

BEVEZETÉS A RÉSZECSEKEFIZIKÁBA

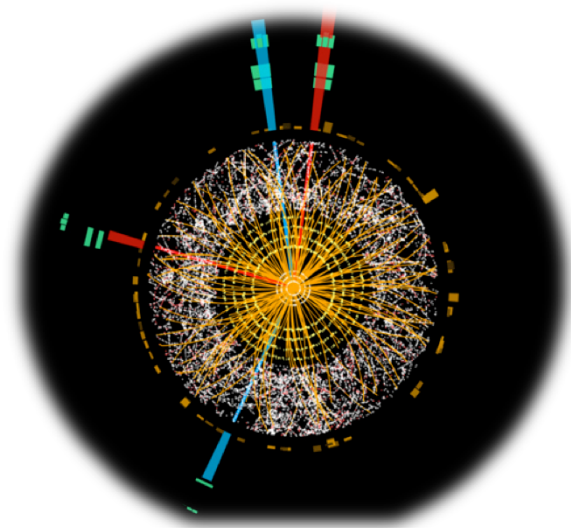
Pásztor Gabriella

University of Geneva & MTA Wigner FK

Gabriella.Pasztor@cern.ch

CERN Hungarian Teachers Programme

2012. augusztus 13-17.



PROGRAM

Hétfő

- Részecskefizika célja, eszközei
- Elemi részecskék és kölcsönhatásaik

Kedd

- Szimmetriák a részecskefizikában
- Elemi részecskék tömege és a Higgs bozon

Szerda

- Neutrínók
- A Standard Modellen túl: szuperszimmetria és extra dimenziók

1. RÉSZ

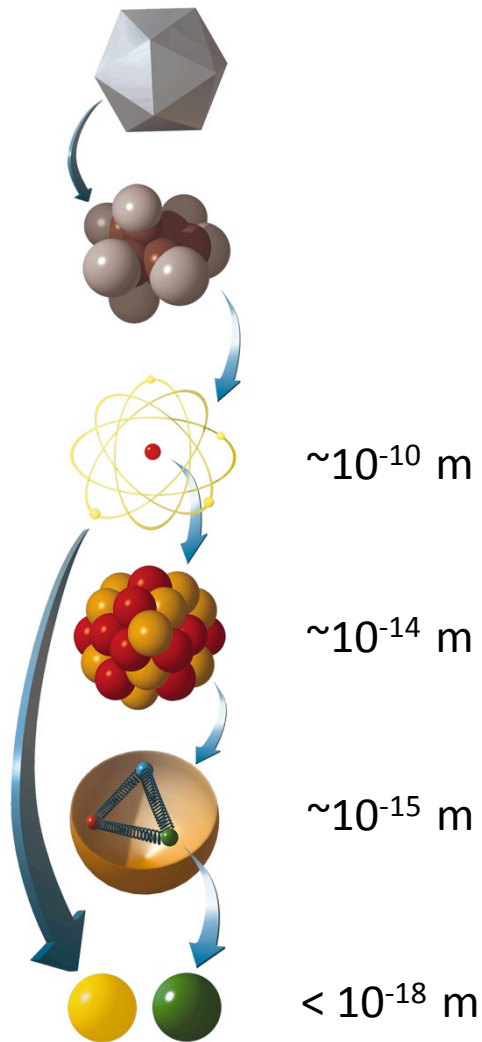
Mit vizsgál a részecskefizika és milyen eszközökkel?

Elemi részecskék és kölcsönhatásaik

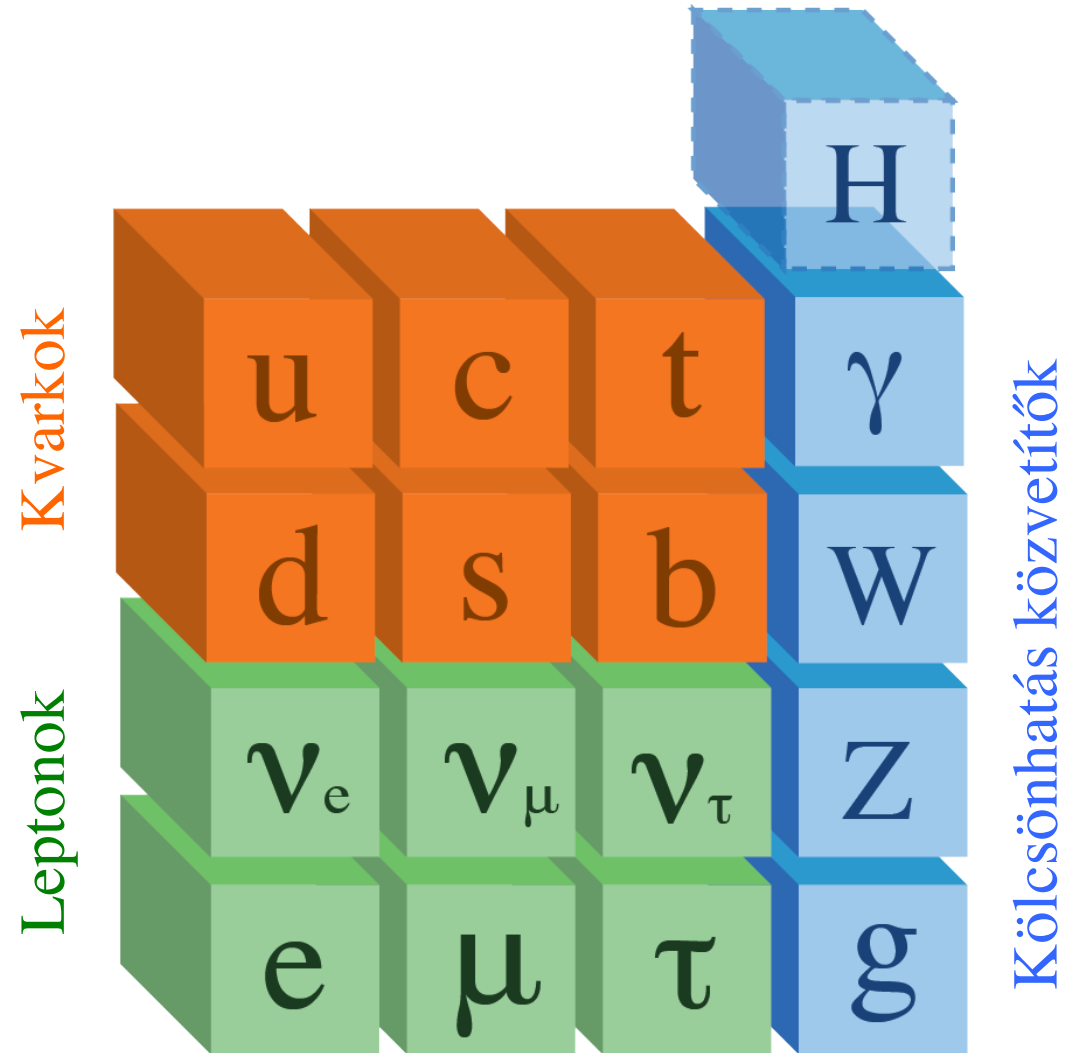
A KÉRDÉS

Mik a világegyetem elemi építőkövei?

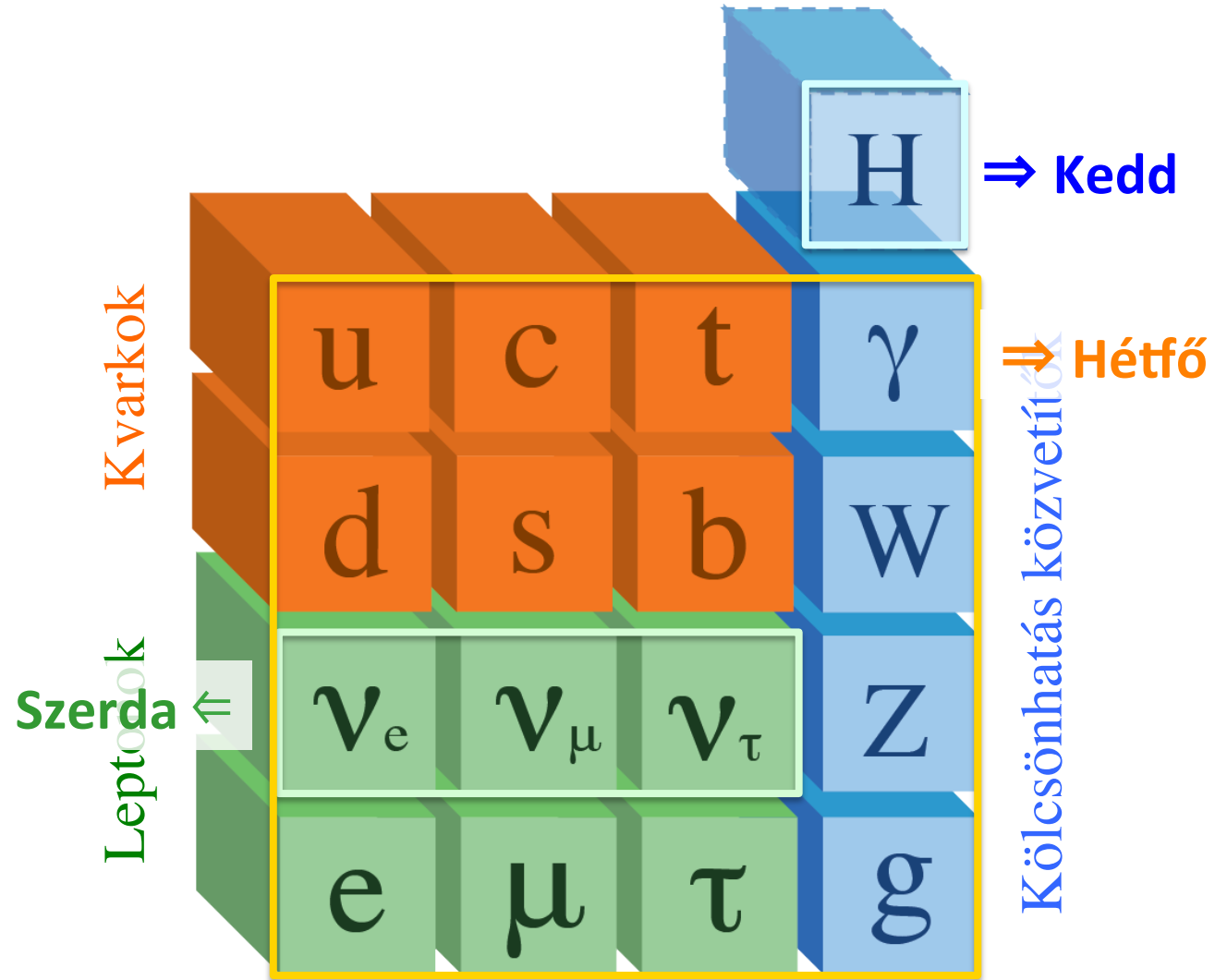
- Részecskék
- Erők / kölcsönhatások



A VÁLASZ



A VÁLASZ



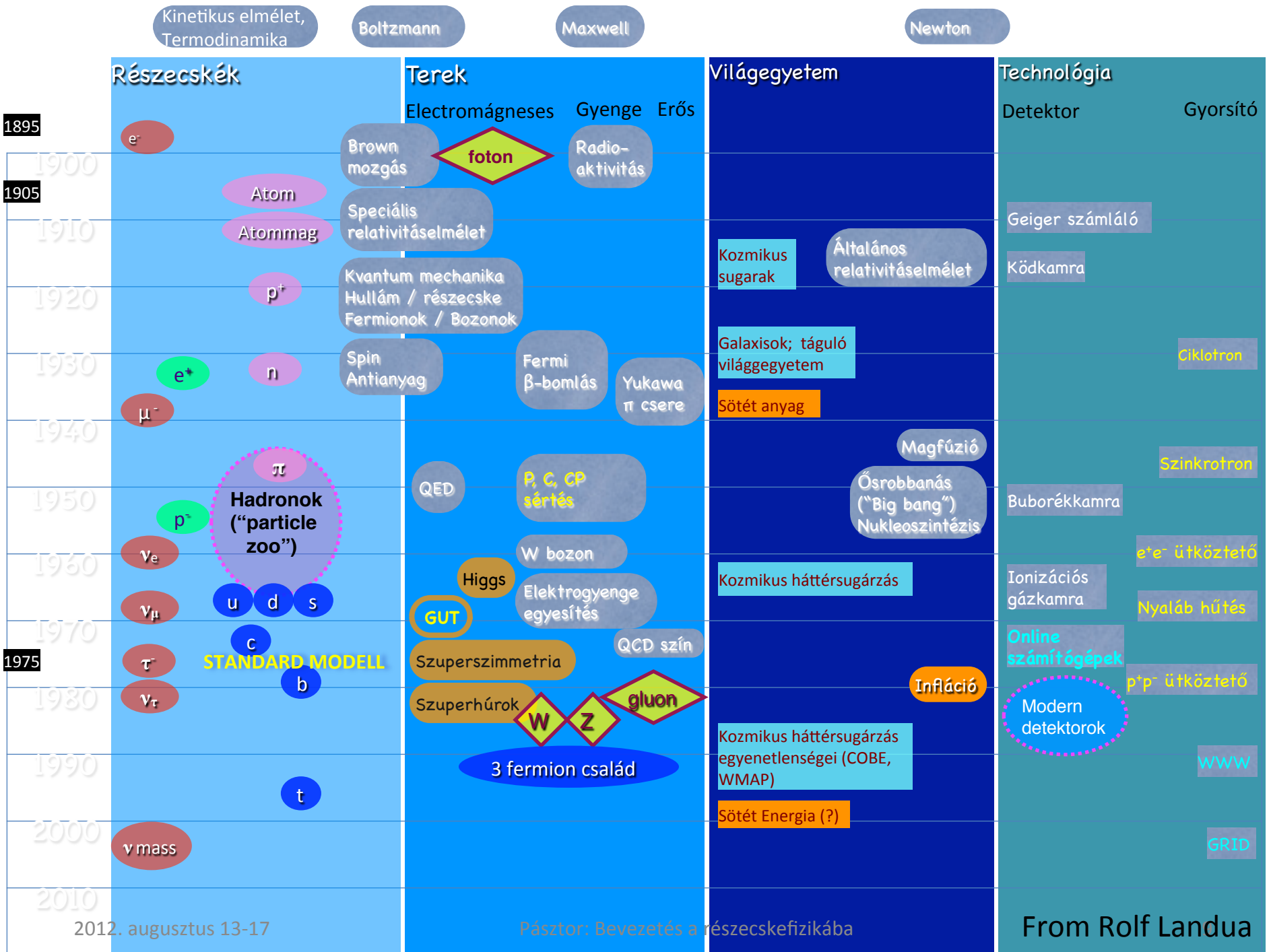
A VÁLASZ A MATEMATIKA NYELVÉN

$$\begin{aligned}\mathcal{L} = & -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}^a F^{a\mu\nu} && \text{(Erők)} \\ & +i\bar{\psi}D\psi + h.c. && \text{(Kölcsönhatások)} \\ & +\psi_i\lambda_{ij}\psi_j\Phi + h.c. && \text{(Fermionok tömege)} \\ & +|D_\mu\Phi|^2 - V(\Phi) && \text{(Elektrogyenge} \\ & && \text{szimmetriasértés)}\end{aligned}$$

AZ ÚT

Több mint 100 ötlettel, elméletekkel és kísérletekkel teli év

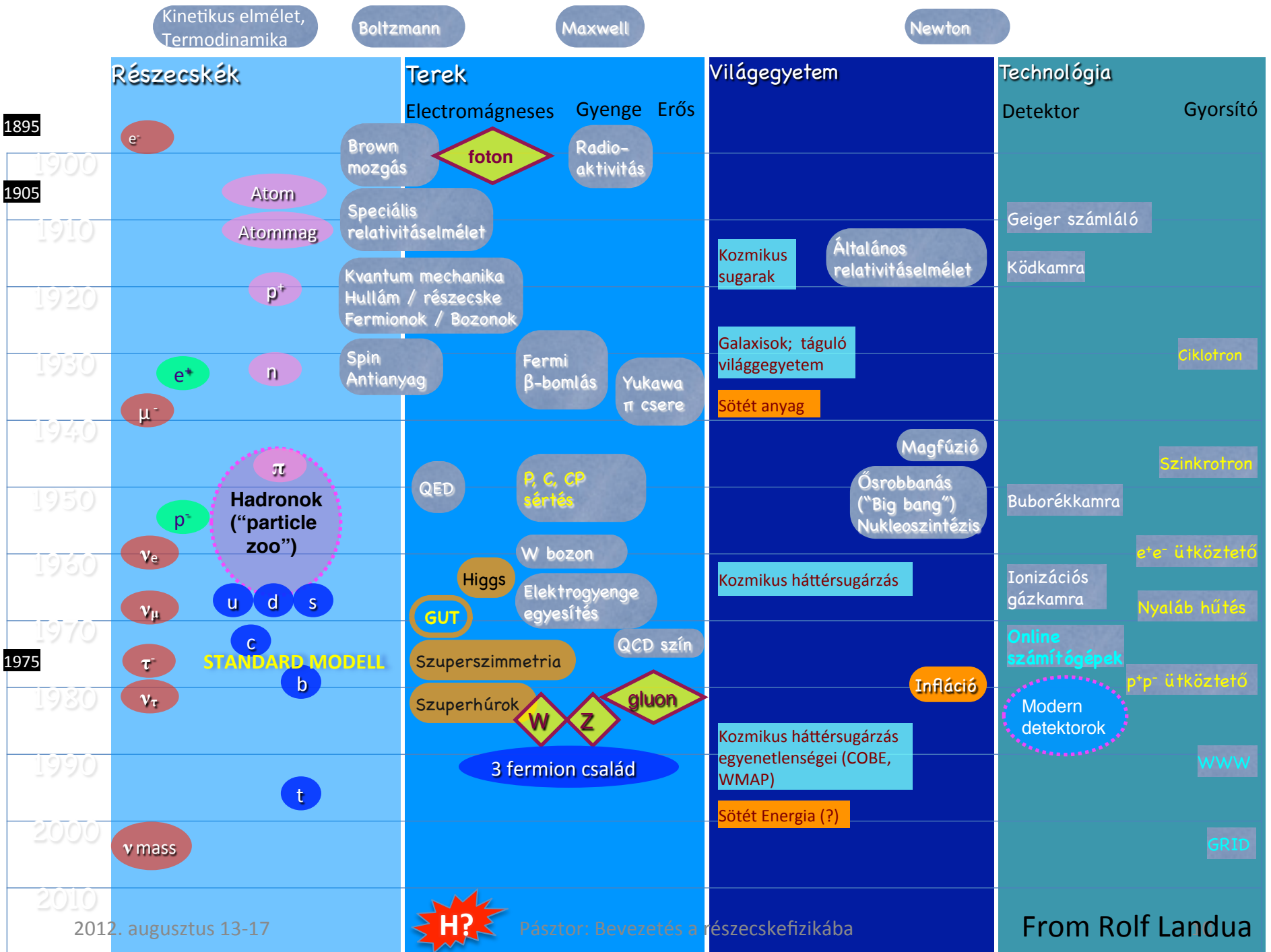
30 Nobel díj



2012. augusztus 13-17

Pásztor: Bevezetés a részecskefizikába

From Rolf Landua



2012. augusztus 13-17

Pásztor: Bevezetés a részecskefizikába

From Rolf Landua

ELEMI RÉSZECSCSKE

Egyszerű, szerkezet nélküli, tovább nem bontható

...de nem feltétlenül stabil, azaz elbomolhat más részecskékre

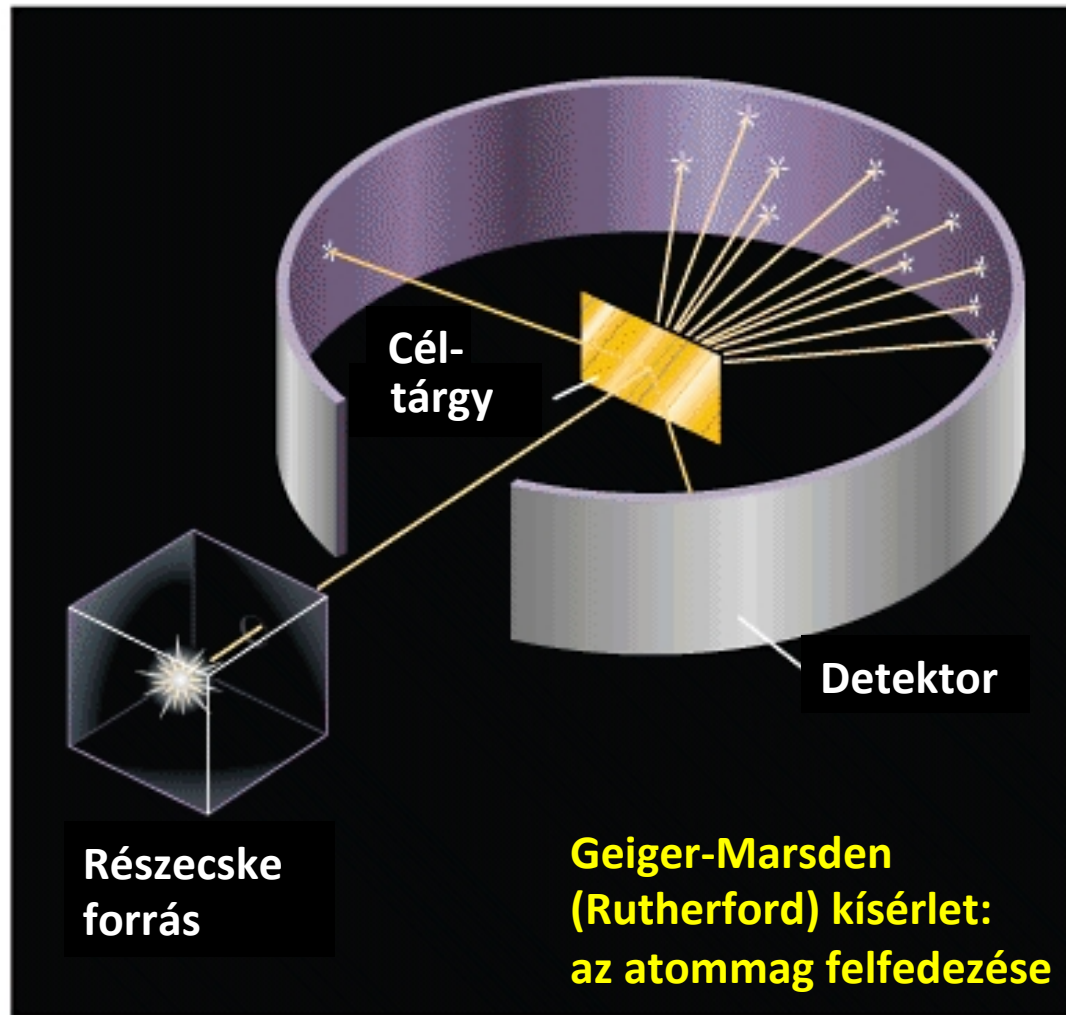
AZ ATOM FOGALMÁNAK FEJLŐDÉSE

- 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 (színeképvonalak)
- 1924, Louis de Broglie: részecske – hullám kettősség
- 1926, Erwin Schrödinger: atom matematikai modellje 3D elektron hullámokkal

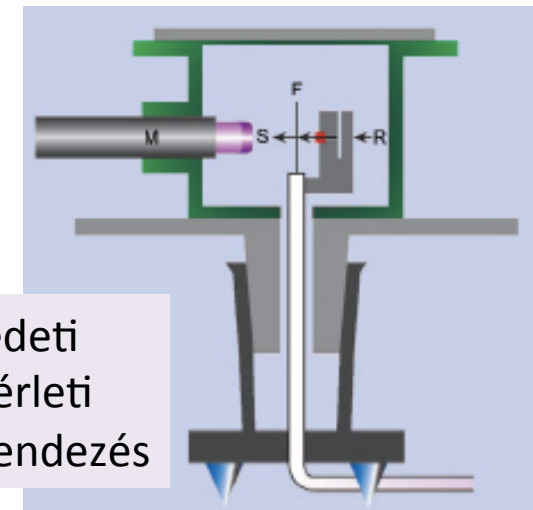
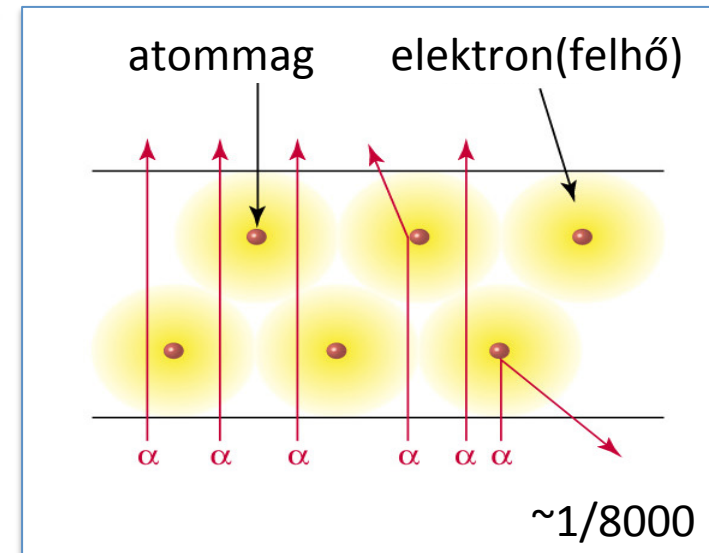
A FELFEDEZÉS MÓDSZEREI

- Szórás kísérletek
(példa: atommag felfedezése)
- Következtetés a megfigyelt rendszerek tulajdonságaiból: tömeg, spin, élettartam,...
(példa: a kvark-modell megszületése)

RÉSZECSCKE SZÓRÁS MINT MIKROSZKÓP: AZ ATOMMAG FELFEDEZÉSE

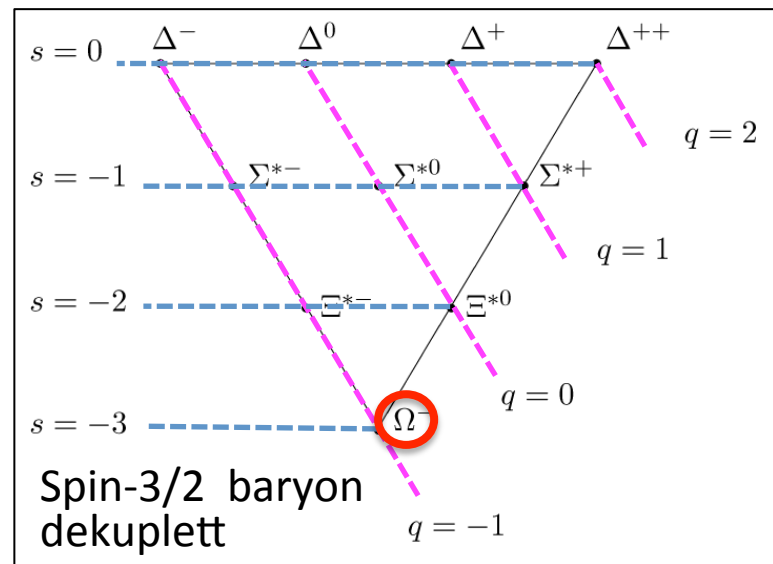
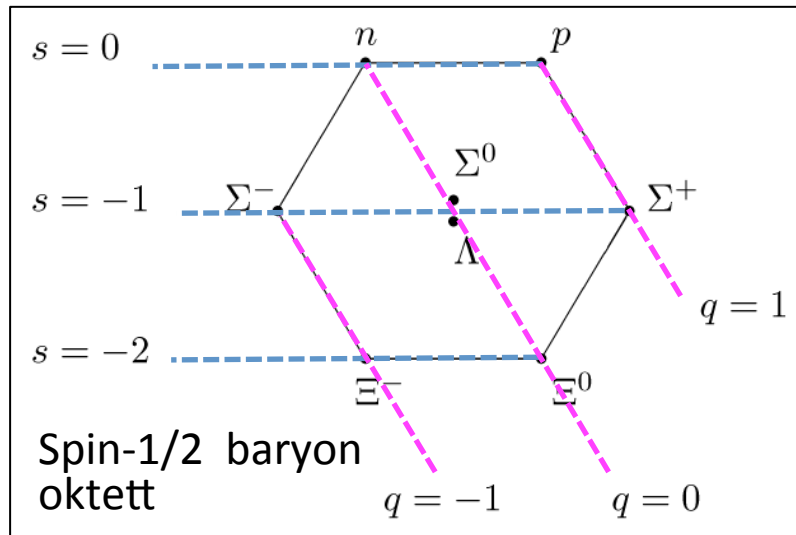
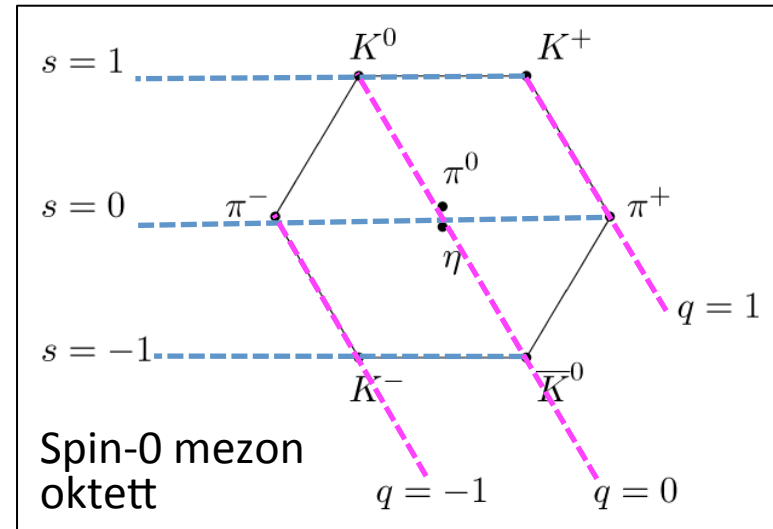


Az eredmény értelmezése



KÍSÉRLETI ADATOK RENDSZEREZÉSE: A KVARKOK FELFEDEZÉSE

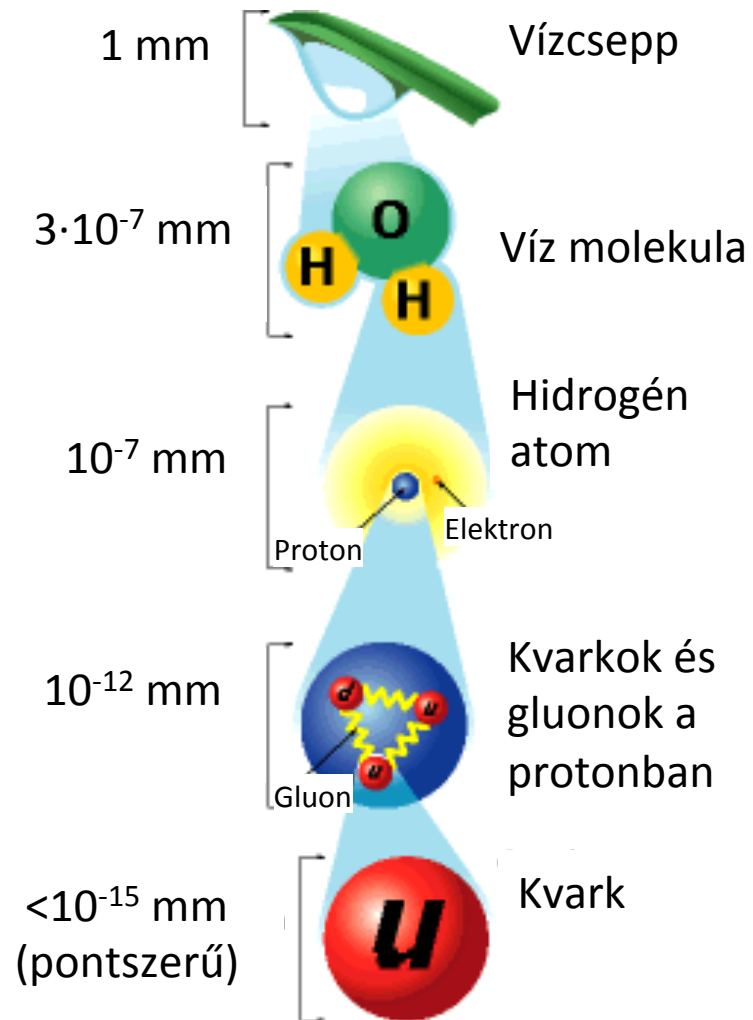
- A 1960-as évekre több száz erős kölcsönhatásban résztvevő részecskét fedeztek fel (“részecske állatkert”)
- 1962, Murray Gell-Mann rendszerezi a részecskéket, és megjósolja az Ω^- létezését (1969, Nobel díj)
- A modern kvark modell megszületik
- 1964, Brookhaven, Ω^- felfedezése a megjósolt tulajdonságokkal



MÉRTÉKEGYSÉGEK

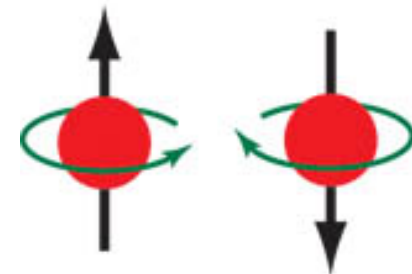
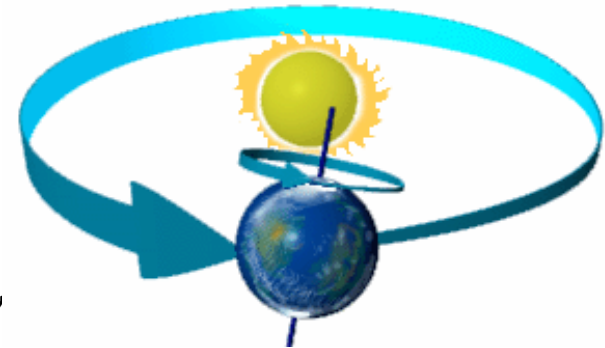
- Energia: $1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
(elektron által felvett energia, amint áthalad 1V potenciálkülönbségen)
- Speciális relativitáselmélet: $E = mc^2$ és $E^2 = p^2 c^2 + m_0^2 c^4$
- Fénysebesség: $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \Rightarrow 1$
- Mértékegységek: $[m] = [p] = [E] = \text{eV}$ (vagy keV, MeV, GeV, TeV)
- Elektron nyugalmi tömege: $m_e = 511 \text{ keV}/c^2$ vagy röviden 511 keV
- Heisenberg határozatlansági reláció: $\Delta x \cdot \Delta p > h/4\pi$, $\Delta E \cdot \Delta t > h/4\pi$
- Planck állandó: $h/2\pi \approx 1.05 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s} \approx 6.6 \cdot 10^{-16} \text{ eV}\cdot\text{s} \Rightarrow 1$
- $p=100 \text{ GeV}/c$ impulzusú részecske $>10^{-18} \text{ m}$ felbontással lát

AZ ANYAG FELÉPÍTÉSE



FERMIONOK ÉS BOZONOK

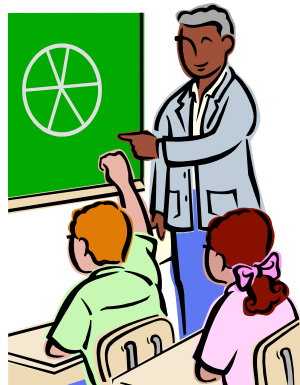
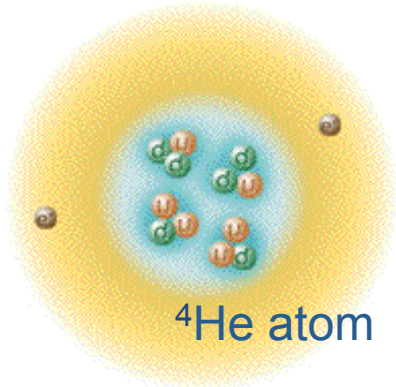
- **Spin: belső impulzus-momentum**
- Analógia:
Föld forgása a tengelye körül → spin
Föld keringése a Nap körül → pályamomentum
- Elemi részecskék esetében a spin nem köthető forgáshoz, hanem egy **belső tulajdonság!**
- Kvantum-rendszerekben az impulzusmomentum **kvantált**:
 $h/2\pi \cdot \sqrt{s \cdot (s+1)}$, 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



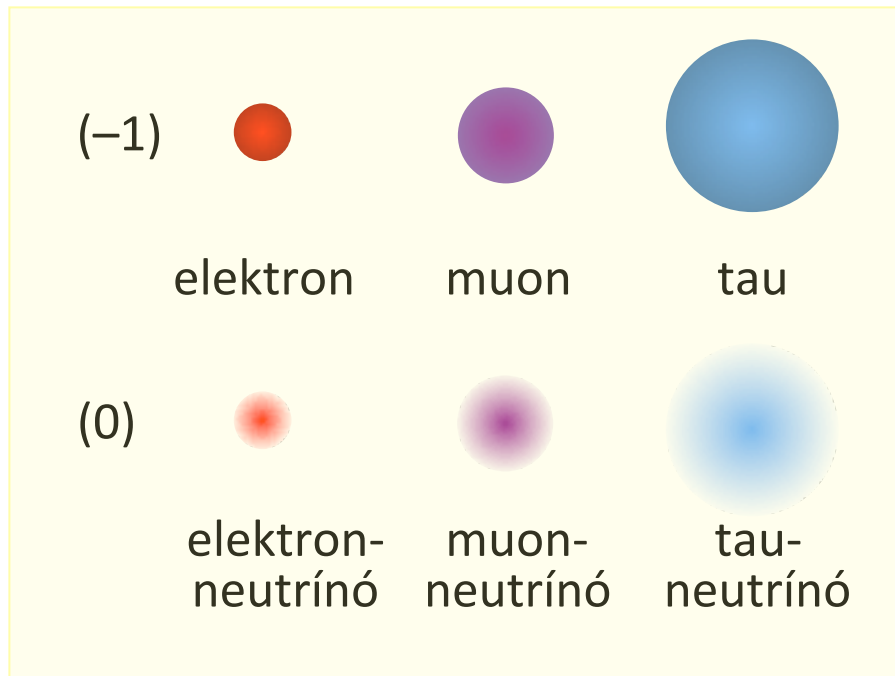
AZ ANYAG ÉPÍTŐKÖVEI: A FERMIONOK



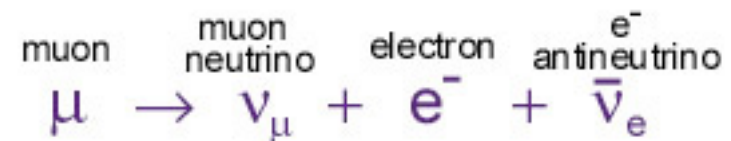
FERMIONS						matter constituents spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...	
Leptons spin = 1/2			Quarks spin = 1/2				
Flavor	Mass GeV/c ²	Electric charge	Flavor	Approx. Mass GeV/c ²	Electric charge		
ν_e electron neutrino	$<1 \times 10^{-8}$	0	U up	0.003	2/3		
e electron	0.000511	-1	d down	0.006	-1/3		
ν_μ muon neutrino	<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

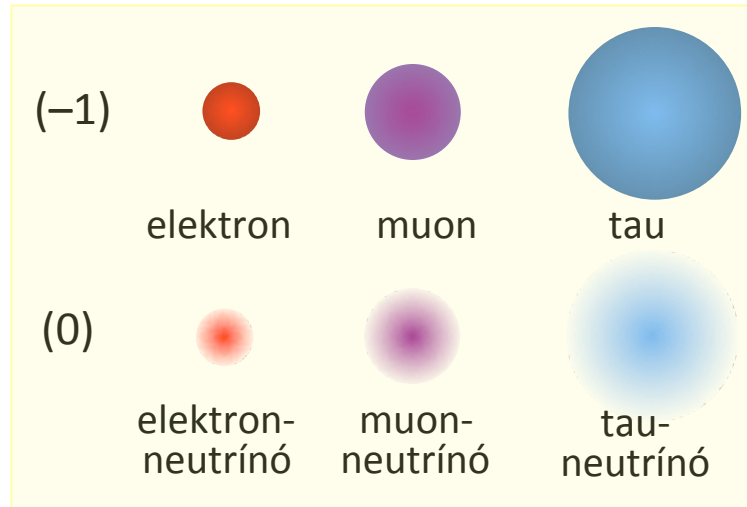


- Elektromosan **töltött leptonok**: a negatív töltésű **elektron és nehezebb társai**
- A nehéz töltött leptonok gyorsan elbomlanak, például



- **Semleges neutrínók**: nagyon könnyűek (0-tömegűnek tartották őket sokáig) és nehezen észlelhetők
- A neutrínók nagyon gyengén hatnak kölcsön, jelenlétükre 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
 $\bar{\nu}_e p \rightarrow n e^+$, $e^+ e^- \rightarrow \gamma\gamma$ NOBEL
- 1962, L.M. Lederman, M. Schwartz, J. Steinberger, Brookhaven AGS neutrínó nyaláb: **muon neutrínó** NOBEL
- 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
- 2000, DONUT kollaboráció (FNAL): **tau neutrínó**

Magyar vonatkozás:

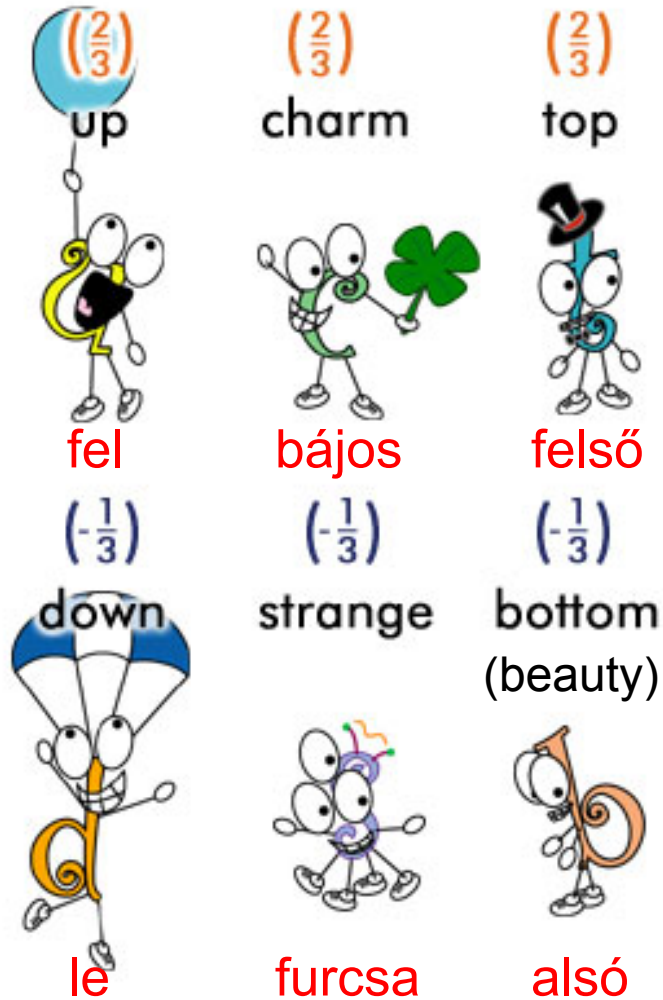
1957 Szalay Sándor és Csikai Gyula

Neutrínó észlelés 6He β -bomlásában

<http://epa.oszk.hu/00300/00342/00185/pdf/>

[FizSzem_EPA00342_2005_10_356-361.pdf](http://epa.oszk.hu/00300/00342/00185/pdf/FizSzem_EPA00342_2005_10_356-361.pdf)

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 létevel **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, Green, Blue \Rightarrow 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 \sim 3 alapszín
(anti-szín \sim kiegészítő szín, színtelen állapot \sim fehér)

HADRONOK: BARIONOK ÉS MEZONOK

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

Spin $J = (\sum_q \pm 1/2) + \text{pályamomentum}$

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

$J = 1/2, 3/2, \dots$ (fermionok)

$Q = 0, \pm 1, \pm 2$

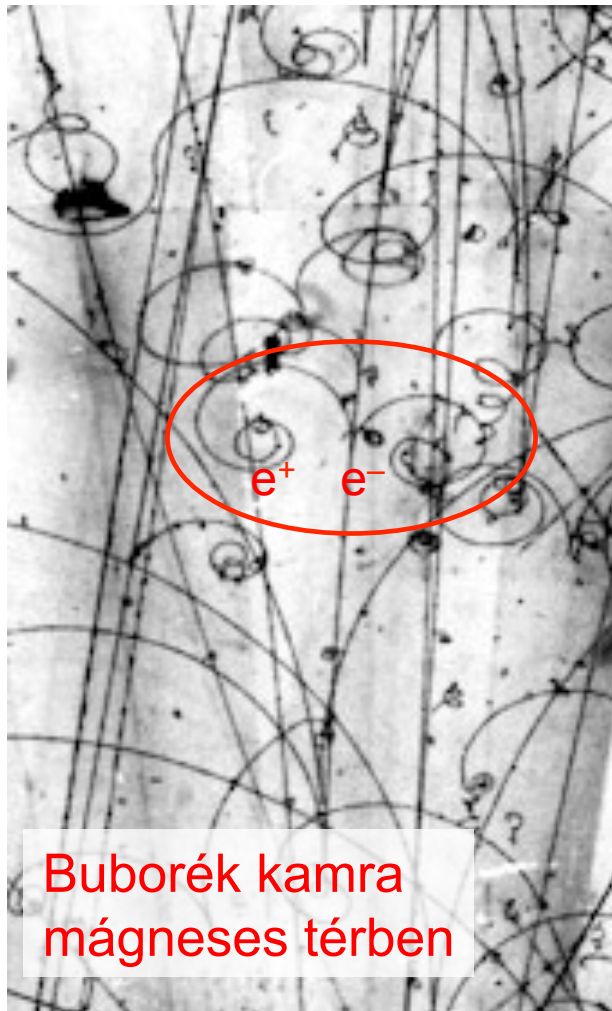
Nukleonok, $J=1/2$: p (uud), n (udd)

$J = 0, 1, \dots$ (bozonok)

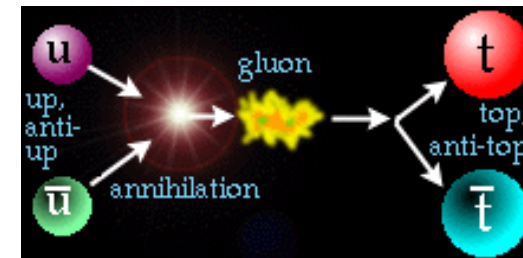
$Q = 0, \pm 1$

Pionok, $J=0$: π^+ ($u\bar{d}$), π^- ($\bar{u}d$), π^0 ($(u\bar{u}-d\bar{d})/\sqrt{2}$)

ANYAG ÉS ANTI-ANYAG



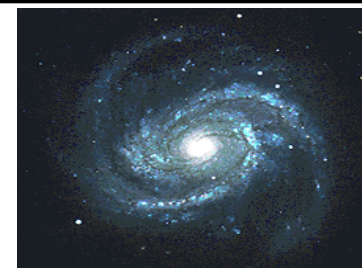
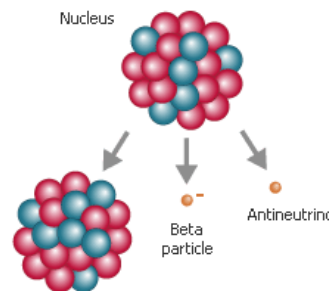
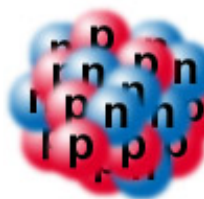
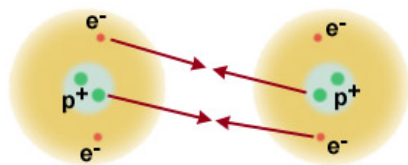
- Dirac-egyenlet negatív energiájú megoldása (1928)
- Minden részecskének van egy anti-részecske párja, amely mindenben megegyezik vele csak a töltése ellentétes:
 - proton (+) \Leftrightarrow anti-proton (-)
 - elektron (-) \Leftrightarrow pozitron (+)
- Gravitáció azonosan hat részecskékre és anti-részecskékre, 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

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

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



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			Strong (color) spin = 1		
Name	Mass GeV/c ²	Electric charge	Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
γ photon	0	0	g gluon	0	0
W⁻	80.4	-1			
W⁺	80.4	+1			
Z⁰	91.187	0			

PROPERTIES OF THE INTERACTIONS					
Property \ Interaction	Gravitational	Weak (Electroweak)		Strong	
				Fundamental	Residual
Acts on:	Mass – Energy	Flavor		Color Charge	See Residual Strong Interaction Note
Particles experiencing:	All	Quarks, Leptons		Quarks, Gluons	Hadrons
Particles mediating:	Graviton (not yet observed)	W⁺ W⁻ Z⁰		Gluons	Mesons
Strength relative to electromag for two u quarks at: for two protons in nucleus	10 ⁻⁴¹	0.8		25	Not applicable to quarks
	10 ⁻⁴¹	10 ⁻⁴		60	
	10 ⁻³⁶	10 ⁻⁷		Not applicable to hadrons	20

“Hierarchia probléma”: gravitációs erőnek a többi erőhöz viszonyított gyengesége

FEYNMAN DIAGRAMMOK

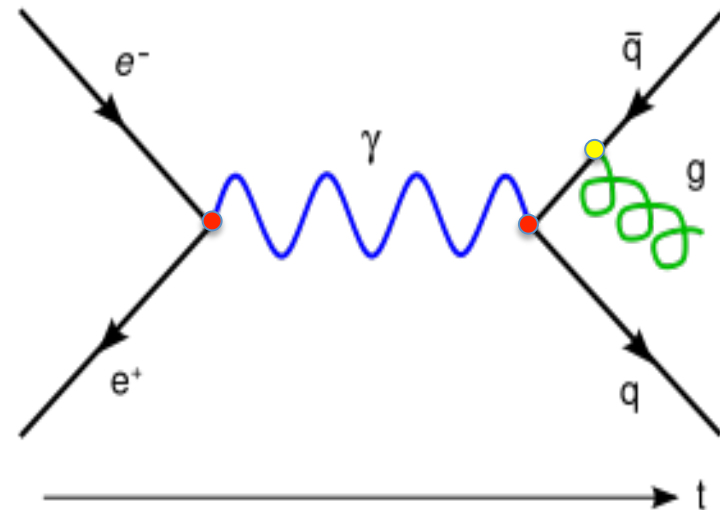
Képi megjelenítése a fizikai folyamatot leíró matematikai kifejezéseknek

- 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

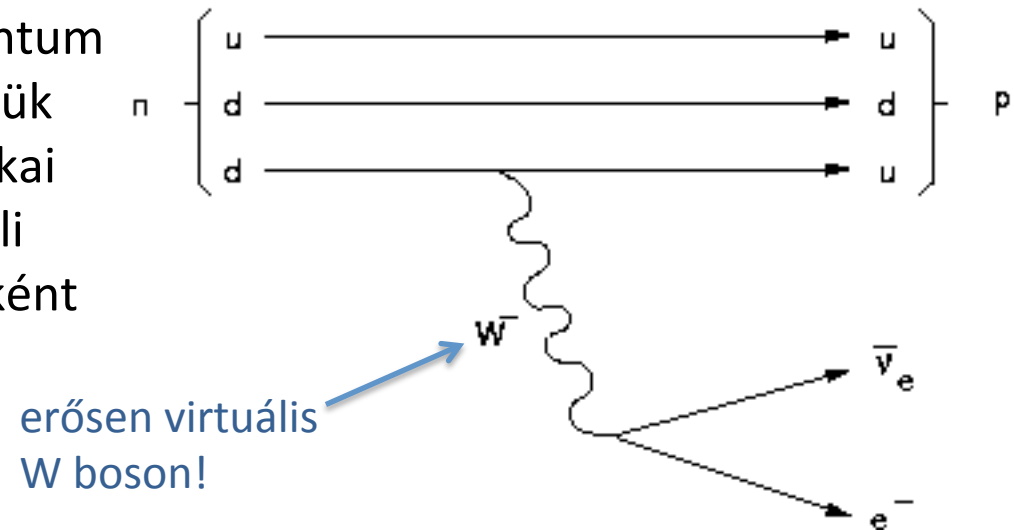
Minden közbülső állapot ábrázolható egy Feynman gráffal, melyeket könnyebb áttekinteni mint a mögöttük lévő bonyolult számításokat

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

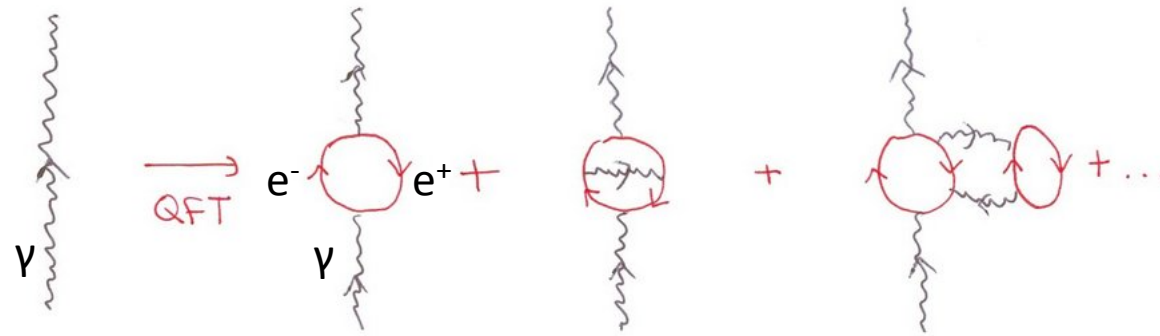


VIRTUÁLIS RÉSZECSKÉK

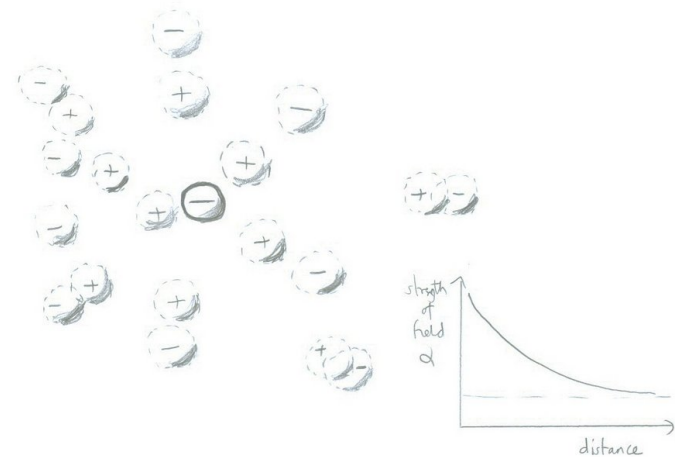
- Csupán nagyon rövid ideig léteznek
- Nem követik be a $E^2=p^2c^2+m_0^2c^4$ összefüggést
- ... de a megmaradási törvényeket betartják!
- Energiájuk bizonytalan a Heisenberg-féle határozatlansági törvény szerint:
 $\Delta E \cdot \Delta t > h/4\pi$
- $m=0$ részecskék (pl. foton) virtuális formájának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



KÖLCSÖNHATÁSOK HATÓTÁVOLSÁGA ÉS A KÖZVETÍTŐ RÉSZECSKÉK TERMÉSZETE I.

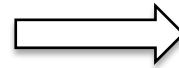
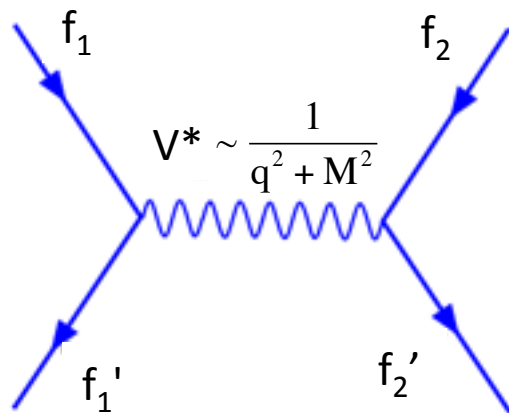


- Kvantummechanika szerint egy részecske összes lehetséges útját össze kell adni a megfelelő súlyokkal ahhoz, hogy egy fizikai jelenséget pontosan leírjunk
- **Hogyan függ az EM kölcsönhatás erőssége a távolságtól?**
- Minél messzebb van két töltés a köztük haladó foton annál több virtuális párt tud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

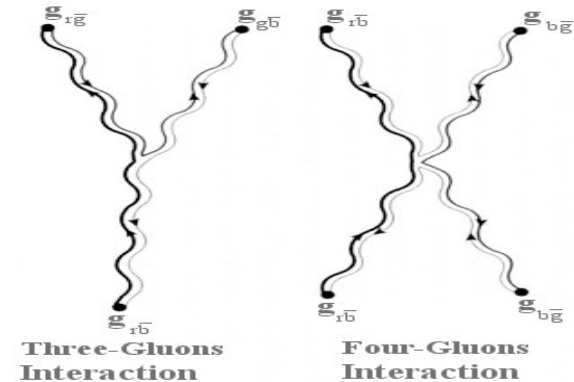


Kölcsönhatási potenciál:

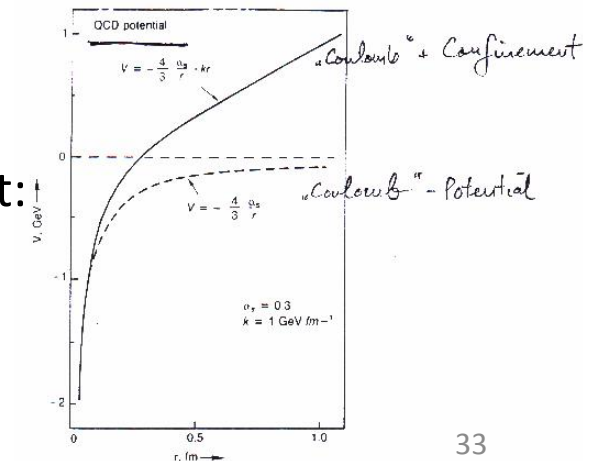
$$V(\mathbf{r}) \sim \frac{e^{-m_V r}}{r}$$

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

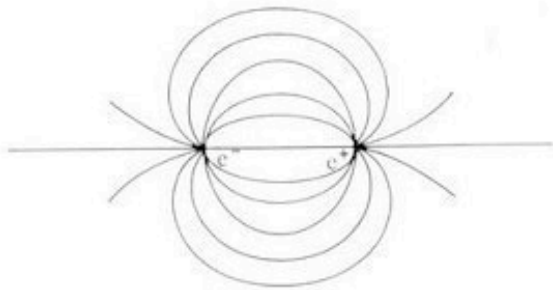


- Ezek a virtuális gluonok nem árnyékolják, hanem erősítik a kölcsönhatást!
- A fenti potenciál leírja mindkét megfigyelt jelenséget: a kvark-bezárást, és az aszimptotikus szabadságot

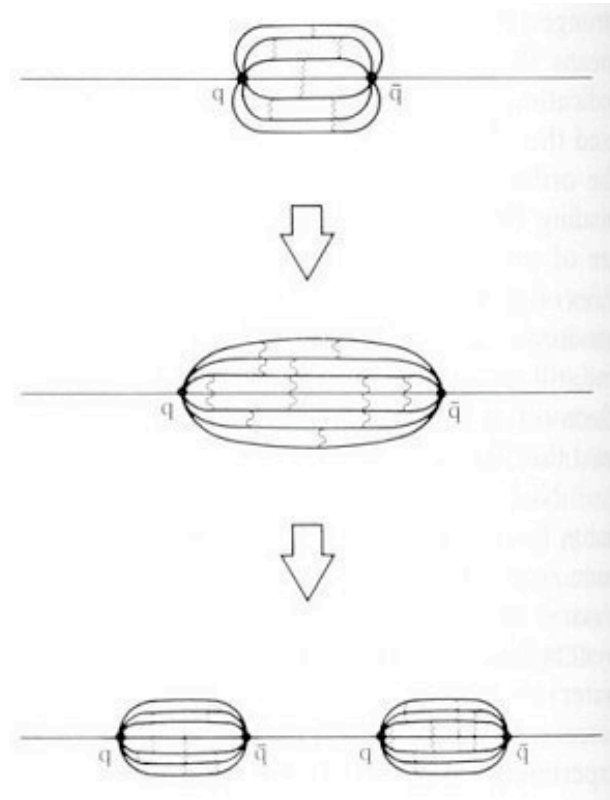


KVARK BEZÁRÁS

- Mi történik, ha két részecskét megpróbálunk eltávolítani egymástól?

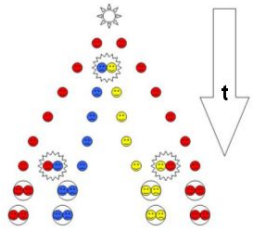


Elektromos tér (szétterjed)



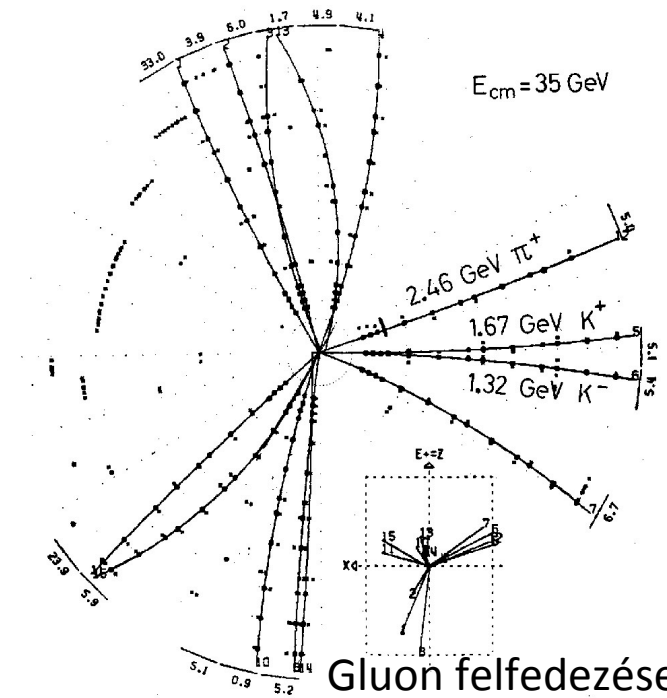
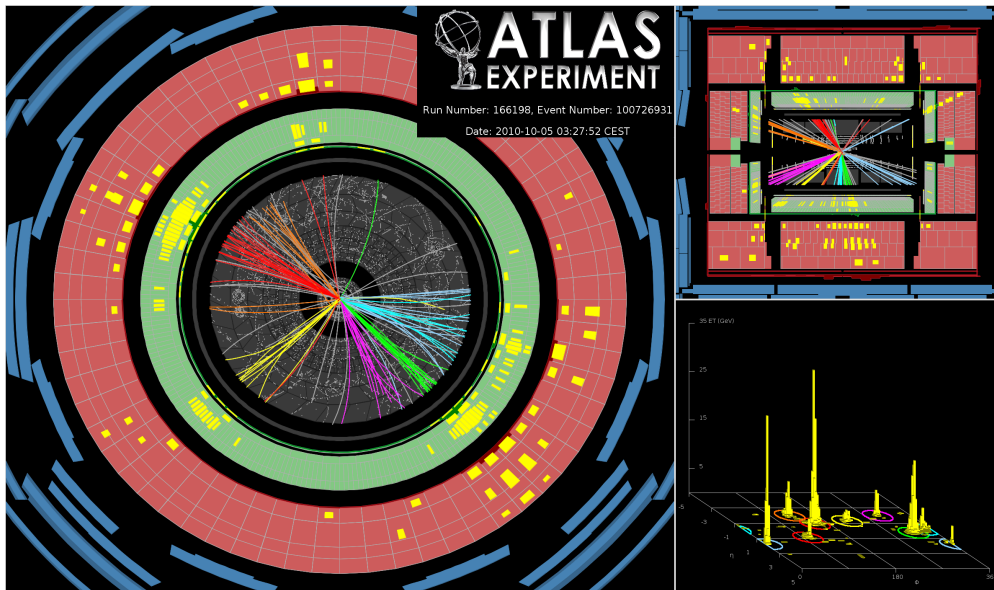
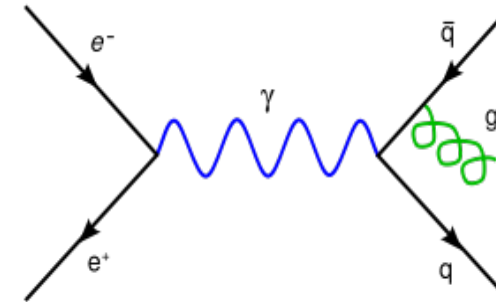
Színtér (szétszakad)

→ kvark bezárás



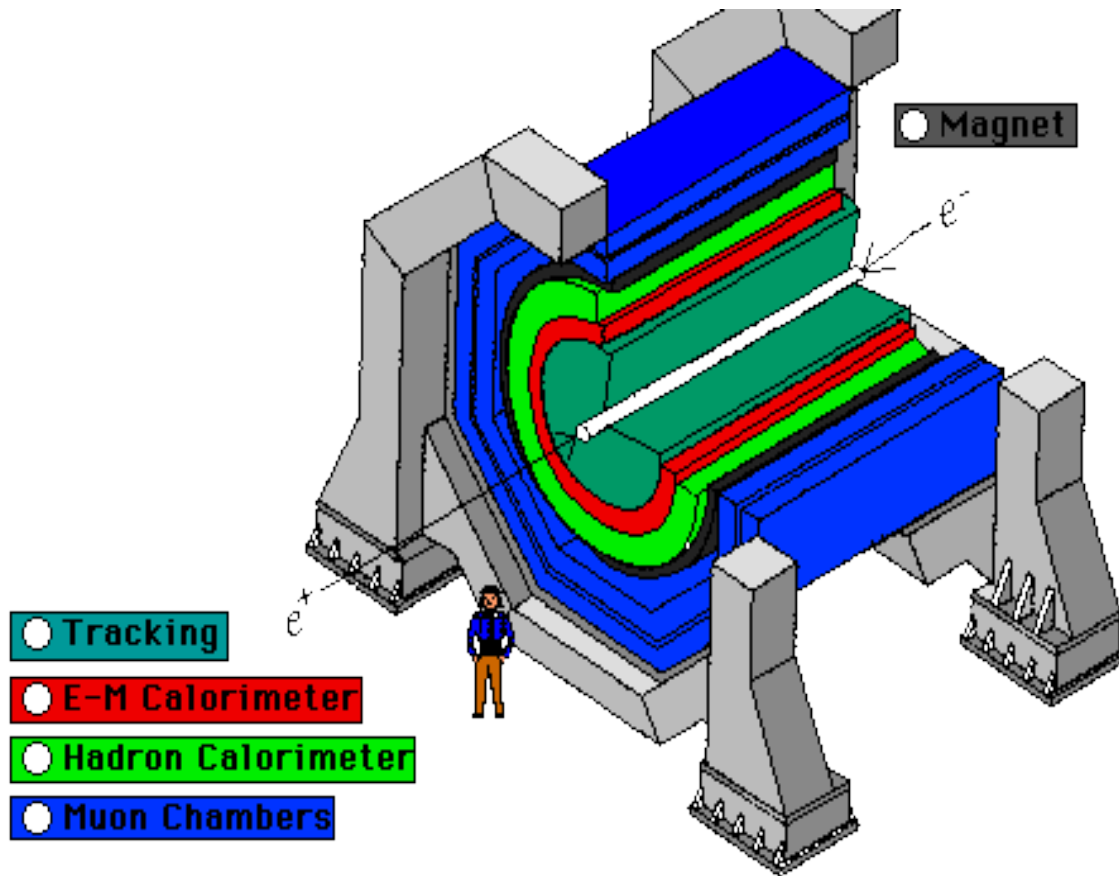
HADRONZÁPOROK

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

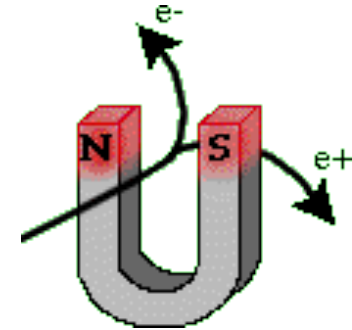


Gluon felfedezése (DESY PETRA) 35

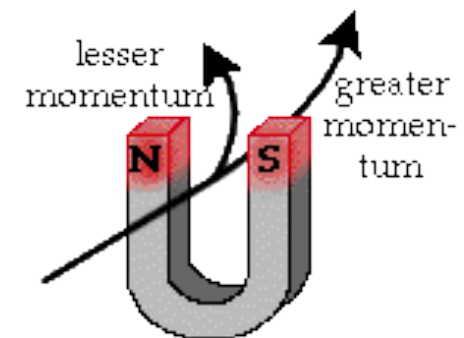
RÉSZECSCKE DETEKTOROK



Töltés meghatározás



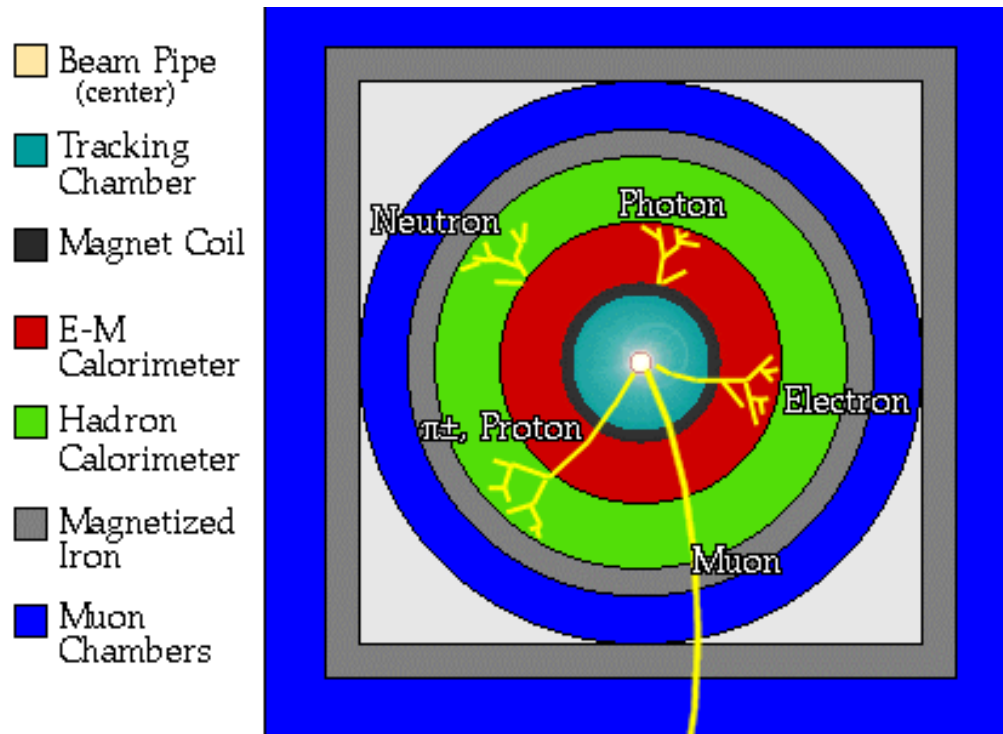
Impulzus mérés



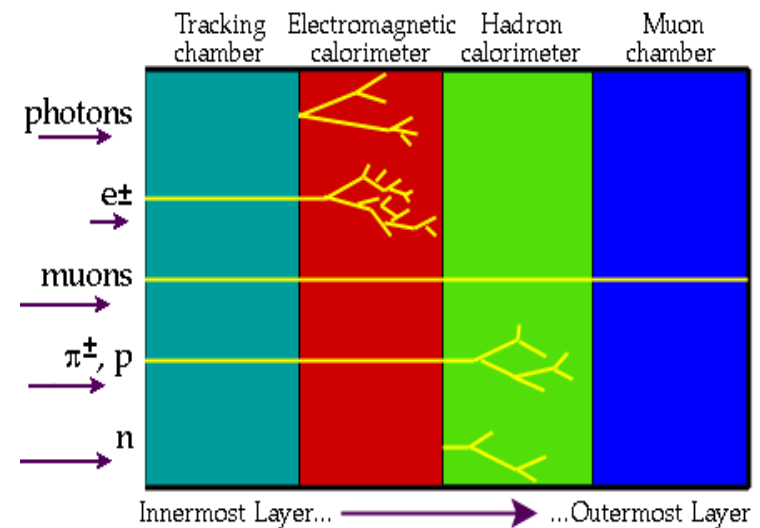
$$F = qv \times B = m \frac{v^2}{r} \Rightarrow r = \frac{mv}{qB}$$

RÉSZECSCKE DETEKTOROK

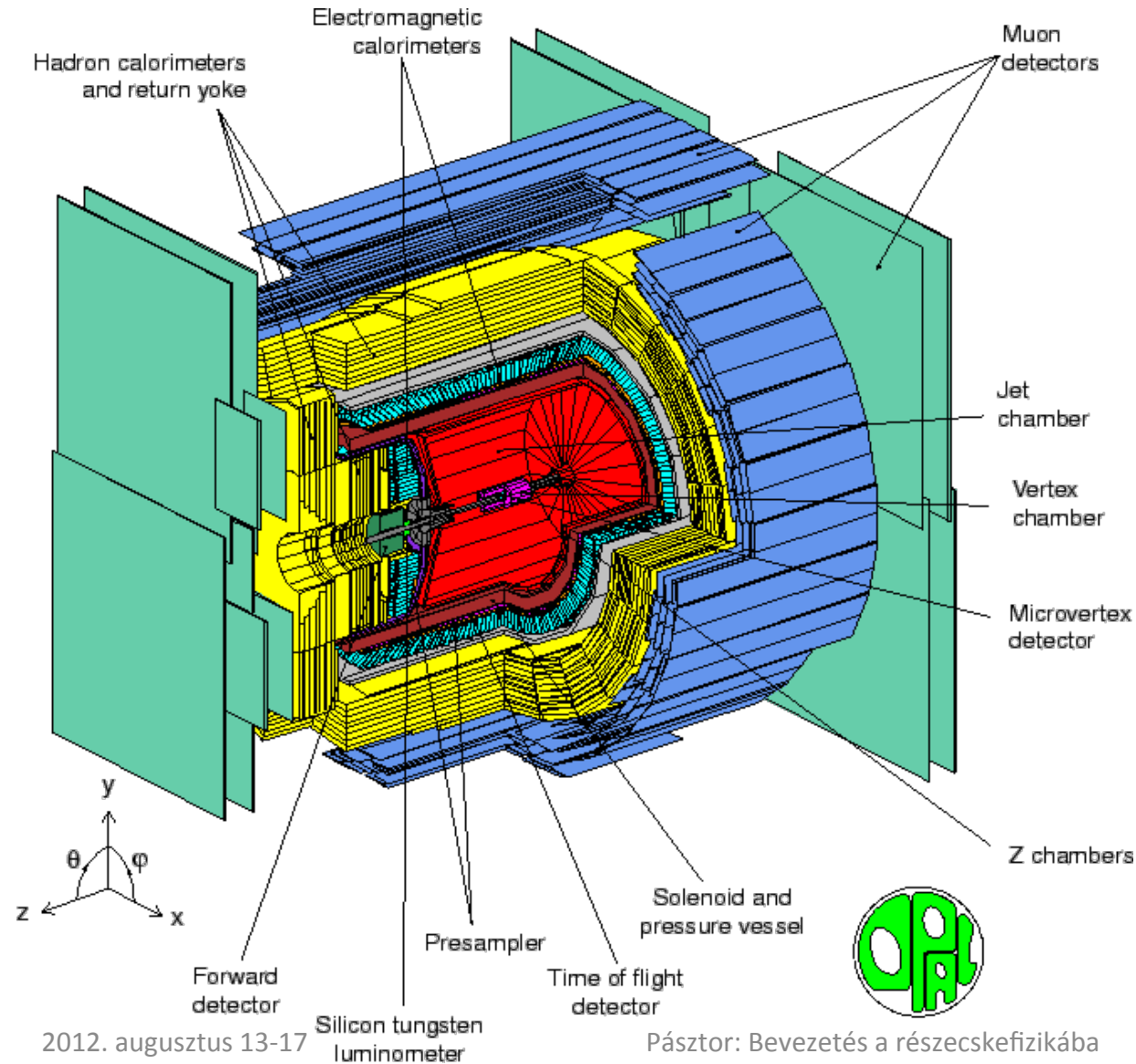
Detektor metszet, részecske nyomokkal



Részecskék nyoma a detektorban



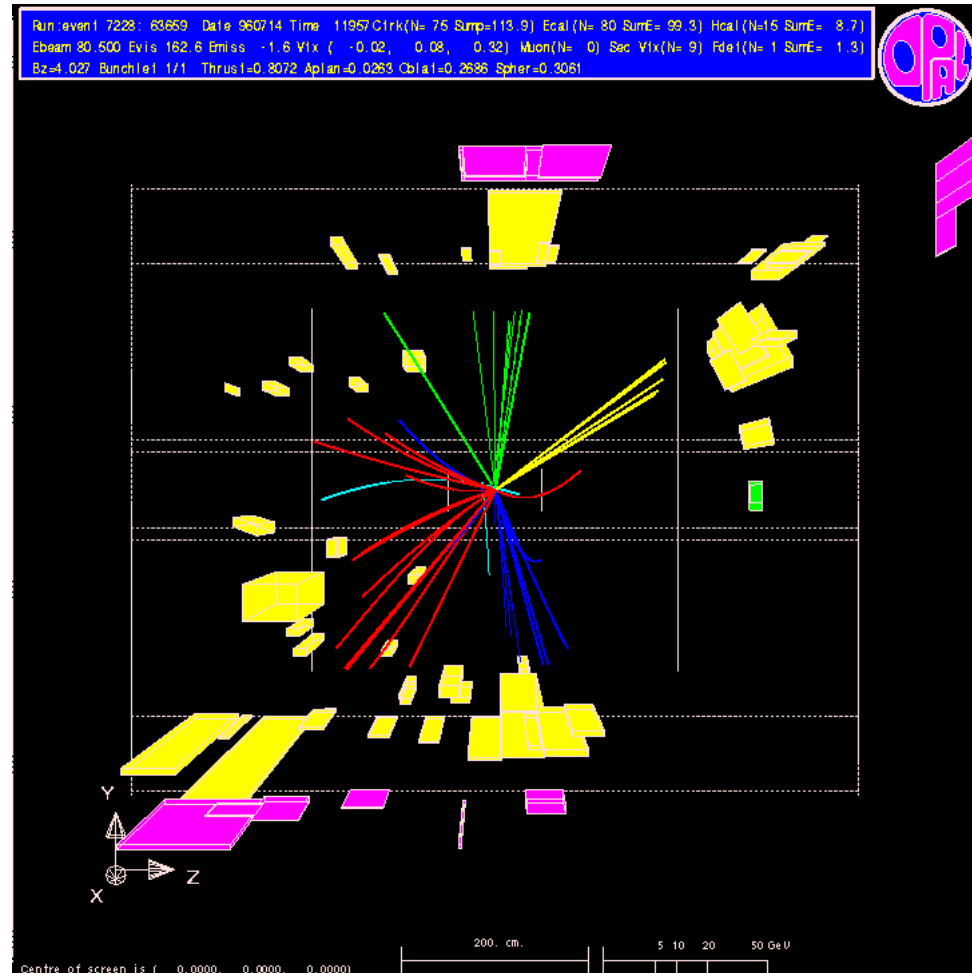
A NÉHAI OPAL DETEKTOR



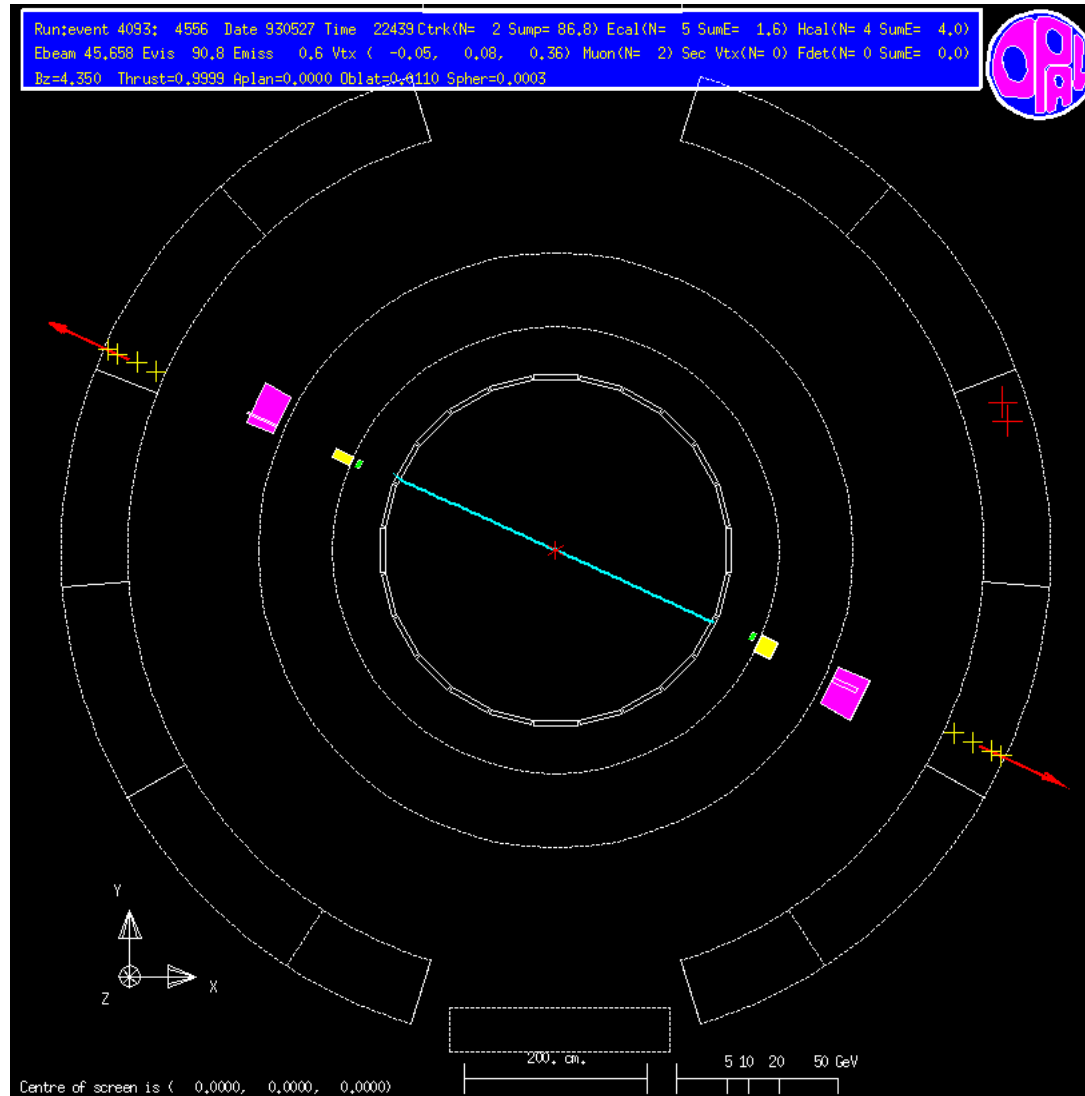
- LEP gyorsító 4 sok-célú detektorának (ALEPH, DELPHI, L3, OPAL) egyike
- Adatgyűjtés: 1989-2000
- Méret: 12 m x 12m x 12m

LEP

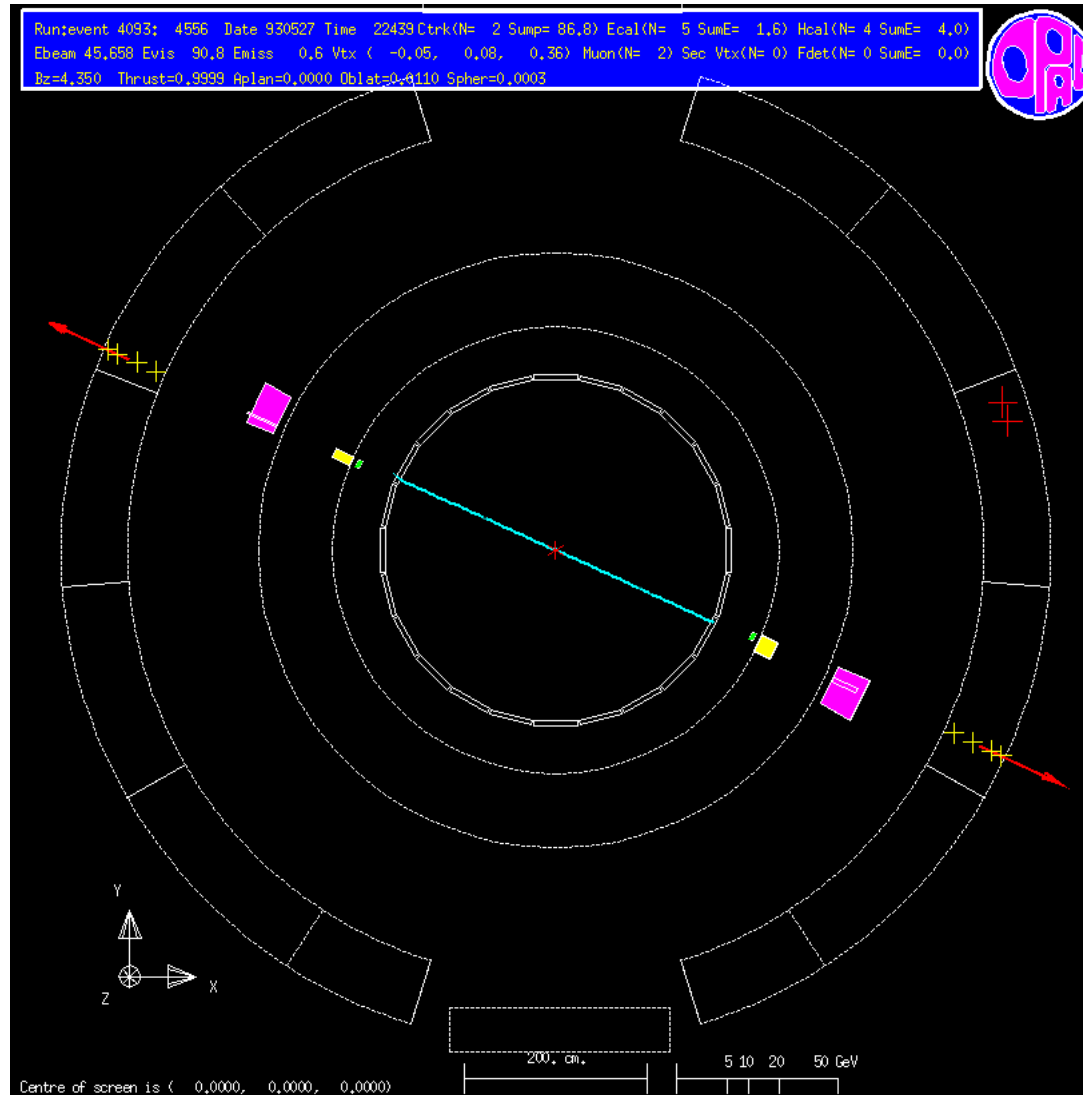
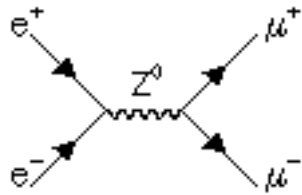
- LEP1, $\sqrt{s} \approx 91$ GeV:
 $e^+e^- \rightarrow Z \rightarrow ff$
- LEP2, $\sqrt{s} \approx 200$ GeV:
 $e^+e^- \rightarrow WW, ZZ, ff(\gamma), \dots$
- Pontszerű leptonok ütközése
- Tiszta események
- Tipikus LEP2 esemény:
 $e^+e^- \rightarrow WW \rightarrow qq\bar{q}\bar{q}$
- 4 hadron zápor
- <100 töltött részecske



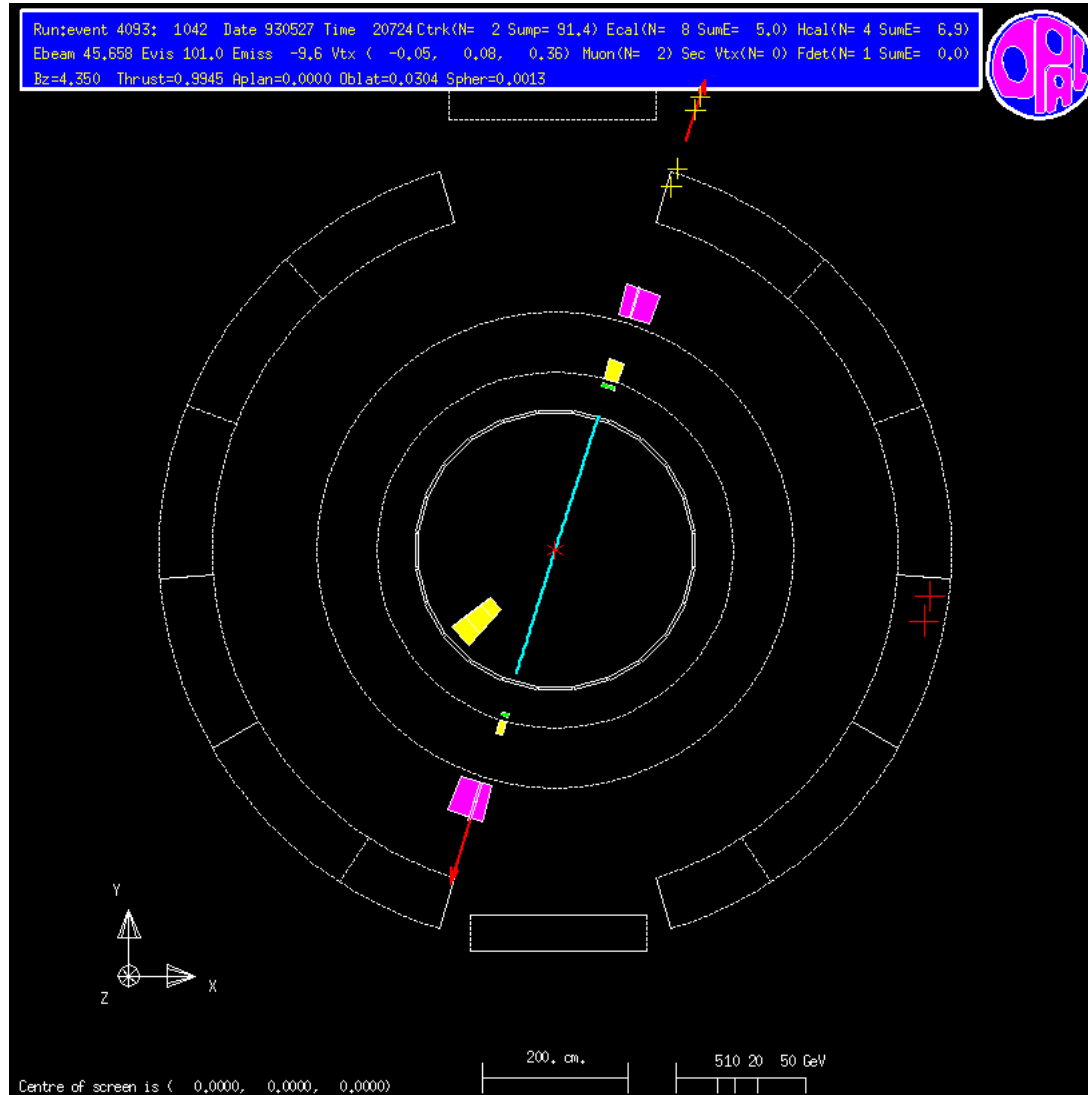
???



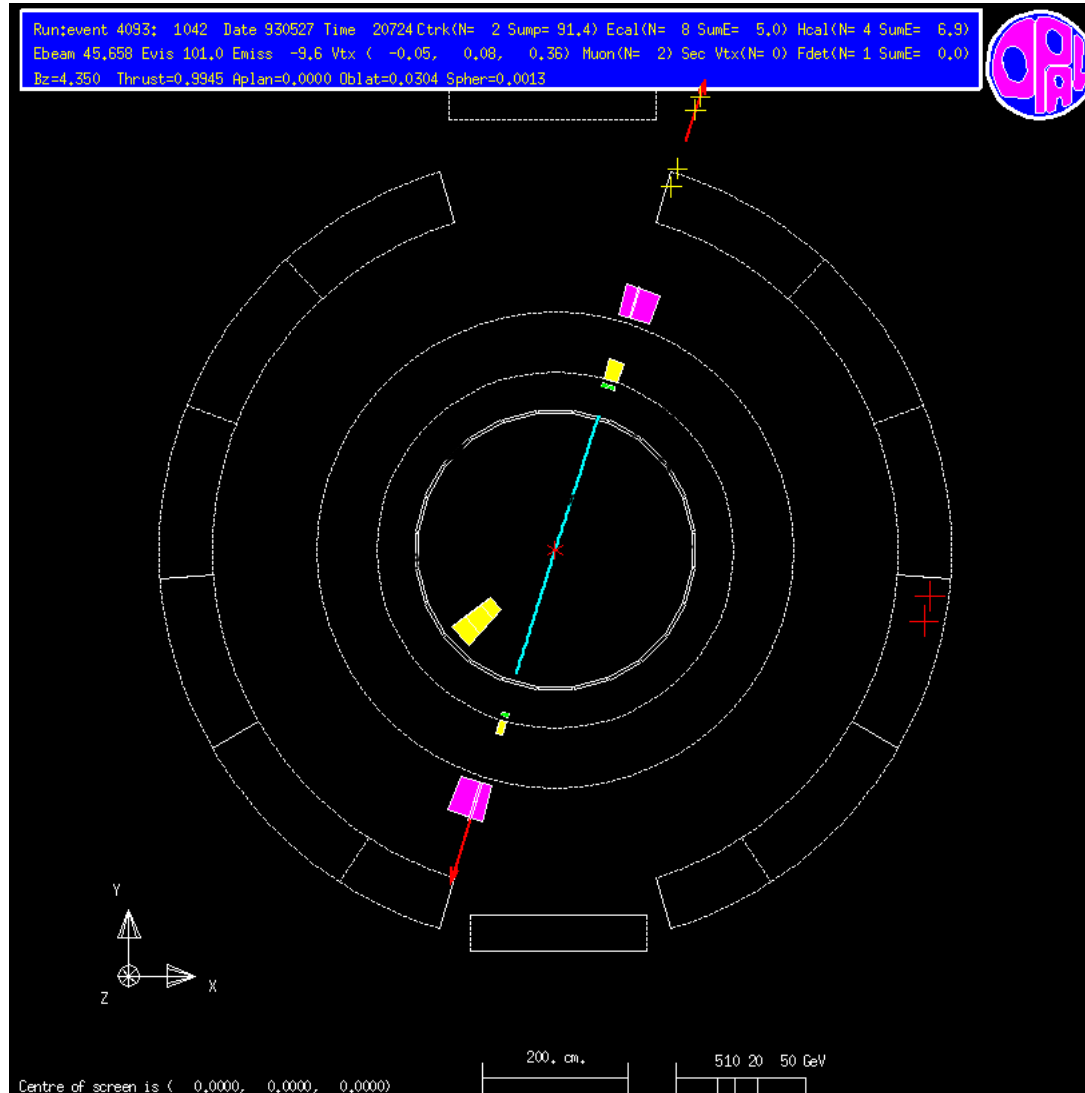
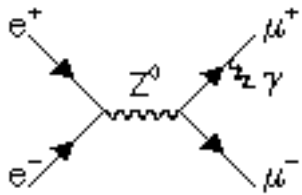
$Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$ AT LEP OPAL



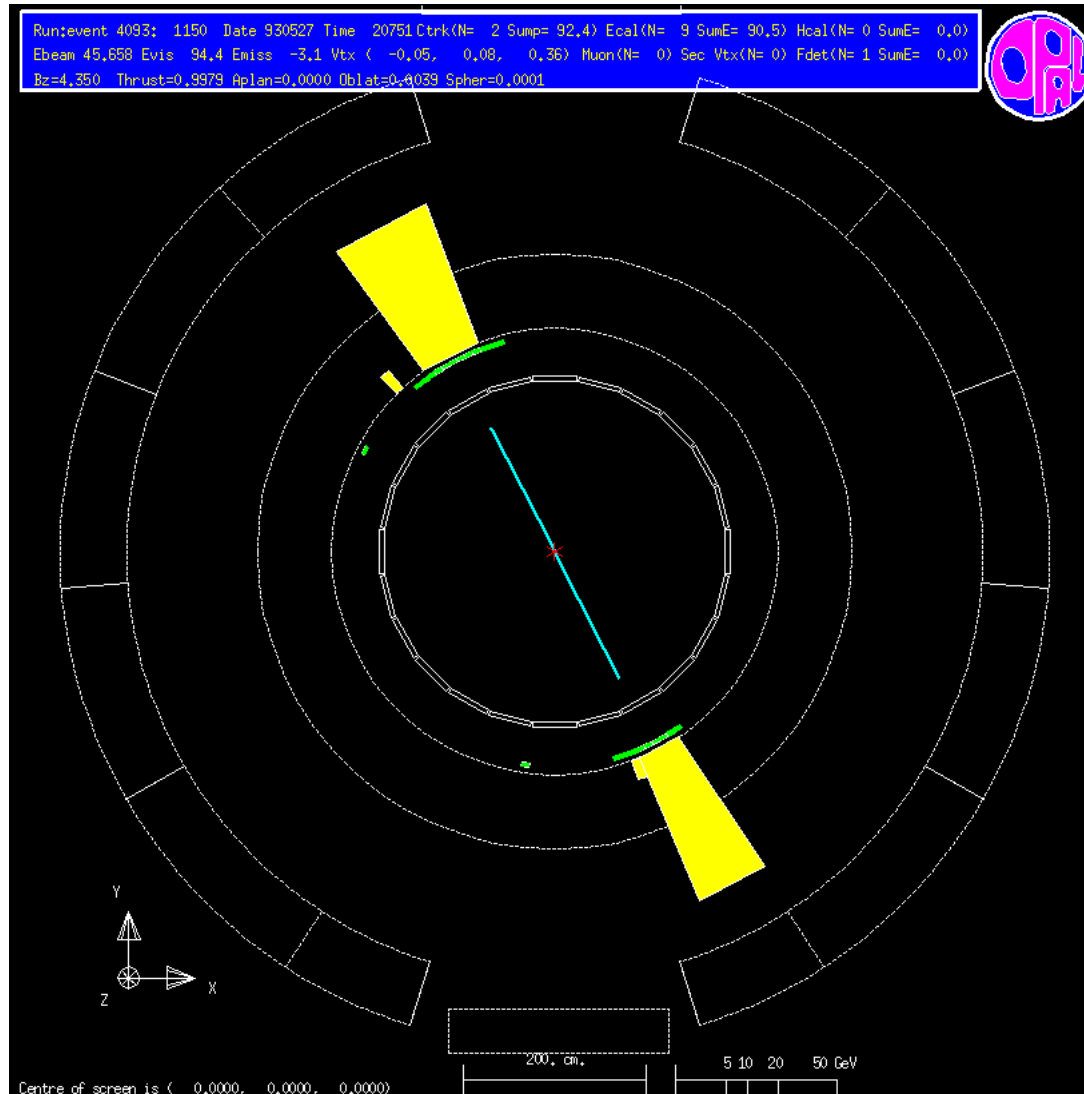
???



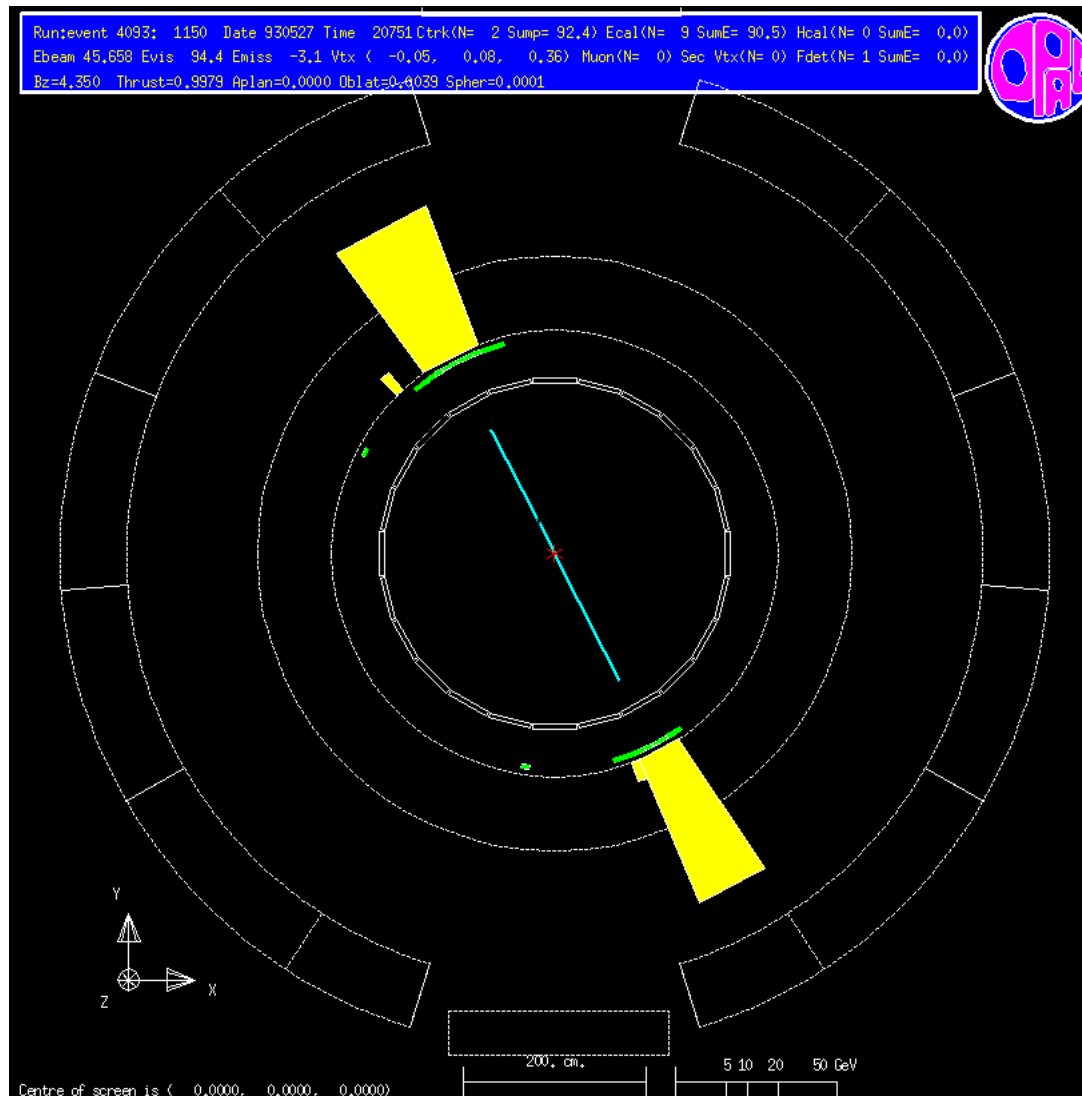
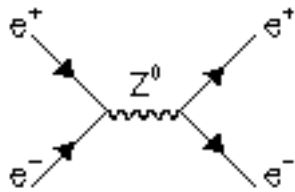
$Z \rightarrow \mu^+ \mu^- \gamma$ AT LEP OPAL



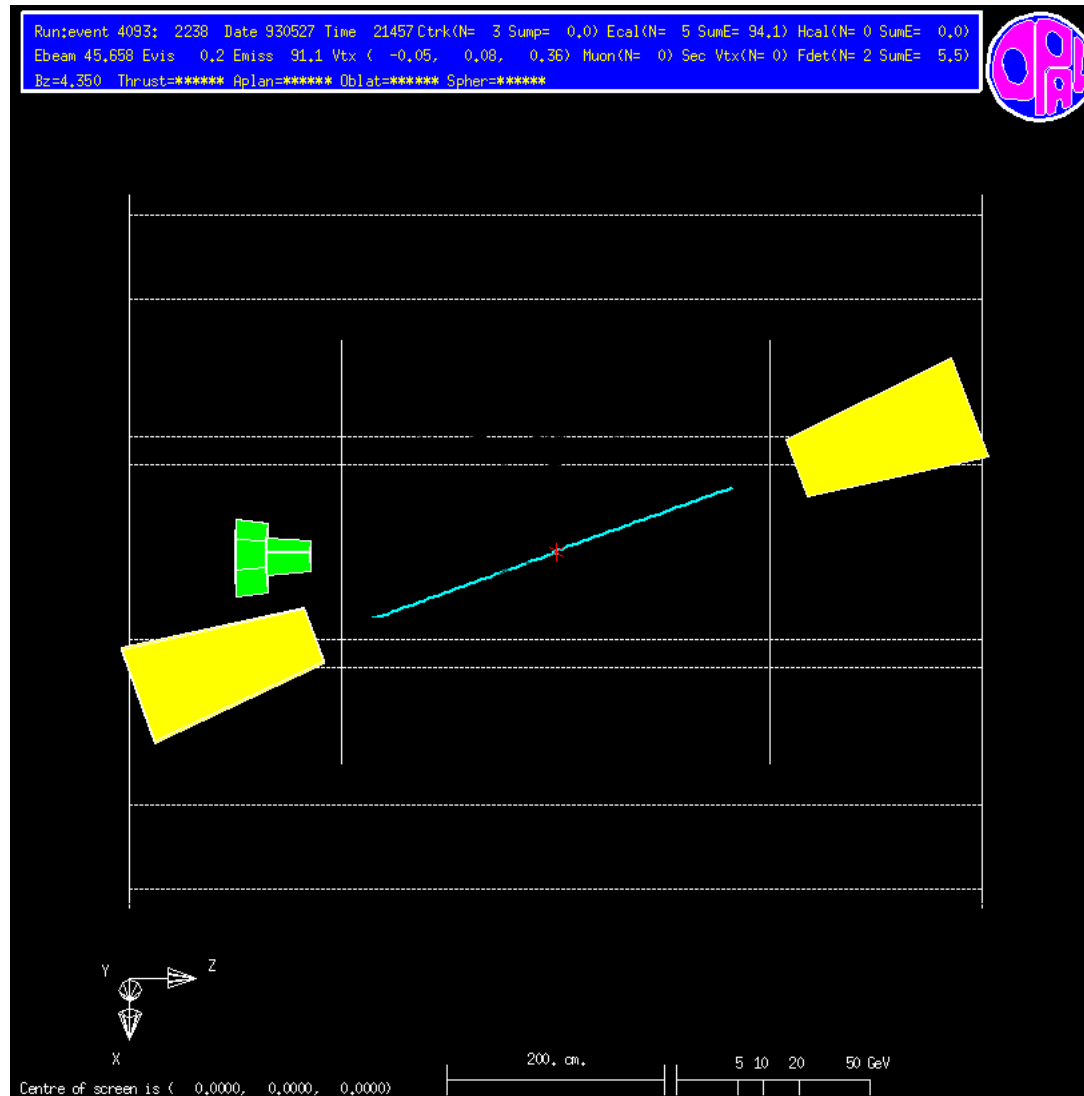
???



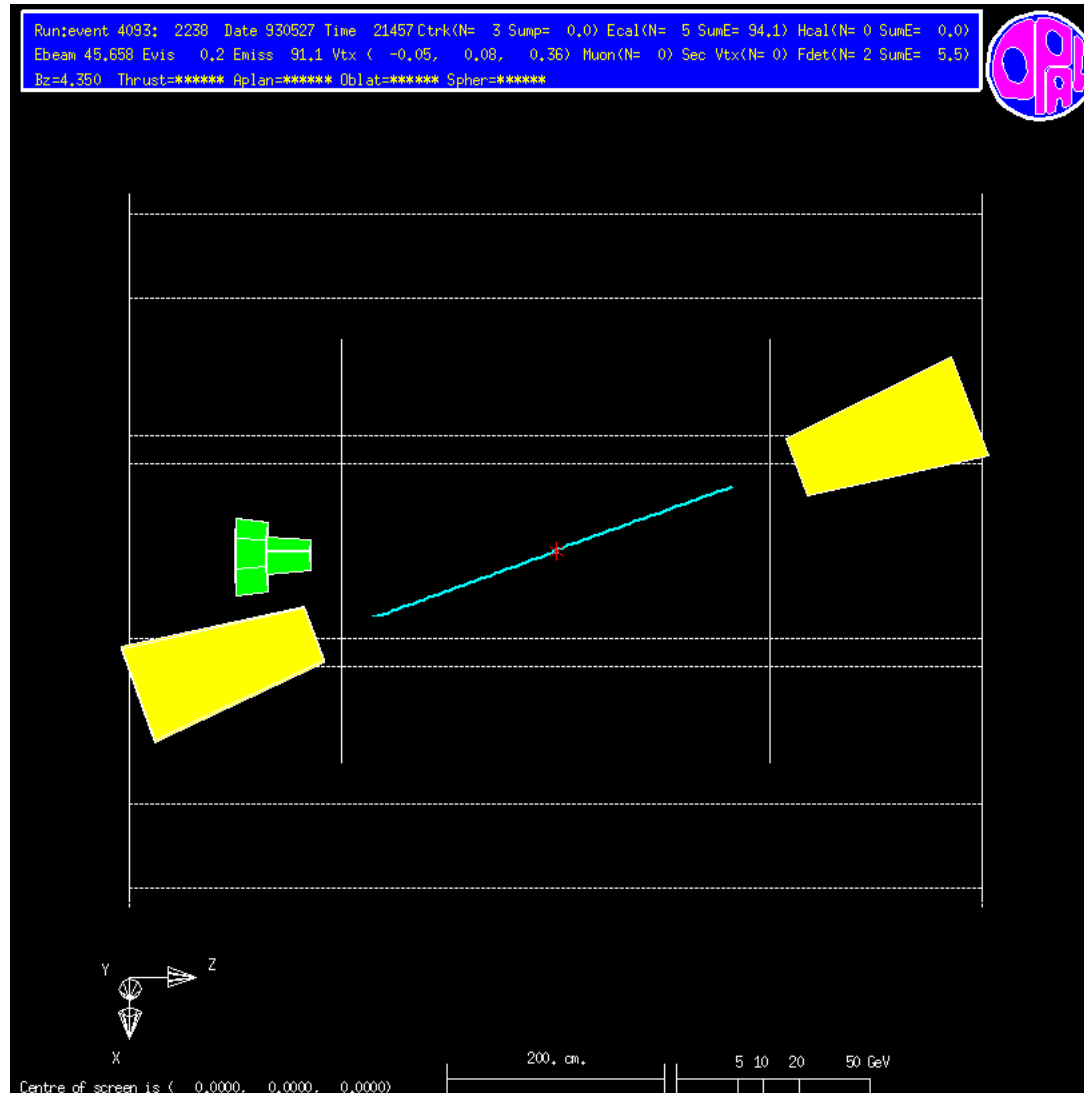
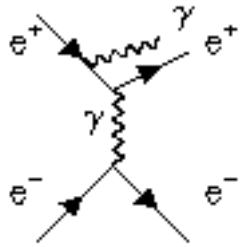
$Z \rightarrow e^+e^-$ AT LEP OPAL



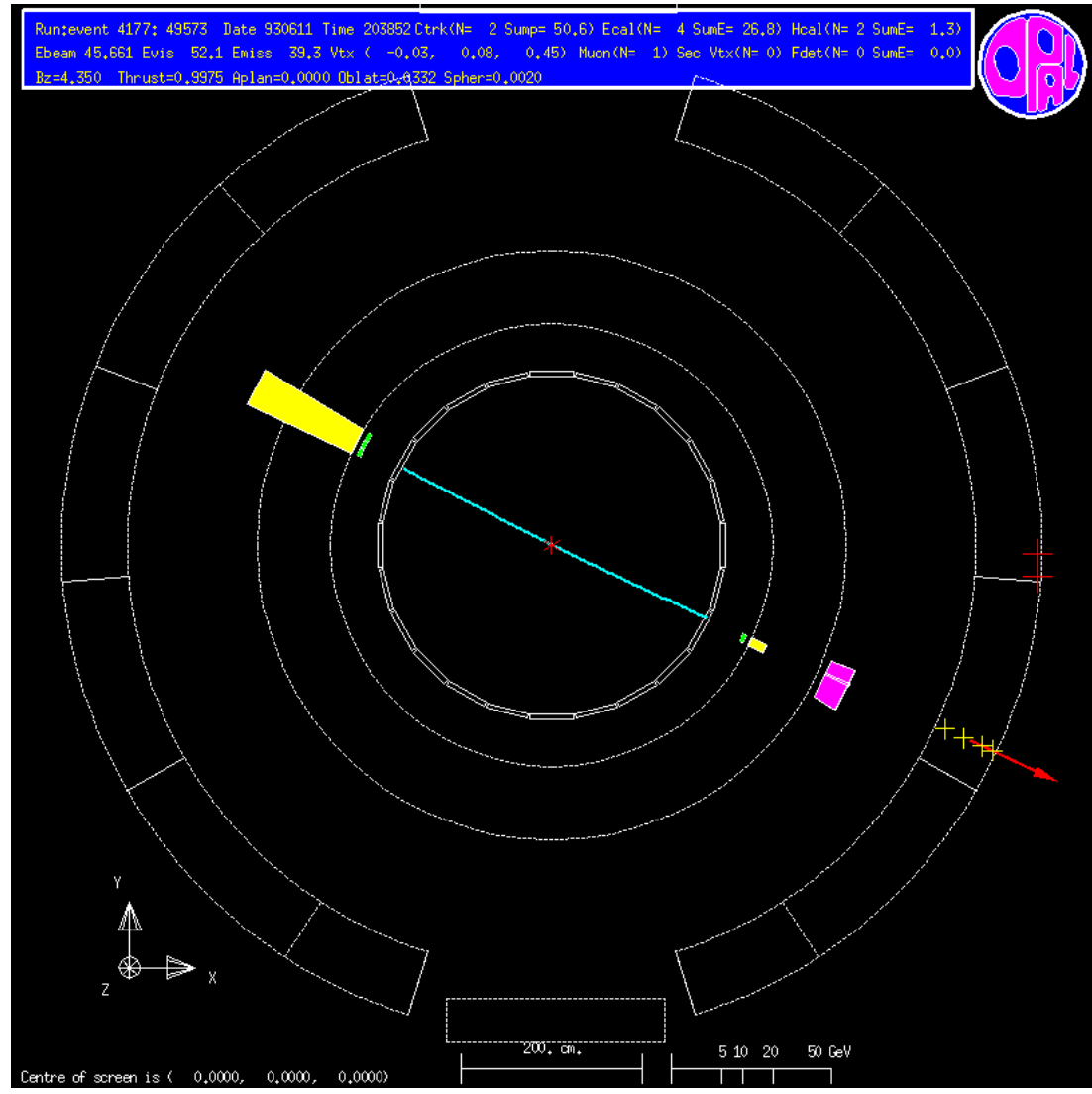
???



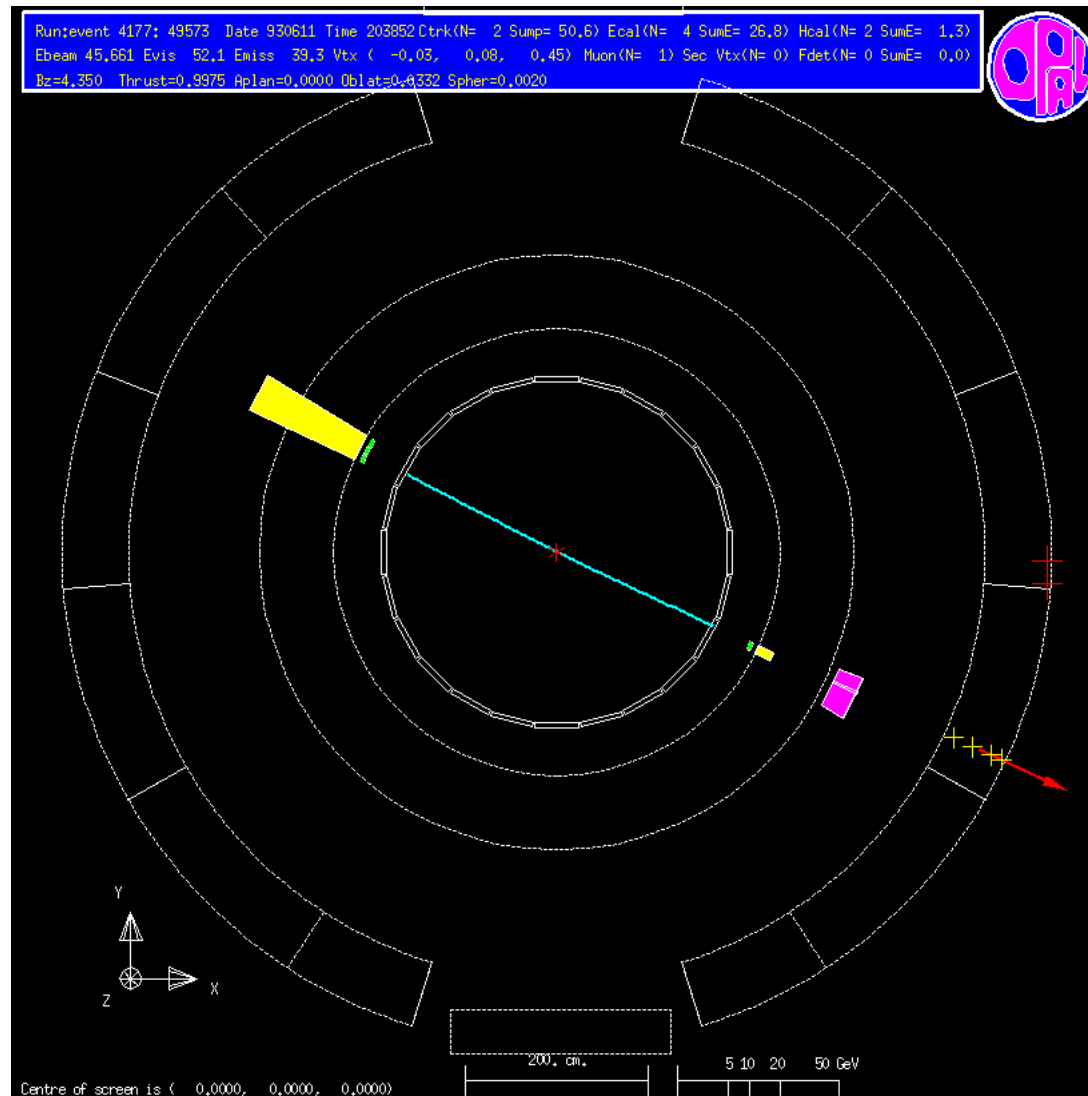
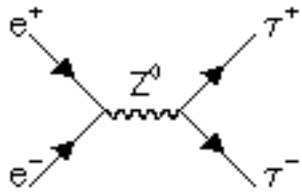
$Z \rightarrow e^+e^-\gamma$ AT LEP OPAL



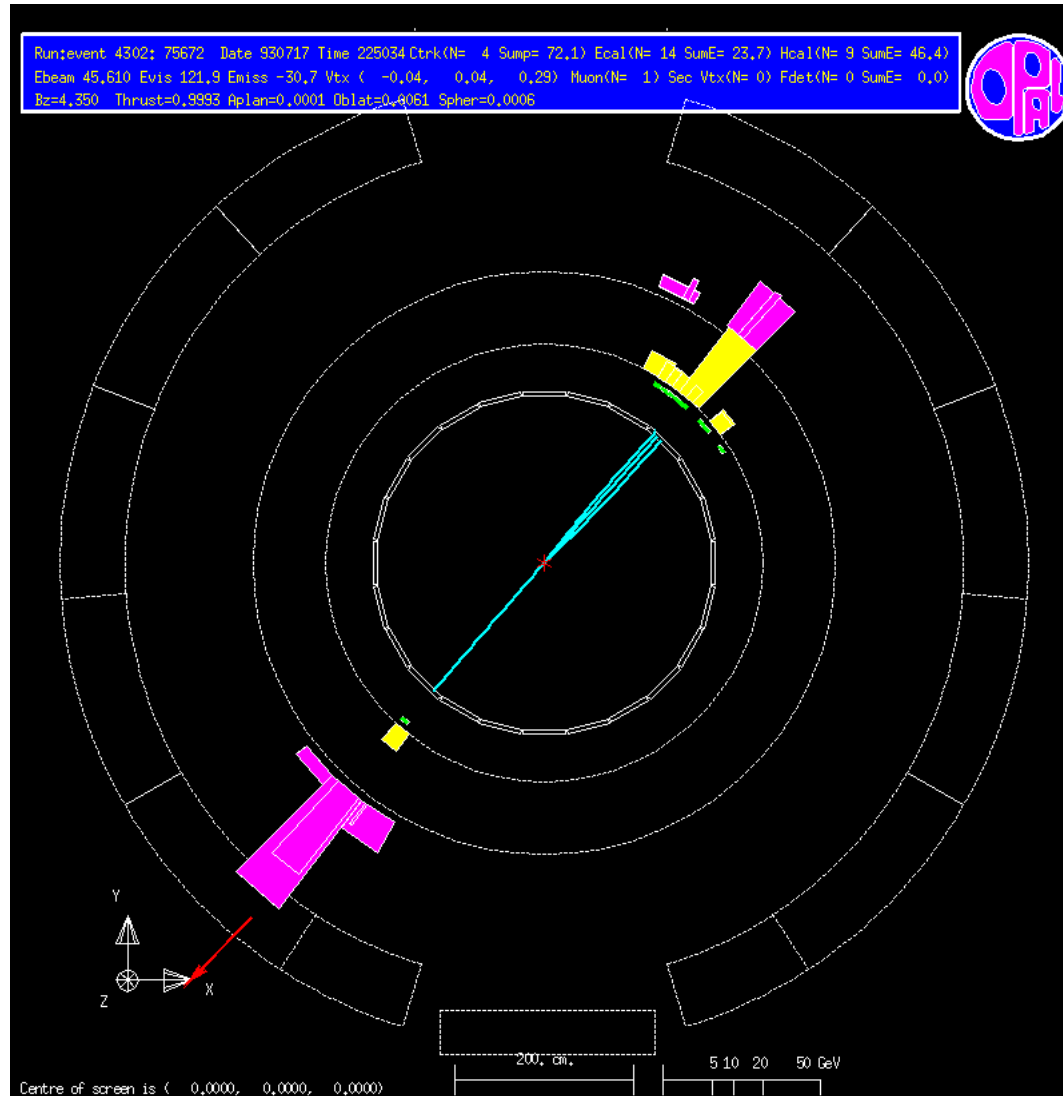
???



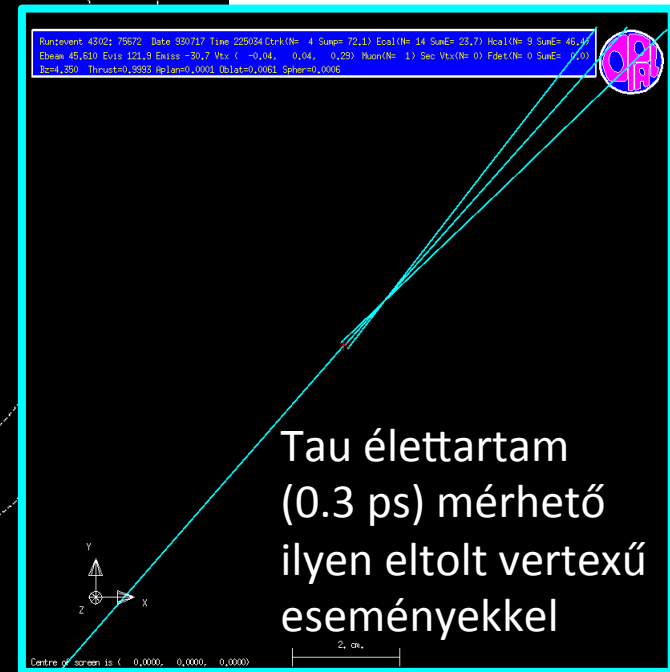
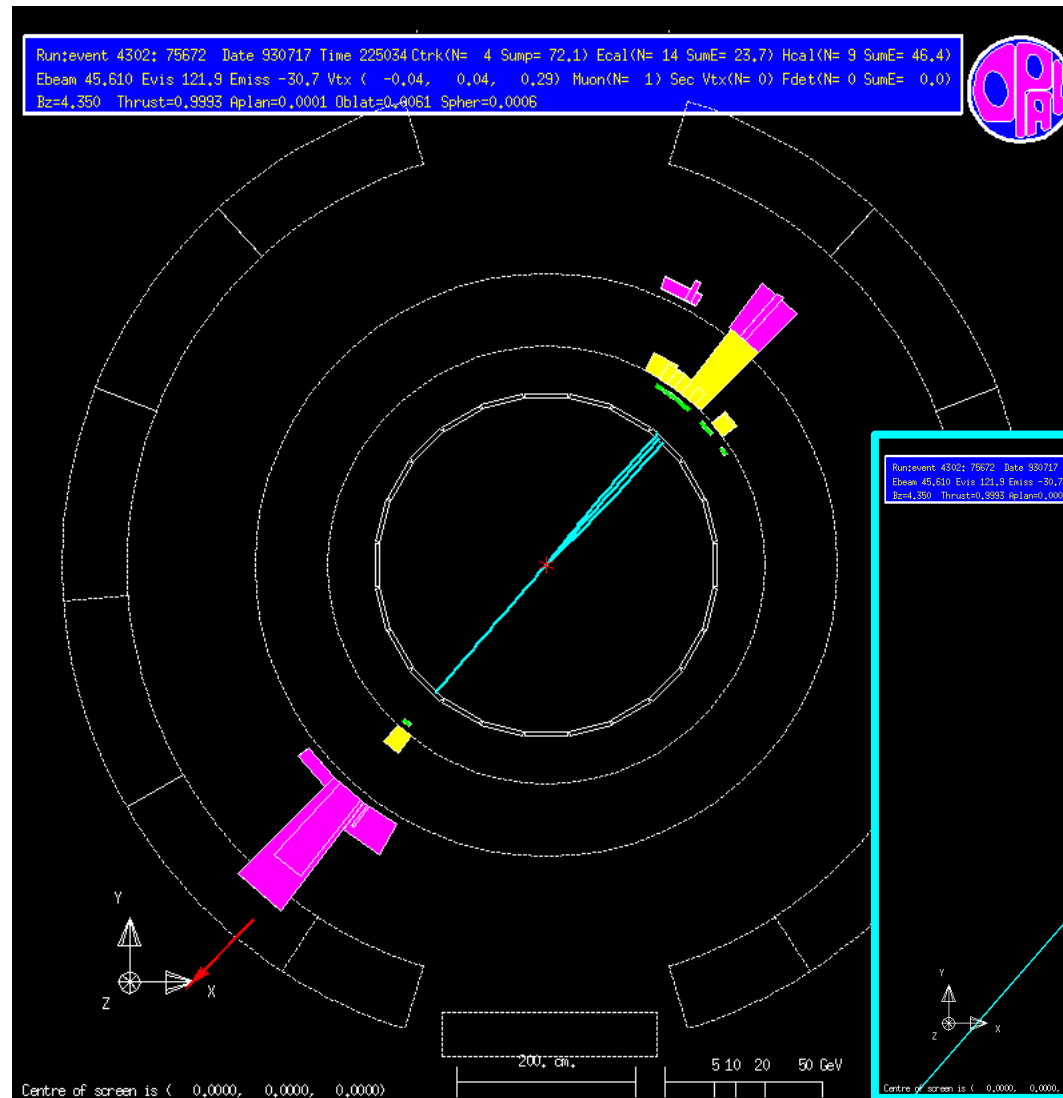
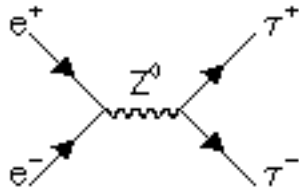
$Z \rightarrow \tau^+ \tau^- \rightarrow \mu^+ e^- + E_{\text{hiányzó}}$ AT LEP OPAL



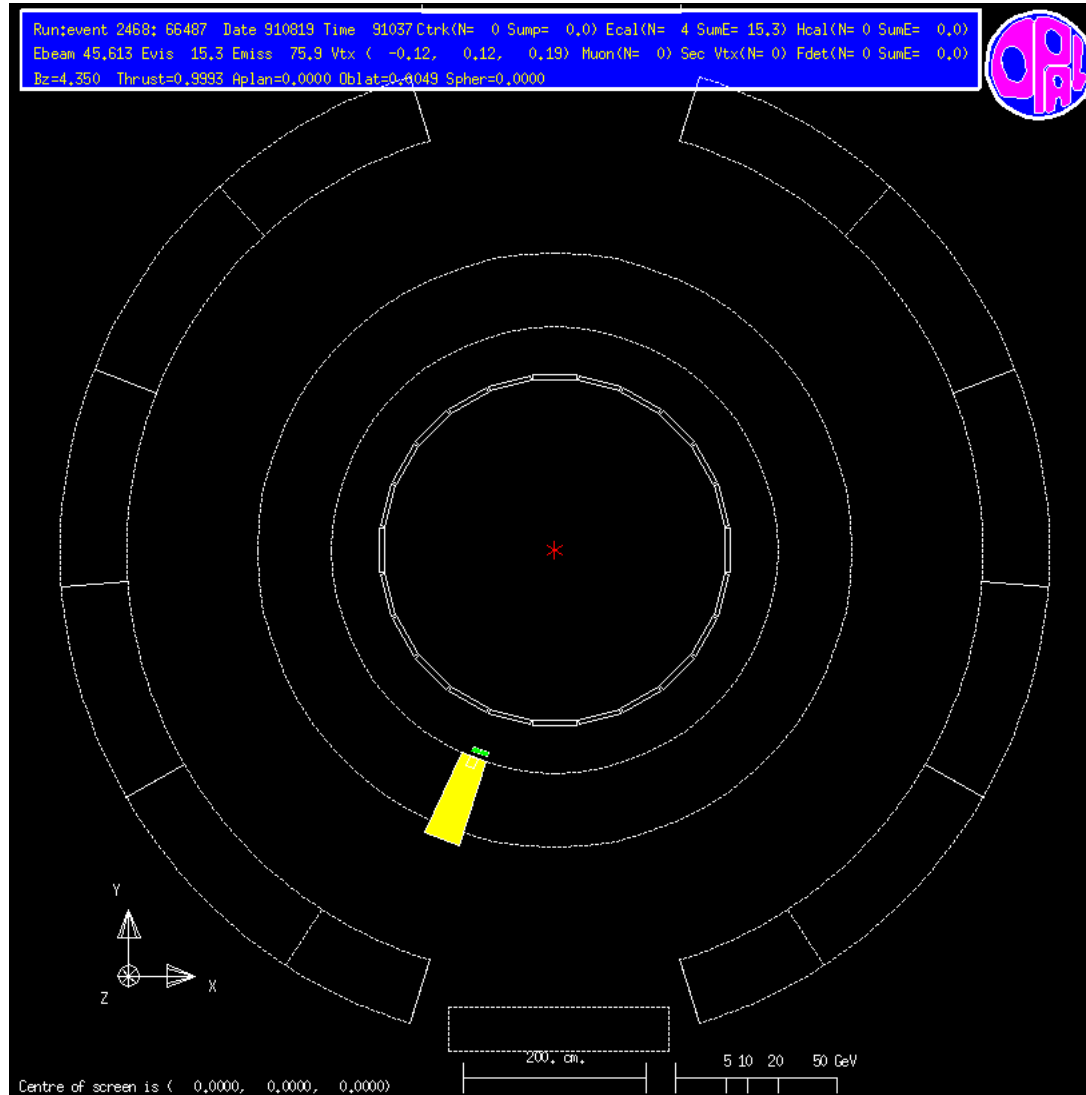
???



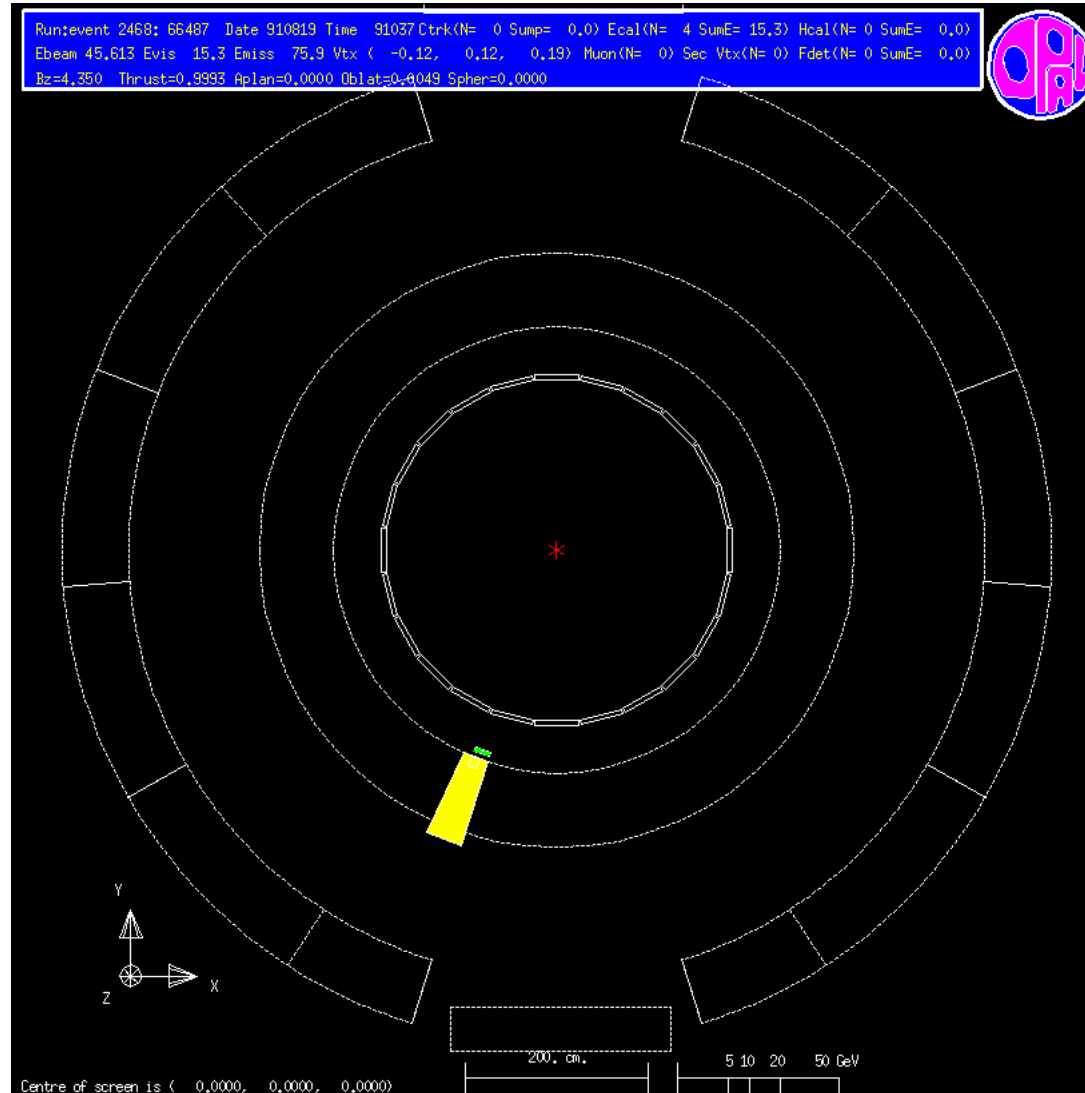
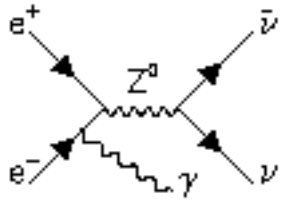
$Z \rightarrow \tau^+ \tau^- \rightarrow h^+ (h^- h^+ h^-) + E_{\text{hiányzó}}$ AT LEP OPAL



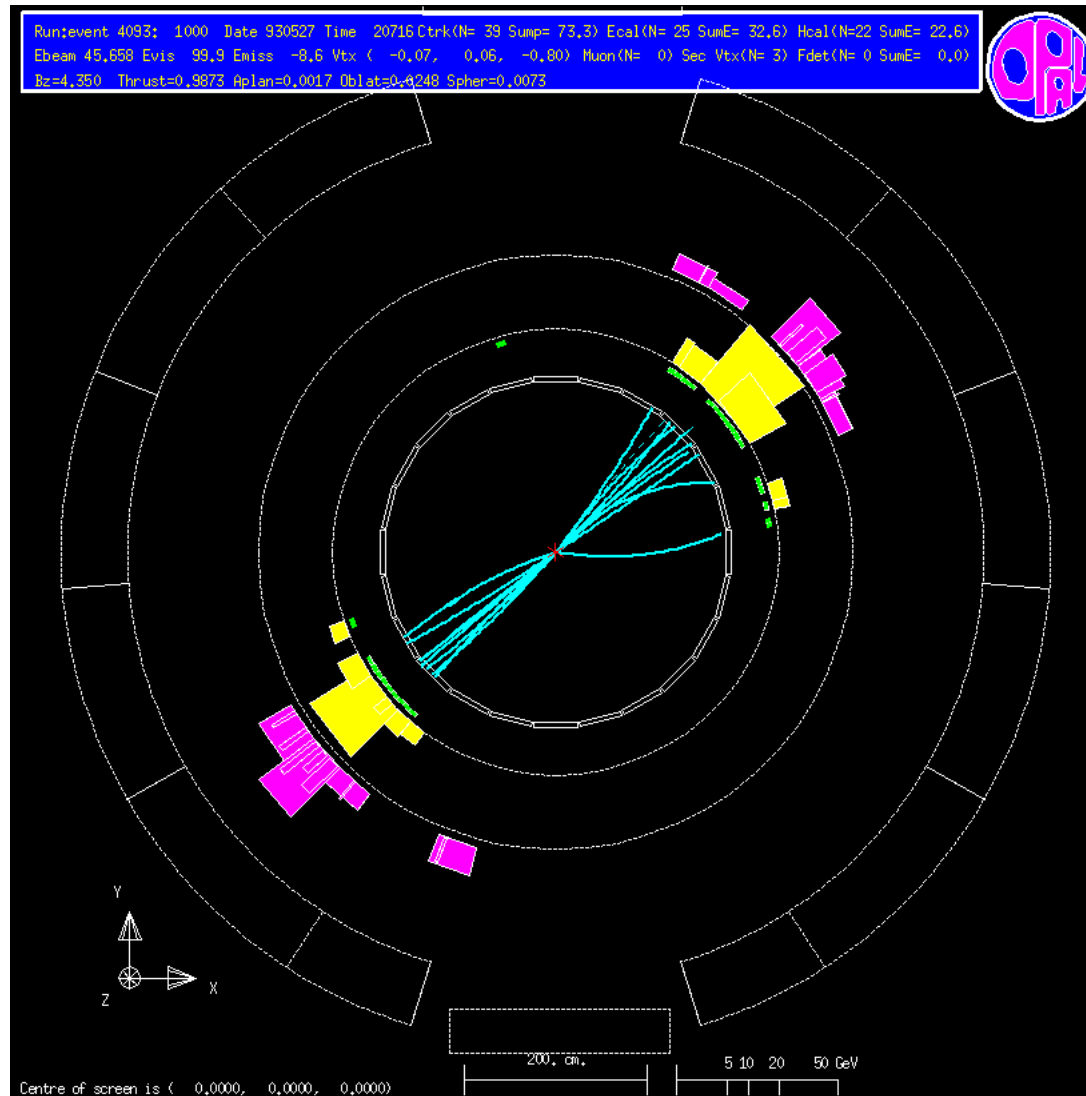
???



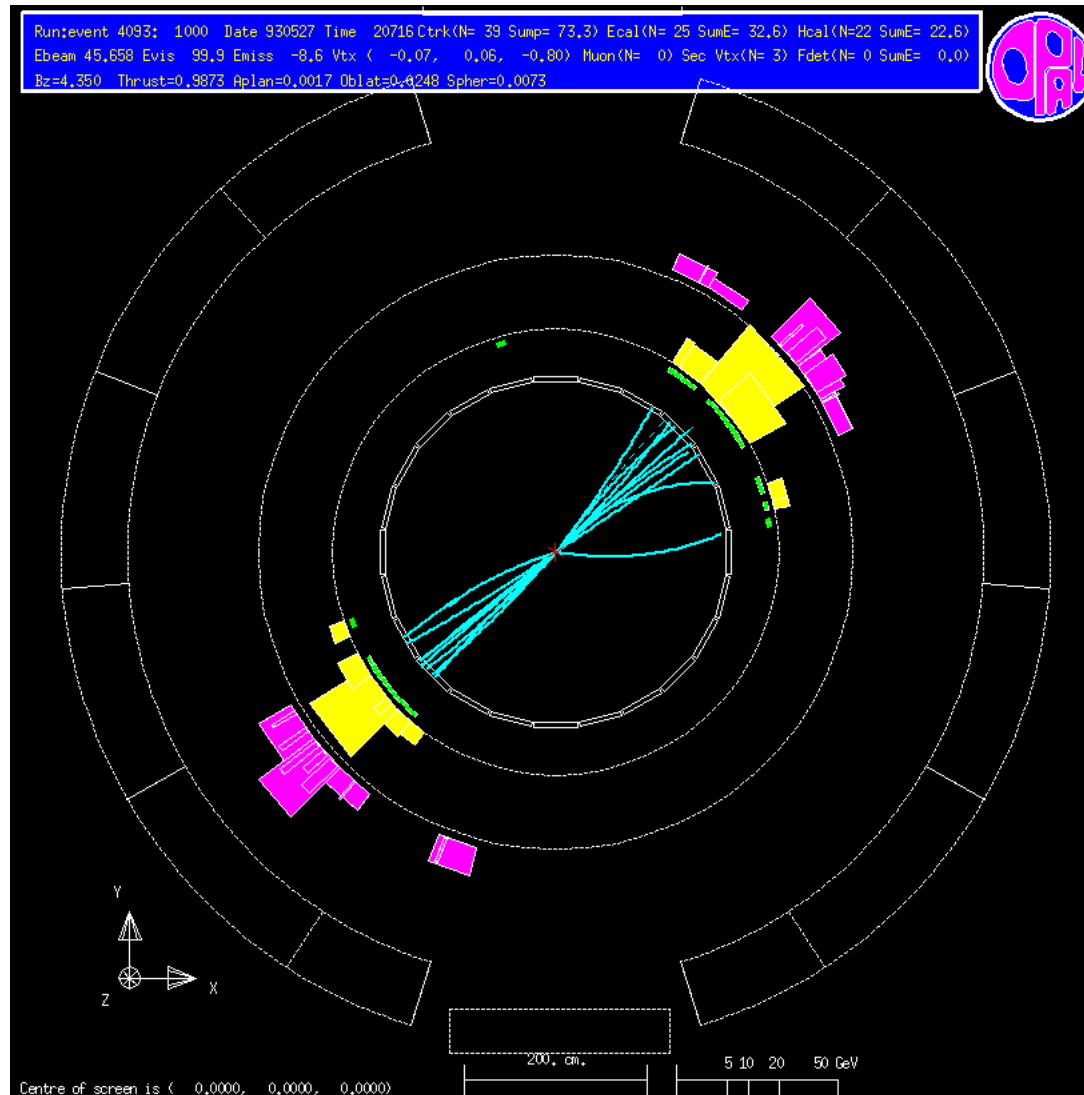
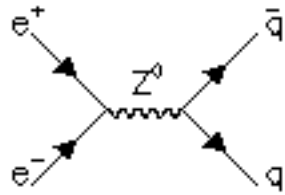
$Z \rightarrow \nu\nu\gamma$ AT LEP OPAL



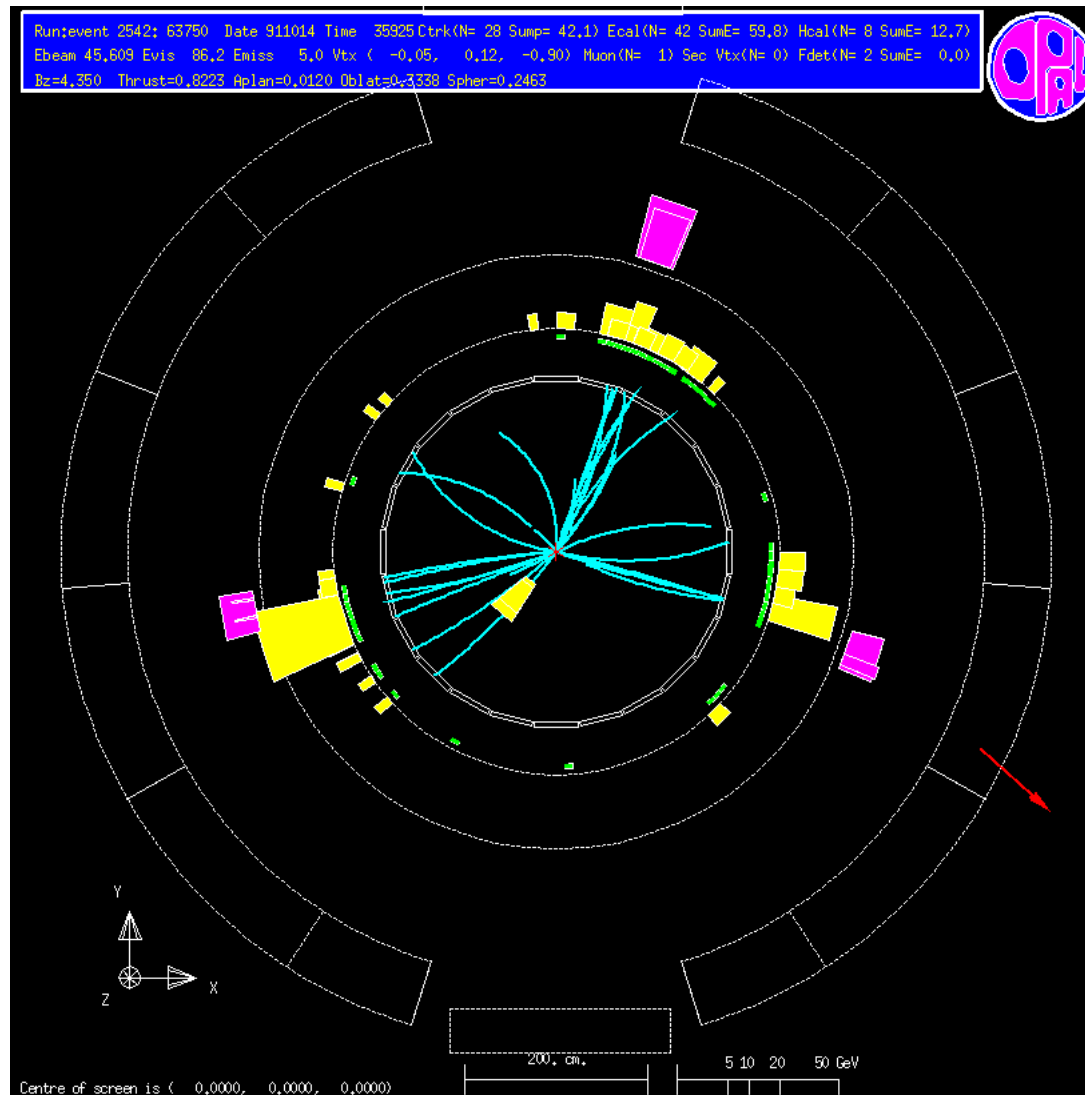
???



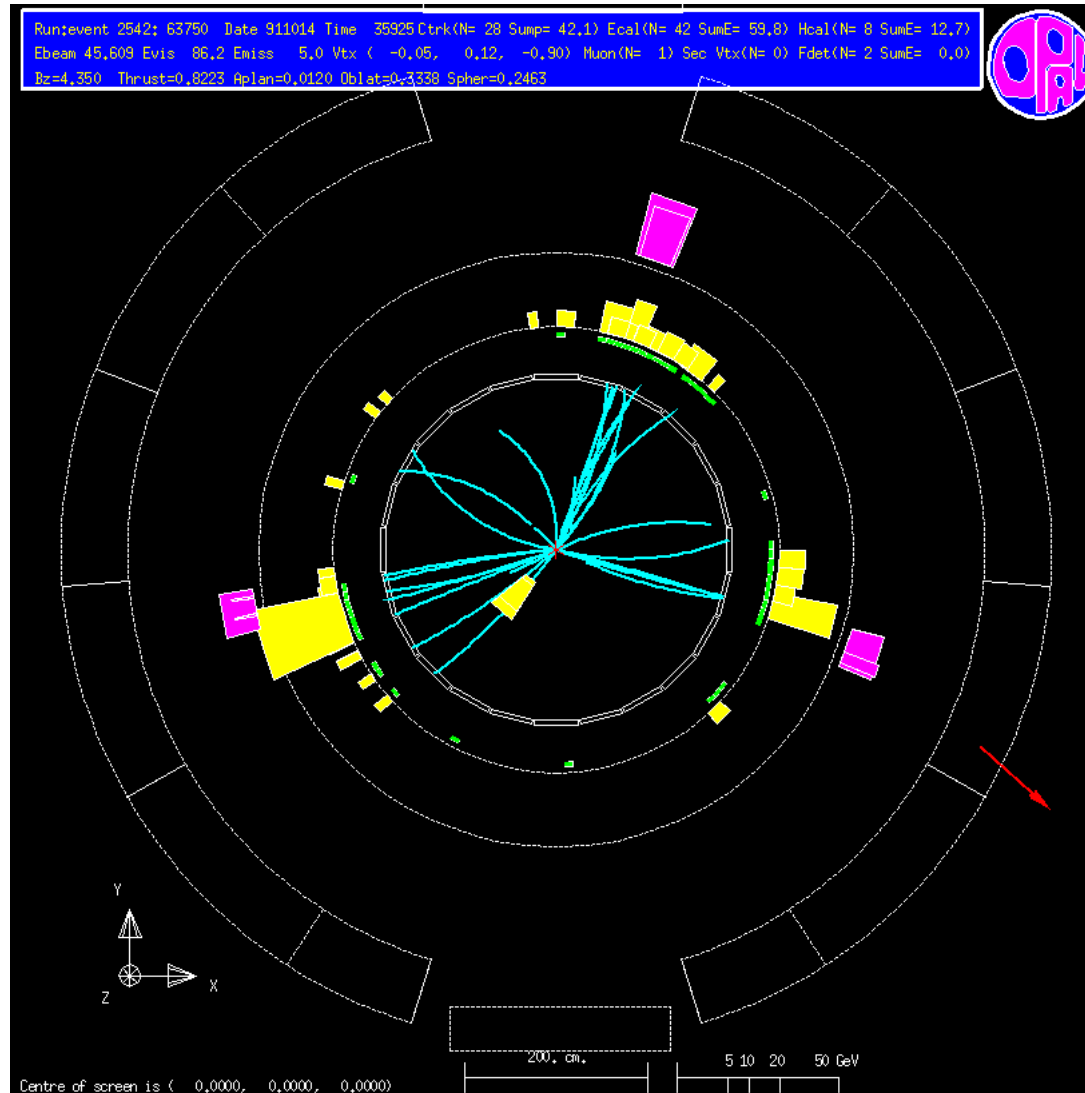
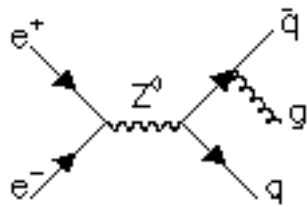
$Z \rightarrow qq$ AT LEP OPAL



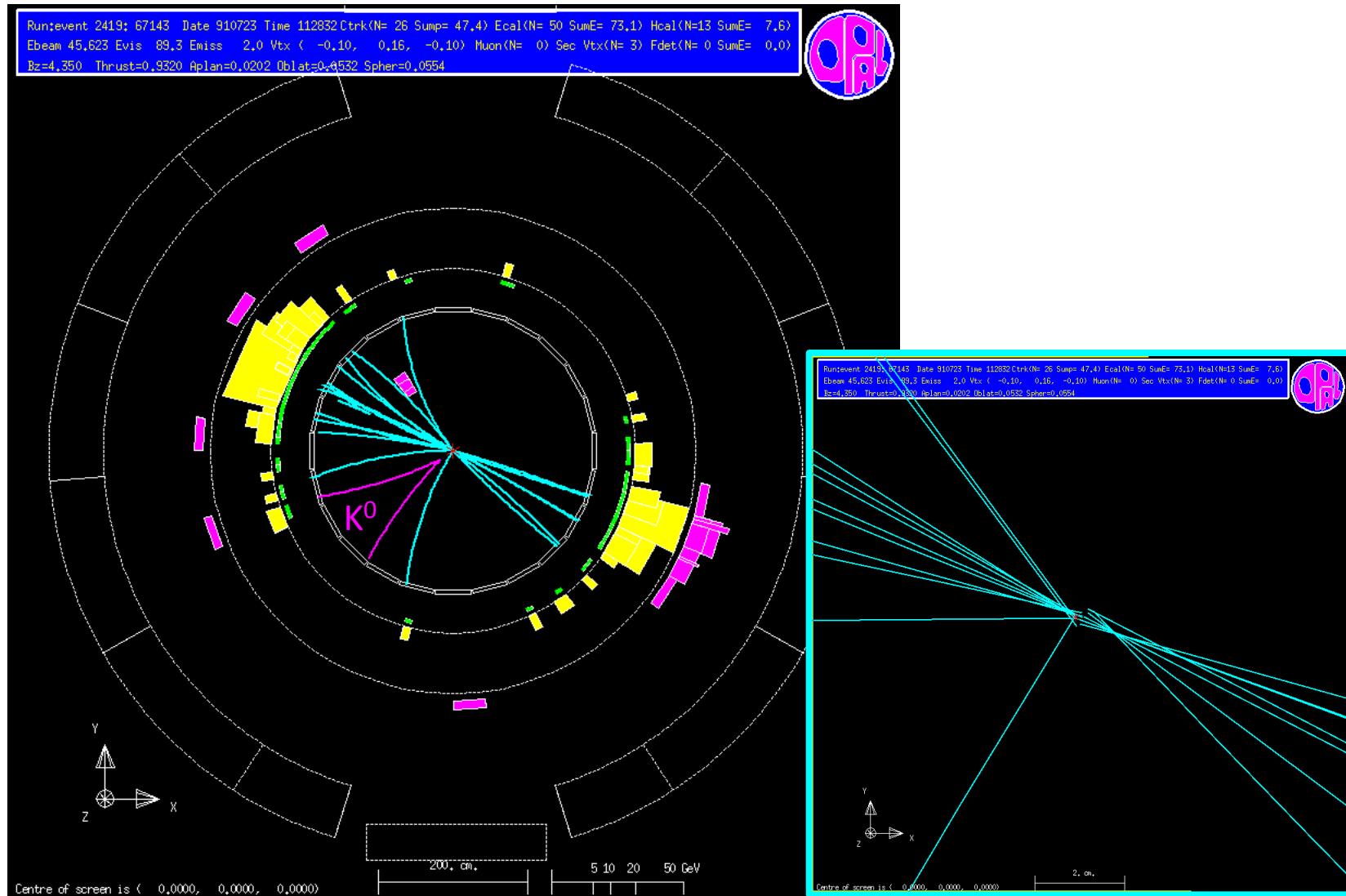
???



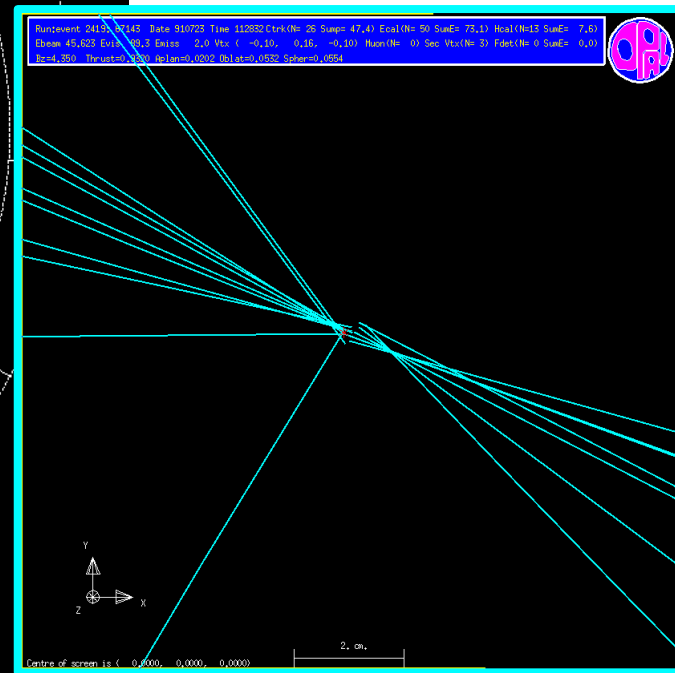
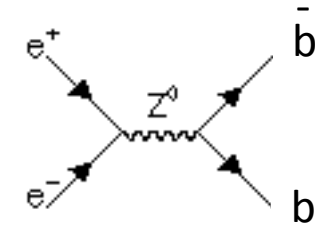
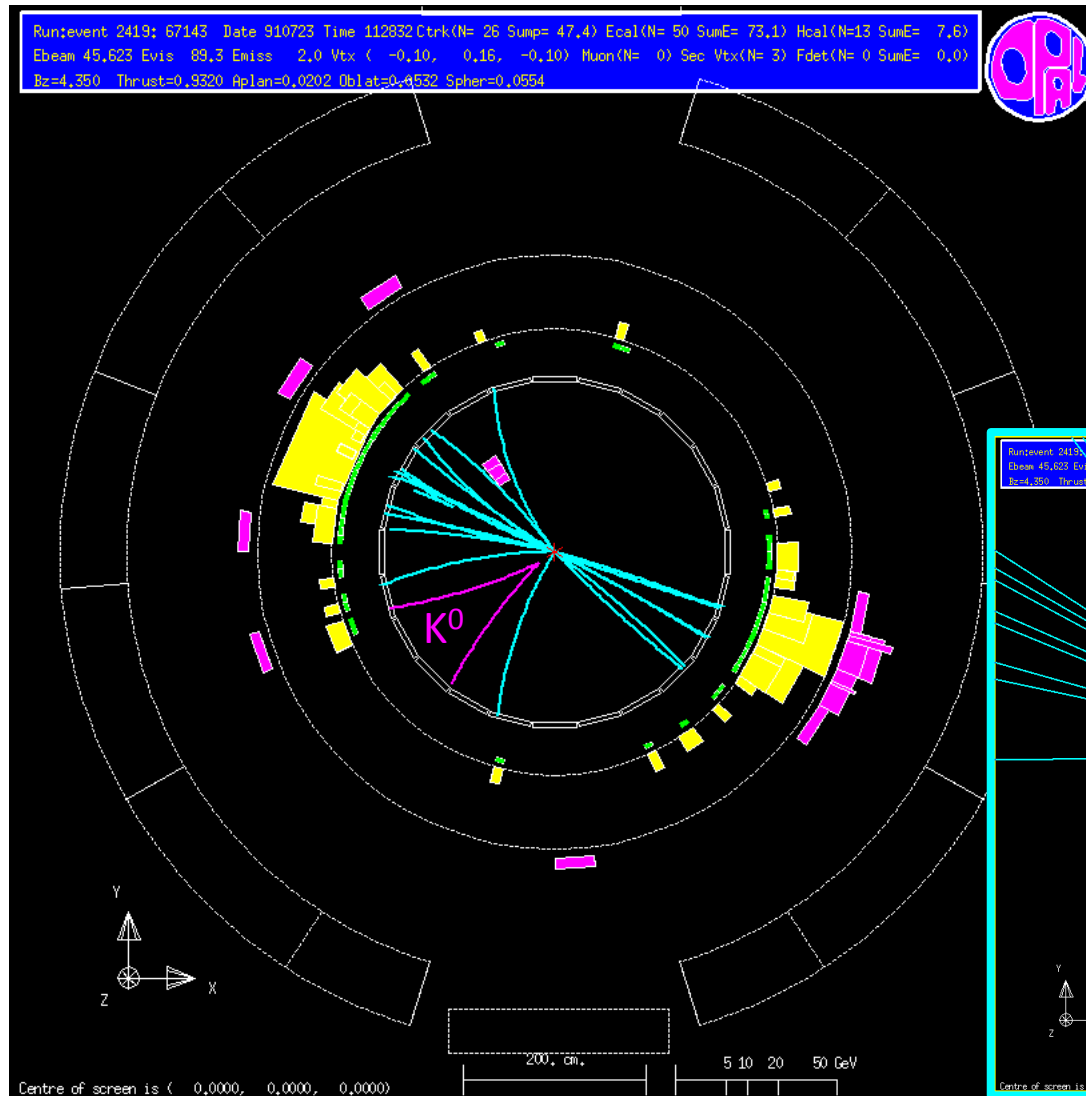
$Z \rightarrow qqg$ AT LEP OPAL



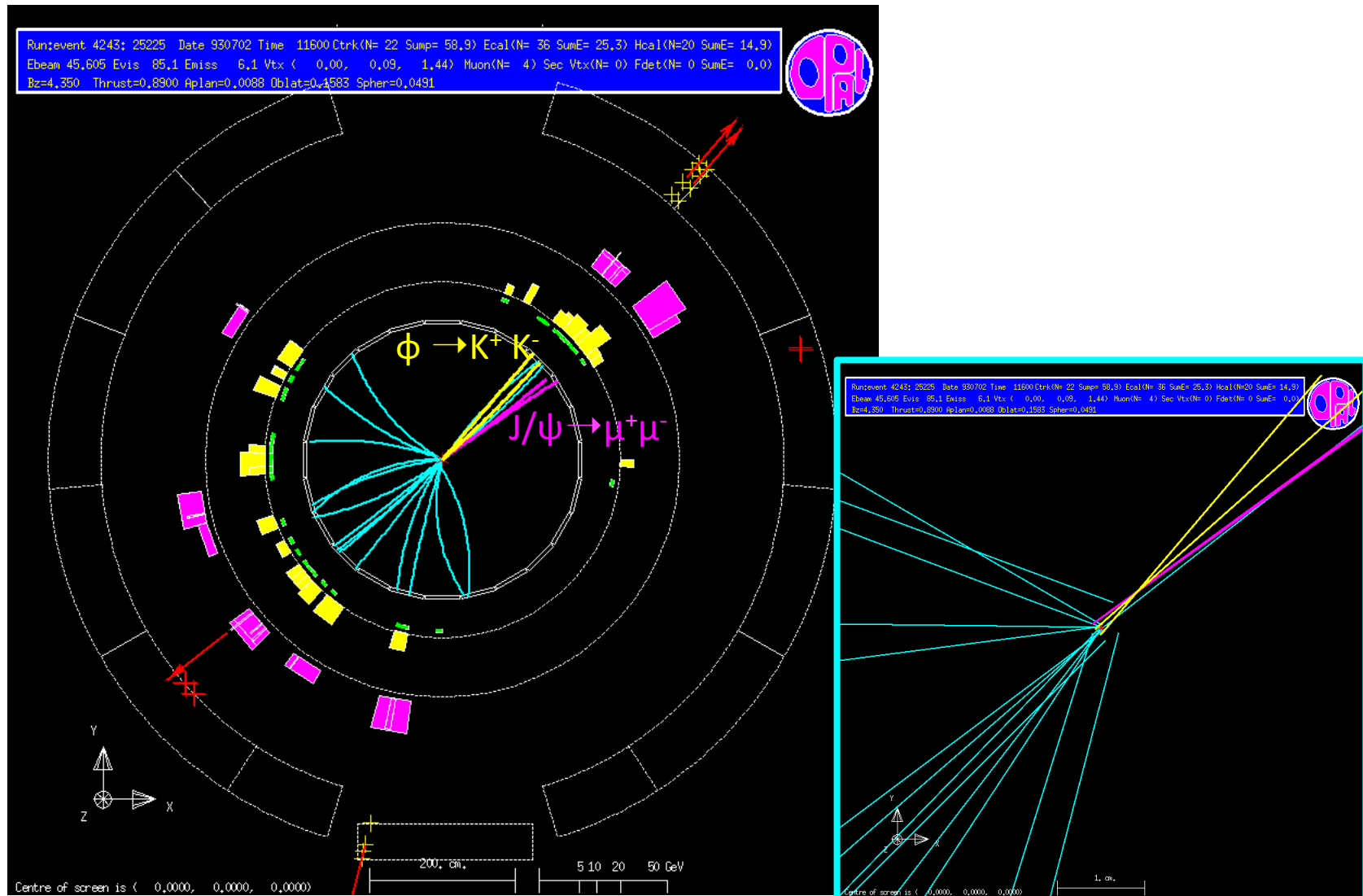
???



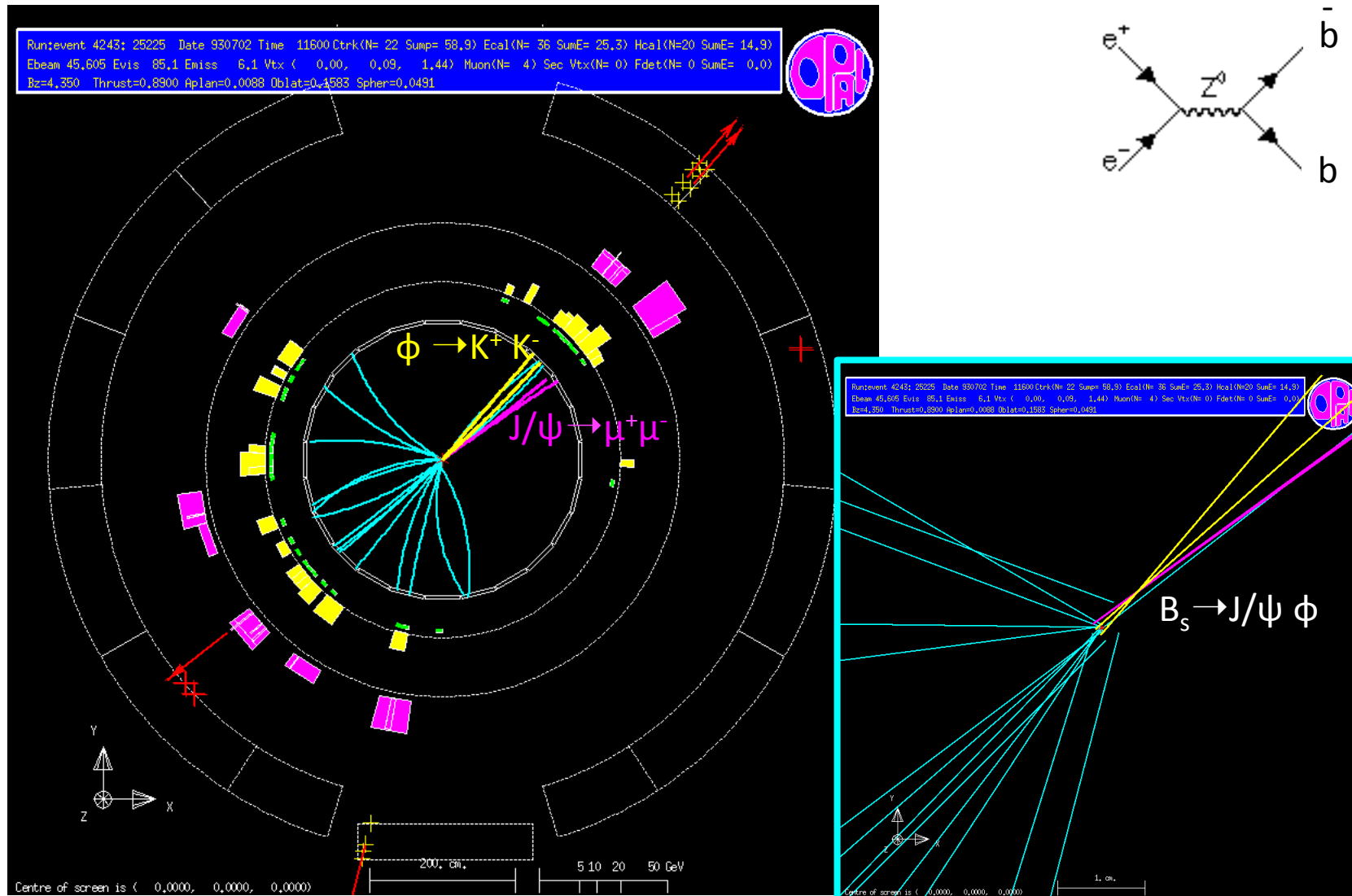
Z → bb AT LEP OPAL



???

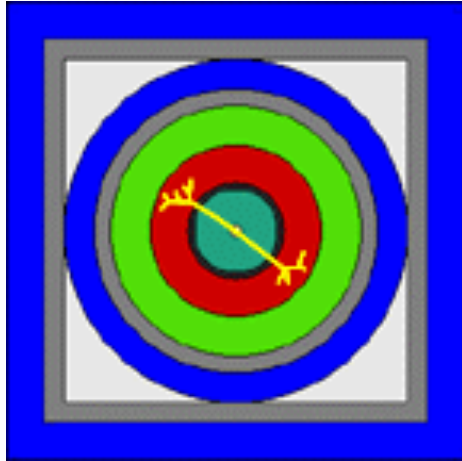


Z → bb AT LEP OPAL

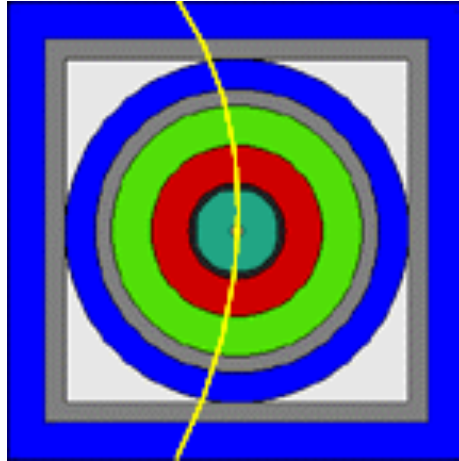


EXTRA

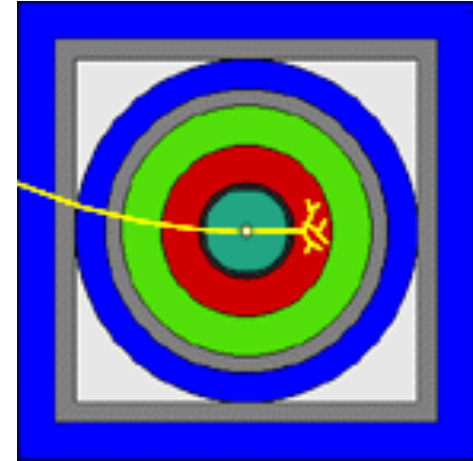
Z BOZON BOMLÁS



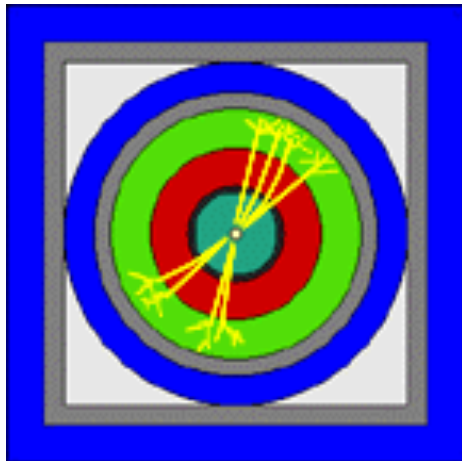
elektron pár



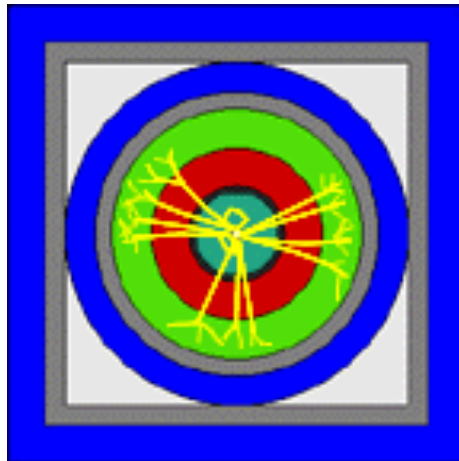
muon pár



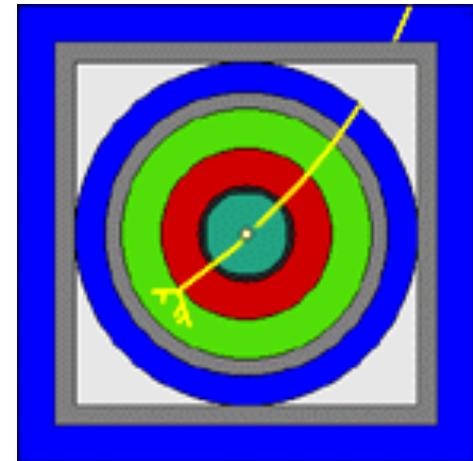
tau pár \rightarrow muon, elektron



kvark (hadron zápor) pár

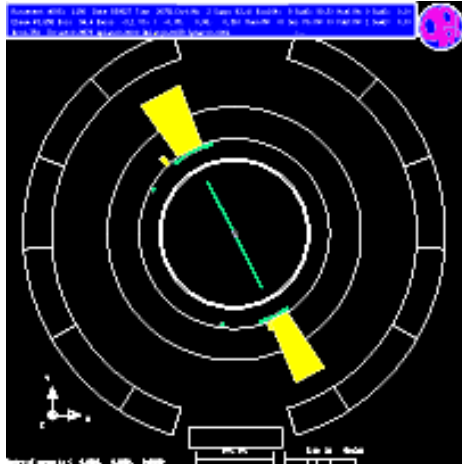


kvark pár és gluon
(3 hadron zápor)

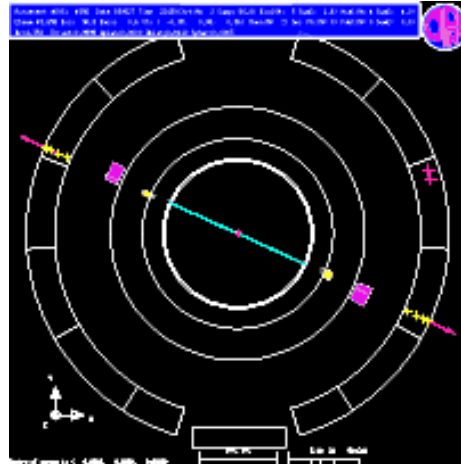


tau pár \rightarrow hadron, muon

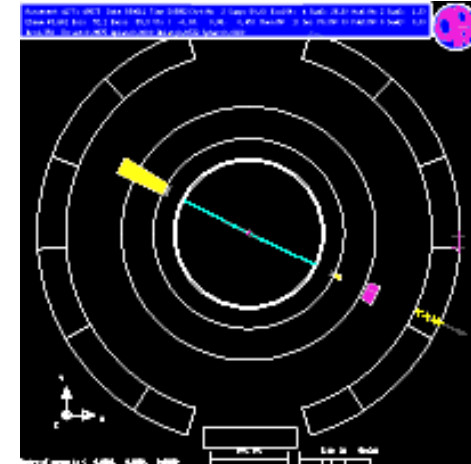
Z BOZON BOMLÁS A LEP GYORSÍTÓN



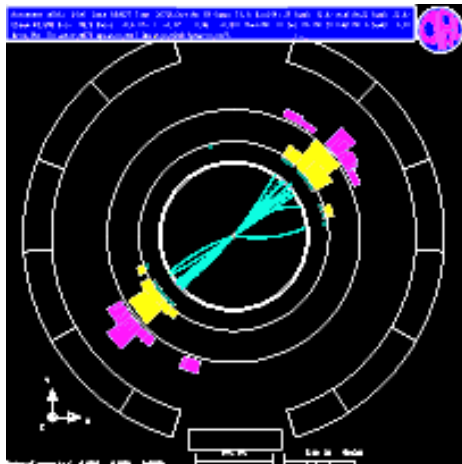
elektron pár



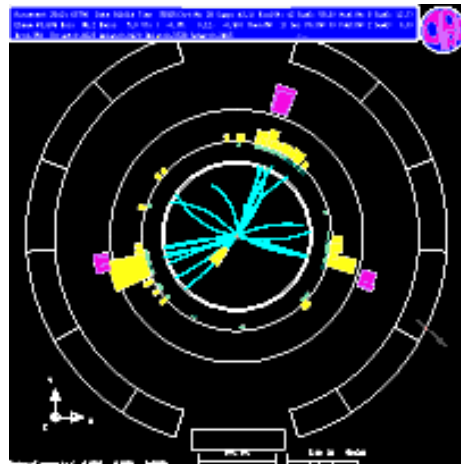
muon pár



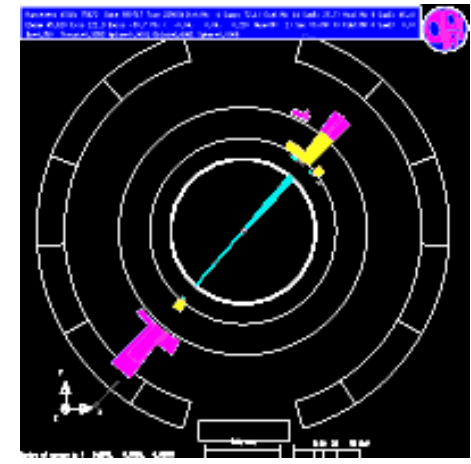
tau pár → elektron, muon



kvark (hadron zápor) pár

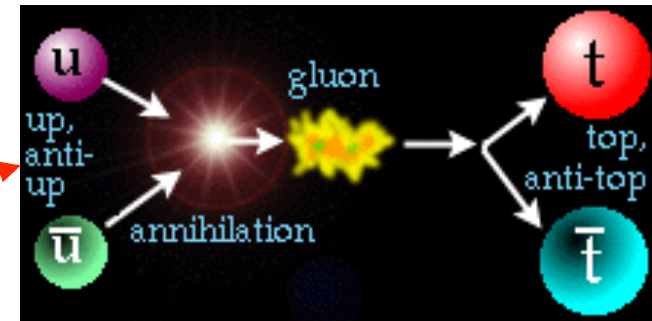
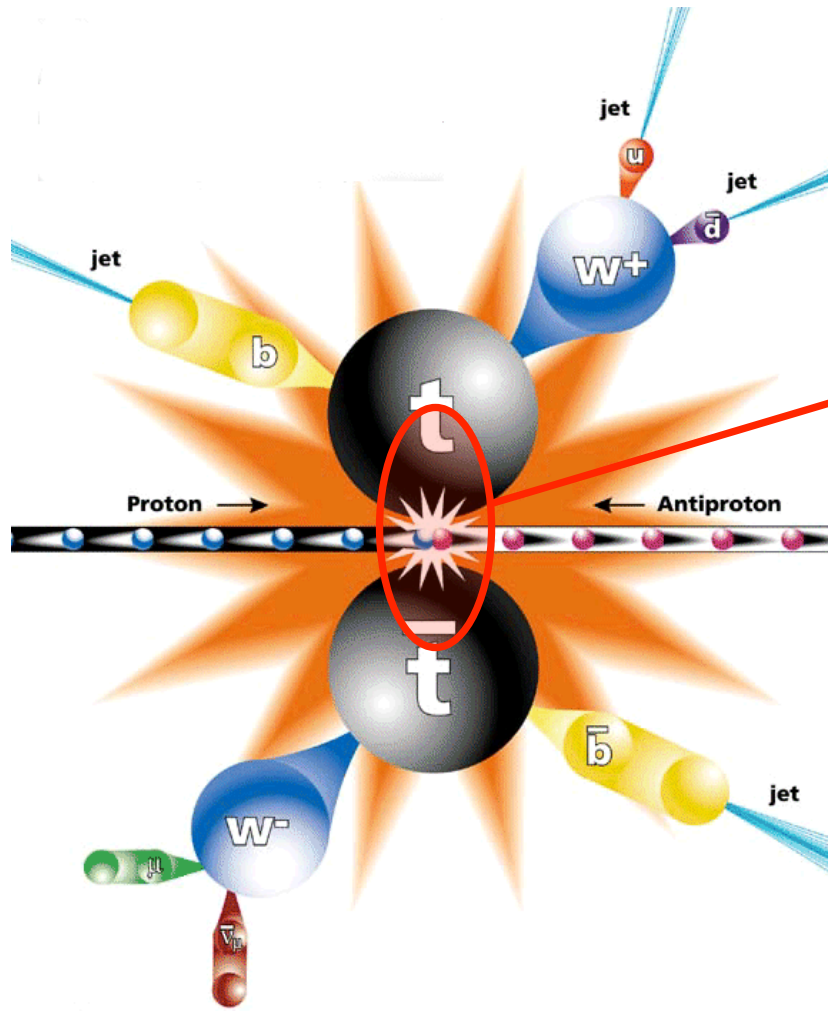


kvark pár és gluon
(3 hadron zápor)



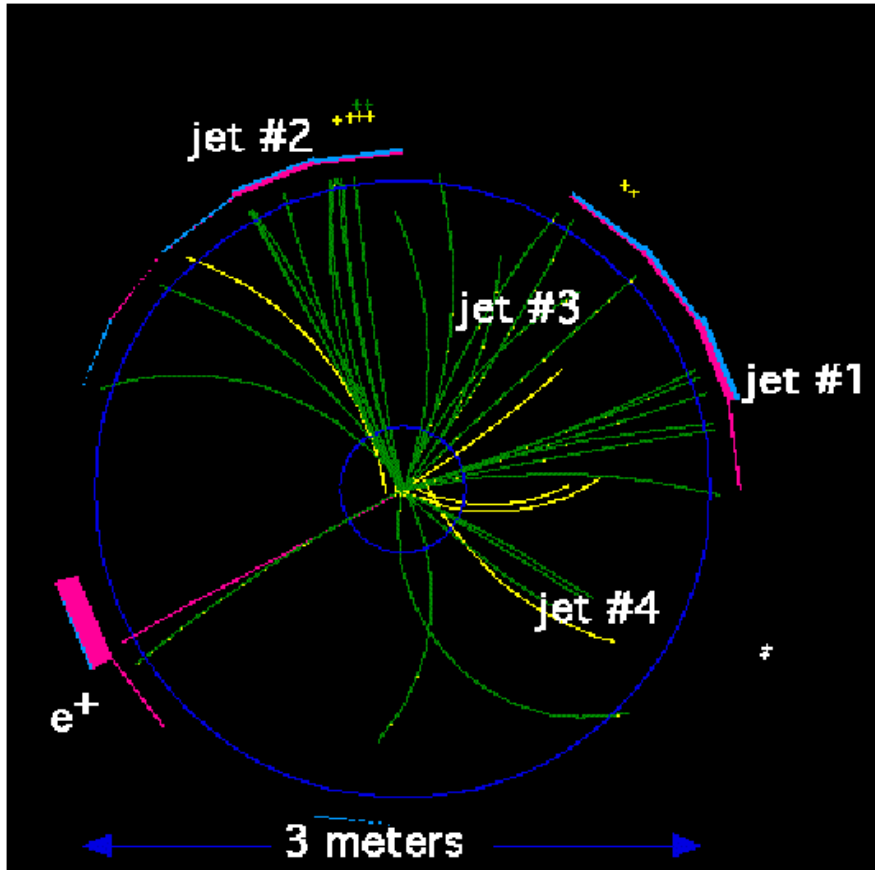
tau pár → 1 és 3 hadron

A TOP KVARK FELFEDEZÉSE

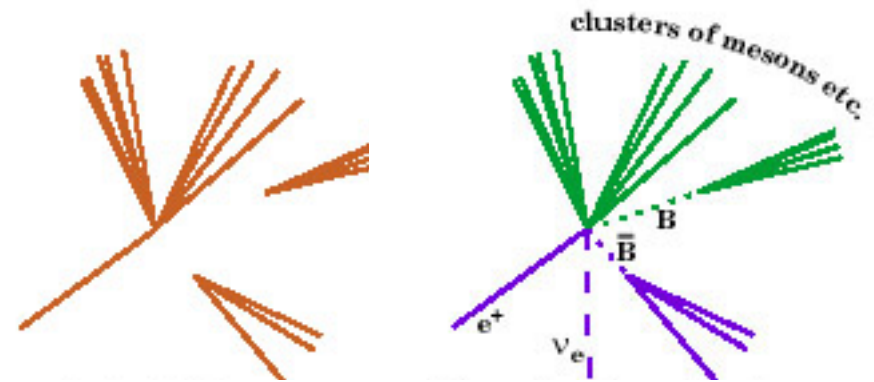


Tevatron proton-antiproton
ütköztető CDF and D0
kísérletei (Fermilab, USA),
1995

A TOP KVARK FELFEDEZÉSE

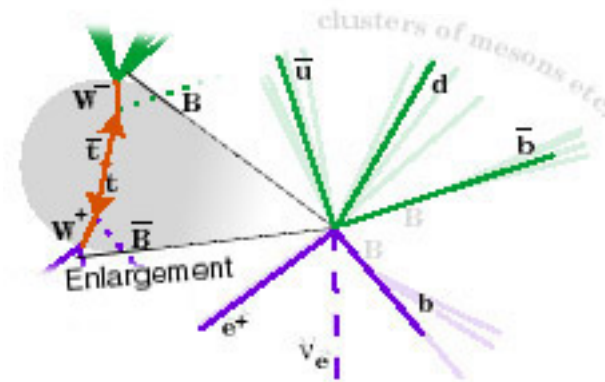


Egy megfigyelt esemény a CDF detektorban



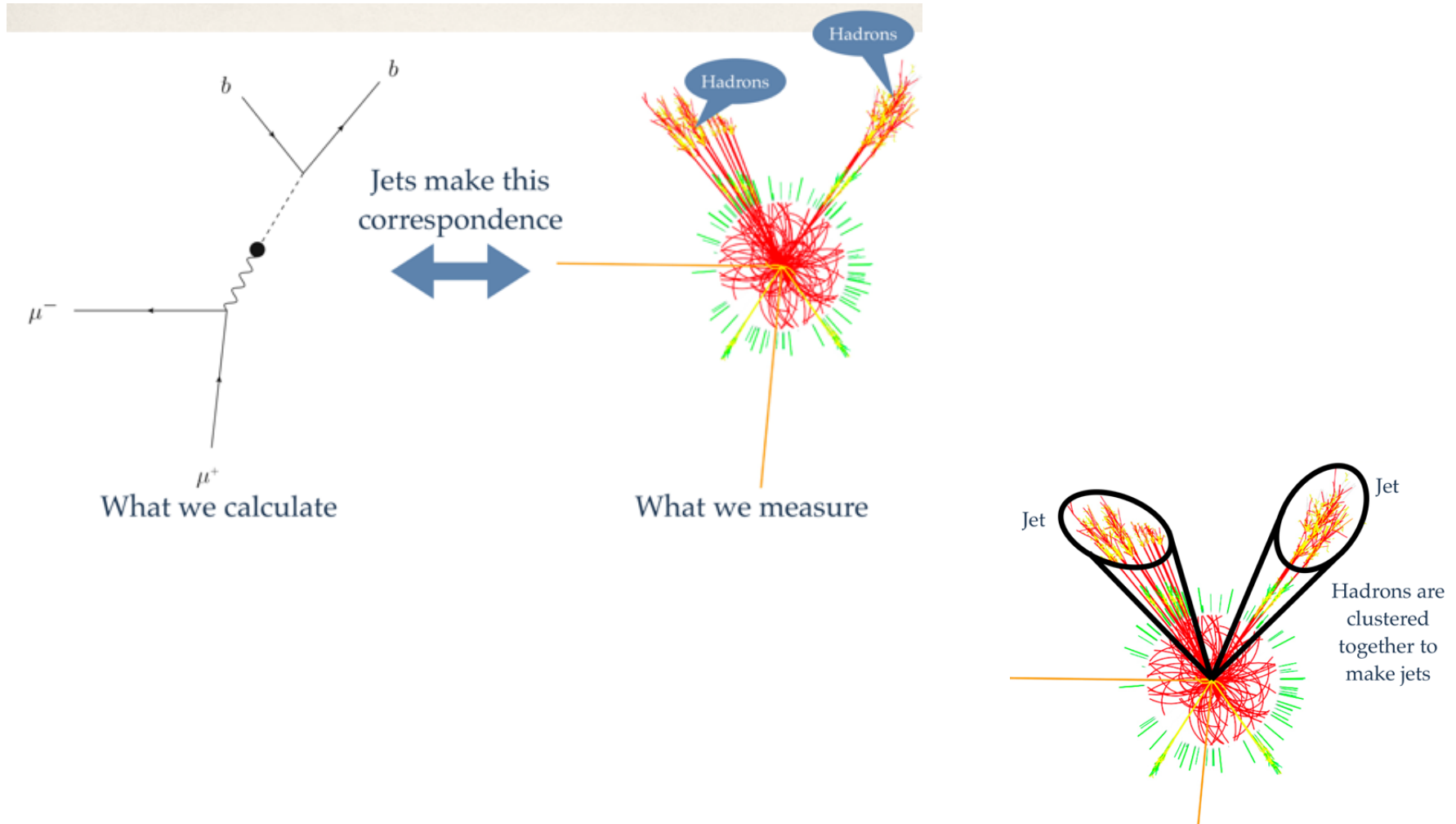
A detektor képe

Számítógépes rekonstrukció



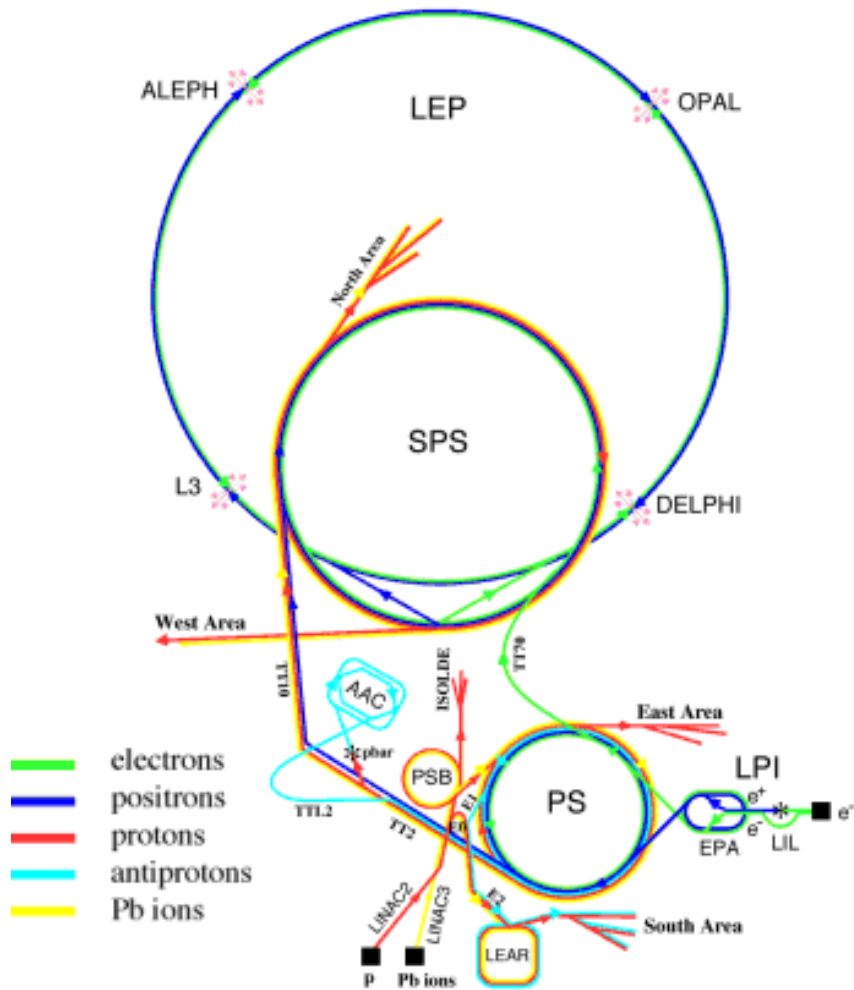
A fizikus értelmezése

HADRONZÁPOROK



A CERN GYORSÍTÓI

LEP éra (-2000)



LHC éra (2008-)

