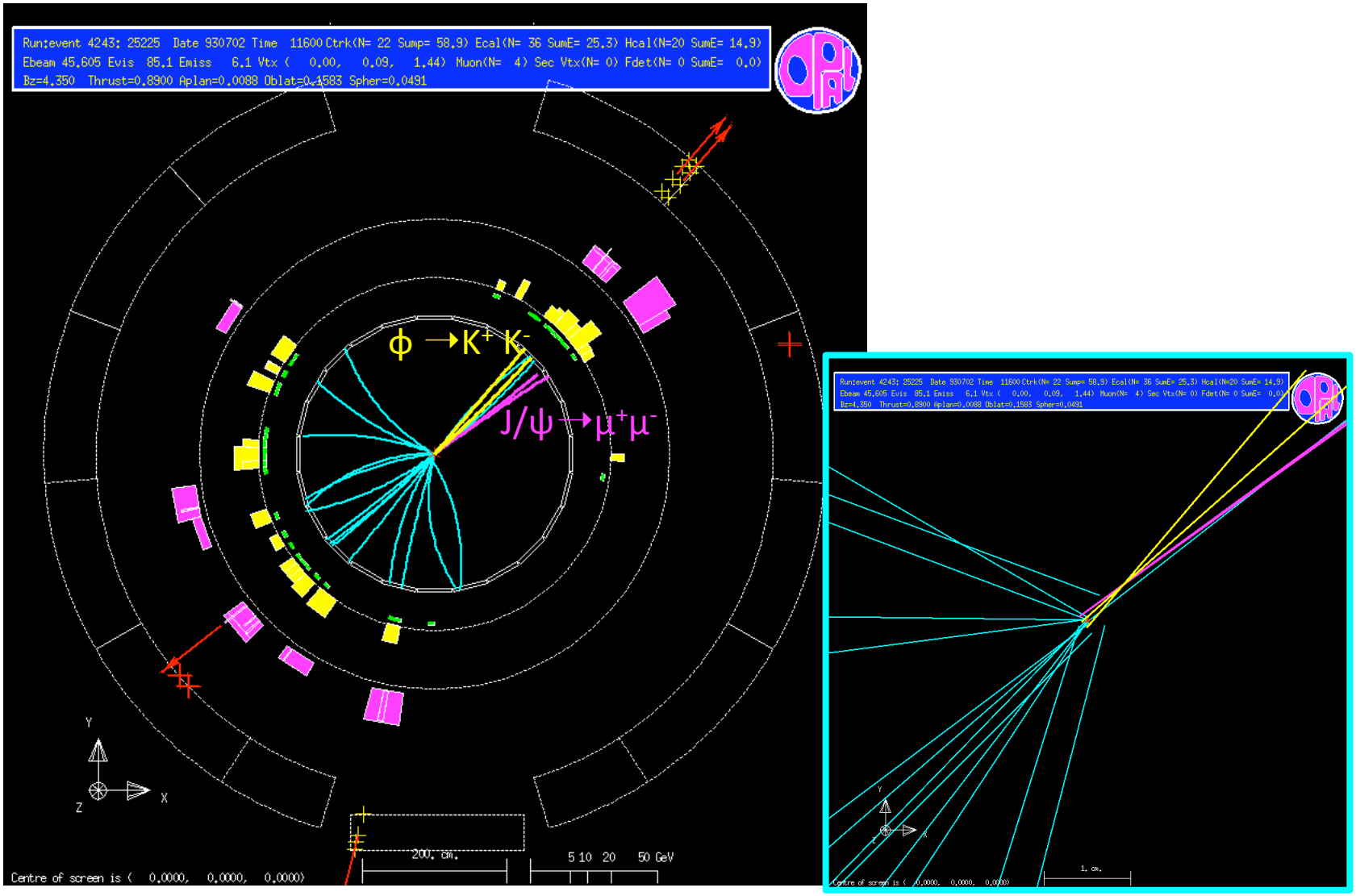
???


Run;event 2419: 67143 Date 910723 Time 112832 Ctrk(N= 26 Sump= 47.4) Ecal(N= 50 SumE= 73.1) Hcal(N=13 SumE= 7.6)
Ebeam 45.623 Evis 89.3 Emiss 2.0 Vtx (-0.10, 0.16, -0.10) Muon(N= 0) Sec Vtx(N= 3) Fdet(N= 0 SumE= 0.0)
Bz=4.350 Thrust=0.9320 Aplan=0.0202 Oblat=0.0532 Spher=0.0554
K0
Y
X
Z
200. cm.
5 10 20 50 GeV
Centre of screen is (0.0000, 0.0000, 0.0000)
2. cm.

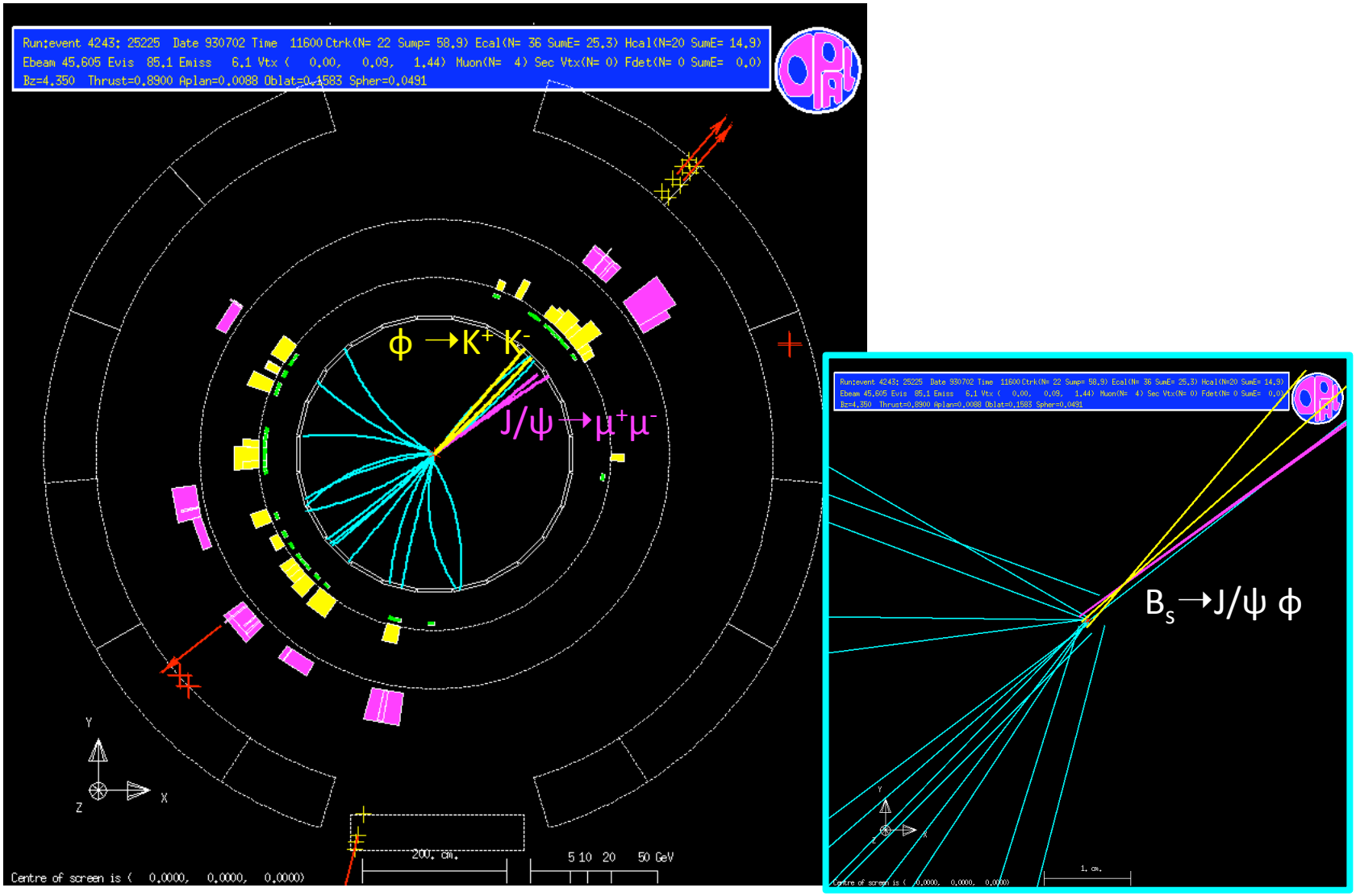
Z → bb AT LEP OPAL



???

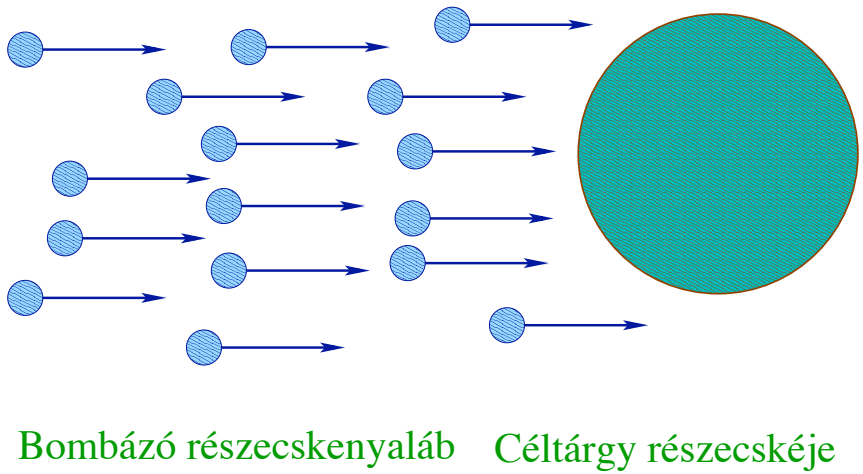

Run;event 4243; 25225 Date 930702 Time 11600 Ctrk(N= 22 Sump= 58.9) Ecal(N= 36 SumE= 25.3) Hcal(N=20 SumE= 14.9)
Ebeam 45.605 Evis 85.1 Emiss 6.1 Vtx (0.00, 0.09, 1.44) Muon(N= 4) Sec Vtx(N= 0) Fdet(N= 0 SumE= 0.0)
Bz=4.350 Thrust=0.8900 Aplan=0.0088 Oblat=0.1583 Spher=0.0491
φ → K+ K-
J/ψ → μ+μ-
Y
Z
X
200. cm.
5 10 20 50 GeV
Centre of screen is (0.0000, 0.0000, 0.0000)
1. cm.

$Z \rightarrow bb$ AT LEP OPAL



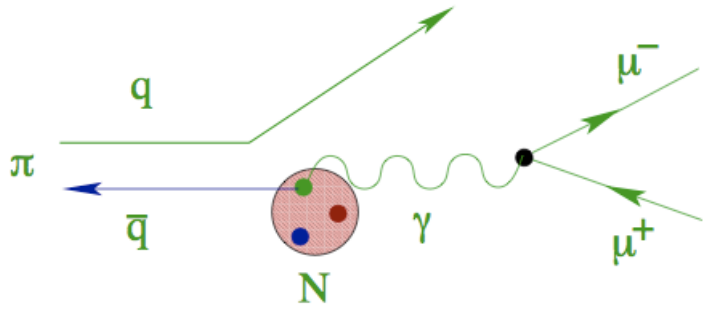
HATÁSKERESZTMETSZET

- Kölcsönhatási valószínűség mértéke:
  $\sigma = W / \phi$
- Fluxus, a bombázó részecskenyaláb áramsűrűsége:
  ϕ = sűrűség • sebesség
  $[\phi] = 1 / (m^2 \bullet s)$
- Átmeneti valószínűség egységnyi idő alatt: W
  $[W] = 1 / s$
- Hatáskeresztmetszet:
  $[\sigma] = m^2$
  barn: $1\ b = 10^{-28}\ m^2$
  Részecskefizikában: $pb = 10^{-40}\ m^2$



PION–NUKLEON SZÓRÁS ÉS A KVARKOK TÖLTÉSE

- Kvark szabadon nem létezik, mégis vizsgálhatjuk a tulajdonságait részecskeszórással
- Példa: pionszórás nukleonon:
  $\pi N \rightarrow \mu^+ \mu^- X$
  Kvark szóródik, anti-kvark befogódik
- Elemi kölcsönhatás: $q\, q \rightarrow \mu^+ \mu^-$
- Hatáskeresztmetszet:



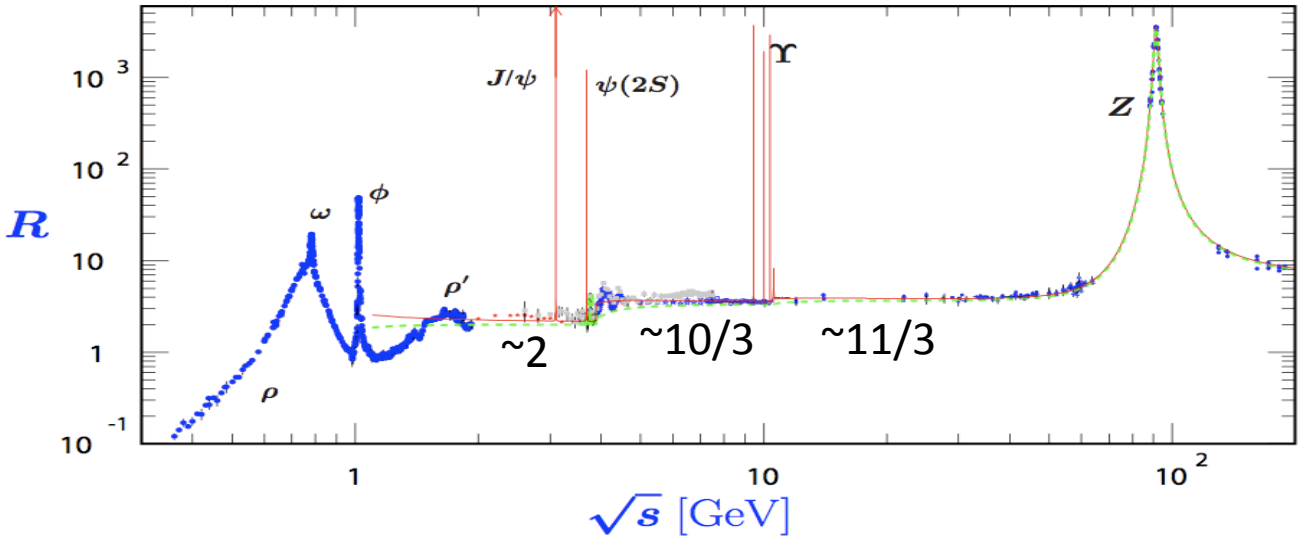
$$\begin{array}{r} \pi^- = (\bar{u}d) \\ {}^{12}C \sim (18u + 18d) \\ \pi^+ = (u\bar{d}) \end{array} \quad \begin{array}{l} > \sigma \sim 18 Q_u^2 = 18 \cdot \frac{4}{9} \rightarrow \\ > \sigma \sim 18 Q_d^2 = 18 \cdot \frac{1}{9} \rightarrow \end{array} \boxed{\frac{\sigma(\pi^- C \rightarrow \mu^+ \mu^- \ldots)}{\sigma(\pi^+ C \rightarrow \mu^+ \mu^- \ldots)} \approx 4}$$

Kísérletileg rendben…

HADRONPÁR KELETKEZÉS HATÁSKERESZTMETSZETE e^+e^- ÜTKÖZÉSBEN

$$R = \frac{\sigma(e^+e^- \to \text{hadronok})}{\sigma(e^+e^- \to \mu^+\mu^-)} = \frac{\sigma(\sum_i e^+e^- \to q_i\overline{q_i})}{\sigma(e^+e^- \to \mu^+\mu^-)} \sim \sum_i Q_{q_i}^2$$

- Töltés-négyzettel és a lehetséges végállapotok számától függ
- Szín nélkül:
  $R_0 = \sum_q Q_q^2$
- 3 színnel:
  $R_3 = 3R_0$
- Magasabb energián több kvark fajta válik elérhetővé:



{u, d, s}: $R_0 = (2/3)^2 + 2 \cdot (1/3)^2 = 2/3; \quad R_3 = 2$

{u, d, s, c}: $R_0 = 2 \cdot (2/3)^2 + 2 \cdot (1/3)^2 = 10/9; \; R_3 = 10/3$

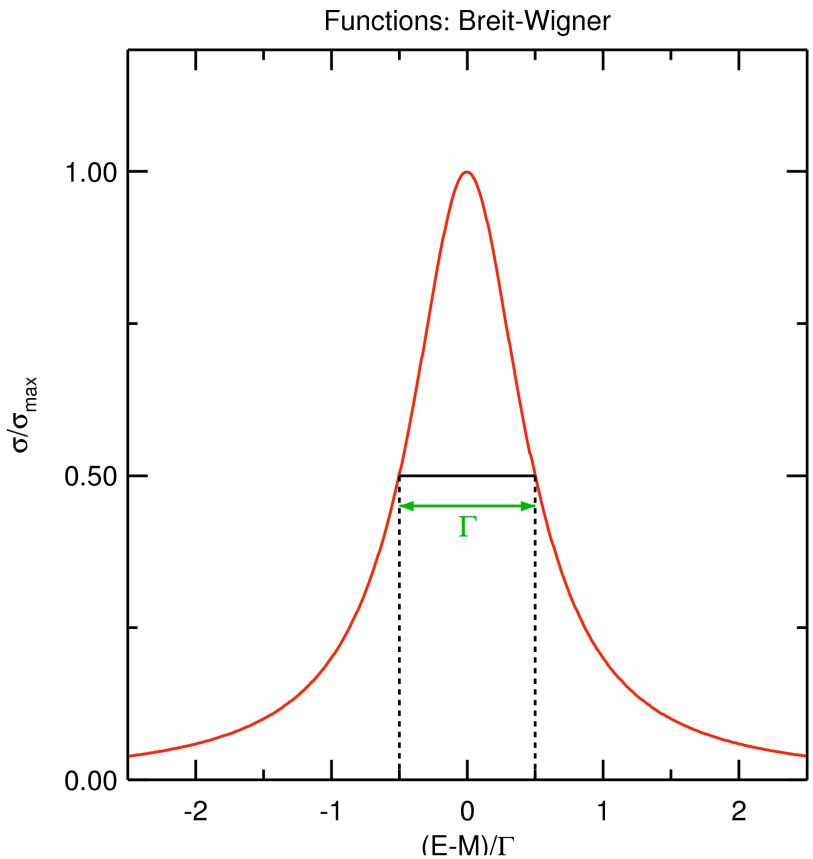
{u, d, s, c, b}: $R_0 = 2 \cdot (2/3)^2 + 3 \cdot (1/3)^2 = 11/9; \; R_3 = 11/3$

REZONANCIA

- Csúcs a differenciális hatáskeresztmetszetben egy adott energiánál szóráskísérletekben
- Egy rövid élettartamú részecske keletkezését és bomlását jelzi
- A rezonancia szélessége a részecske élettartamától függ: $\Gamma = 1 / \tau$
- Valószínűség-eloszlás:

$$f(E) = \frac{\Gamma/2}{(E-M)^2 + (\Gamma/2)^2}$$

- M: rezonancia helye
- Γ: rezonancia szélessége

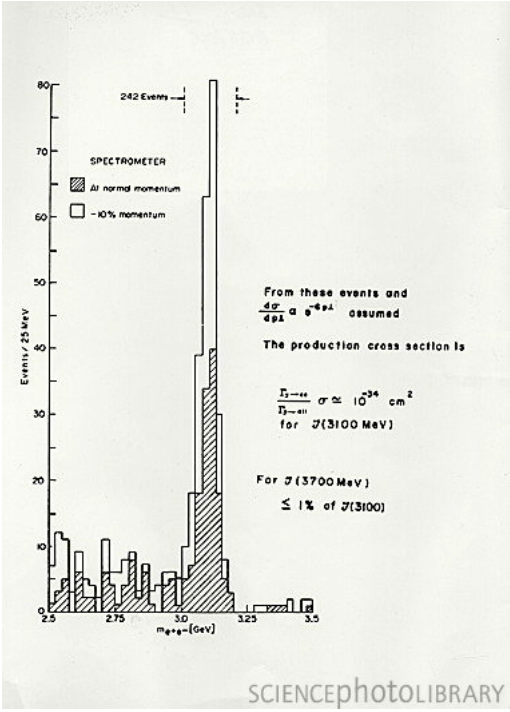


MIÉRT HASZNOSAK A REZONANCIÁK?

Új részecskék felfedezése

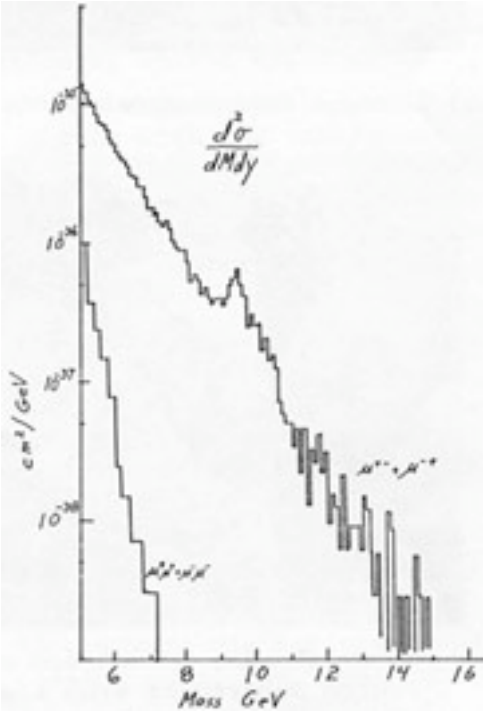
J/ψ ($c\bar{c}$), 1974

→c kvark

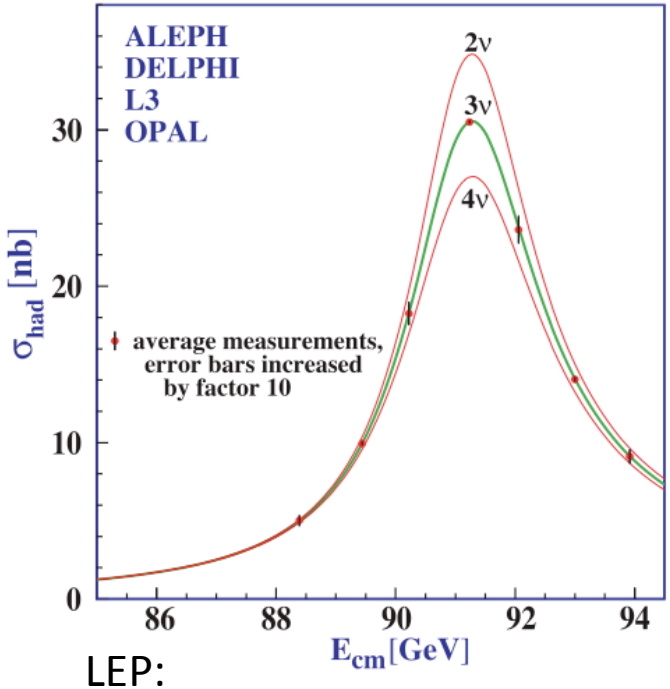


Upsilon ($b\bar{b}$), 1977

→b kvark



Neutrínó családok számának meghatározása a LEP gyorsítón



LEP:

$\Gamma_{inv}/\Gamma_Z = 0.200 \pm 0.055$

$\Gamma_{ll}/\Gamma_Z = 0.033658 \pm 0.000023$

SM: $\Gamma_{\nu\nu}/\Gamma_{ll} = 1.991 \pm 0.001$

⇨ $N_\nu = \Gamma_{inv}/\Gamma_{\nu\nu} = 2.984 \pm 0.008$

AZ ELEMI RÉSZECSKÉK ÉS ALAPVETŐ KÖLCSÖNHATÁSOK

Standard Modellje

Az elemi részecskékre és alapvető kölcsönhatásokra vonatkozó jelenlegi legpontosabb ismereteinket összegzi a Standard Modell, amely az erős és egyesített elektrogyenge kölcsönhatások elmélete. A gravitáció, jóllehet alapvető kölcsönhatás, nem része a Standard Modellnek.

Fermionok – az anyag építőkövei, spinjük: 1/2, 3/2, 5/2 ...

kvarkok (spin = 1/2)

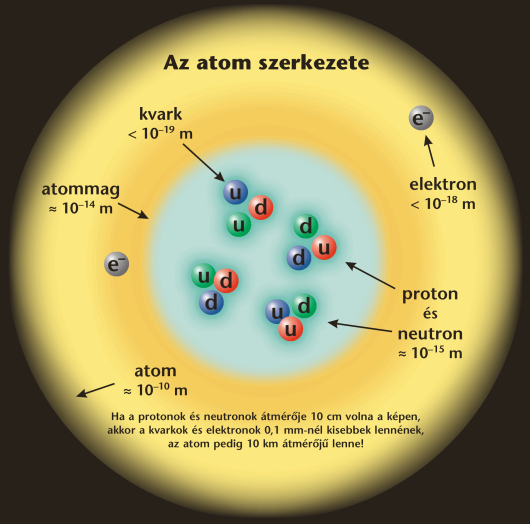
jel/íz	tömeg GeV/c^2	elektr. töltés
u up	0,003	2/3
d down	0,006	–1/3
c charm	1,3	2/3
s strange	0,1	–1/3
t top	175	2/3
b bottom	4,3	–1/3

leptonok (spin = 1/2)

jel/íz	tömeg GeV/c^2	elektr. töltés
ν_e elektron neutrínó	$< 10^{-8}$	0
e elektron	0,000511	–1
ν_μ müon neutrínó	< 0,0002	0
μ müon	0,106	–1
ν_τ tau neutrínó	< 0,02	0
τ tau	1,7771	–1

Tömeg: a részecskefizikában az energiát elektronvoltban (eV), a tömeget GeV/c^2 egységekben ($E = mc^2$) mérik. 1 GeV = 10^9 eV = $1{,}60 \cdot 10^{-10}$ J. A proton tömege 0,938 GeV/c^2 = $1{,}67 \cdot 10^{-27}$ kg.

Töltés: az elektromos töltéseket a protontöltés egységében adjuk meg. A proton töltése $1{,}60 \cdot 10^{-19}$ Coulomb.



Bozonok – a kölcsönhatások közvetítői, spinjük: 0, 1, 2 ...

erős – szín (spin = 1)

jel/név	tömeg GeV/c^2	elektr. töltés
g gluon	0	0

elektrogyenge (spin = 1)

jel/név	tömeg GeV/c^2	elektr. töltés
γ gamma-foton	0	0
W^- W-bozon	80,39	–1
W^+ W-bozon	80,39	1
Z^0 Z-null bozon	91,187	0

Színtöltés: a kvarkok és gluonok „színtöltést" hordoznak. A kvarkok három-, a gluonok nyolcféle „színűek" lehetnek. Kvarkok és gluonok szabadon nem létezhetnek. Őket a színtöltések között ható alapvető erős kölcsönhatás kétféleképpen kötheti össze színsemleges hadronokba: vagy három kvark alkothat egy bariont, vagy egy kvark–antikvark-pár alkothat egy mezont.

A visszamaradó erős kölcsönhatás a színsemleges nukleonok – vagyis az atommagot alkotó neutronok és protonok – között hat (ez felelős a „magerőkért"), jellegében a Van der Waals-kölcsönhatáshoz hasonlít.

A spin a részecske saját perdülete. A spint $\hbar$ egységekben adjuk meg, ahol $\hbar = h/2\pi = 6{,}58 \cdot 10^{-25}$ GeVs = $1{,}05 \cdot 10^{-34}$ Js.

Fermionikus hadronok

barionok (qqq) és antibarionok ($\bar{q}\bar{q}\bar{q}$) – több száz ismert barion van

jel/név	kvark-össz.	tömeg GeV/c^2	elektr. töltés	spin
p proton	uud	0,938	1	1/2
$\bar{p}$ anti-proton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	0,938	–1	1/2
n neutron	udd	0,940	0	1/2
Λ lambda	uds	1,116	0	1/2
Ω omega	sss	1,672	–1	3/2

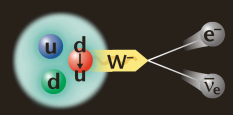
Antianyag: a részecskének általában van „antirészecskéje", amely azonos tulajdonságú, de ellentétes töltésű, mint a részecske. Néhány elektromosan semleges részecske egyben saját antirészecskéje is. Ilyen a Z^0-bozon, a γ-foton, vagy az η_c-mezon, de a K^0-kaon, mely $d\bar{s}$ kvark–antikvark-párból áll, már nem.

Az ábrák a jellemző fizikai folyamatokat csak szemléltetik, hozzájuk értelmes módon skálát rendelni nem lehet. A kékeszöld tartományok a gluonok felhőjét, illetve mezejét, a piros vonalak a kvarkok pályáját mutatják.

A kölcsönhatások tulajdonságai

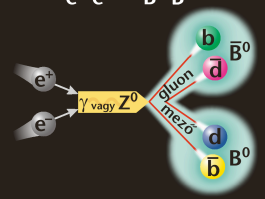
kölcsönhatás / tulajdonság	erős: alapvető	erős: visszamaradó	gyenge (elektrogyenge)	elektromágneses (elektrogyenge)	gravitációs (nem az SM része)
amire hat	színtöltés	lásd magyarázat	íz	elektromos töltés	tömeg, energia, lendület
ezek a részecskék érzik	kvarkok, gluonok	hadronok	kvarkok, leptonok	elektr. töltöttek	minden
közvetítő részecske	gluonok	mezonok	W^-, W^+, Z^0-bozon	γ-foton	graviton (még nem figyelték meg)
relatív erősség két up kvarkra, 10^{-18} m	25	–	0,8	1	10^{-41}
relatív erősség két up kvarkra, $3 \cdot 10^{-17}$ m	60	–	10^{-4}	1	10^{-41}
két proton az atommagban	–	20	10^{-7}	1	10^{-36}

$n \to p\, e^-\, \bar{\nu}_e$



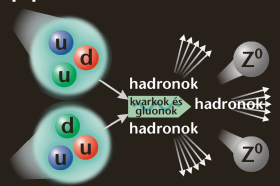
Egy neutron protonra, elektronra és antineutrínóra bomlik egy virtuális W-bozon (gyenge kölcsönhatás) közvetítésével. Ez a béta-bomlás.

$e^+ e^- \to B^0 \bar{B}^0$



Nagy energiájú elektron–pozitron-ütközésben (elektrogyenge kölcsönhatás) B^0–anti-B^0 keltése, γ-foton vagy Z^0-bozon közvetítésével.

$p\, p \to Z^0\, Z^0$ + hadronok



Nagy energiájú, erősen kölcsönható protonok ütközésekor keletkezhetnek hadronok és nehéz részecskék, például Z-bozonok.

Bozonikus hadronok

mezonok ($q\bar{q}$) – több száz ismert mezon van

jel/név	kvark-össz.	tömeg GeV/c^2	elektr. töltés	spin
π^+ pion	$u\bar{d}$	0,140	1	0
K kaon	$s\bar{u}$	0,494	–1	0
ρ^+ ró-mezon	$u\bar{d}$	0,770	1	1
B^0 B-null mezon	$d\bar{b}$	5,279	0	0
η_c eta-c mezon	$c\bar{c}$	2,980	0	0

Az eredeti posztert a **Contemporary Physics Project** (http://CPEPweb.org) készítette. A magyar változat **Kármán Tamás** és **Somogyi Gábor** munkája.

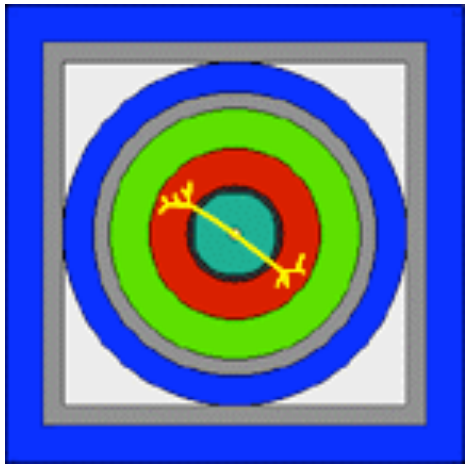
Megjelent a **Fizikai Szemle** mellékleteként, tetszőleges méretre nagyítható változata letölthető a http://fizikaiszemle.hu honlapról.

Köszönetünket fejezzük ki a megjelenést támogató **Paksi Atomerőmű Zrt.**-nek.

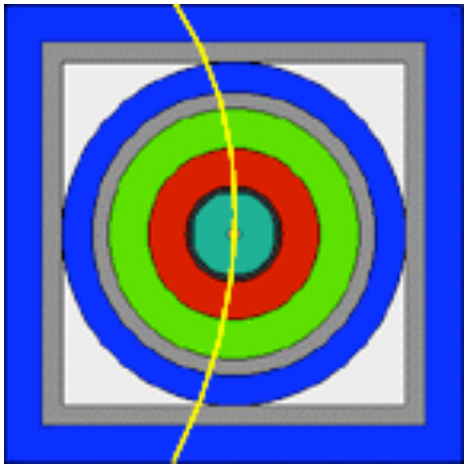
mvm paksi atomerőmű

Fizikai Szemle
MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT
az Eötvös Loránd Fizikai Társulat folyóirata

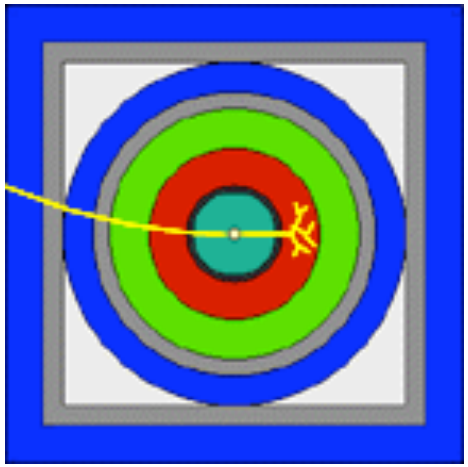
Z BOZON BOMLÁS



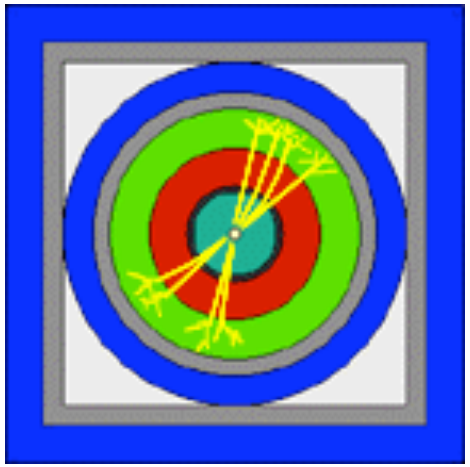
elektron pár



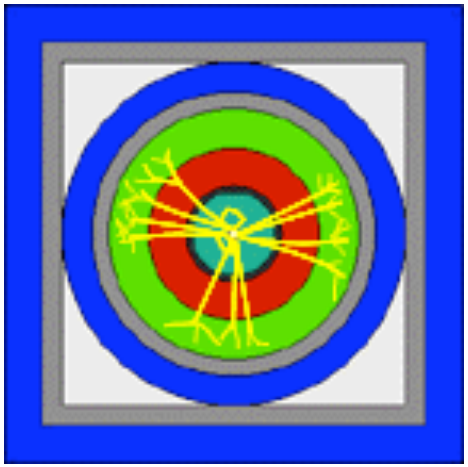
muon pár



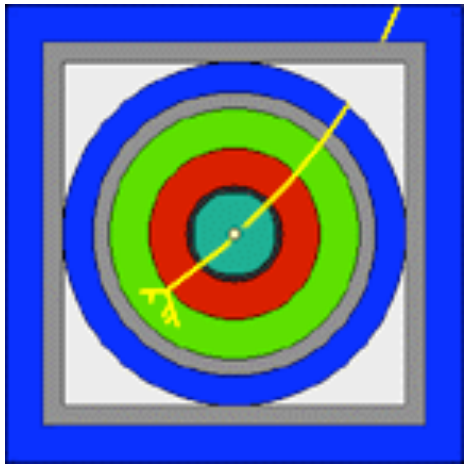
tau pár → muon, elektron



kvark (hadron zápor) pár

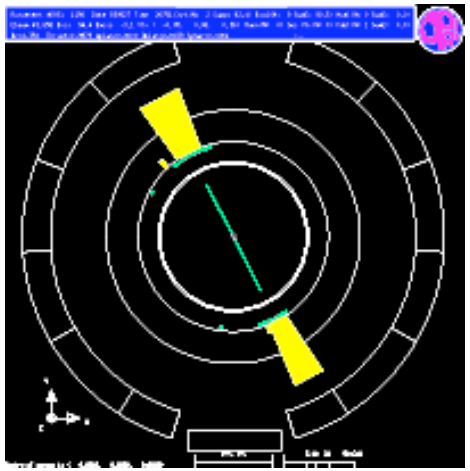


kvark pár és gluon
(3 hadron zápor)

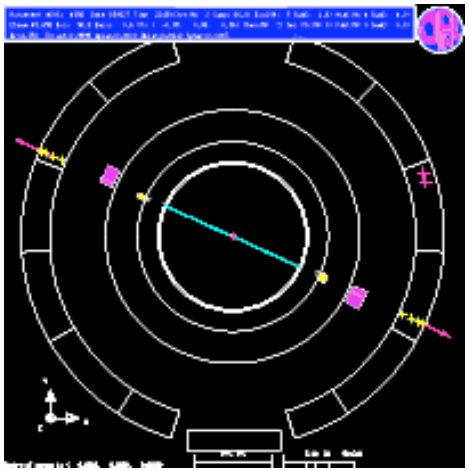


tau pár → hadron, muon

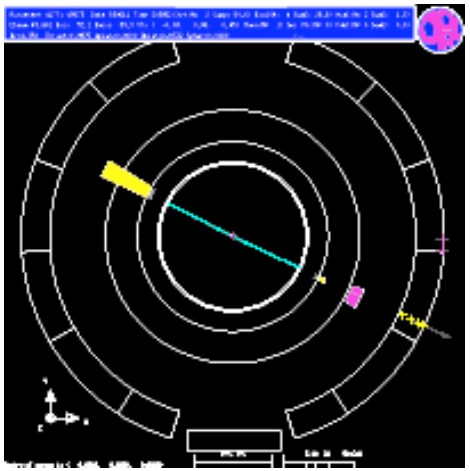
Z BOZON BOMLÁS A LEP GYORSÍTÓN



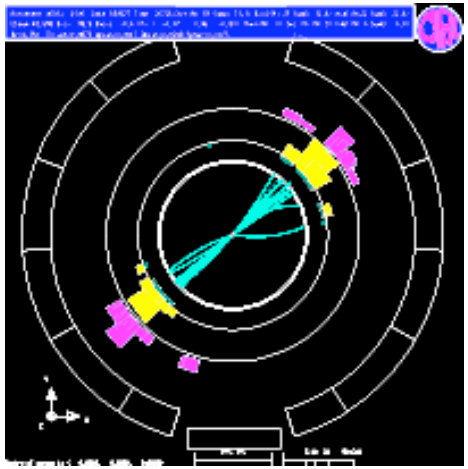
elektron pár



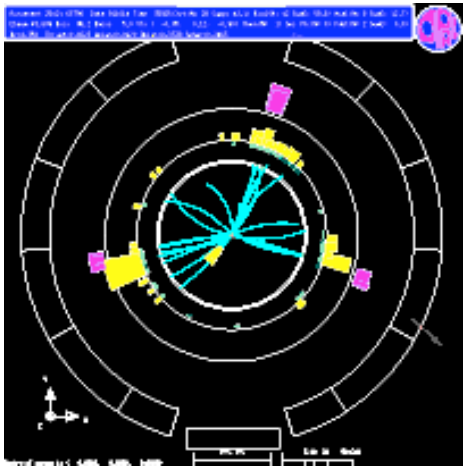
muon pár



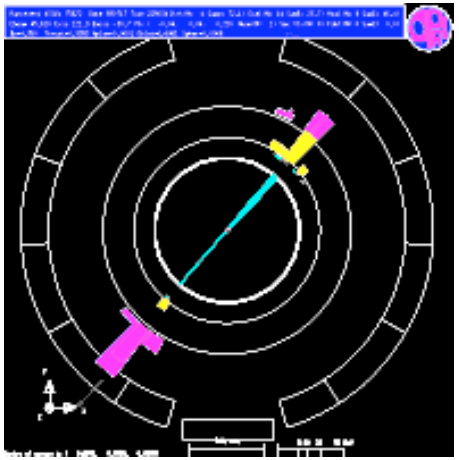
tau pár → elektron, muon



kvark (hadron zápor) pár



kvark pár és gluon
(3 hadron zápor)



tau pár → 1 és 3 hadron