

Mese a Standard Modellről 2*2 órában

*Előadás a magyar CMS-csoport számára
(RMKI-ATOMKI-CERN, 2008. június)*

Horváth Dezső

horvath@rmki.kfki.hu.

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



Mese a Standard Modellről: vázlat

A. Elemi részecskék

- Fermionok és bozonok, kvarkok és leptonok
- Összetett részecskék
- A kvarkok töltése és színe

B. Kölcsönhatások

- Mértékszimmetriák
- Kvantumelektrodinamika
- Kvantumszíndinamika
- Higgs-mechanizmus
- Elektrogyenge kölcsönhatás

● Tömegteremtés

C. A Standard Modell ellenőrzése

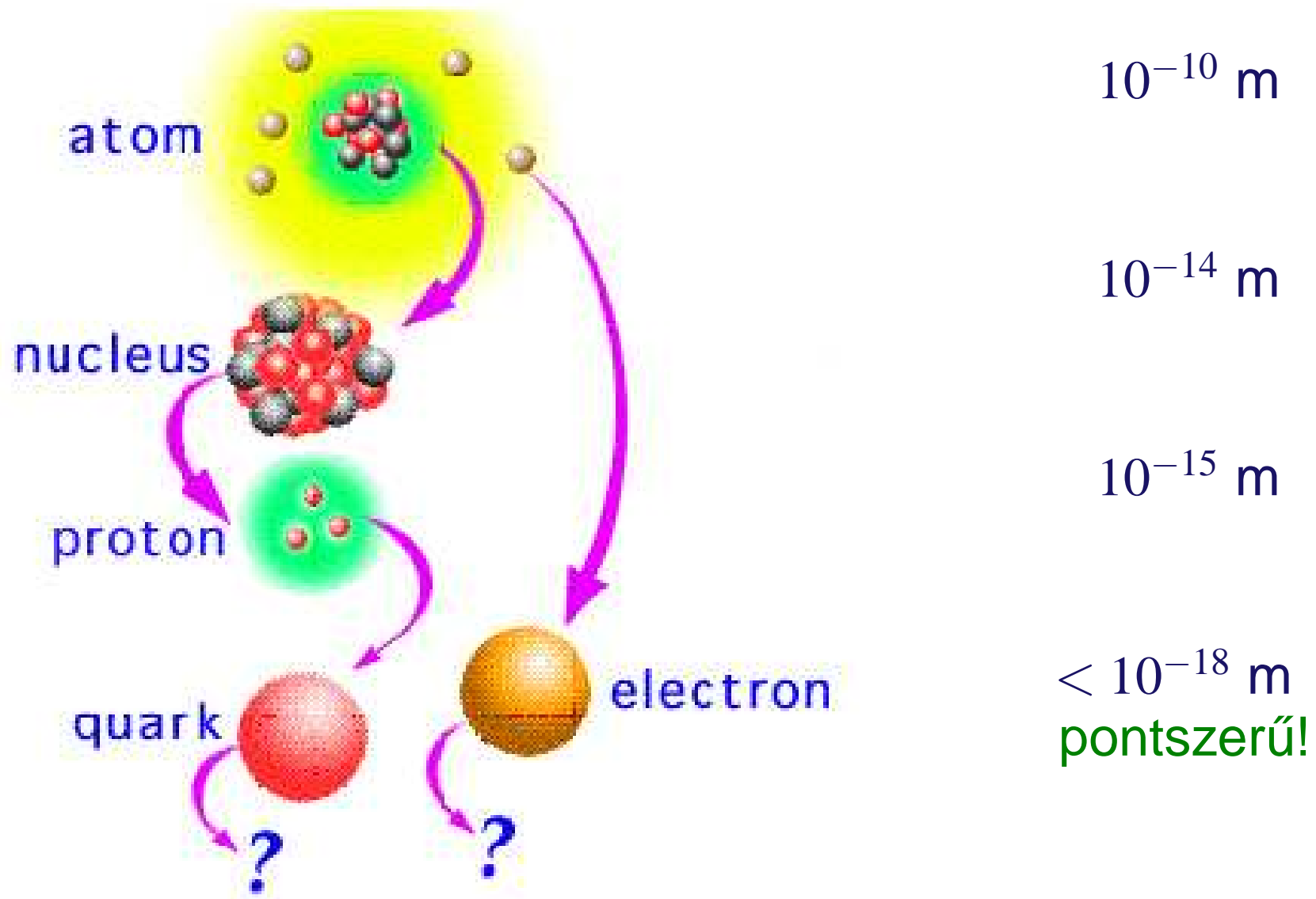
- LEP és LHC
- Kalorimetria
- Jellegzetes események
- Z-szélesség és a 3 család
- Higgs-keresés

D. Új fizika keresése

- A Standard Modell problémái
- Szuperszimmetria



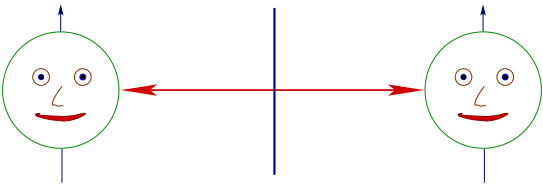
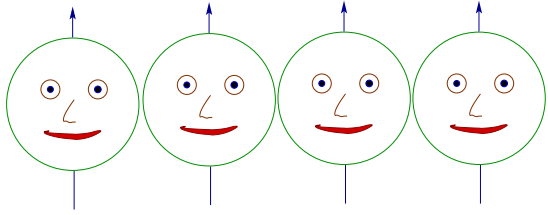
Az atomtól a kvarkig



Fermionok és bozonok

Legfontosabb tulajdonság:

spin (perdület) = saját impulzusmomentum \hbar egységben

Tulajdonság	fermion	bozon
Spin	feles ($\frac{1}{2}, \frac{3}{2} \dots$)	egész (0, 1, 2, ...)
$\psi(1, 2) = \pm \psi(2, 1)$ Pauli-kizárás	— van	+ nincs
Részecskeszám megmaradása	van	nincs
Statisztika	Fermi-Dirac	Bose-Einstein
Kondenzáció		



Elemi (pontoszerű!) részecskék

Elemi fermionok:
leptonok és kvarkok

Elemi bozonok:
kölcsonhatások közvetítői
+ Higgs-bozon



Elemi fermionok ($S = \frac{1}{2}$)

	1. család	2. család	3. család	töltés
Leptonok	$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}_L$	0 -1
Kvarkok	$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix}_L$	$+\frac{2}{3}$ $-\frac{1}{3}$

Tömeg családdal \nearrow nő; kvarkbomlás: \downarrow , majd \nwarrow

$()_L$: gyenge kölcsönhatás sérti a paritás-szimmetriát
 \Rightarrow balos részecskepárok és jobbos antirészecskepárok

d', s', b' : kevert állapotok



Hadronok: összetett részecskék

Mezonok = $q\bar{q}$ -állapotok: $J = 0, 1, \dots$ (bozonok)

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

Barionok = qqq -állapotok: $J = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \dots$ (fermionok)

$$Q = 0, \pm 1, \pm 2, B = 1 \quad (\text{barionok})$$

Nukleonok:

proton = (uud), neutron = (udd) alapállapot

$$J = \frac{1}{2}, B = 1$$

Pionok ($J = 0, B = 0$):

$$\pi^+ = (u\bar{d}), \quad \pi^0 = \frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u} - d\bar{d}), \quad \pi^- = (d\bar{u})$$



Színes kvarkok

Bajok a kvarkmodellel

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

Új kvantumszám: 3 szín $\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$

- Δ^{++} kvarkjai különböző kvantumállapotban
- Kvarkok között erős, vonzó szín–szín kölcsönhatás
- Csak színtelen állapotok szabadok (kvarkbezárás)



Szintelen kvarkállapotok

Mezon = $(q\bar{q})$; barion = qqq ; antibarion = $(\bar{q}\bar{q}\bar{q})$

q kvarkok azonosak vagy különbözők.

Bizonyíték:

- Mindent magyaráz
- Összes lehetséges kvarkállapot létezik
- Nem találtunk lehetetlent (pl. $Q > 2$)
- Nem látunk több-kvarkos állapotot (dibarion, pentakvark?)
- Családokban osztótlés
 $\Sigma Q = Q_v + Q_{\ell^-} + 3(Q_u + Q_d) = 0 \Rightarrow$ anomáliák eltűnnek



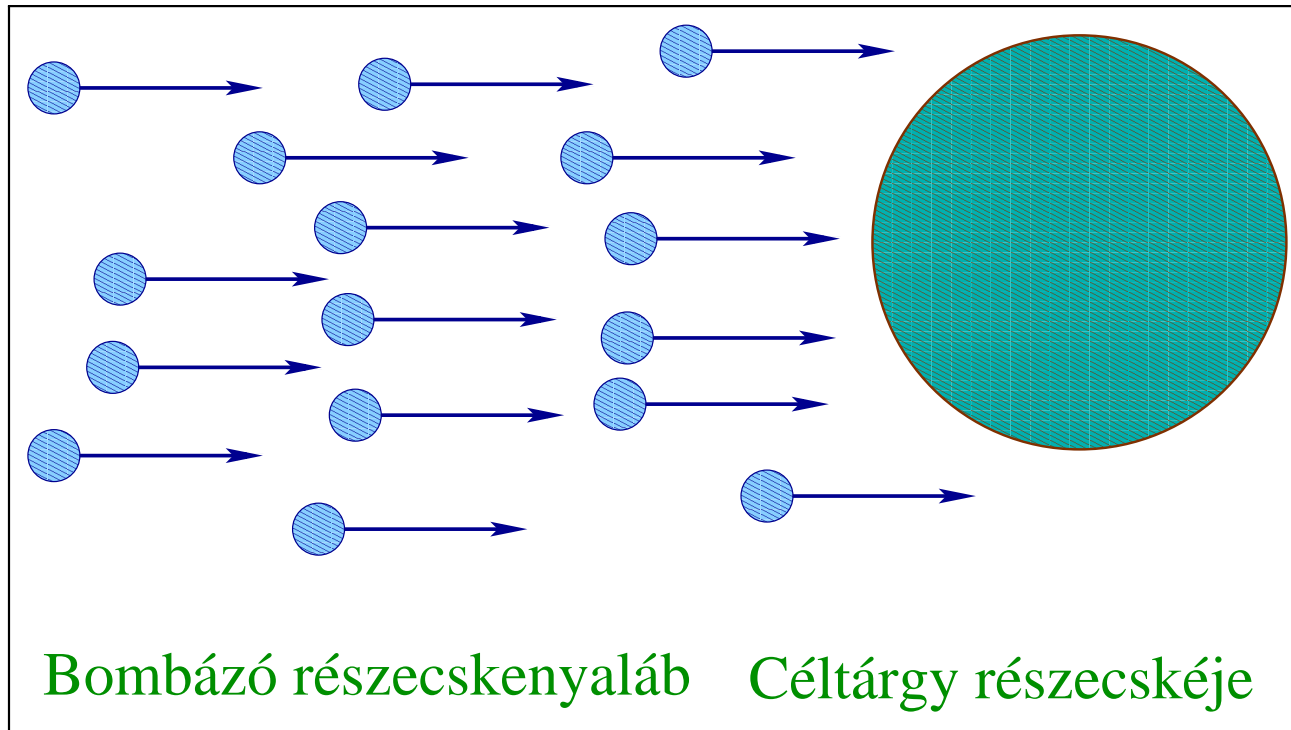
Kölcsönhatások és közvetítő bozonjaik

Kölcsönhatás	erősség	potenciál	hatótáv	élettartam	bozon	m_0 GeV
Erős	1	$\sim R$	1 fm $\sim 1/m_\pi$	10^{-23} s ($\Delta \rightarrow p\pi$)	8 gluon	0
El-mágn.	10^{-2}	$\sim 1/R$	∞	$10^{-20} - 10^{-16}$ s ($\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$)	foton	0
Gyenge	10^{-7}	$\sim \frac{1}{R} e^{-\frac{R}{R_0}}$	< 1 fm $R_0 \sim \frac{\hbar}{M_W c}$	$> 10^{-12}$ s ($\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}$)	W^\pm Z^0	80 91
Gravitáció	10^{-38}	$\sim \frac{1}{R}$	∞		graviton	0

$$r(\text{proton}) = 0,8 \text{ fm} \quad 1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$$



Amit mérünk: hatáskeresztmetszet



$\sigma = W / \Phi$ átmeneti valószínűség/fluxus

Egysége: 1 barn = 10^{-28} m^2 (1 pb = 10^{-40} m^2)

Fluxus = részecskék sűrűsége \times sebessége nyalámban:

$$\Phi = n_b \cdot v_b = \text{részecskeszám/felület/sec}$$



Amit mérünk: rezonancia

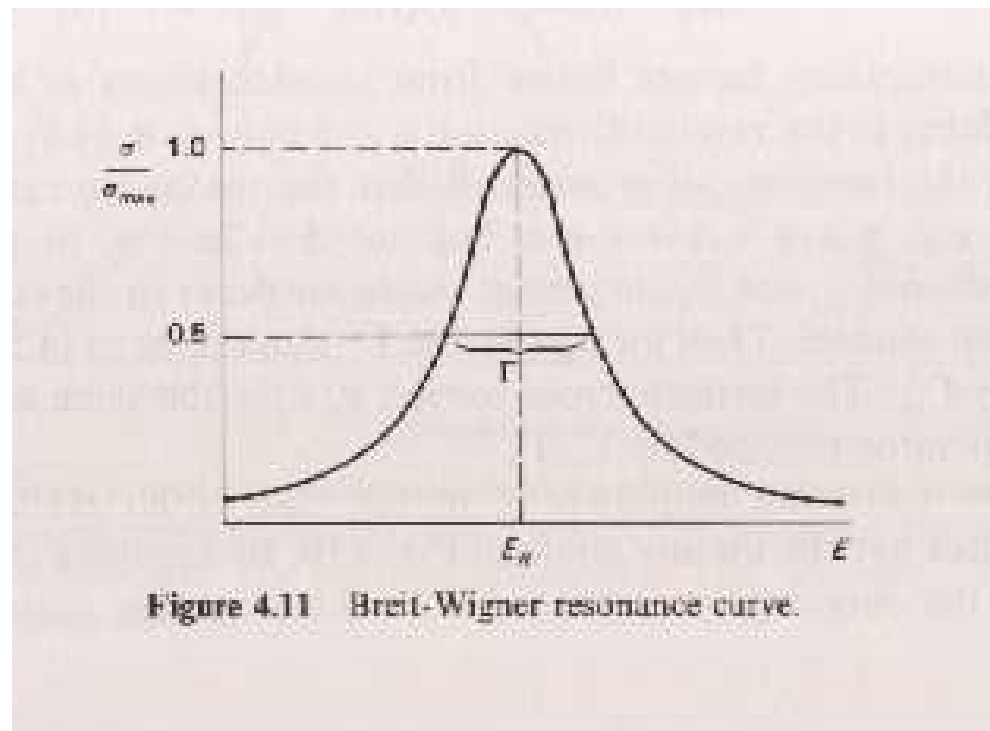
$\tau = \Gamma^{-1}$ élettartam \Rightarrow exp. bomlás: $N(t) = N_0 e^{-\Gamma t}$

Valószínűségeloszlás:

$$|\chi(E)|^2 = \frac{1}{(E-M)^2 + \Gamma^2/4}$$

Breit-Wigner-formula

M } rezonancia { helye
 Γ } { szélessége



Lorentz-görbe

Új részecske felfedezése:

rezonancia a tömegnek megfelelő ütközési energiánál



A kvarkok töltése: $\frac{2}{3}$ és $-\frac{1}{3}$?

Kvark ad-hoc, nyakatekert, szabadon nem létezik, de egyetlen modell (Nambu!) és kísérlet igazolja

Semleges mezonok elektromágneses bomlása

$$V^0 = (q\bar{q})$$

$$\Gamma(V^0 \rightarrow \ell^+ \ell^-) \sim Q_q^2$$



$$\rho(770) = \frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u} - d\bar{d})$$

$$\omega(782) = \frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u} + d\bar{d})$$

$$Q_q^2 = \left\{ \frac{1}{\sqrt{2}} \left[\frac{2}{3} - \left(-\frac{1}{3} \right) \right] \right\}^2 = \frac{1}{2}$$

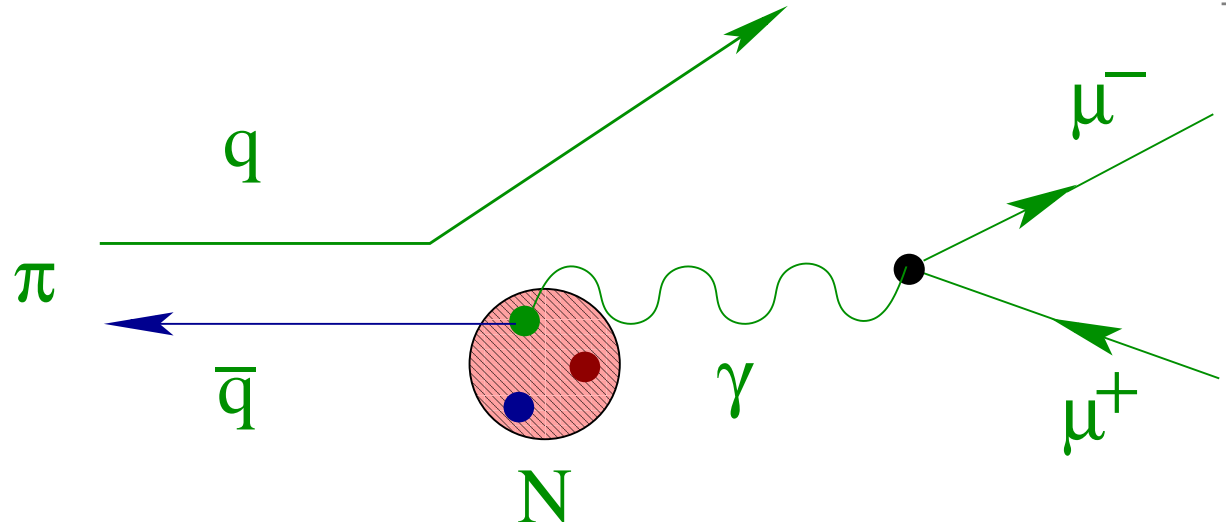
$$Q_q^2 = \left\{ \frac{1}{\sqrt{2}} \left[\frac{2}{3} + \left(-\frac{1}{3} \right) \right] \right\}^2 = \frac{1}{18}$$

$$\Gamma_e(\rho) : \Gamma_e(\omega) \sim 9 : 1 \quad \text{mért arány} \sim 11 : 1$$

$$\text{de pl. } 1 : 1 \text{ ha } Q_u = 1; Q_d = 0$$



Elektromágneses pionszórás nukleonon



$$\begin{aligned} \pi^- &= (\bar{u}d) &> \sigma &\sim 18Q_u^2 = 18 \cdot \frac{4}{9} \\ {}^{12}\text{C} &\sim (18u + 18d) &> \sigma &\sim 18Q_d^2 = 18 \cdot \frac{1}{9} \\ \pi^+ &= (u\bar{d}) \end{aligned}$$

$$\frac{\sigma(\pi^- \text{C} \rightarrow \mu^+ \mu^- \dots)}{\sigma(\pi^+ \text{C} \rightarrow \mu^+ \mu^- \dots)} \approx 4 \sim \text{kísérlet}$$



Hadronképződés hatáskeresztmetszete

$$R = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{hadronok})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)} = \frac{\sigma(\sum_i e^+e^- \rightarrow q_i\bar{q}_i)}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)} \sim \sum_i Q_{q_i}^2$$

Lehetséges végállapotok számával arányos

$$\text{Nincs szín} \rightarrow R_0 = \sum_q Q_q^2;$$

$$3 \text{ szín van} \rightarrow R_3 = 3R_0$$

Energia [$E_{CM}(e^+e^-)$] függvényében:

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

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

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



$$R = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{hadronok})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)}$$

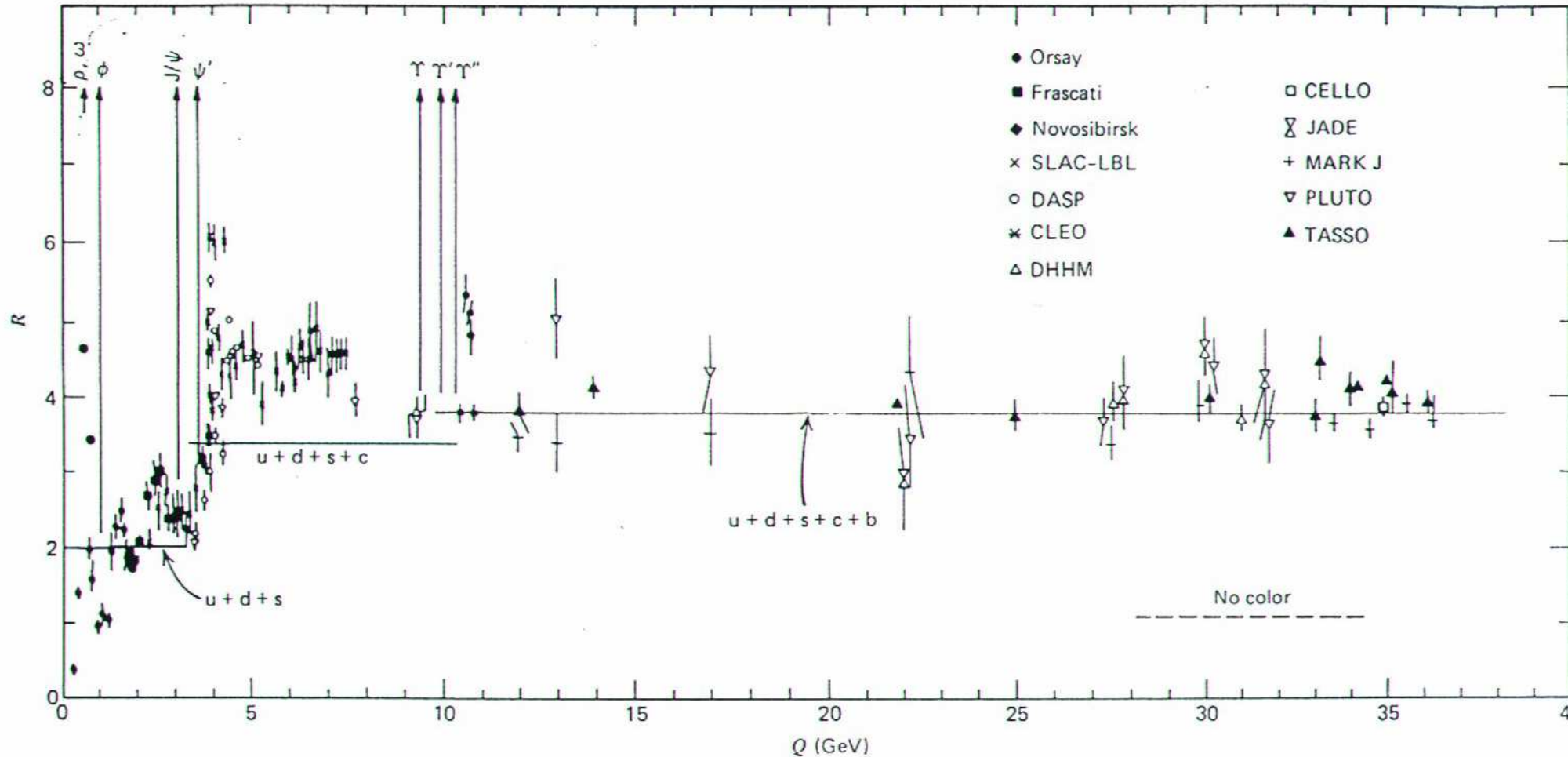


Fig. 11.3 Ratio R of (11.6) as a function of the total e^-e^+ center-of-mass energy. (The sharp peaks correspond to the production of l^+l^- resonances just below or near the flavor thresholds.)



B. A Standard Modell

- Szimmetriák és megmaradási törvények
- Mértékszimmetriák és kölcsönhatások
- Kvantumelektrodinamika és a foton
- Kvantumszíndinamika és a gluon, kvarkbezárás
- Higgs-mechanizmus
- Elektroyenge kölcsönhatás
- Tömegteremtés



Szimmetriák

Noether-tétel:

Globális szimmetria	⇒ megmaradási törvény
Eltolás térben	⇒ impulzus (lendület)
Eltolás időben	⇒ energia
Forgatás	⇒ impulzusmomentum
Elektromágneses mérték-	⇒ töltés

Mértékelmélet:

Lokális szimmetria ⇒ kölcsönhatás

Lokális szimmetria: pontról pontra meghatározott módon
módosuló

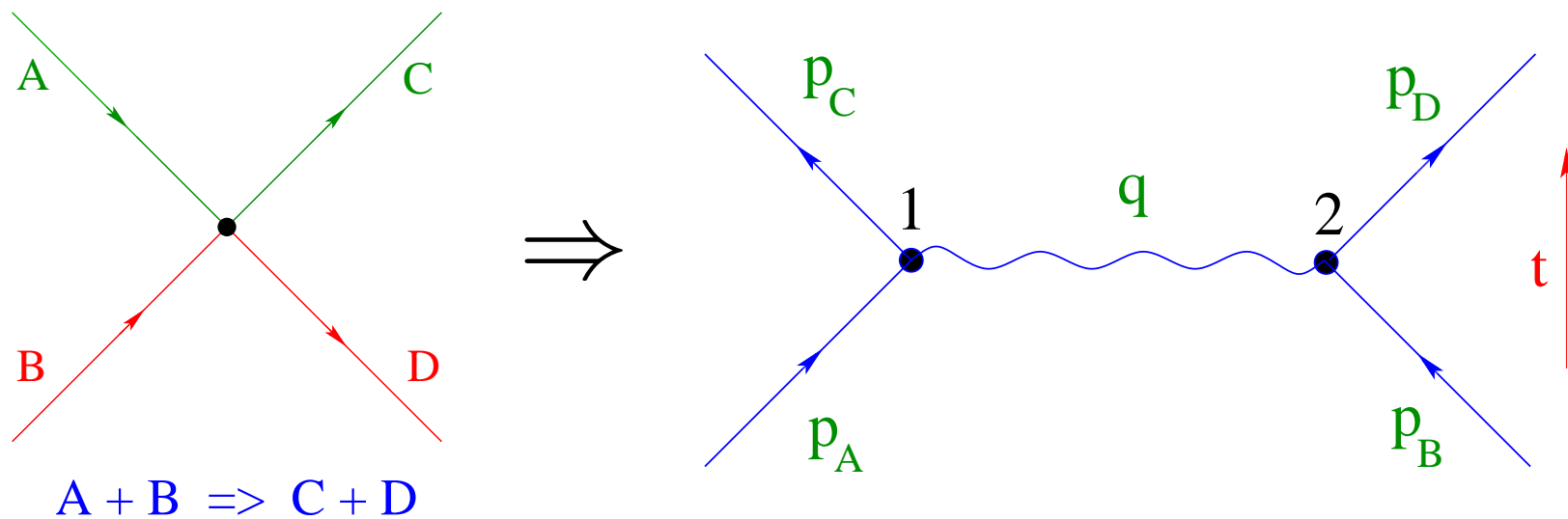
Részecskefizika legfontosabb feladata
a szimmetriák vizsgálata



Kvantumelektrodinamika

Az elektromágneses jelenségek kvantumelmélete

Töltött részecskék szóródása egymáson:



Leírás: foton q impulzust visz át A-ról B-re

Feynman-gráf: recept valószínűség kiszámítására

Belső foton, nem észlelhető \Rightarrow virtuális



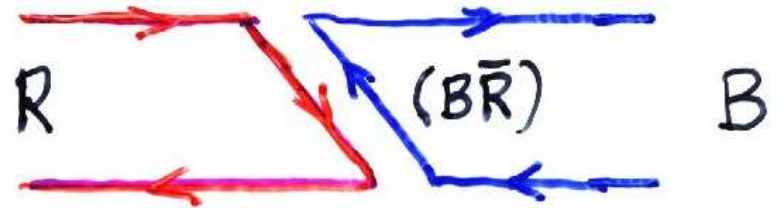
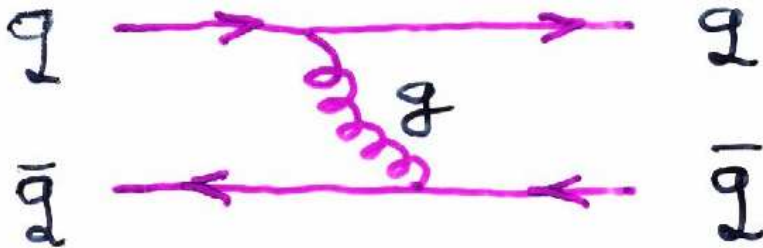
Kvantumszíndinamika, QCD

Szín-szín kölcsönhatás

Közvetítő: **gluon**, $m = 0$, $J = 1$

Színt hordoz: $RR, GG, BB, RG, RB, GR, BR, BG$

de $\frac{1}{\sqrt{3}}(RR + GG + BB) = 1 \Rightarrow 8$ független



gluon \sim foton: m, J , de γ nem hordoz töltést

gluon két színt \Rightarrow g-g kölcsönhatás $\Rightarrow V(r) \sim r$



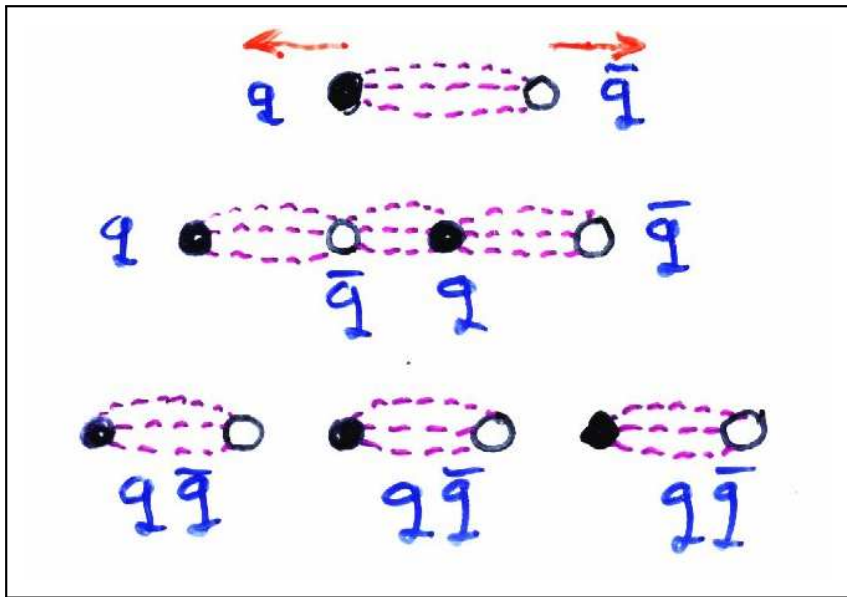
Fragmentáció, hadronizáció

Fragmentáció, hadronizáció:

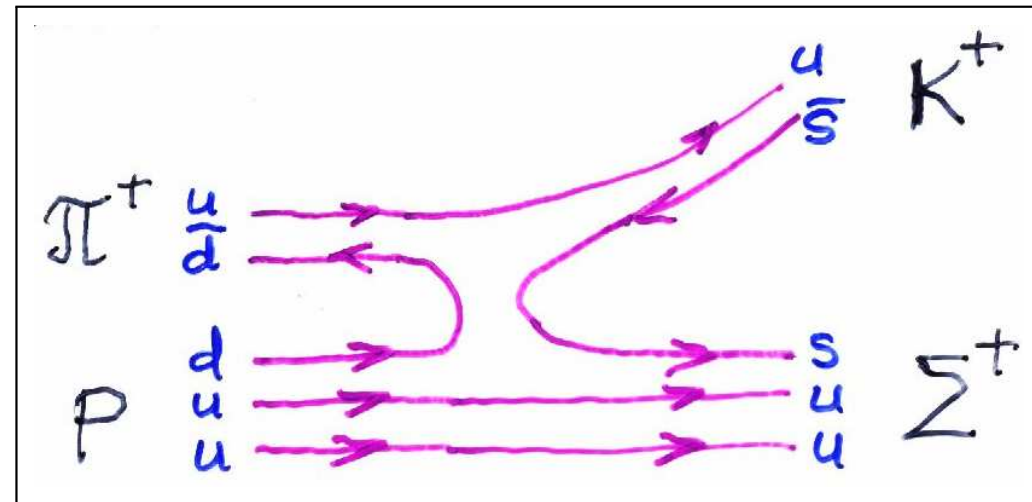
Kvarkpárok keltése, amíg az energiából futja



nincs szabad kvark vagy gluon



szakadó gluonszál



Példa: $p\pi^+ \rightarrow K^+\Sigma^+$
kvarkvonalakkal



Mérték-kölcsönhatások elmélete

Pontszerű fermion (pl. elektron) mozog lokális szimmetriájú térben.

Lokális szimmetria \Rightarrow speciális (*kovariáns*) deriválás

Háromféle lokális szimmetria, három kölcsönhatás:
elektromágneses, **gyenge** és **erős** (szín-)

Mértékbozonok mind zérus-tömegűek:
foton és 8 gluon rendben.

De 3 gyenge bozon nehéz:

$$m(W^{\pm}) = 80 \text{ GeV}; m(Z^0) = 91 \text{ GeV}!!$$

Ráadásul gyenge kh. elméletében végtelen tagok,
zérus-spinű bozon létezése megszabadítana tőlük.

Megoldás: Higgs-mechanizmus



Spontán szimmetriasértés \Rightarrow tömeg

Gyenge
bozonok
tömege



Higgs-
bozon



David J. Miller és CERN: <http://www.hep.ucl.ac.uk/~djm/higgsa.html>



A Higgs-bozon

A spontán szimmetriasértés *mellékterméke*

A részecskefizika legkeresettebb része, mivel a Standard Modell egyetlen hiányzó láncszeme

Kísérletileg nem figyeltük meg,
az elmélet szerint léteznie kell

mert tömeget teremt és rendbeteszi a divergenciákat

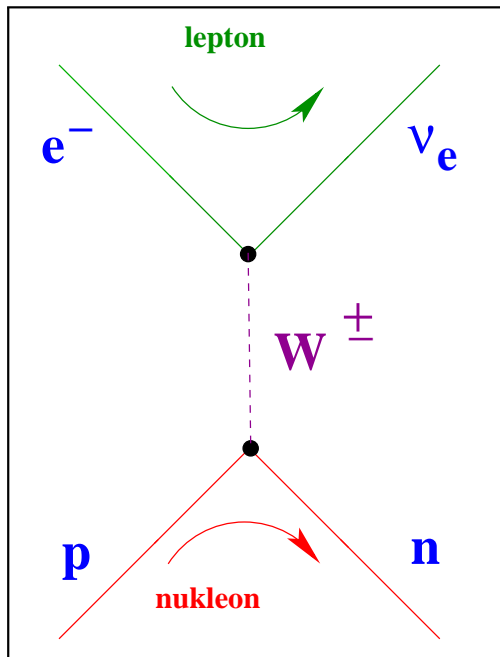
It was in 1972 ... that my life as a boson really began
(Peter Higgs: Int. J. Mod. Phys. A 17 Suppl. (2002) 86-88.)



Elektrogyenge kölcsönhatás

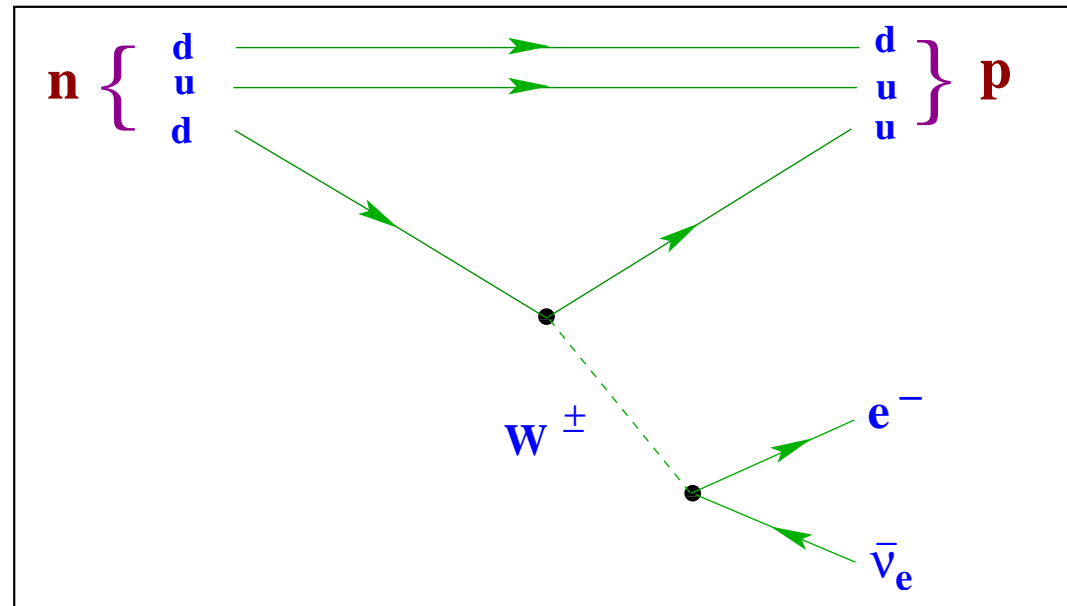
Elektromágneses és gyenge kölcsönhatás egyesítése
a Higgs-mechanizmus jótékony közreműködésével

Eredmény: zérus-tömegű foton és nehéz Z , W^+ , W^-



Standard Modell:
áram-áram
















kölcsönhatás



neutronbomlás



A Standard Modell állatkertje

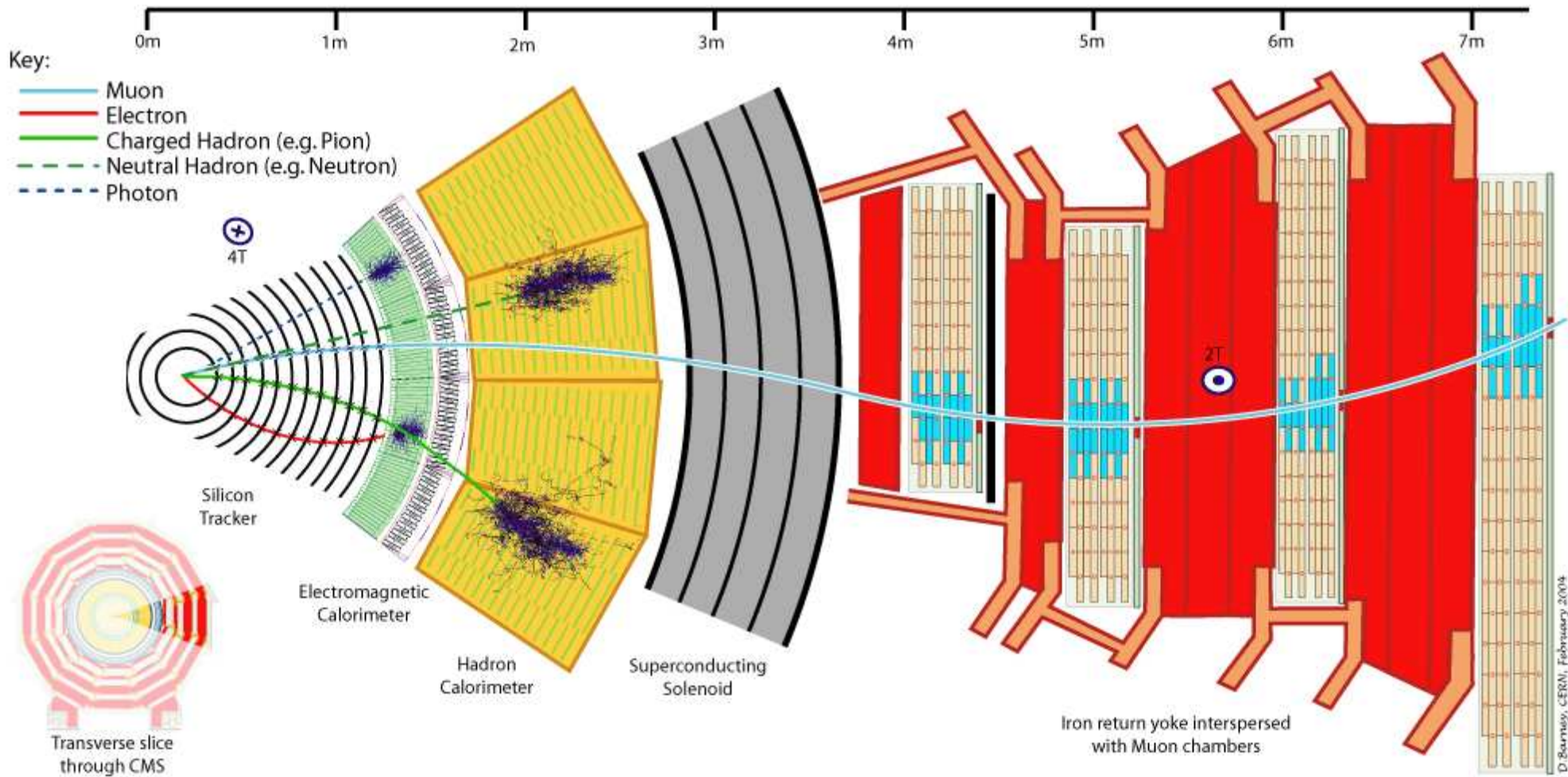
Quarks		Leptons		Bosons
 up	 down	 electron	 neutrino e	 photon
 charm	 strange	 muon	 neutrino μ	 gluon
 top	 beauty	 tau	 neutrino τ	 $Z^0 W^\pm$
				 Higgs

The Standard Model

A. Pich - CERN Summer Lectures 2005



Kalorimetria: a CMS-detektor szelete

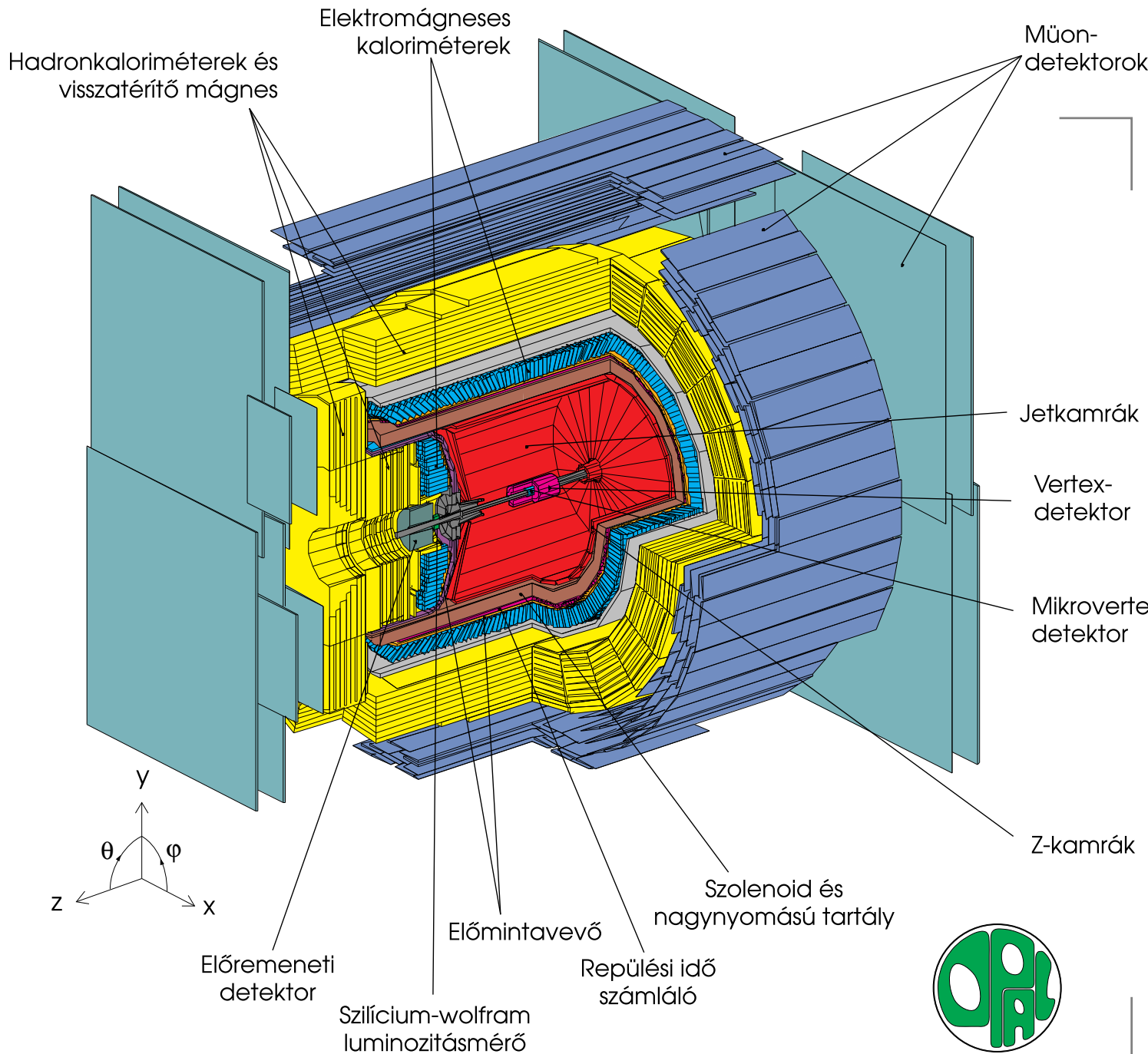


A néhai OPAL detektor

Omni-Purpose
Apparatus for LEP

Large Electron
Positron collider,
1989–2000

10 m
×
Ø10 m





Run: event 7228: 63659 Date: 960714 Time: 11957 Cirk(N= 75 Surrp=113.9) Ecal(N= 80 SumE= 99.3) Hcal(N=15 SumE= 8.7)
 Ebeam 80.500 Evis 162.6 Emiss -1.6 Vix (-0.02, 0.08, 0.32) Muon(N= 0) Sec Vix(N= 9) Fdel(N= 1 SumE= 1.3)
 Bz=4.027 Bunchlet 1/1 Thrust=0.8072 Aplan=0.0263 Cblat=0.2686 Spher=0.3061

LEP-események:

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

pontszerű leptonok
 ütközése

tiszta folyamatok

Tipikus OPAL-esemény

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



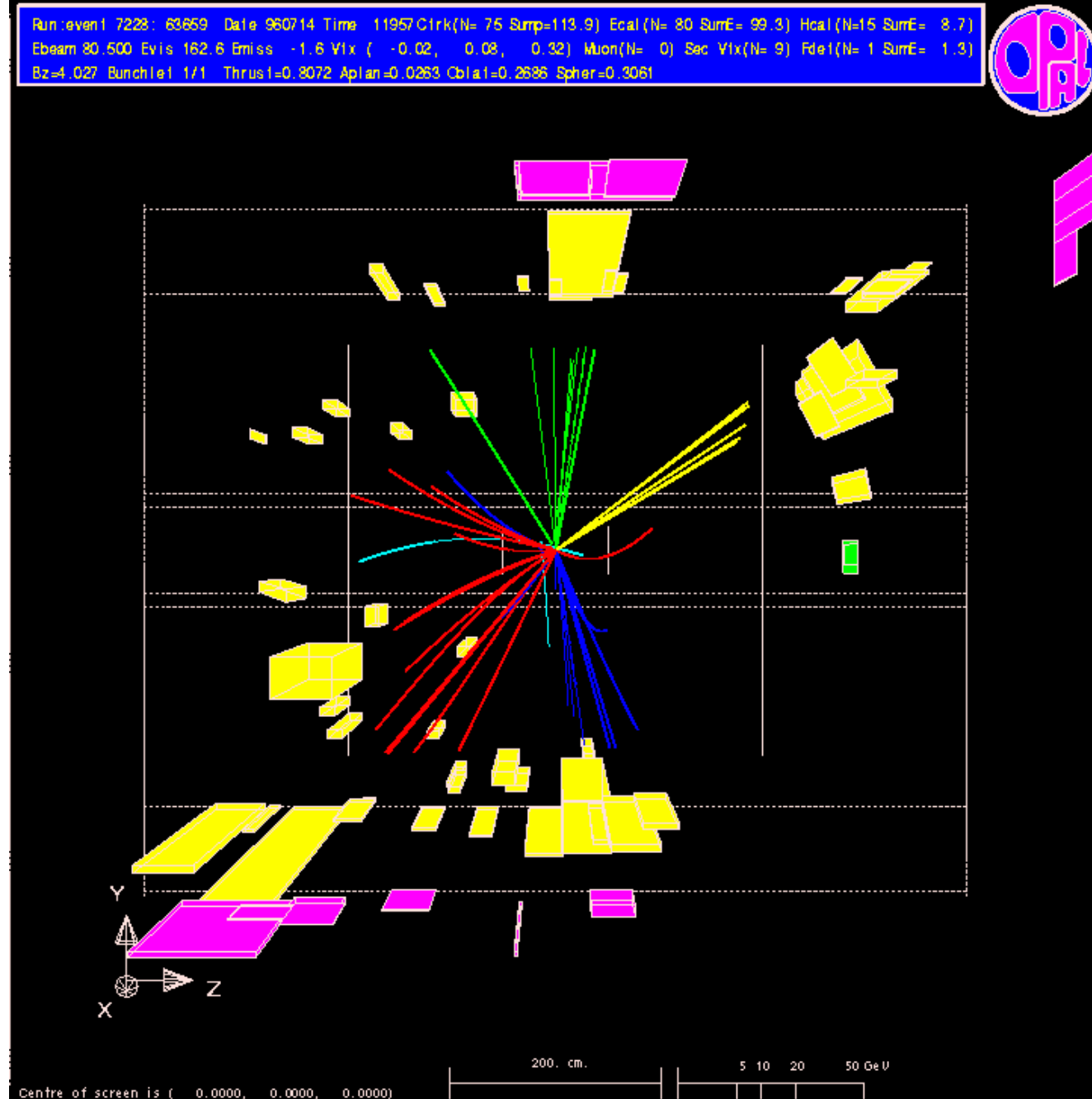
4 kvark



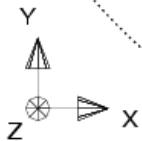
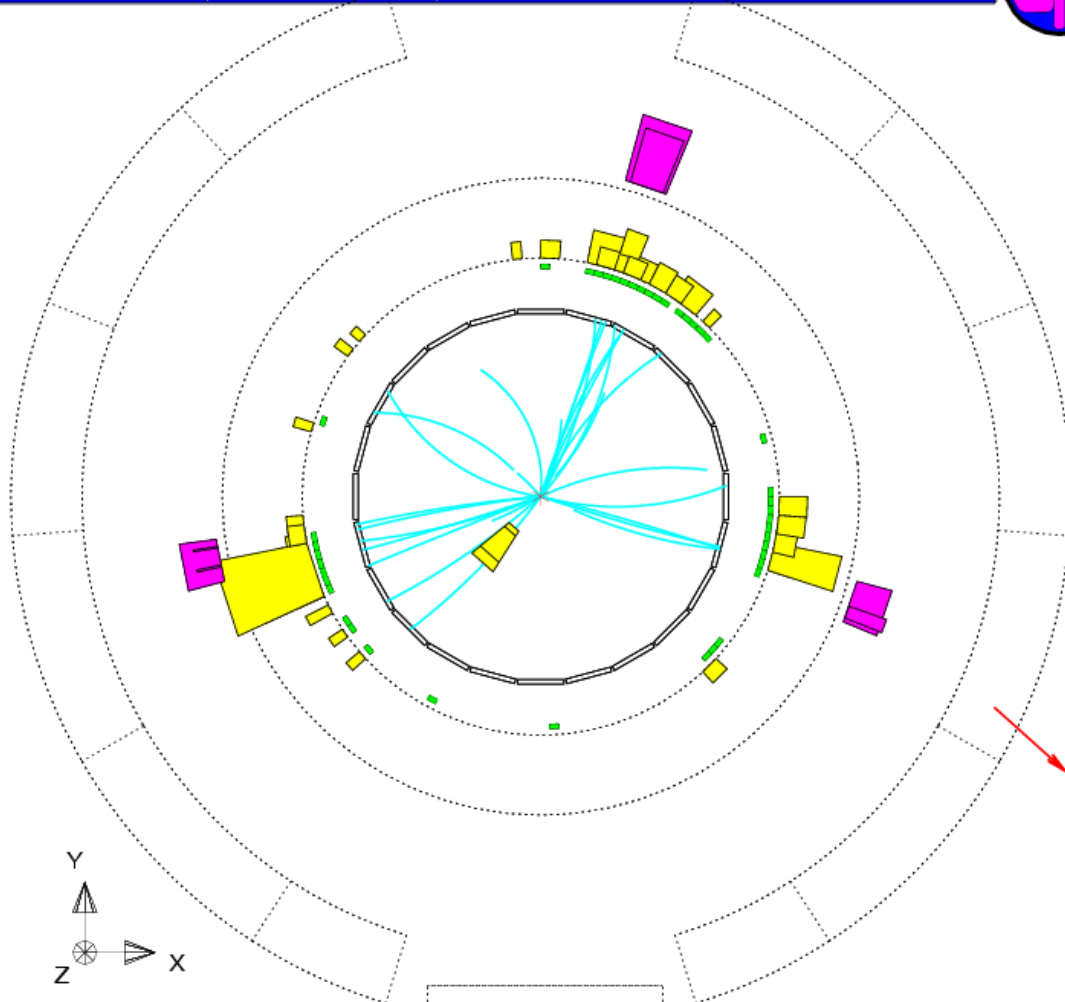
4 hadronzár



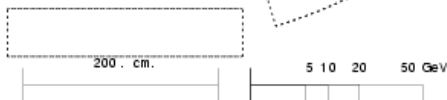
75 töltött részecske



Run:event 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

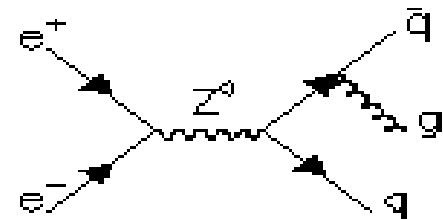


Centre of screen is (0.0000, 0.0000, 0.0000)



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

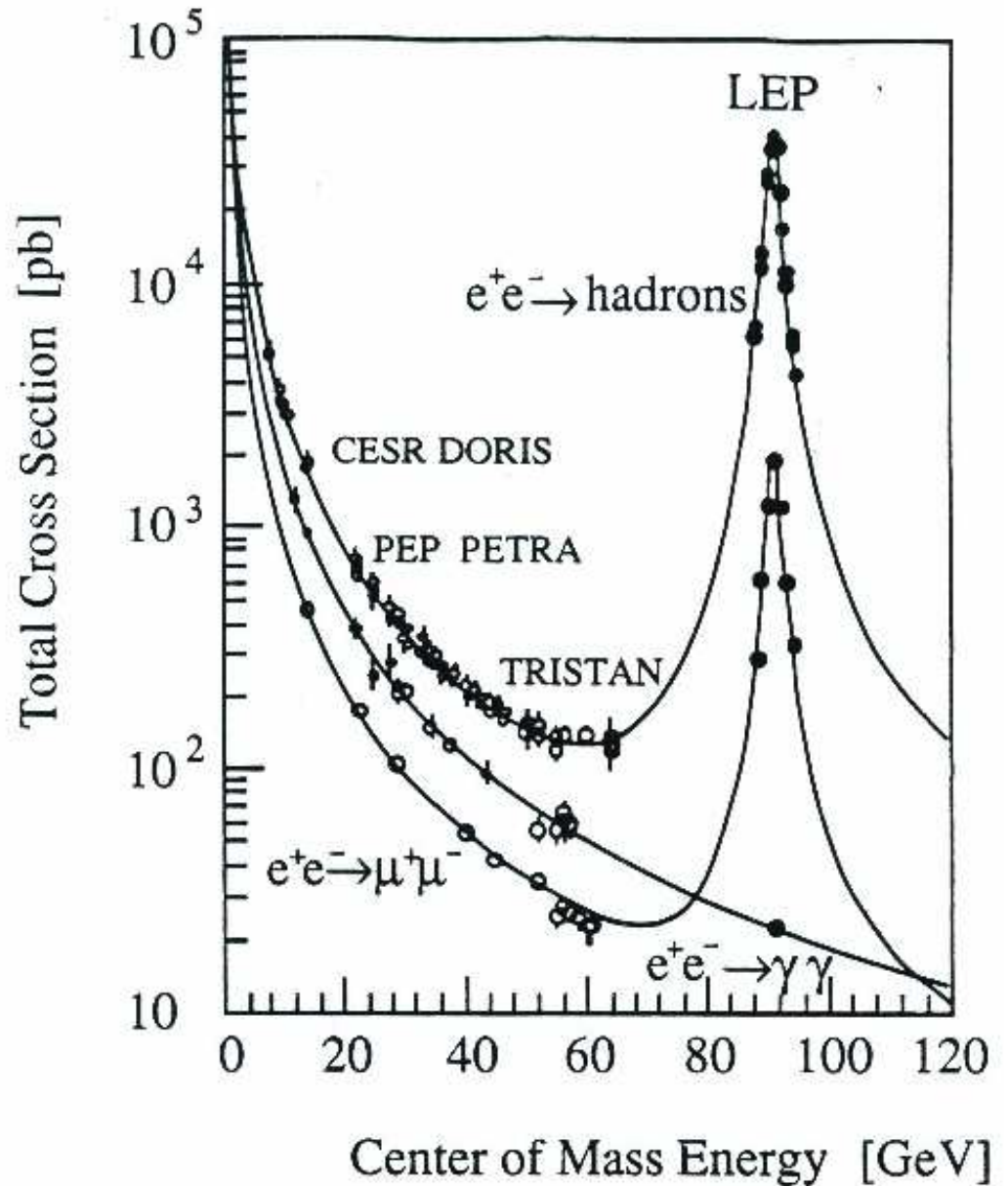
Illesztés LEP-adatokhoz \Rightarrow

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

A láthatatlan szélesség:

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

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



A 3 fermioncsalád

A láthatatlan szélesség:

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

Standard Modell: neutrínók

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

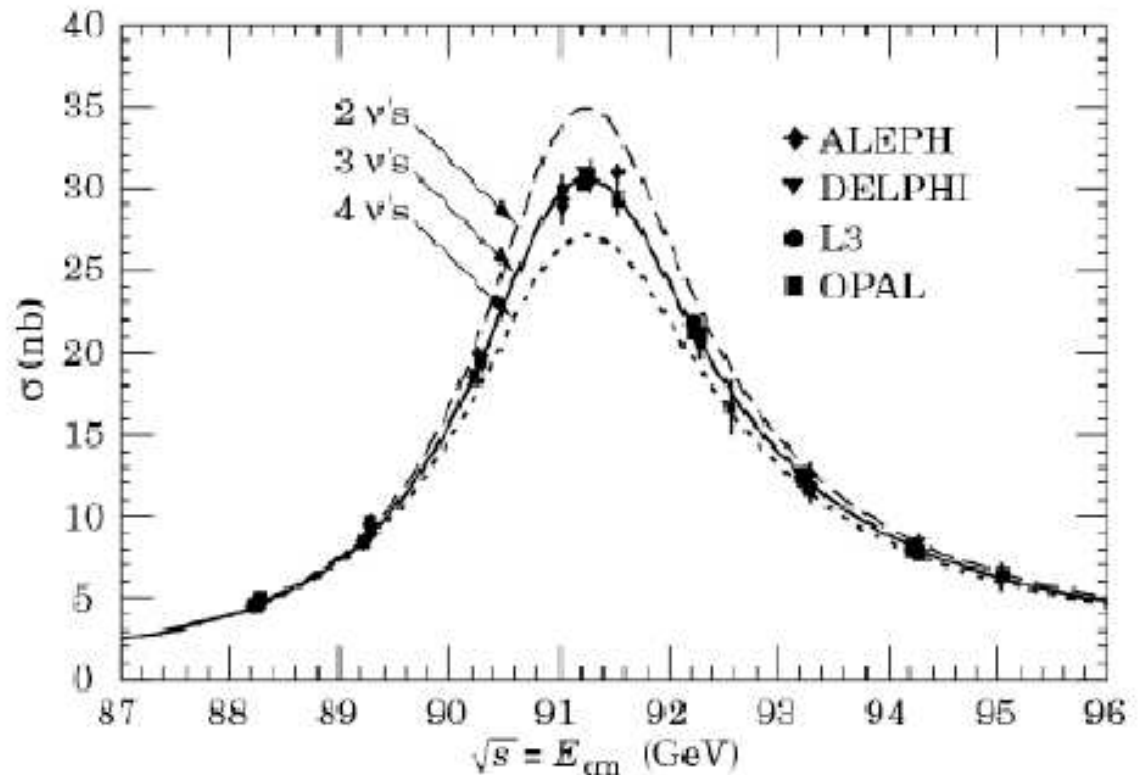
Könnyű neutrínók száma:

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

SM-ben 3 leptoncsalád \Rightarrow

3 kvarkcsalád (össztöltés 0!)

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



A SM Higgs–bozonja

Spin nélküli, semleges, nehéz részecske

Renormálás (divergenciák eltávolítása) skalár részecskéje,
kvantumszámok nélkül

A SM megadja a keletkezési és bomlási valószínűségeit.

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

Tömeget a SM nem jósol, csak limitál:

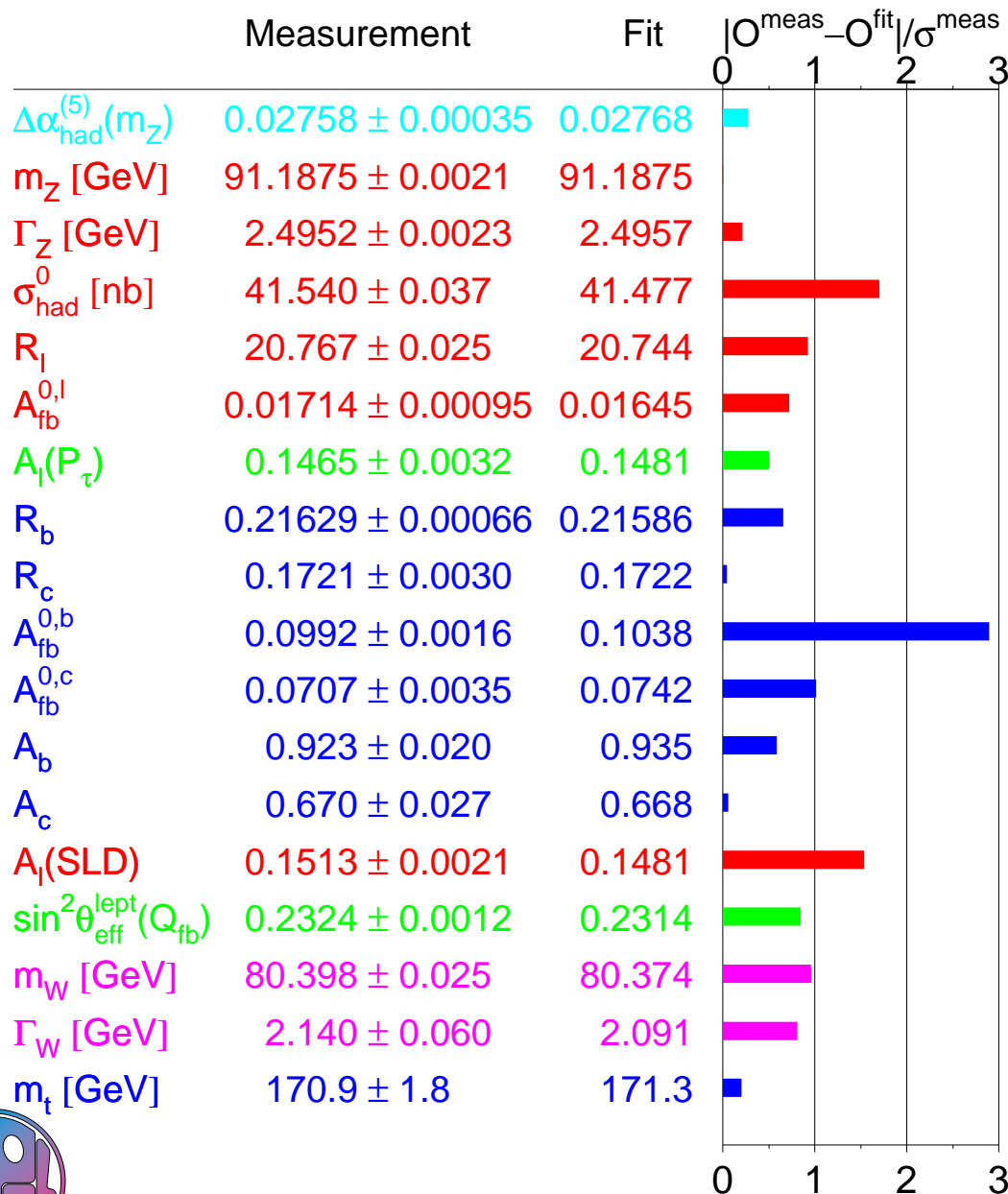
$$30 \text{ GeV} < m_H < 500 \text{ GeV}$$

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

Létezik? SM: muszáj léteznie



A Standard Modell diadalmenete



2007-es állapot

Valamennyi kísérlet
sokszáz mérésének
analízise:

$|Mért - számolt|/szórás$

Kilógó adat változik

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

LEP Electroyenge munkacsoport:

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



A SM érzékenysége Higgs-tömegre

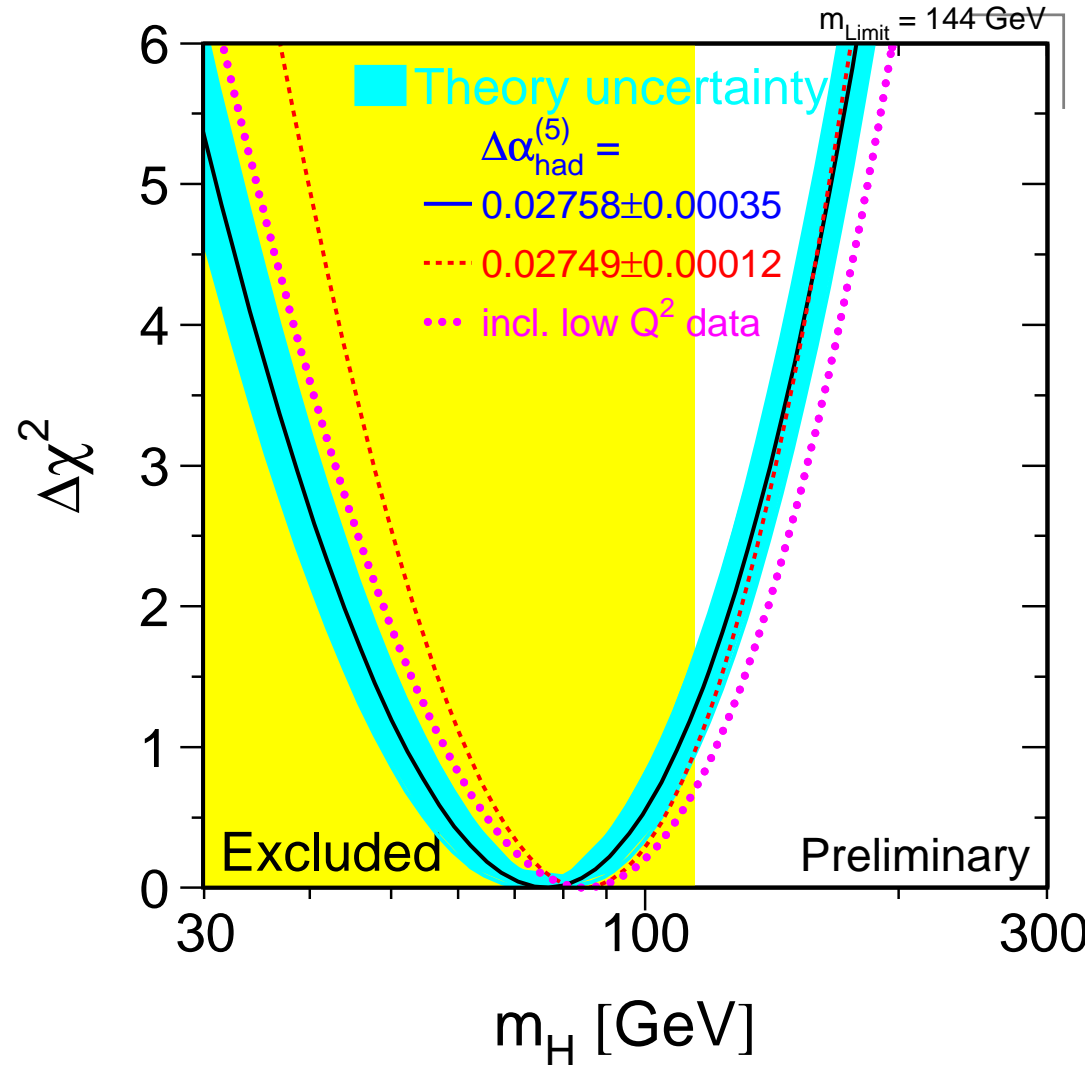
Illesztés jósága
Higgs-tömeg függvényében

különböző elméleti
becslésekre

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

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

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



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



A Standard Modell problémái

- **Aszimmetriák:** jobb \Leftrightarrow bal világ \Leftrightarrow antivilág
- **Töltéskvantálás:** $Q_e = Q_p$, $Q_d = Q_e/3$
- **Miért éppen 3 fermioncsalád?**
- **Sötét anyag és energia ??** Az Univerzum tömegének 4%-a közönséges anyag (csillag, gáz, por, ν), 23 %-a láthatatlan *sötét anyag*, 73 %-a *rejtélyes sötét energia*
- **Természetesség:** A Higgs-bozon tömege divergál, fermion-bozon szimmetria eltűntetné.
- **Gravitáció:** nem illik a másik három kölcsönhatás rendszerébe.
- A SM három kölcsönhatási állandója **konvergál**, de **nem találkozik** nagy energián. **Egyesülő kölcsönhatások?**



Szuperszimmetria: partner-részecskék

A problémákat mind megoldaná, ha a fermionok és bozonok párban léteznének, azonos tulajdonságokkal (tömeg, töltés)

A fermionok SUSY-partnerei

Leptonok ($S = \frac{1}{2}$) e, μ, τ ν_e, ν_μ, ν_τ	skalár leptonok ($S = 0$) $\tilde{e}, \tilde{\mu}, \tilde{\tau}$ $\tilde{\nu}_e, \tilde{\nu}_\mu, \tilde{\nu}_\tau$
Kvarkok ($S = \frac{1}{2}$) u, d, c, s, t, b	skalár kvarkok ($S = 0$) $\tilde{u}, \tilde{d}, \tilde{c}, \tilde{s}, \tilde{t}, \tilde{b}$

Antirészecske \leftrightarrow antipartner

$$X_L, X_R \leftrightarrow \tilde{X}_1, \tilde{X}_2$$



A bozonok SUSY-partnerei

Elemi bozon	spin	SUSY-partner	spin
foton: γ	1	fotino: $\tilde{\gamma}$	$\frac{1}{2}$
gyenge bozonok: Z, W^+, W^-	1	zínó: \tilde{Z}	$\frac{1}{2}$
	1	wínó: \tilde{W}^+, \tilde{W}^-	$\frac{1}{2}$
gluonok: g_1, \dots, g_8	1	8 gluínó: $\tilde{g}_1, \dots, \tilde{g}_8$	$\frac{1}{2}$
Higgs-terek $H_1^0, H_2^0, H_1^+, H_2^-$	0	higgszínók $\tilde{H}_1^0, \tilde{H}_2^0, \tilde{H}_1^+, \tilde{H}_2^-$	$\frac{1}{2}$
graviton	2	gravitínó	$\frac{3}{2}$

két Higgs-dublett \Rightarrow 5 Higgs-bozon: h, H, A, H^+, H^-



Szuperszimmetria? Minek?

A szuperszimmetria nyilvánvalóan sérül:
nincsenek ilyen részecskék,
vagy sokkal nagyobb tömeggel

Mire jó egy **sérülő** szimmetria?

Higgs-mechanizmus:
szimmetria-sértő tér \Rightarrow tömeg, renormálás

Higgs-tér sért egy **létező** szimmetriát

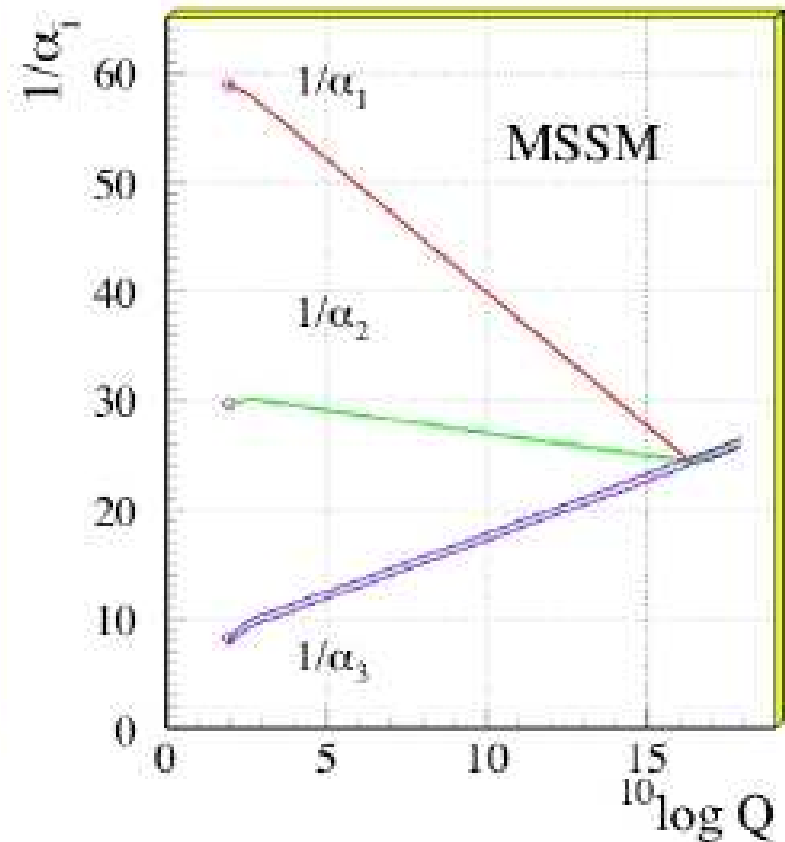
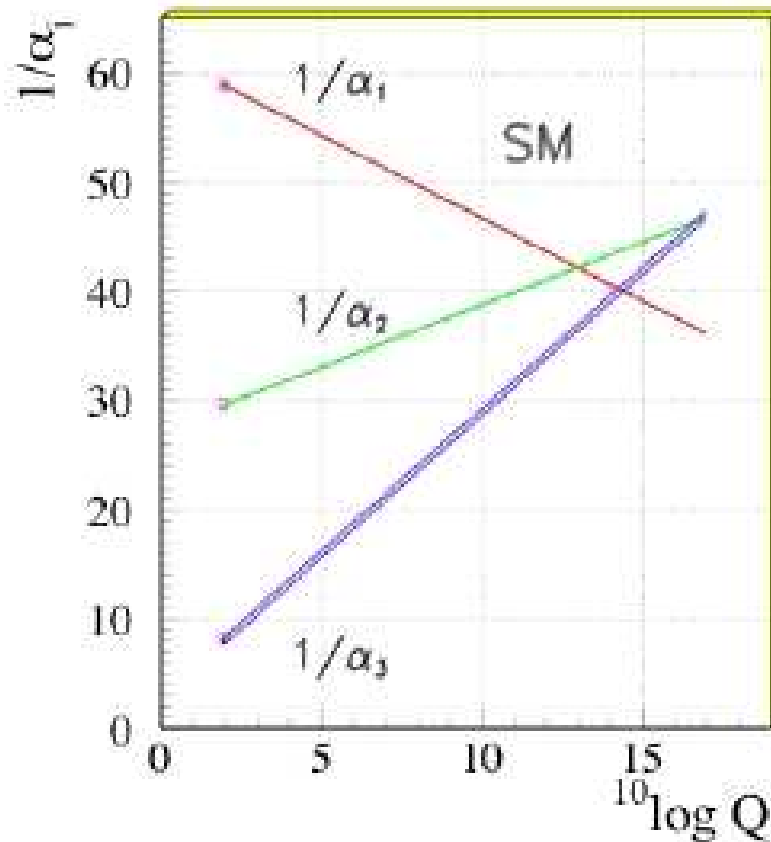


SUSY bevezet egy **nemlétezőt**

Mindez egy racionális, konzisztens elméletért



A mérték-kölcsönhatások egyesítése

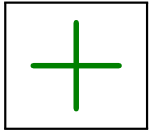


Standard Modell: Nagy energián közelítő, de nem konvergáló mértékcsatolások

SUSY: Tökéletes konvergencia $\sim 10^{16}$ GeV körül



Szuperszimmetria: + és –



- elmélet természetessége
- Unverzum hideg, sötét anyaga (23 %):
legkönnyebb SUSY-részecske
- kölcsönhatások egyesítése
- gravitáció is beilleszthető

DE:



- SUSY-sértés mechanizmusa ??
- Sok különböző SUSY-modell
- Rengeteg új paraméter
- $\tilde{m} \sim 100$ GeV alatt nem látunk SUSY-részecskét



SUSY-részecskék keresése

Keletkezés párban, bomlás közösleges és
SUSY-részecskére

Tulajdonságok **modell- és parameter-függők**

Legkönnyebb SUSY-részecske (LSP) nem figyelhető meg
⇒ csak **hiányzó energia** látszana

LSP melyik? Modellfüggő...

SUSY- (és Higgs-) keresés a CERN-ben:
Large Electron-Positron collider (LEP), 1989 – 2000;
Large Hadron Collider (LHC), 2008 –



Elveszett szimmetriák?

„... a fizika alapvető egyenletei több szimmetriával rendelkeznek, mint az aktuális fizikai világ”

Frank Wilczek: *In search of symmetry lost*, Nature 433 (2005) 239

- **CPT-invariancia:** abszolút, alapvető, nem sérülhet (?)
- **Gyenge kölcsönhatás:** sérti a paritást és CP -t (tehát időtükrözési szimmetriát is!)
- Higgs-tér spontán sérti az elektrogyenge kölcsönhatás helyi szimmetriáját, és azzal tömeget teremt, divergenciát töröl.
- Szuperszimmetria ??



Konklúzió helyett

"Van egy elmélet, miszerint, ha egyszer kiderülne, hogy mi is valójában az Univerzum, és mit keres itt egyáltalán, akkor azon nyomban megszűnne létezni, és valami más, még bizarrabb, még megmagyarázhatatlanabb dolog foglalná el a helyét"

"Van egy másik elmélet, amely szerint ez már be is következett"

Douglas Adams: *Vendéglő a világ végén* (Nagy Sándor fordítása)

