

BEVEZETÉS A RÉSZECSEFIZIKÁBA

Pásztor Gabriella

Gabriella.Pasztor@cern.ch

CERN Hungarian Teachers Programme

2011. augusztus 15-10.

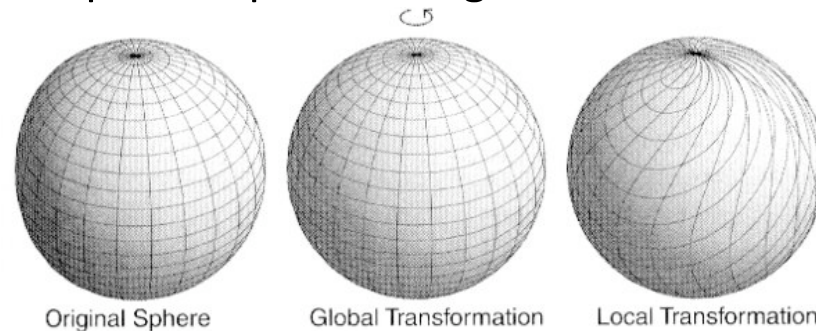
2. RÉSZ

Szimmetriák a részecskefizikában

Elemi részecskék tömege és a Higgs bozon

SZIMMETRIÁK SZEREPE A FIZIKÁBAN

- **Noether-tétel:** minden szimmetriához tartozik egy megmaradó mennyiség
 - idő-eltolás → energia megmaradás
 - térbeli-eltolás → impulzus megmaradás
 - forgás → impulzusmomentum megmaradás
 - folytonos lokális szimmetria elektromágneses térben → elektromos töltés
- **Lokális szimmetria:** pontról pontra meghatározott módon modosuló



- **Wigner-tétel:** fizikai törvények szimmetriája határozza meg a természetben található részecskék tulajdonságait
- A szimmetriák a fizikusok leghatékonyabb eszközei a világ megértésében
- **Mértékelmékekben minden erő (elemi kölcsönhatás) egy lokális mértékszimmetriából ered**

PARITÁSSÉRTÉS

- Paritás vagy tértükrözés, $P: (x,y,z) \rightarrow (-x,-y,-z)$
- A $\tau - \theta$ paradox: két részecske azonos tulajdonságokkal, de különböző paritással:
 $\tau^+ \rightarrow \pi^+\pi^0$ és $\theta^+ \rightarrow \pi^+\pi^0\pi^0, \pi^+\pi^+\pi^-$ $J^P(\pi)=1^-$
- 1956: T.D. Lee és C.N. Yang áttekinti az eddigi eredményeket **NOBEL 1957**
 - A paritás megmaradás kísérleti bizonyítékai mind EM és erős folyamatokra vonatkoztak
 - Ha a gyenge kh. sérti a paritást, $\tau^+ = \theta^+ (\equiv K^+)$
 - Javaslatok a kísérleti ellenőrzésére

1957: **Experimental Test of Parity Conservation in Beta Decay***
 C. S. Wu, *Columbia University, New York, New York*
 AND
 E. AMBLER, R. W. HAYWARD, D. D. HOPPEs, AND R. P. HUDSON,
National Bureau of Standards, Washington, D. C.
 (Received January 15, 1957)
 The inspiring discussions held with Professor T. D. Lee and Professor C. N. Yang by one of us (C. S. Wu) are gratefully acknowledged.

Observations of the Failure of Conservation of Parity and Charge Conjugation in Meson Decays: the Magnetic Moment of the Free Muon*
 RICHARD L. GARWIN,† LEON M. LEDERMAN,
 AND MARCEL WEINRICH
*Physics Department, Nevis Cyclotron Laboratories,
 Columbia University, Irvington-on-Hudson,
 New York, New York*
 (Received January 15, 1957)

The authors wish to acknowledge the essential role of Professor Tsung-Dao Lee in clarifying for us the papers of Lee and Yang. We are also indebted to Professor C. S. Wu⁶ for reports of her preliminary results in the Columbia discussions immediately preceding this experiment.

Phys. Rev. 105 (1957) 1413-1414

Phys. Rev. 105 (1957) 1415-1417

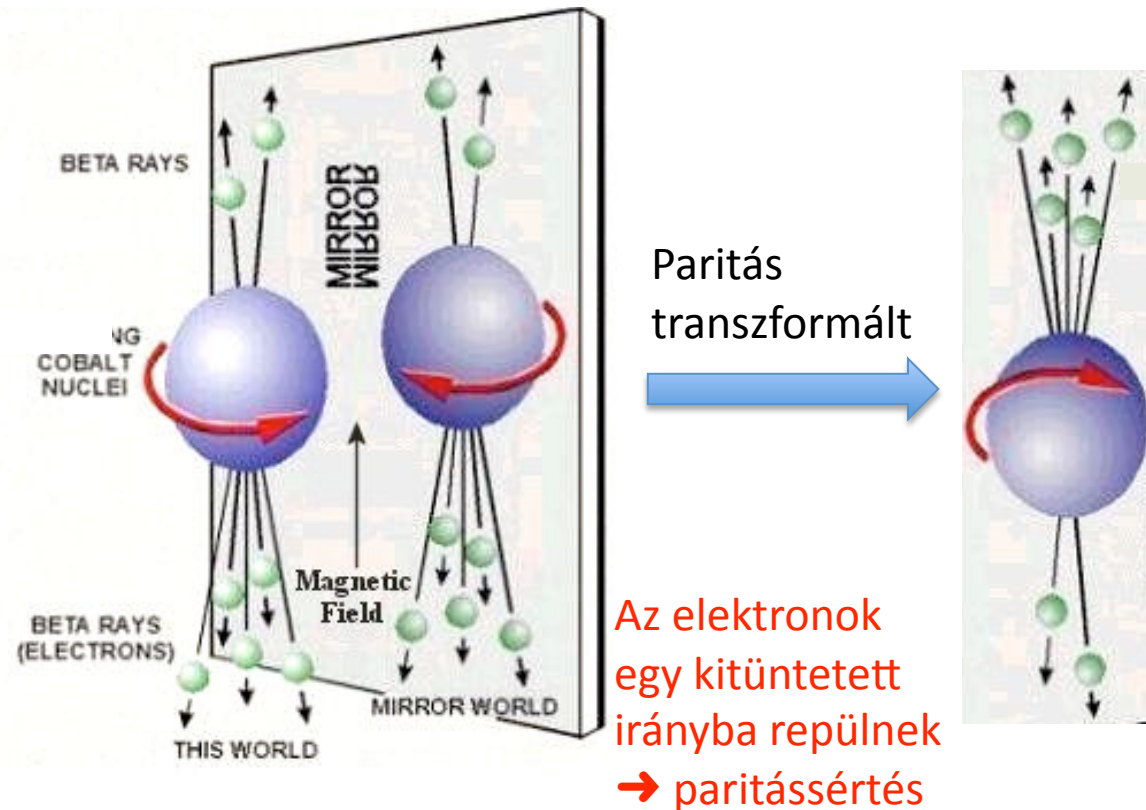
C.S. WU ET AL. KÍSÉRLET

- Polarizált ^{60}Co β -bomlásának vizsgálata
- Alacsony hőmérséklet ($T \approx 0.01\text{K}$), mágneses tér: Co atomok spinje beáll a mágneses tér irányába
- $^{60}\text{Co} \rightarrow ^{60}\text{Ni}^* e^- \nu_e$
 $J=5 \quad J=4 + \frac{1}{2} + \frac{1}{2}$
 $\rightarrow \quad \rightarrow \quad \rightarrow \quad \rightarrow$
- Az elektronok a mágneses tér irányával ellentétes irányba repülnek
- Maximális paritás sértés

Paritás

$$P(\vec{r}) = -\vec{r}$$

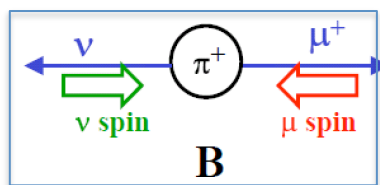
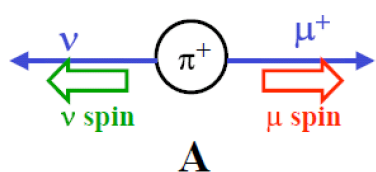
$$P(L) = P(\vec{r} \times \vec{p}) = L$$



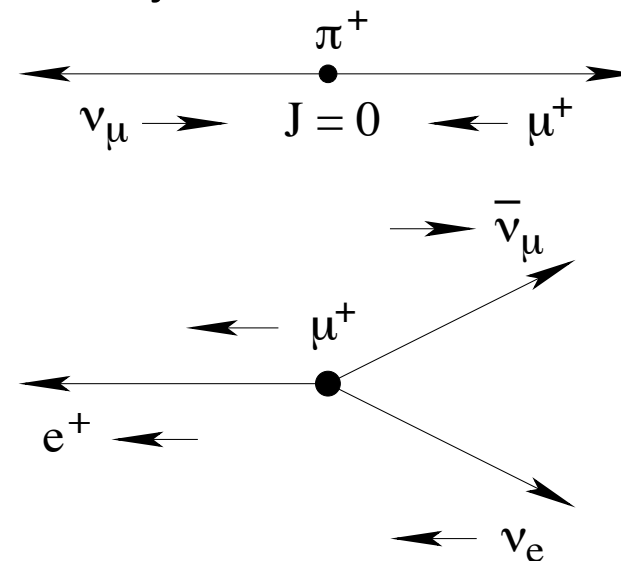
Az elektronok egy kitüntetett irányba repülnek
 → paritás sértés

R.L. GARWIN ET AL. KÍSÉRLET

- $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+$ folyamat vizsgálata egy 85 MeV-es pion nyaláb segítségével
- A $S=0$ pionokat megállítják szénben
- A $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ gyenge bomlásban keletkező muonokat lelassítják



- A muon is elbomlik gyenge kölcsönhatással
- A keletkező pozitronok irányát vizsgálják
- A pozitronok követik a muon spinjének irányát, amikor azt mágneses térben precesszálják
 → a paritás sérül



R.L. GARWIN ET AL. KÍSÉRLET

3. ábra. Lederman kísérlete [4]: A szénben lefékeződő pionok bomlásánál keletkező müonok lelassulnak és a mágneses térben precesszálva időben változó irányban bocsátják ki a bomlási pozitronokat, ami a tükrözési szimmetria és paritásmegmaradás sértését jelenti.

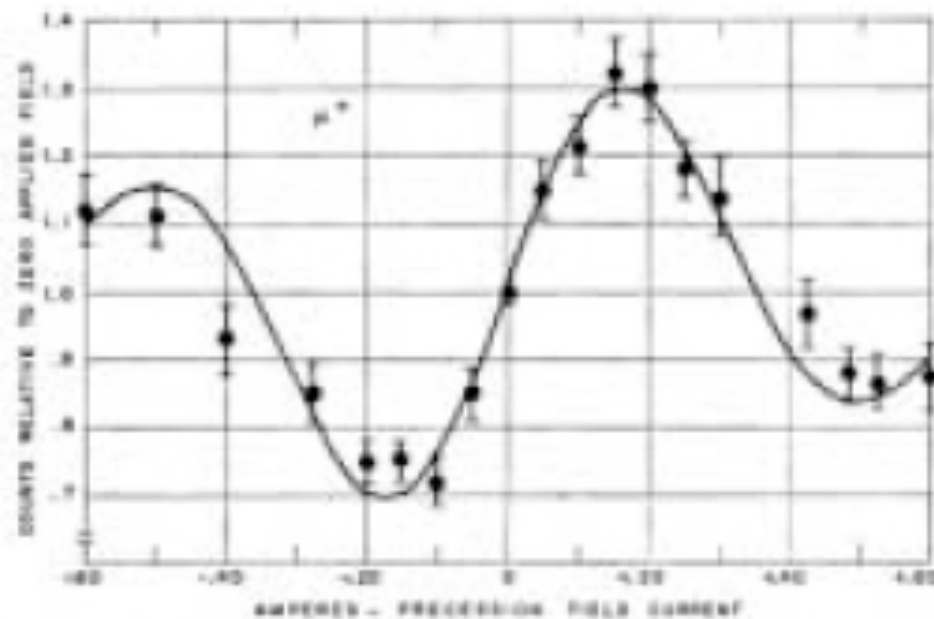
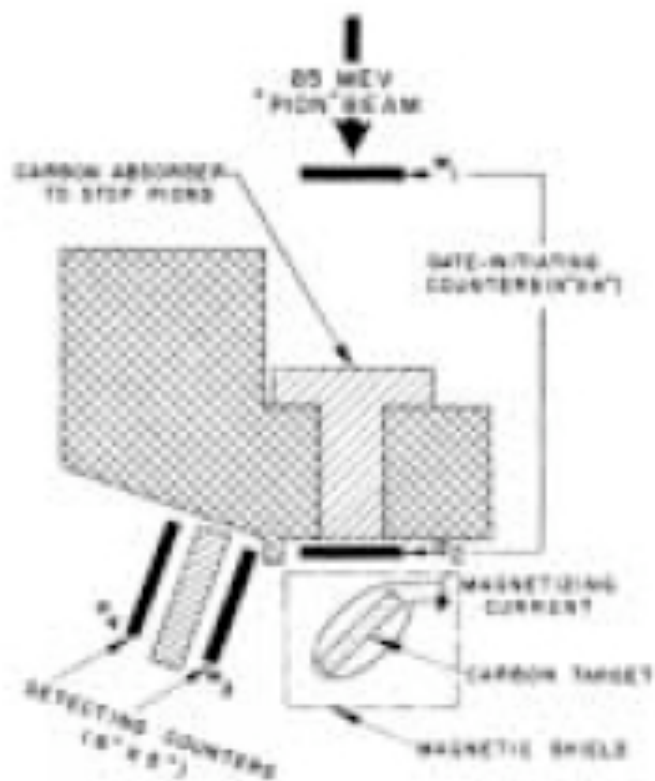
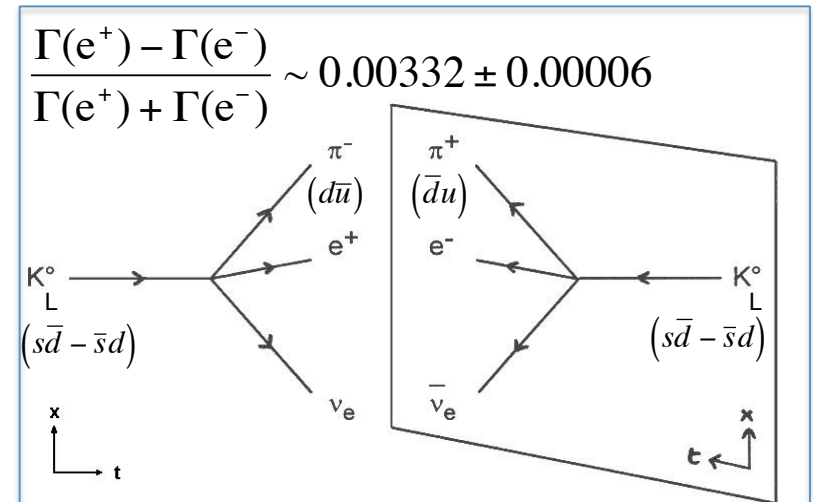


FIG. 2. Variation of gated 3-4 counting rate with magnetizing current. The solid curve is computed from an assumed electron angular distribution $1 - \frac{1}{2} \cos \theta$, with counter and gate-width resolution folded in.

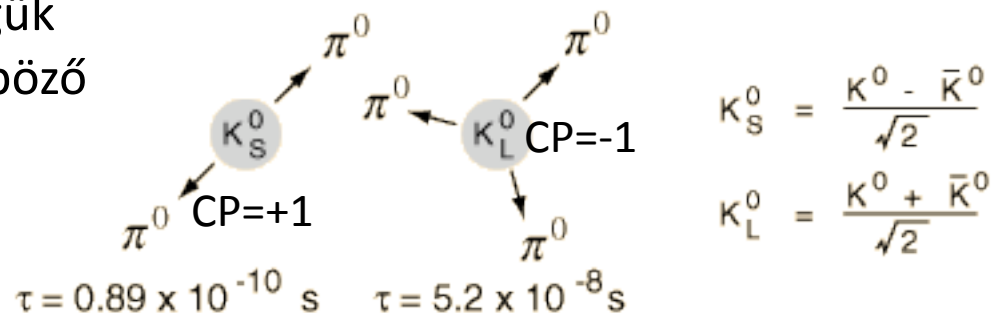
CP TÜKRÖZÉSI SZIMMETRIA SÉRTÉS

- **Paritás vagy tértükrözés, P:** $(x,y,z) \rightarrow (-x,-y,-z)$
1957: a bal-kezes neutrínó jobb-kezes tükörpárját nem észlelik \rightarrow paritássértés
- **Töltés-tükrözés, C:** részecske \rightarrow antirészecske
- **CP tükrözés:**
(pl. bal-kezes ν \rightarrow jobb-kezes anti- ν)
1964: CP-sértés gyenge folyamatokban, semleges K^0 mezonok bomlásában
1980: Cronin, Fitch kísérleti Nobel díj
- **A részecskefizika Standard Modellje leírja a CP-sértés jelenségét, ám meg nem magyarázza annak eredetét**
- **Anyag - antianyag aszimmetria:** az univerzumban minden anyag részecskére $\sim 10^{10}$ foton (10^{10} megsemmisült részecske - antirészecske pár) jut
- **Az ismert CP sértő folyamatok lényegesen ritkábbak, mint amit az univerzumban észlelt aszimmetria magyarázata igényel**
- **Fontos kutatási irány napjainkban is a CP sértés**

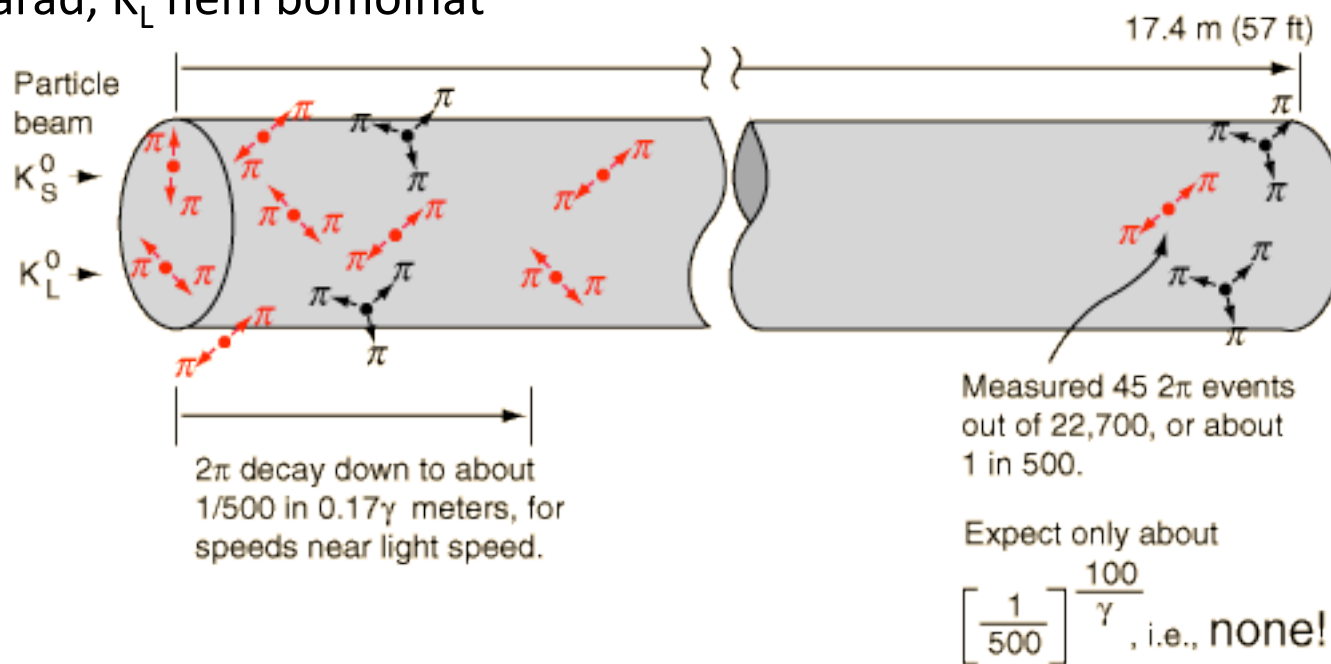


CRONIN AND FITCH KÍSÉRLET

- Két fajta semleges kaon: tömegük azonos, de élettartamuk különböző



- Ha CP megmarad, K_L nem bomolhat 2 pionra



CPT-INVARIANCIA

- A térelmélet alaptétele:
$$\text{CPT } |p(r, t) \rangle \sim |\bar{p}(-r, -t) \rangle \sim |p(r, t) \rangle$$

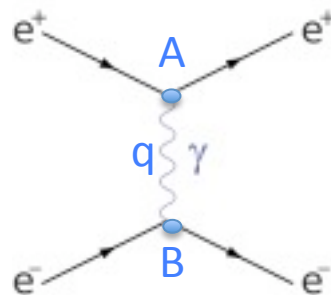
Szabad anti-részecske \sim tér-időben visszafelé haladó részecske
- CPT sérülése komoly problémákat okozna. Sérülne
 - a kölcsönhatások lokálitása, a kauzalitás, vagy
 - az unitaritás, az anyag, információ, ... megmaradás, vagy
 - A Lorent-invariancia.
- Feltételezés: CPT nem sérül
- Ellenőrizni kell (vannak CPT-sértő modellek)
- CERN AD anti-proton lassító (ALPHA, **ASACUSA**, ATRAP):
proton – anti-proton (m, q, μ) összehasonlítás
hidrogén – anti-hidrogén (spektroszkópia) összehasonlítás

MÉRTÉK-KÖLCSÖNHATÁSOK ELMÉLETE

- Pontszerű fermion (pl. elektron) mozog lokális (mérték)szimetriájú térben
- Standard Modellben 3-féle lokális szimmetria, 3 mértékkölcsönhatás van: elektromágneses, gyenge és erős (avagy szín) kcsh.
- Ezeket 3-féle mértékbozon közvetíti: foton, W és Z bozon, gluon

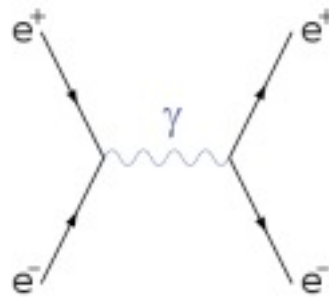
KVANTUMELEKTRODINAMIKA (QED)

- Elektromágneses jelenségek kvantumelmélete
- Töltött részecskék szóródása egymáson:



a belső (nem-észlelhető, virtuális) photon q impulzust visz át a két részecske között A-ból B-be

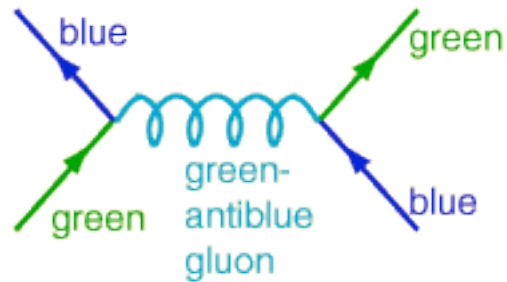
- Elektron-pozitron megsemmisülés



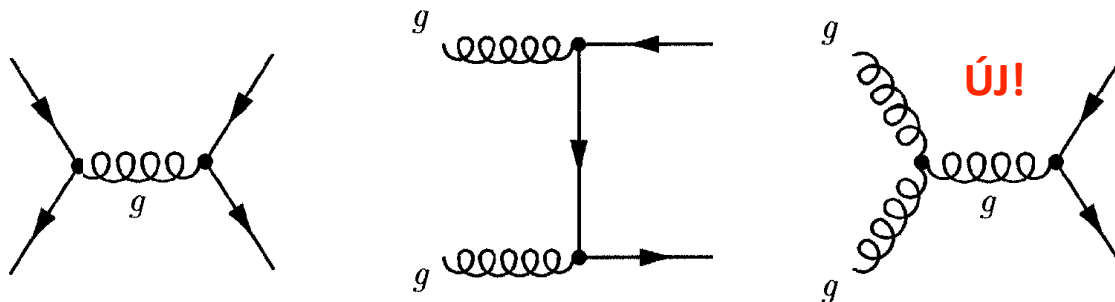
- A Feynman-gráfok megadják a receptet a kölcsönhatási valószínűségek kiszámolására

KVANTUMSZÍNDINAMIKA (QCD)

- Szín-szín kölcsönhatás kvantumelmélete
- A közvetítő gluon színt hordoz: $R\bar{R}, G\bar{G}, B\bar{B}, R\bar{G}, R\bar{B}, G\bar{R}, B\bar{R}, B\bar{G}, G\bar{B}$
- Mivel $(R\bar{R}+G\bar{G}+B\bar{B})/\sqrt{3}=1$, csak 8 független



- A foton nem hordoz töltést. A gluon igen... van gluon-gluon kcsh!



MÉRTÉK-KÖLCSÖNHATÁSOK ELMÉLETE

- Pontszerű fermion (pl. elektron) mozog lokális (mérték)szimmetriájú térben
- Standard Modellben 3-féle lokális szimmetria, 3 mértékkölcsönhatás van: elektromágneses, gyenge és erős (avagy szín) kcsh.
- Ezeket 3-féle mértékbozon közvetíti: foton, W és Z bozon, gluon

- A fermionoknak és mértékbozonoknak nulla tömegűnek kell lennie ahhoz, hogy a mértékszimmetria megmaradjon
- Foton és gluon: OK
- Fermionoknak, W és Z bozonoknak van tömege

- Hogyan oldható fel ez az ellentmondás?

SPONTÁN SZIMMETRIASÉRTÉS

Analógia: Emberke a sombrérón

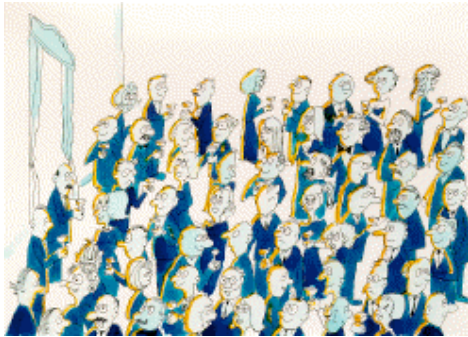
- A sombréró csúcsán ülő emberke szemével a világ teljesen kör (forgás) szimmetrikus
- A természet törvényei is szimmetrikusak (példánkban a gravitáció számára nincs kitüntetett irány)
- A csúcsról azonban bármilyen kicsi fluktuáció (remegés) kibillentheti emberkénket, aki egy véletlen irányban csúszik le a kalap karimájára
- Helyzete a karimán immár sérti a rendszer szimmetriáját, noha a természet törvényei szimmetrikusak maradnak (nincs kitüntetett irány)



Higgs mechanizmus (1964):

A Higgs-tér legalacsonyabb energiájú (alap) állapotában nem-nulla értéket vesz fel (\sim kalap karimájának sugara). Ezt a nem nulla értéket érzik azon elemi részecskék, akiknek van gyenge töltése (W, Z, fermionok és maga a Higgs is). Ezzel kölcsönhatásba lépve kapnak tömeget.

A TÖMEG EREDETE ÉS A HIGGS BOZON



Képzeld el egy termet tele tanárokkal, akik halkan társalognak
→ Világunk megtöltve Higgs-mezővel



Belép egy híres ember és zavart kelt a tömegben, ahogy minden lépésénél magához vonza csodállói egy csoportját...



...ez megnehezíti haladását
→ tömeget kap, akárcsak egy részecske, amint áthalad a Higgs mezőn



Ha egy szenzációs hír éri el a termet, az hasonlóképpen csoportosulásokat hoz létre...



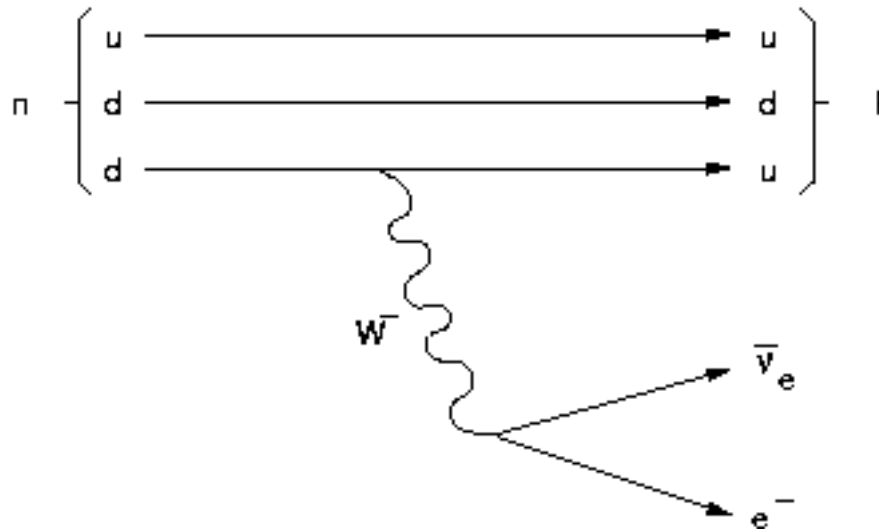
...ezúttal maguk a tanárok között
→ analógiánkban, ezek a csoportok a Higgs bozonok

A TÖMEG EREDETE ÉS A HIGGS BOZON

- A Standard Modellben az elemi részecskék tömege csupán egy bemenő paraméter
- **Kulcs kérdés: honnan származik a tömeg és miért van a különböző elemi részecskéknek eltérő tömege?**
- 1964-ban Peter Higgs (és függetlenül F. Englert, R. Brout valamint G. Guralnik, C.R. Hagen és T. Kibble) javasolta megoldást:
A teret betölti egy fizikai mező (ú.n. Higgs-mező), és a részecskék ezzel a mezővel kölcsönhatva kapják tömegüket, minél erősebb a kölcsönhatás, annál nehezebb a részecske
- **Az elmélet következménye (a spontán szimmetriasértés mellékterméke) egy új nehéz semleges skalár részecske, a Higgs bozon**
- Higgs bozon nélkül a SM nem működik: baj van az elemi részecskék tömegével, sőt a gyenge kcsh-ban divergenciák (végtelenek) is megjelennek

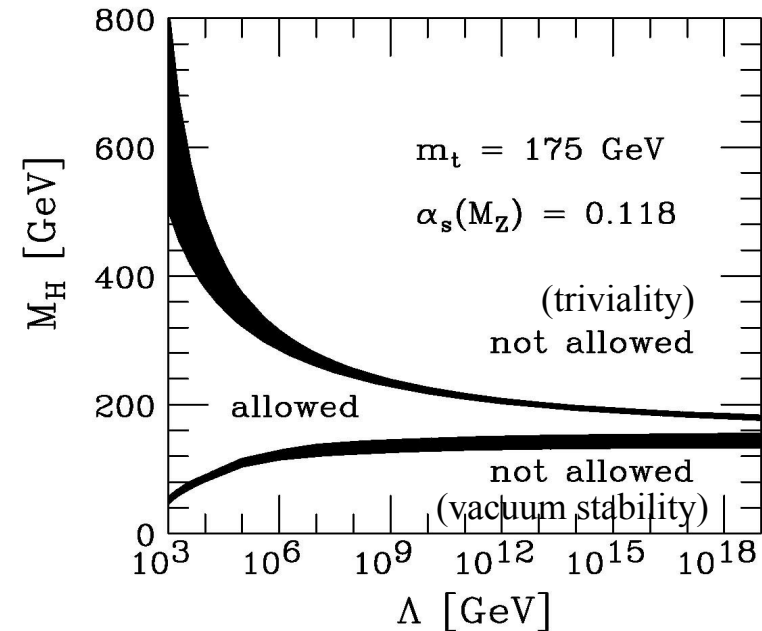
ELEKTROGYENGE KÖLCSÖNHATÁS

- Az elektromágneses és gyenge kölcsönhatás egyesítése a Higgs-mechanizmus közreműködésével
- Közvetítők: nulla-tömegű foton, nehéz W^+ , W^- , Z
- Példa: neutron bomlás



A STANDARD MODELL HIGGS BOZONJA

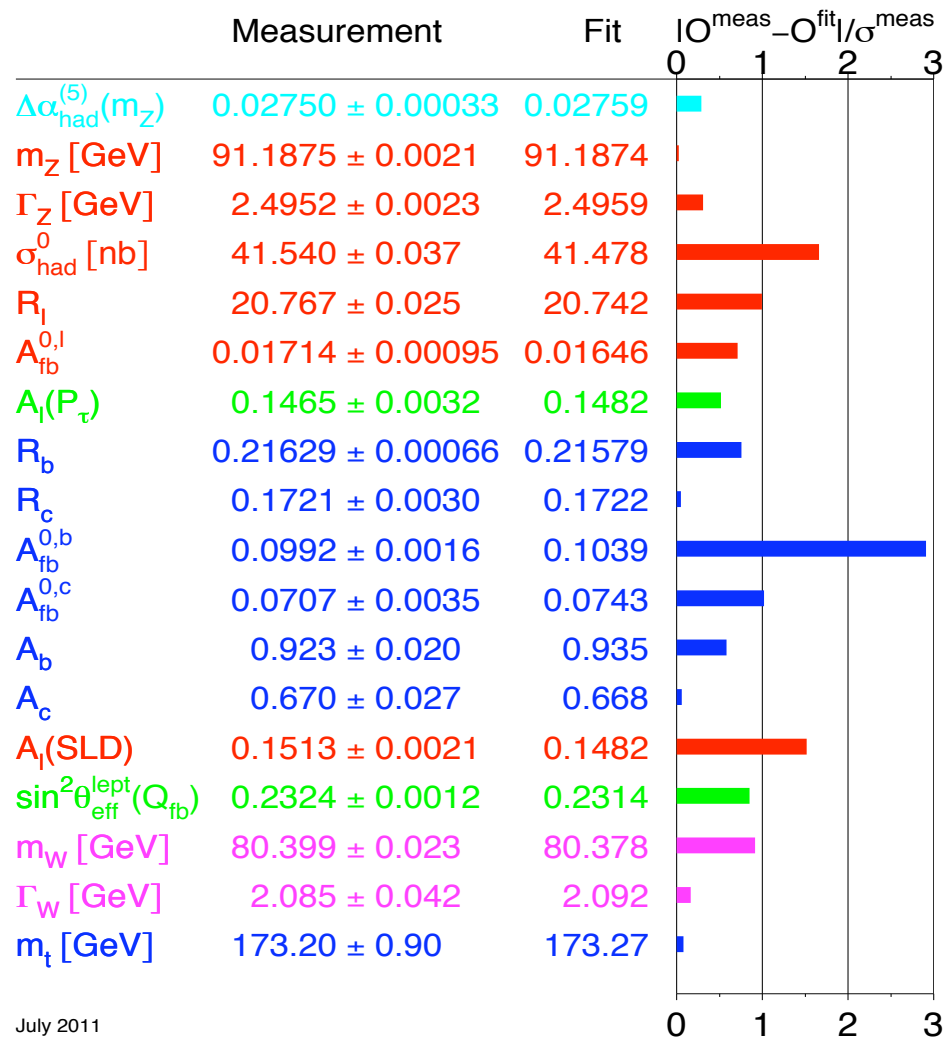
- Skalár (spin=0), semleges, nehéz részecske
- Tömege a SM bemenő paramétere
- Unitaritás fennáll, ha $m_H \lesssim 700$ GeV
- Elméleti megfontolások alapján $115 \text{ GeV} \lesssim m_H \lesssim 180 \text{ GeV}$, ha a SM érvényes a Planck skáláig
- SM megadja a keletkezési hatáskeresztmetszetet és a bomlási valószínűségeket a Higgs tömeg függvényében, pl. $\sigma(H \rightarrow ff) \sim m_f^2/m_W^2$
- A Standard Modell utolsó hiányzó eleme, a részecskefizika legkeresettebb objektuma...



T. Hambye and K. Riesselmann, Phys. Rev. D55, 7255 (1997), hep-ph/9708416 v1
 Bounds on the Higgs boson mass based on arguments of self-consistency of the SM. Λ denotes the energy scale at which the SM would become non-perturbative or the electroweak potential unstable.

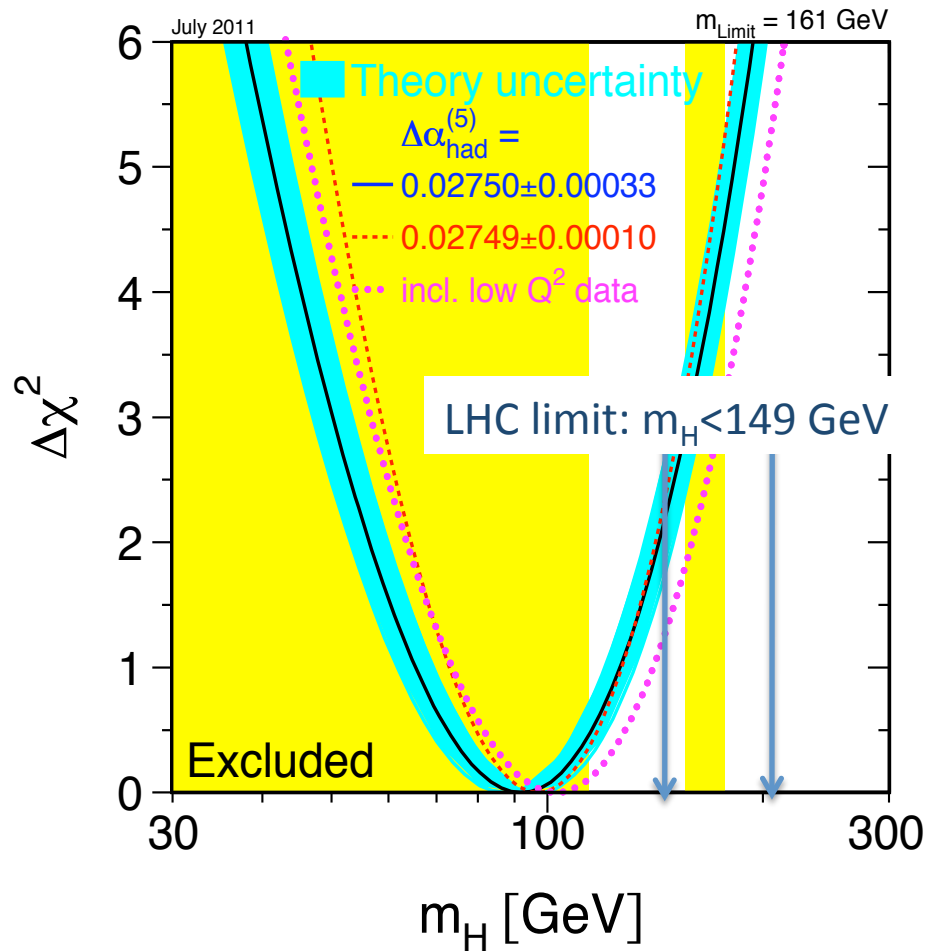
A STANDARD MODELL SIKERE

$| \text{mért} - \text{elmélet} | / \text{mérési pontosság}$



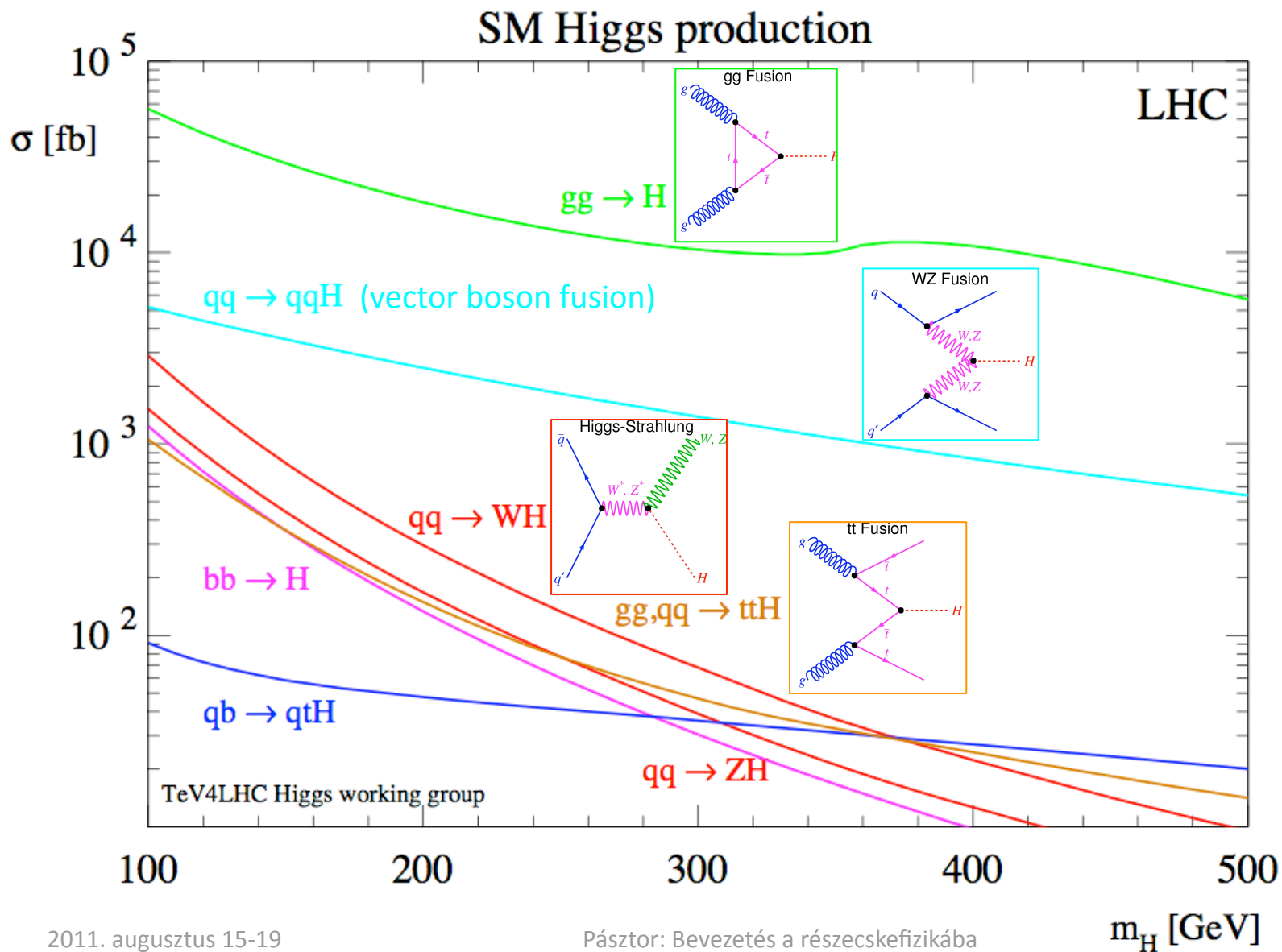
- Sok kísérlet (ALEPH, DELPHI, L3, OPAL @ LEP, D0, CDF @ Tevatron, SLD, ...) számos eredményének kombinációja
- Kevés kilógó eredmény
- Legnagyobb különbség jelenleg az $e+e- \rightarrow Z \rightarrow b\bar{b}$ előre-hátra aszimmetriája

A SM ÉRZÉKENYSÉGE A HIGGS TÖMEGÉRE

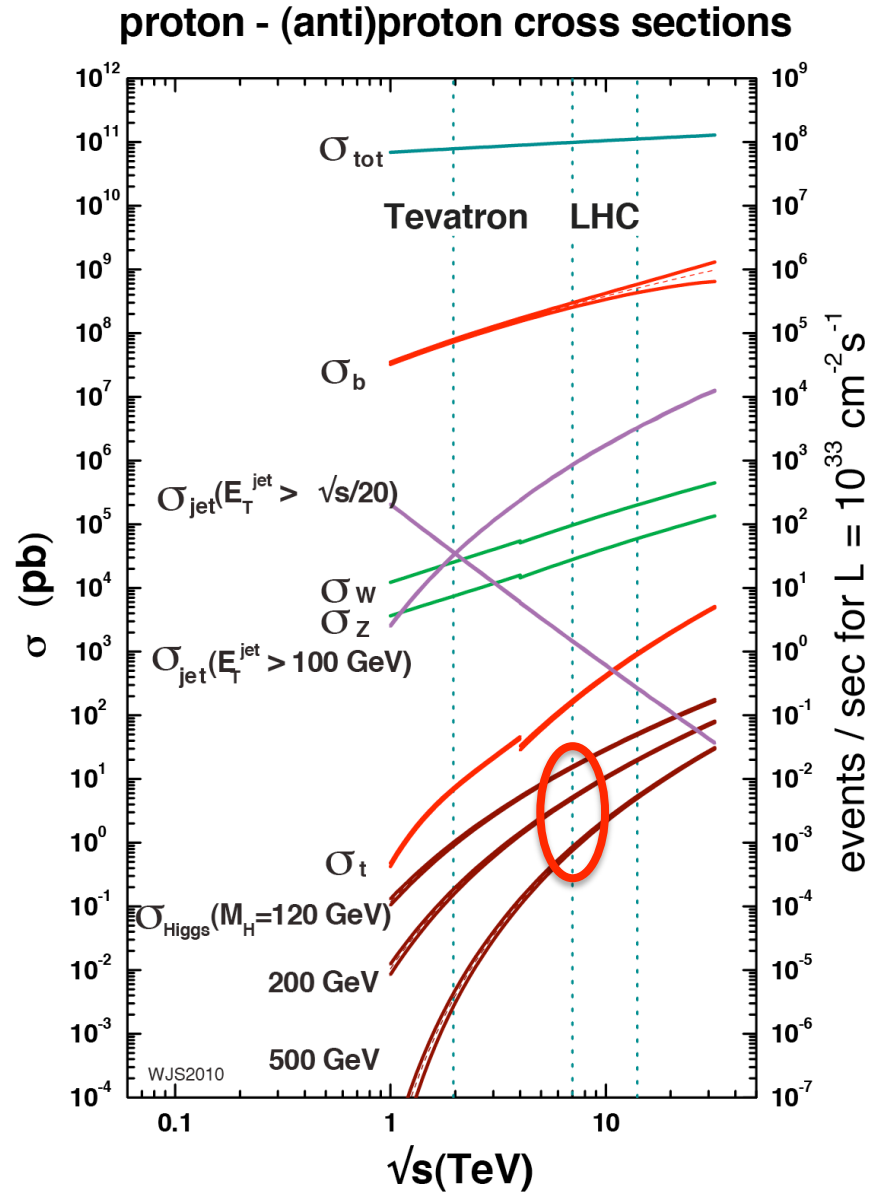


- Az illesztés jósága a mérésekre a Higgs tömeg függvényében
- Legjobb ~ 92 GeV
- Illesztés: $m_H < 161$ GeV
- LEP: $m_H > 114.4$ GeV
- Tevatron, LHC: $m_H \neq 149-209$ GeV és $m_H \neq 300-440$ GeV
- Néhány érdekes esemény az LHC ATLAS és CMS detektoraiban $m_{\text{mért}} \sim 140$ GeV körül... Nem pontosan modellezett háttér? Végre a Higgs részecske? Hamarosan kiderül...

HIGGS KELETKEZÉS AZ LHC-N (ELMÉLETI JÓSLAT!)

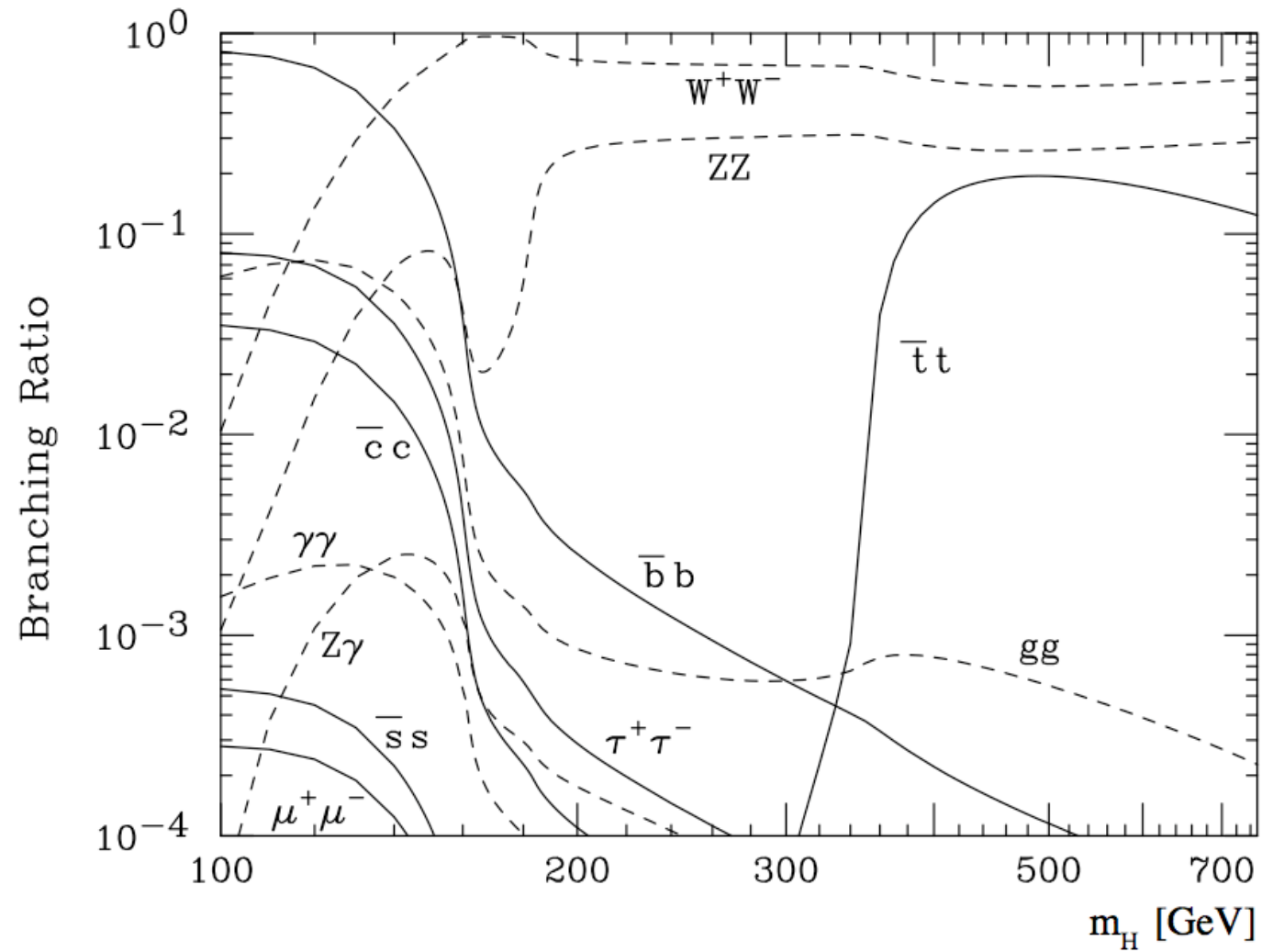


HIGGS KELETKEZÉS AZ LHC-N



- Alacsony hatáskeresztmetszet
- Sok háttér esemény közül kell kiválasztani a jelet

A SM HIGGS BOZON BOMLÁSA



KERESÉSI CSATORNÁK

$H \rightarrow ZZ$

- $H \rightarrow ZZ \rightarrow llll$: “Golden channel”
- $H \rightarrow ZZ \rightarrow ll\nu\nu$: Nagy tömegre
- $H \rightarrow ZZ \rightarrow llqq$: Nagy tömegre

$H \rightarrow WW$

- $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$: Legérzékenyebb
- $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu qq$: Leggyakoribb

$H \rightarrow \gamma\gamma$

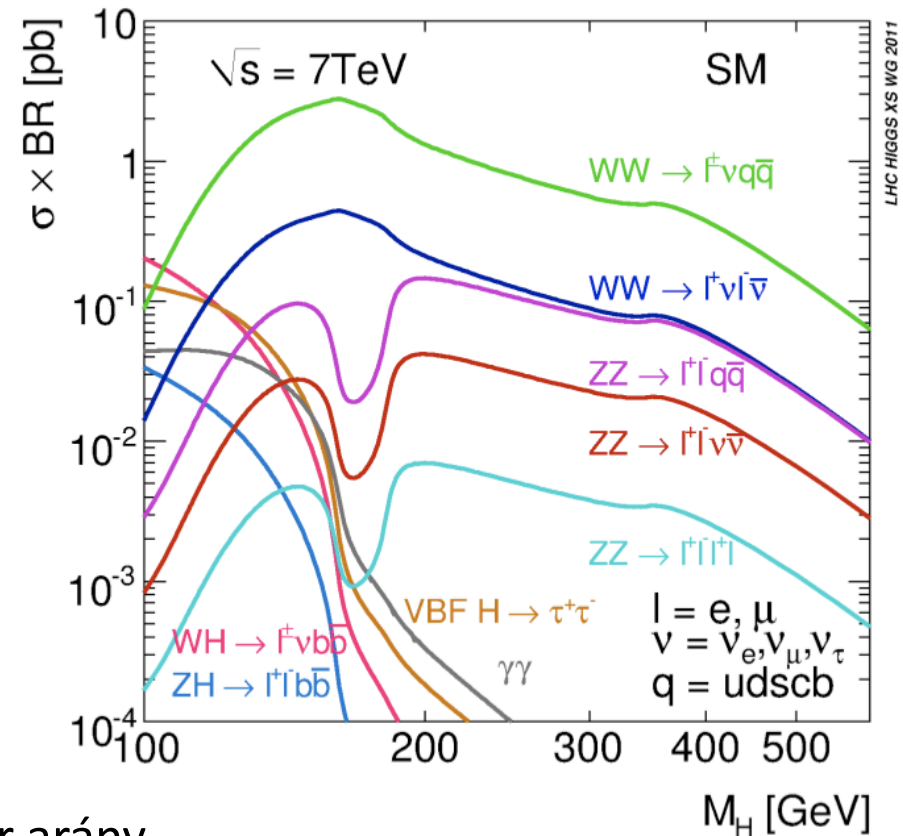
- Ritka, kis tömegre a legjobb

$H \rightarrow \tau\tau$

- Ritka, kis tömegre kedvező jel/háttér arány

$H \rightarrow bb$

- ttH , ZH , WH , hasznos de nehéz a jelentős háttér miatt



KERESÉSI CSATORNÁK

$H \rightarrow ZZ$

- $H \rightarrow ZZ \rightarrow \text{llll}$: "Golden channel"
- $H \rightarrow ZZ \rightarrow \text{ll}\nu\nu$: Nagy tömegre
- $H \rightarrow ZZ \rightarrow \text{ll}qq$: Nagy tömegre

$H \rightarrow WW$

- $H \rightarrow WW \rightarrow \text{lv}lv$: Legérzékenyebb
- $H \rightarrow WW \rightarrow \text{lv}qq$: Leggyakoribb

$H \rightarrow \gamma\gamma$

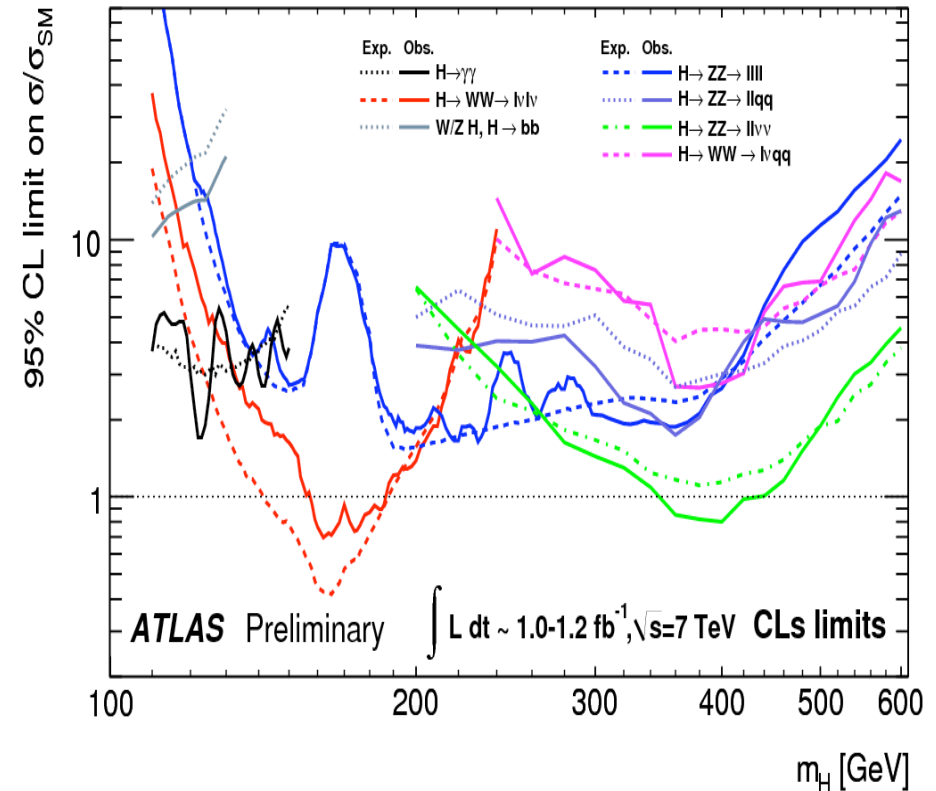
- Ritka, kis tömegre a legjobb

$H \rightarrow \tau\tau$

- Ritka, kis tömegre kedvező jel/háttér arány

$H \rightarrow bb$

- $t\bar{t}H$, ZH , WH , hasznos de nehéz a jelentős háttér miatt

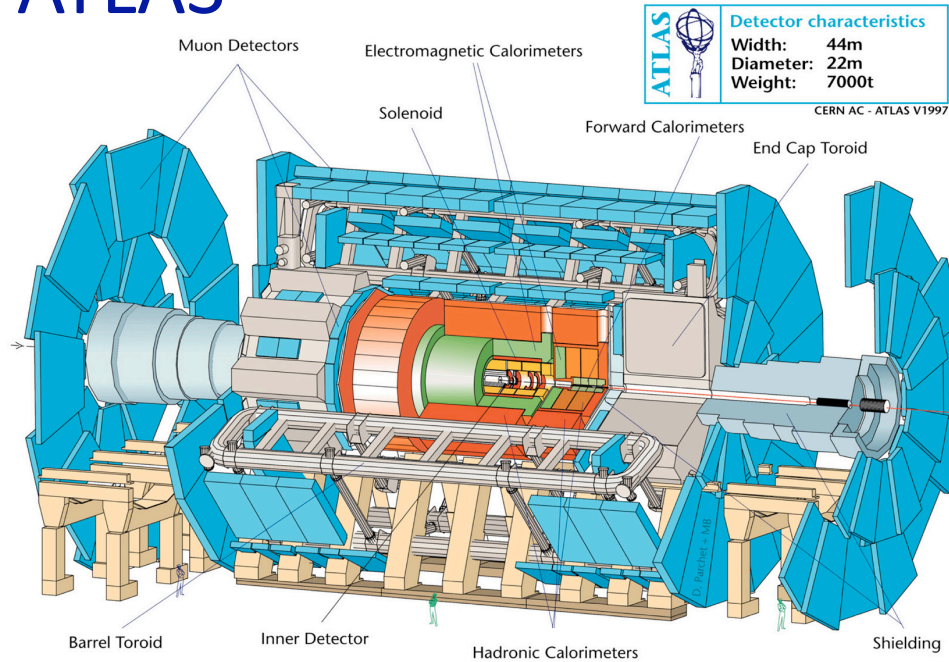


NEHÉZSÉGEK AZ LHC-N



- A relativisztikus proton impulzusán kvarkok és gluonok osztoznak
- Proton – proton ütközésben két kiterjedt, összetett objektum vesz részt, a p-p események bonyolultak
- e-e vs. p-p : acélgolyó vs. túrógombóc

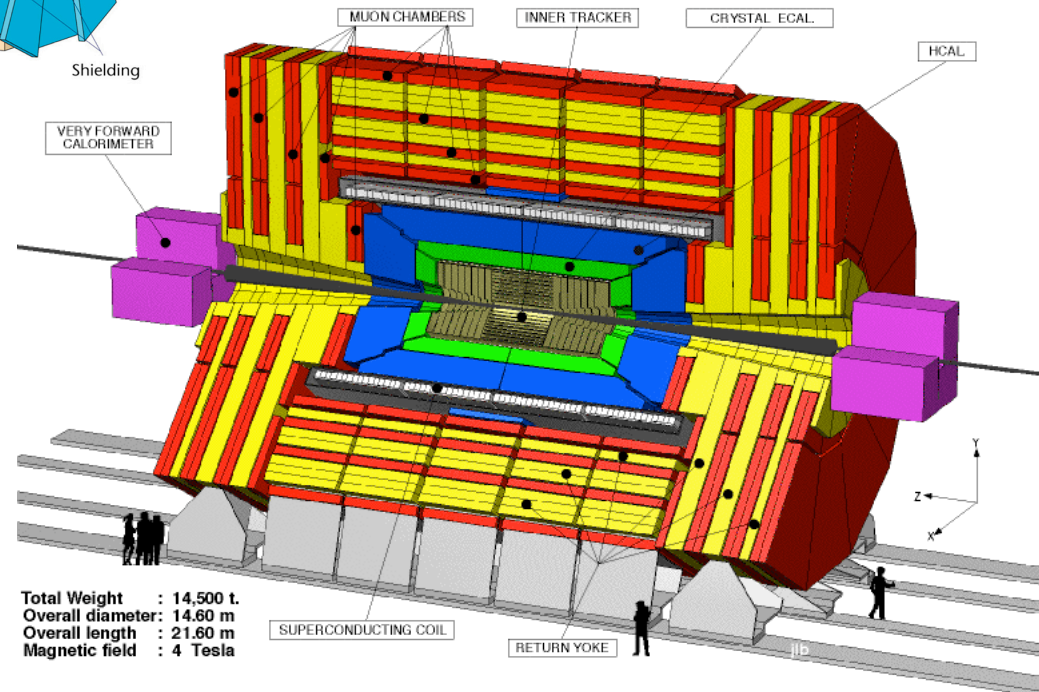
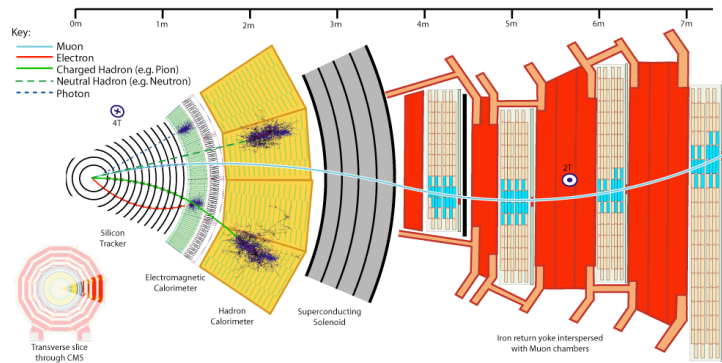
ATLAS



AZ LHC SOK-CÉLÚ DETEKTORAI

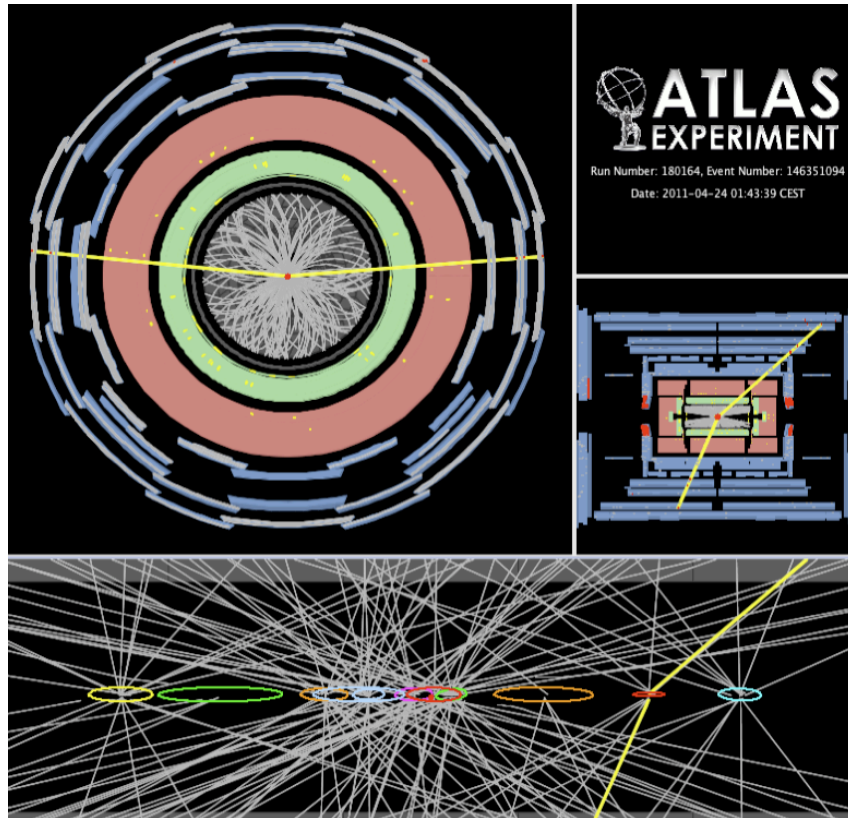
- Különböző filozófia a tervezésben
- Hasonló pontosság

CMS



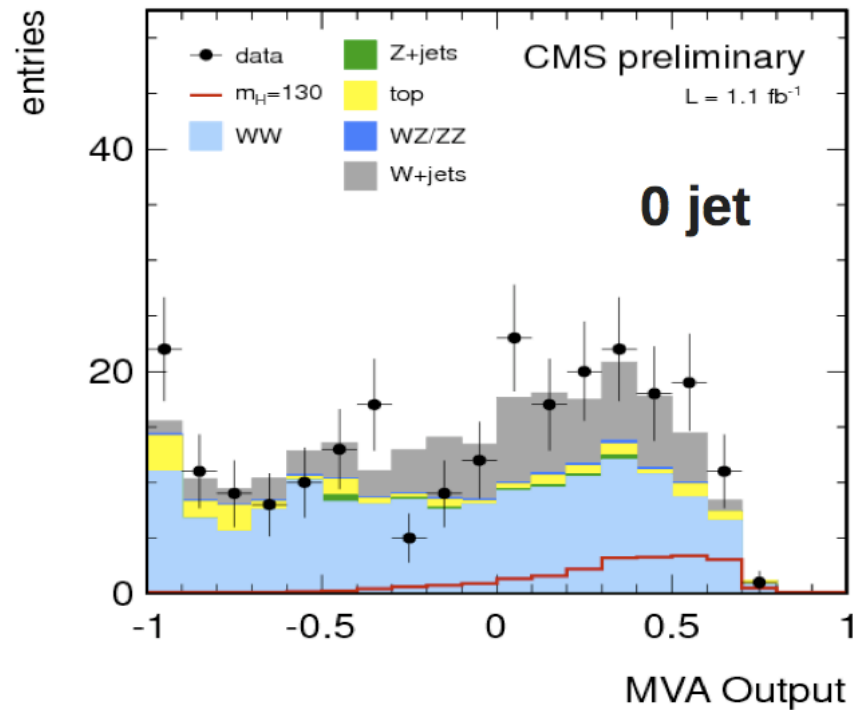
NEHÉZSÉGEK AZ LHC-N...

Magas luminozitás,
sok kölcsönhatás ütközésenként



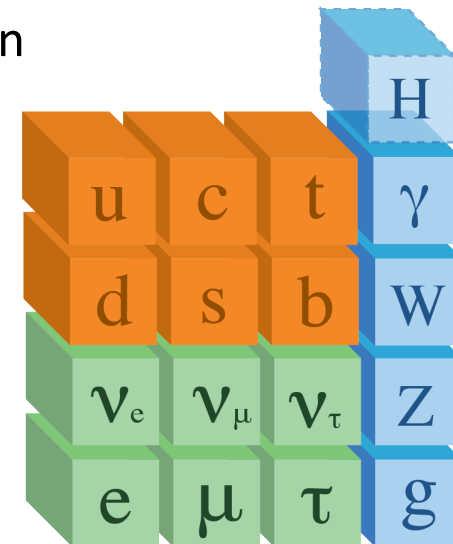
Még a legérzékenyebb keresési
végállapotoknál is jelentős háttér
egyéb SM folyamatokból

$H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$ jelölt események



STANDARD MODELL - ÖSSZEFOGLALÓ

- 3 fermion (+ anti-fermion) család, azaz (6 kvark*3 szín + 6 lepton) * 2 (*egy családon belül az össztöltés nulla!*)
- 12 kölcsönhatás-közvetítő bozon: γ , Z, W^+ , W^- , gluon
- 19 paraméter
 - **3 kölcsönhatási erősség** (“csatolási állandó”)
 - **9 fermion tömeg:**
 $m_e, m_\mu, m_\tau, m_d, m_u, m_s, m_c, m_b, m_t$
 - 3 keveredési szög, 1 CP-sértő fázis a kvark szférában (CKM mátrix)
 - 1 QCD vákum paraméter
 - 2 Higgs paraméter
(*még? hiányzik a Higgs bozon*)



- *Hogyan illenek ebbe a képbe a neutrínók???*