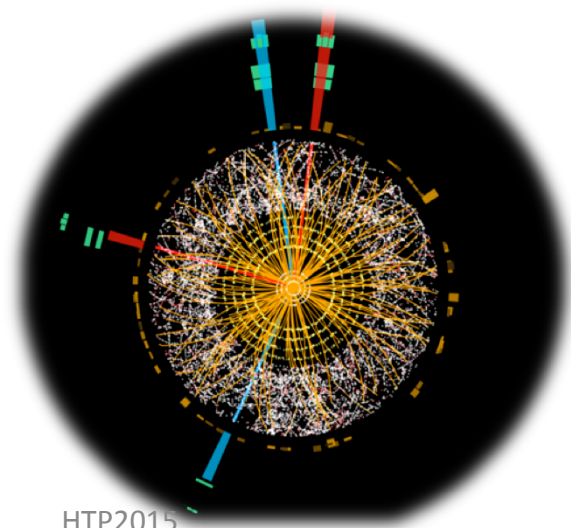


# BEVEZETÉS A RÉSZECSEKEFIZIKÁBA 2.

[Gabriella.Pasztor@cern.ch](mailto:Gabriella.Pasztor@cern.ch)

CERN Hungarian Teachers Programme  
2015. augusztus 17-21.



HTP2015

Pásztor: Bevezetés a részecskefizikába



79

# KÖZVETÍTŐ RÉSZECSKÉK: MÉRTÉK BOZONOK



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

erős – szín (spin = 1)			elektrogyenge (spin = 1)		
jel/név	tömeg GeV/c <sup>2</sup>	elektr. töltés	jel/név	tömeg GeV/c <sup>2</sup>	elektr. töltés
g gluon	0	0	γ gamma-foton	0	0
			W <sup>-</sup> W-bozon	80,39	-1
			W <sup>+</sup>	80,39	1
			Z <sup>0</sup> Z-null bozon	91,187	0

## A kölcsönhatások tulajdonságai

tulajdonság	erős		gyenge (elektrogyenge)	elektromágneses	gravitációs (nem az SM része)
	alapvető	visszamaradó			
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 <sup>-</sup> , W <sup>+</sup> , Z <sup>0</sup> -bozon	γ-foton	graviton (még nem figyelték meg)
relatív erősség két up kvarkra	25	-	0,8	1	10 <sup>-41</sup>
	60	-	10 <sup>-4</sup>	1	10 <sup>-41</sup>
két proton az atommagban	-	20	10 <sup>-7</sup>	1	10 <sup>-36</sup>

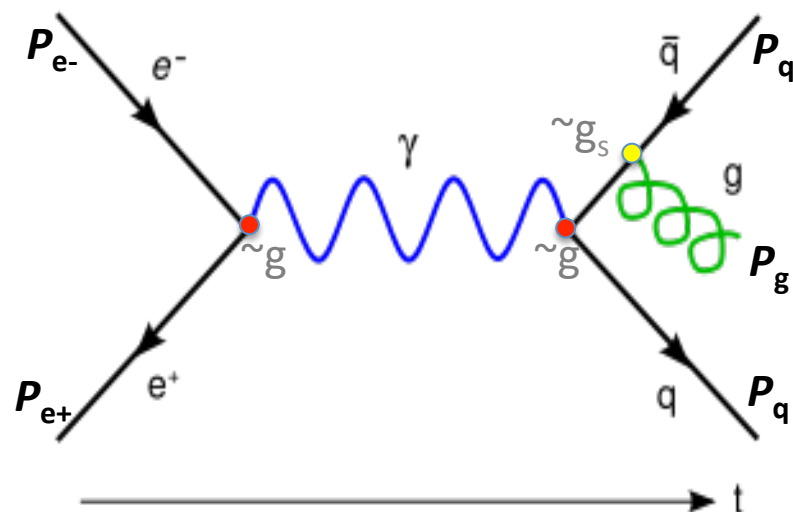


“Hierarchia probléma”: gravitációs erőnek a többi erőhöz viszonyított gyengesége

# FEYNMAN DIAGRAMMOK

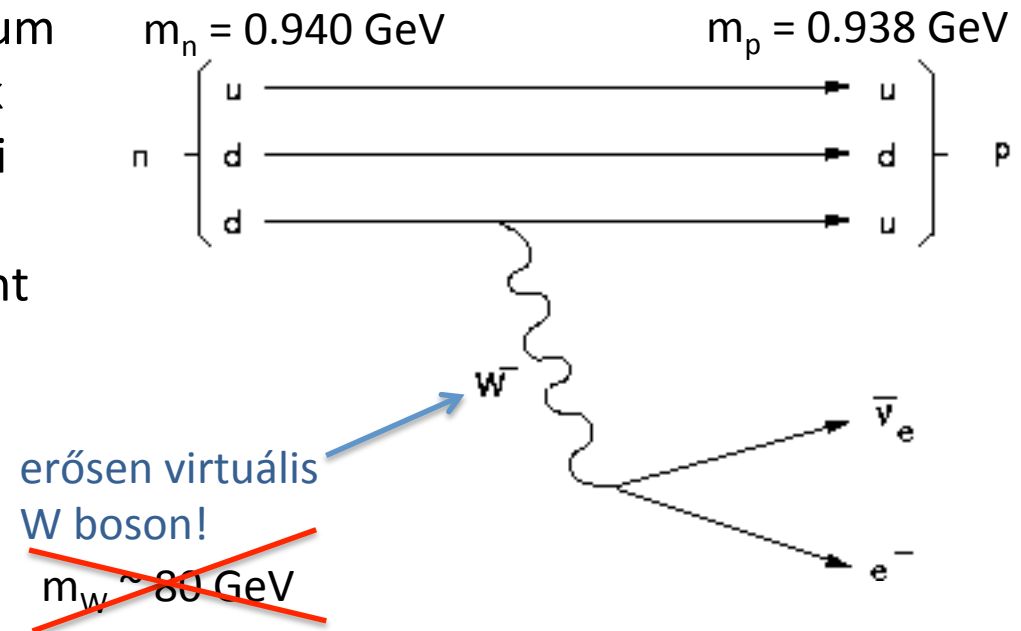
Képi megjelenítése a fizikai folyamatot leíró matematikai kifejezéseknek

- Minden részecskét más vonaltípus jelöl
- Szabad véggel rendelkező vonalak valódi, megfigyelhető részecskéket, egyik vertexből (részecskevonalak találkozási pontjából) a másikba futók virtuális részecskéket jelölnek
- Fermionoknál a részecskét és anti-részecskét a nyíl iránya különbözteti meg
- Minden vertexhez tartozik egy csatolási állandó
- Minden vertexben energia/impulzus-, impulzusmomentum-, valamint töltésmegmaradás áll fenn
- A Standard Modell alapegyenlete, ún. Lagrange függvénye (1. előadás, 6. fólia) írja le, milyen vertexek léteznek, milyen kölcsönhatások játszódhatnak le
- A részecske kvantumszámjai (pl. töltései) határozzák meg, mely kölcsönhatásban vesz részt



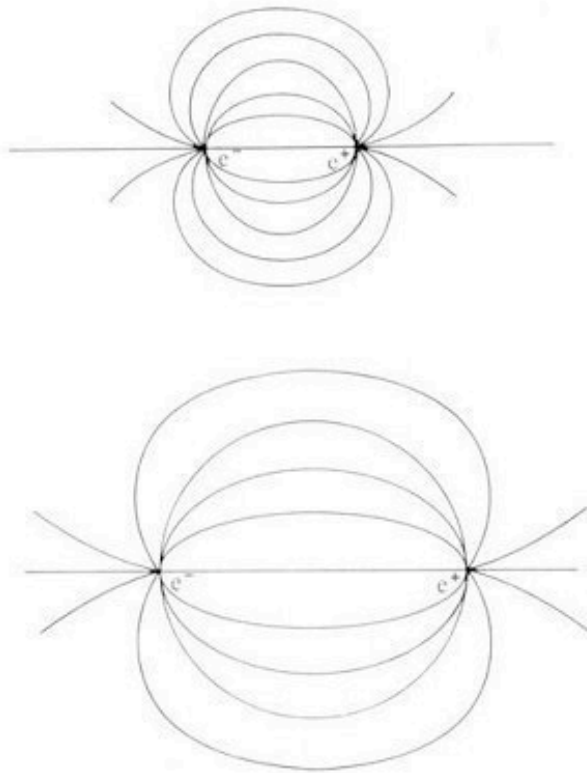
# VIRTUÁLIS RÉSZECSKÉK

- Csupán nagyon rövid ideig léteznek
- Nem követik 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



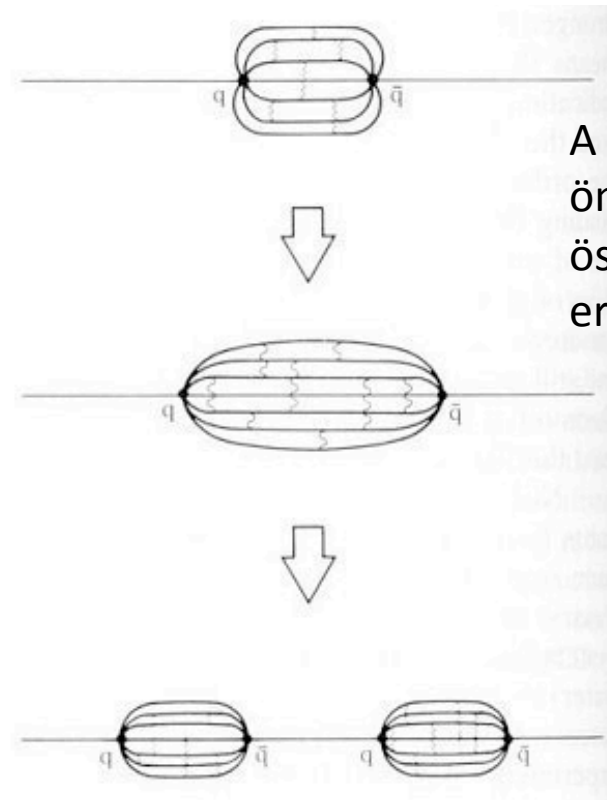
# KVARK BEZÁRÁS

- Mi történik, ha két részecskét megpróbálunk eltávolítani egymástól?



Elektromos tér (szétterjed)

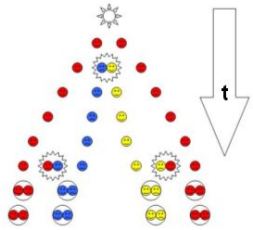
$$V(r) \sim 1/r$$



A gluon  
önkölcshatás  
összehúzza az  
erővonalakat

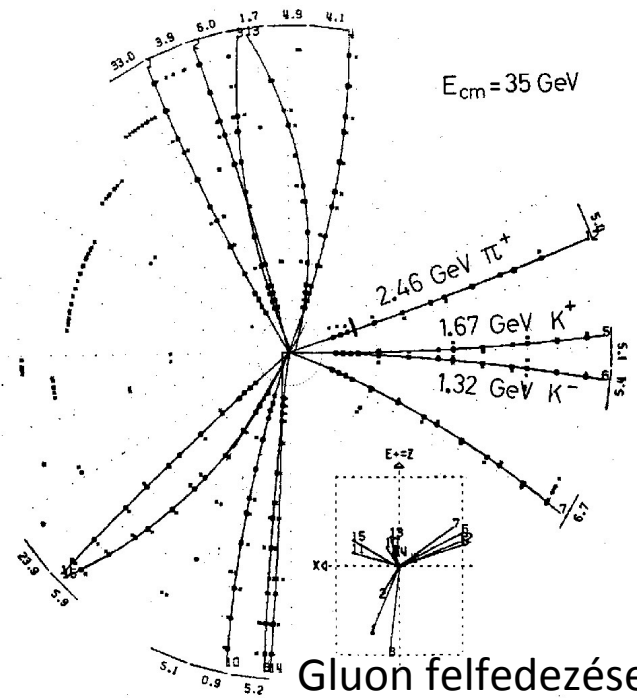
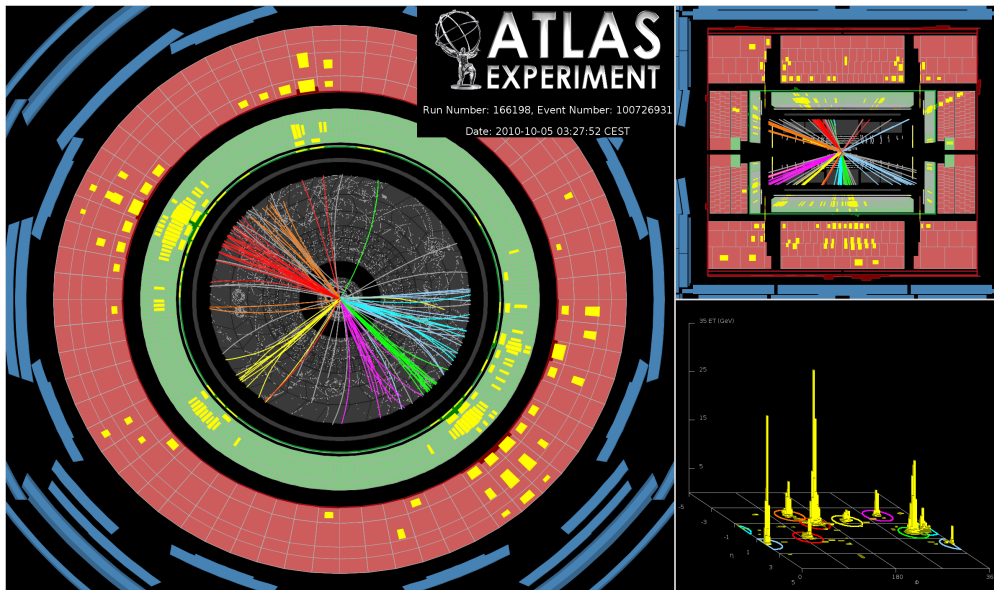
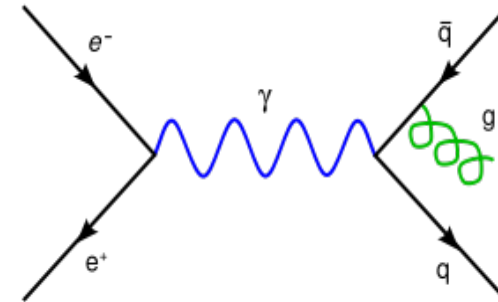
Színtér (szétszakad) → **kvark bezárás**

$$V(r) \sim -a/r + b r$$



# HADRONZÁPOROK

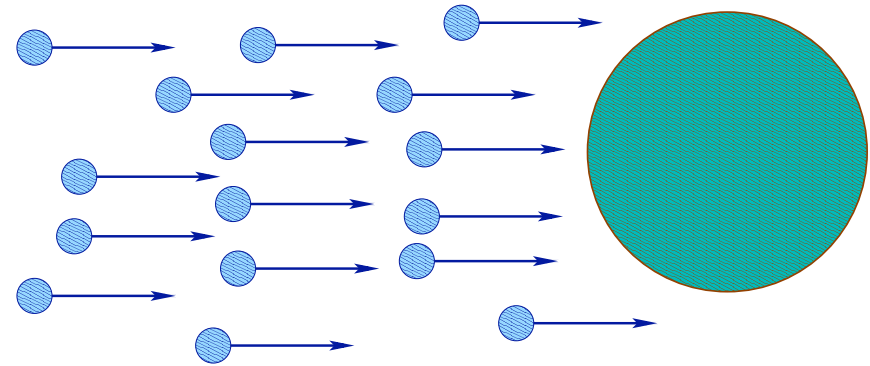
- Az ütközésben keletkező kvarkok távolodnak egymástól...
- ... amíg energiájuk futja, kvarkpárokat keltenek...
- kialakul egy részecske- vagy hadron-zápor (“jet”)
- A közeli kvarkpárok, kvark-hármasok hadronokat hoznak létre (mezonok, barionok)
- Fragmentáció, hadronizáció



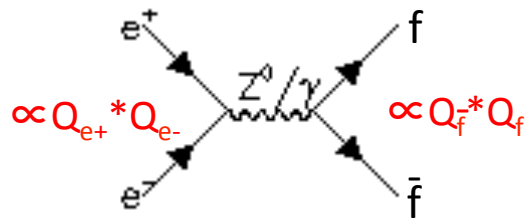
Gluon felfedezése  
(DESY PETRA)

# HATÁSKERESZTMETSZET

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



Bombázó részecskenyaláb    Céltárgy részecskéje



# HADRONPÁR KELETKEZÉS HATÁSKERESZTMETSZETE e<sup>+</sup>e<sup>-</sup> ÜTKÖZÉSBEN

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

- Töltés-négyzettel és a lehetséges végállapotok számától függ

- Szín nélkül:

$$R_0 = \sum_q Q_q^2$$

- 3 színnel:

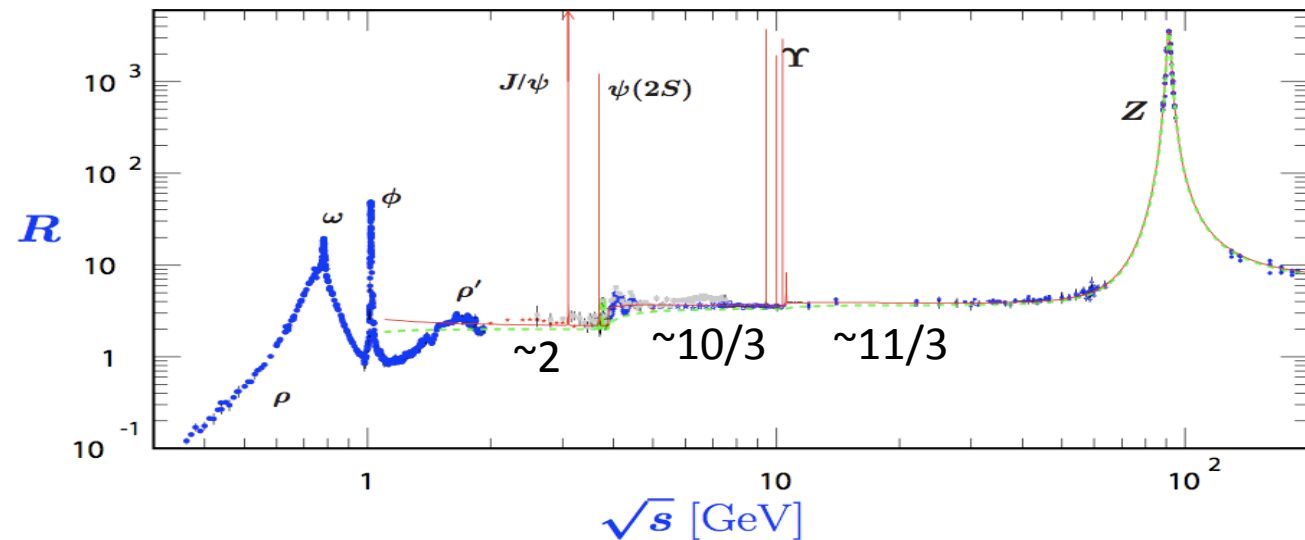
$$R_3 = 3R_0$$

- Magasabb energián több kvark fajta válik elérhetővé:

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

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

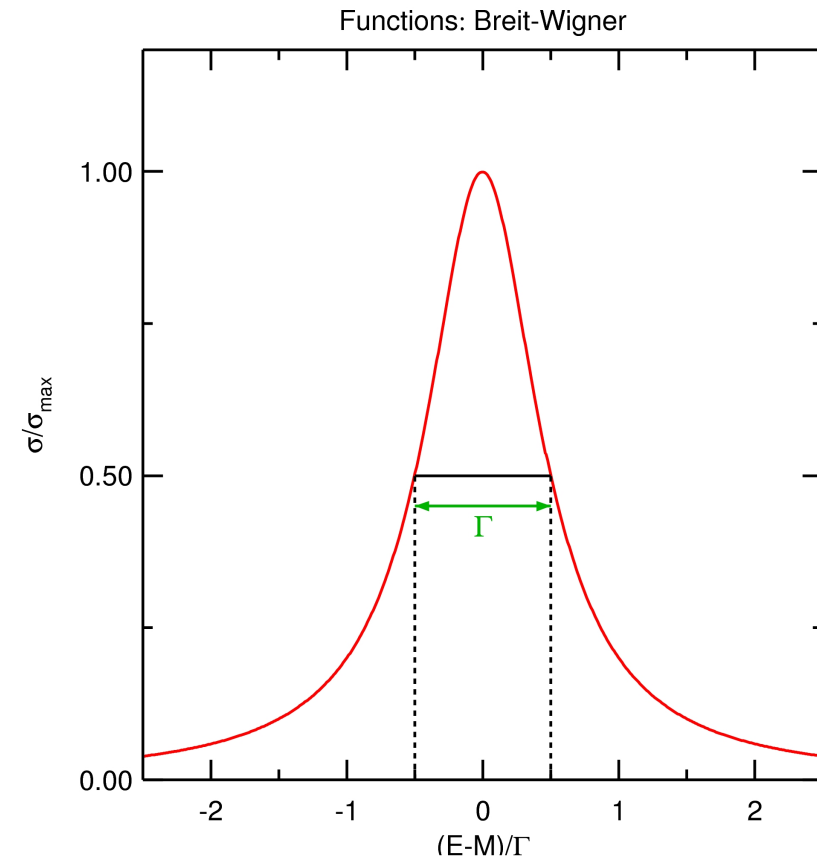
$$\{u, d, s, c, b\}: \quad R_0 = 2 \cdot (2/3)^2 + 3 \cdot (1/3)^2 = 11/9; \quad R_3 = 11/3$$





# REZONANCIA

- Csúcs a differenciális hatáskeresztmetszetben egy adott energiánál szórás kísérletekben
- Egy rövid élettartamú részecske keletkezését és bomlását jelzi
- A rezonancia szélessége a részecske élettartamától függ:  
 $\Gamma = 1 / \tau$   
(Heisenberg határozatlansági reláció!)
- Valószínűség-eloszlás:  
$$f(E) = \frac{\Gamma/2}{(E - M)^2 + (\Gamma/2)^2}$$
- M: rezonancia helye
- $\Gamma$ : rezonancia szélessége

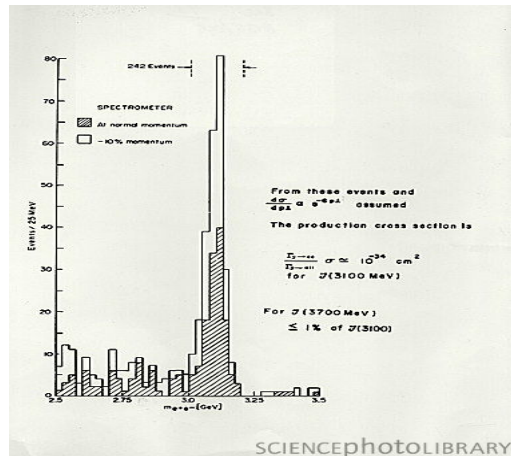


# MIÉRT HASZNOSAK A REZONANCIÁK?

## Új részecskék felfedezése

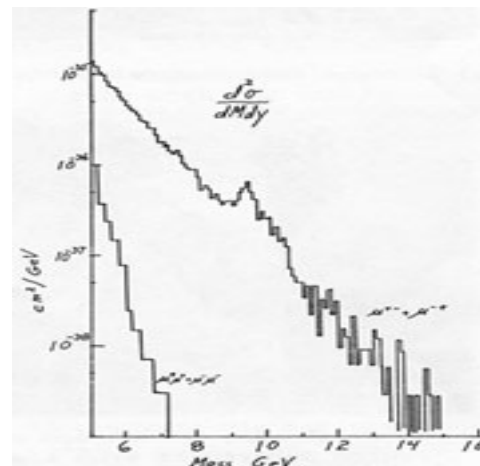
$J/\psi$  ( $c\bar{c}$ ), 1974

→ c kvark



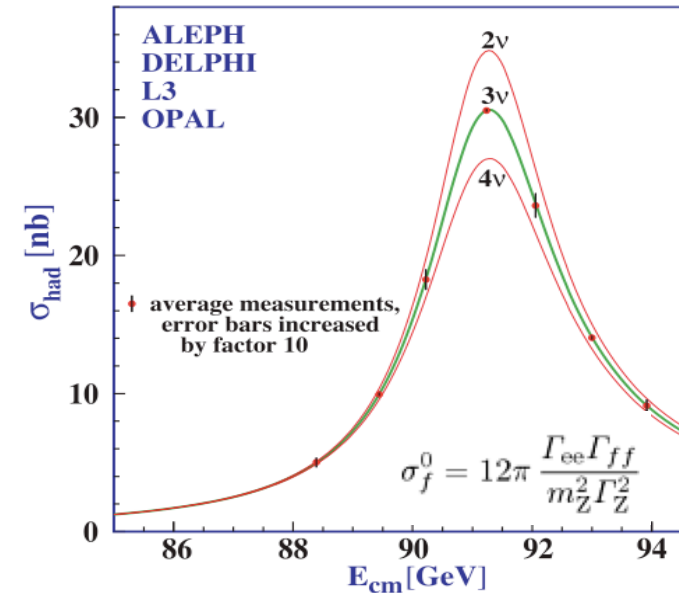
Upsilon ( $b\bar{b}$ ), 1977

→ b kvark

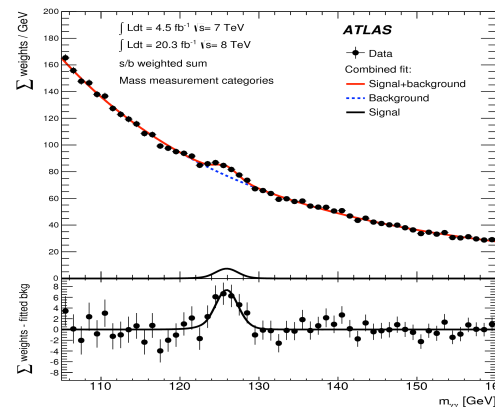
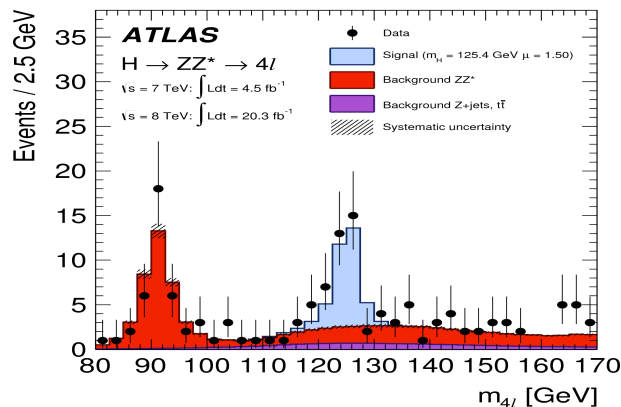


Neutrínó családok számának meghatározása a LEP gyorsítón

$$\sigma_{\text{had}}(s) = \sigma_{\text{had}}^0 \frac{s}{(s - m_Z^2)^2 + s^2 \Gamma_Z^2 / m_Z^2}$$



## Higgs-bozon, 2012



$$\Gamma_{\text{inv}} = \Gamma_Z - \Gamma_{\text{had}} - \Gamma_{e\bar{e}} - \Gamma_{\mu\bar{\mu}} - \Gamma_{\tau\bar{\tau}}$$

$$N_\nu = \frac{\Gamma_{\text{inv}} / \Gamma_{e\bar{e}}}{(\Gamma_\nu / \Gamma_{e\bar{e}})_{\text{SM}}} = 2.9840 \pm 0.0082$$

## 2. RÉSZ

### Szimmetriák a részecskefizikában

### Elemi részecskék tömege és a Higgs-bozon



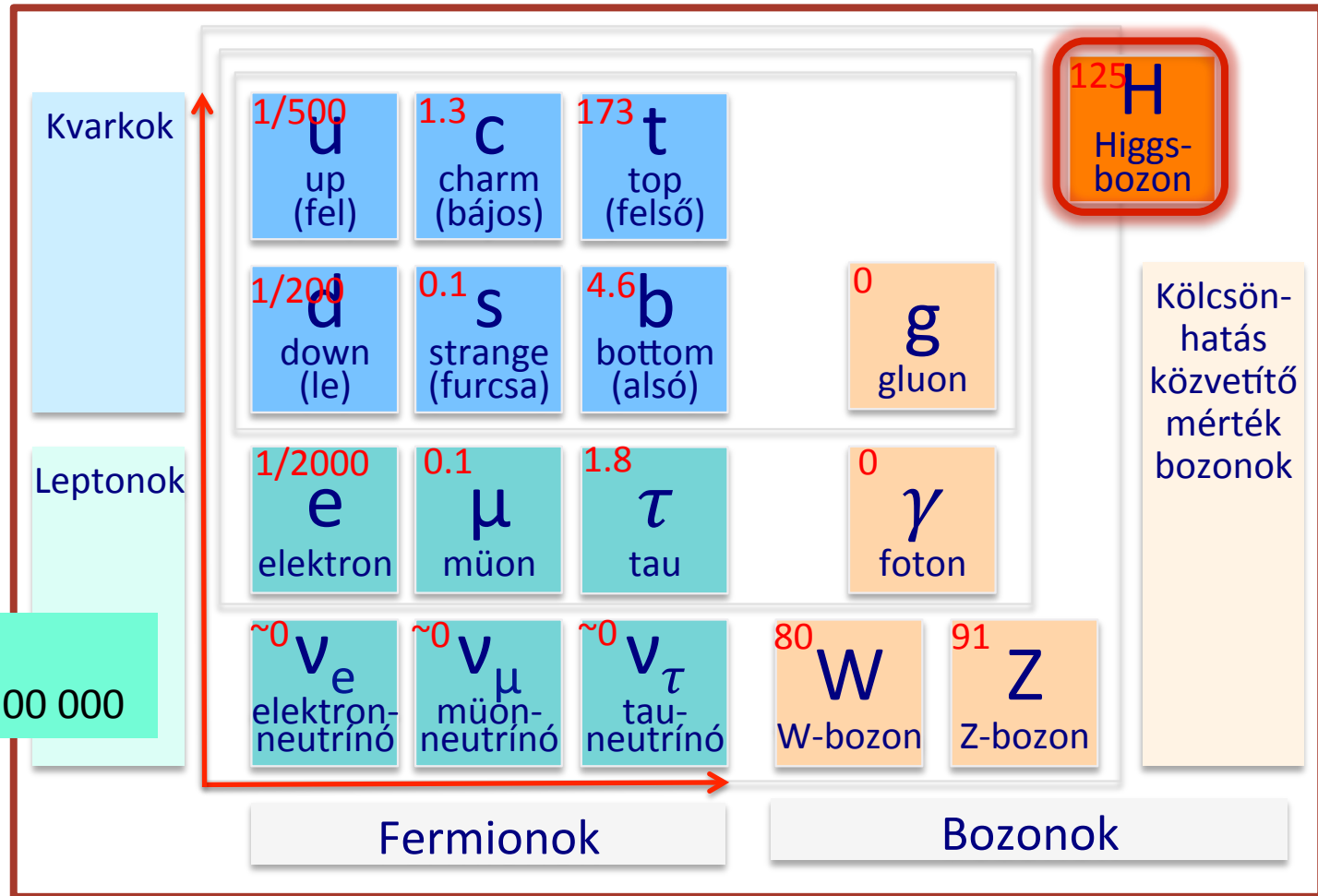
... avagy miért ünnepeltünk Európában (is) 2012. július 4-én, és miért adták a 2013-as fizikai Nobel-díjat?

# A STANDARD MODELL

## Az elemi részecskék tömege (GeV/c<sup>2</sup>)

Óriási tömeg tartomány:

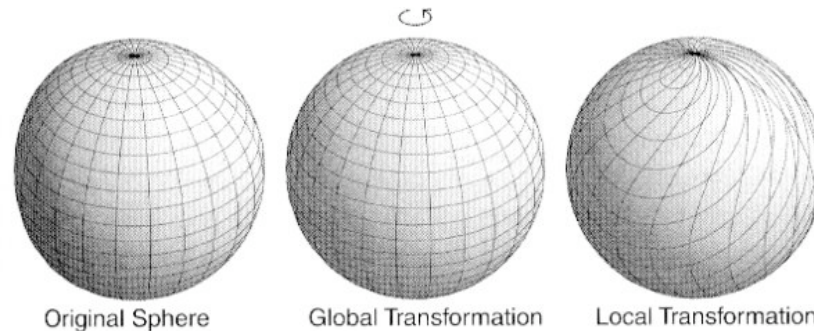
legkönnyebb  $\geq 10^{11}$   
legnehezebb



Neutrínó tömeg:  
 $m < 2 \text{ eV} = 1 \text{ GeV}/500\,000$

# SZIMMETRIÁK SZEREPE A FIZIKÁBAN

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



- **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.

*Phys. Rev.* 105 (1957) 1413-1414

**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. Wu<sup>6</sup> for reports of her preliminary results in the Columbia discussions immediately preceding this experiment.

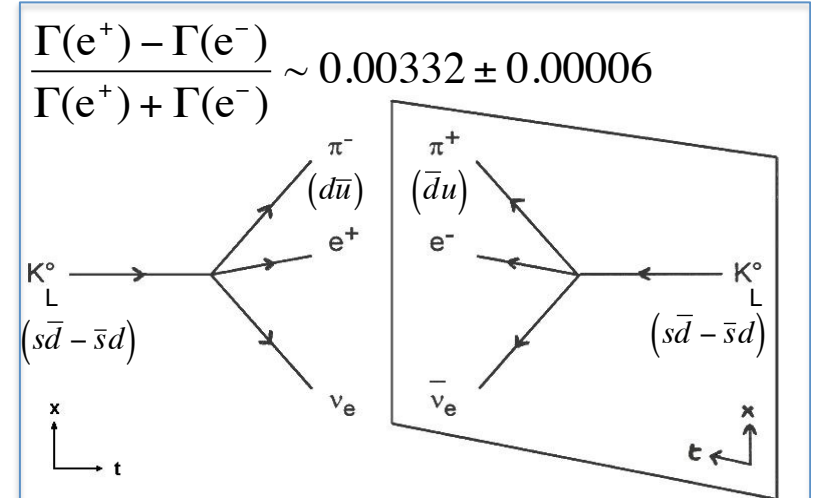
*Phys. Rev.* 105 (1957) 1415-1417

# 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  $\nu$   $\rightarrow$  jobb-kezes anti- $\nu$ )  
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**



# CPT-INVARIANCIA

- A térelmélet alaptétele:  
CPT  $|p(r, t) \rangle \sim |p(-r, -t) \rangle \sim |p(r, t) \rangle$   
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, BASE):  
proton – anti-proton ( $m, q, \mu$ ) összehasonlítás  
hidrogén – anti-hidrogén (spektroszkópia) összehasonlítás
- Legfrissebb eredmény, BASE, 2015. aug:  $\frac{(q/m)_{\bar{p}}}{(q/m)_p} - 1 = 1(64)(26) \times 10^{-12}$

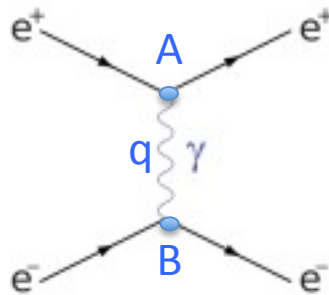


# MÉRTÉK-KÖLCSÖNHATÁSOK ELMÉLETE

- Pontszerű fermion (pl. elektron) mozog lokális (mérték)szimetriájú térben
- Standard Modellben 3-féle lokális szimmetria, 3 mértékkölcsönhatás van: elektromágneses, gyenge és erős (avagy szín) kölcsönhatás
- Szimmetria csoport:  $U(1) \times SU(2) \times SU(3)$
- Megmaradó töltések: elektromos töltés, gyenge izospin, szín-töltés
- Közvetítő mértékbozonok: foton, W és Z bozon, gluon

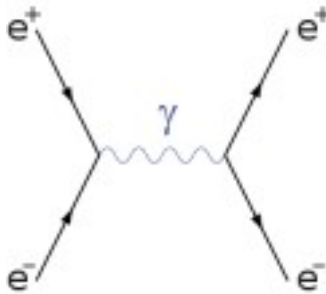
# KVANTUMELEKTRODINAMIKA (QED)

- Elektromágneses (EM) jelenségek kvantumelmélete; (U(1) szimmetria)
- Töltött részecskék szóródása egymáson:



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

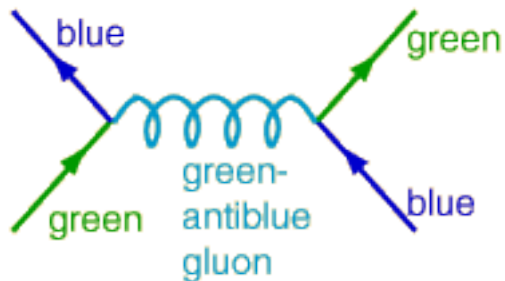
- Elektron-positron megsemmisülés



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

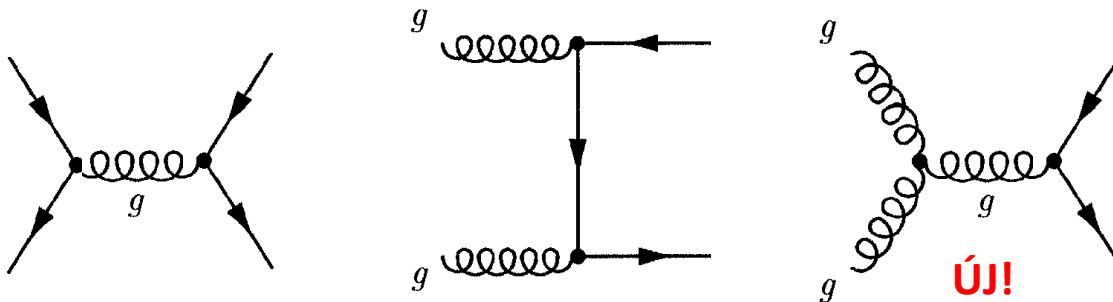
# KVANTUMSZÍNDINAMIKA (QCD)

- Szín-szín kölcsönhatás kvantumelmélete; SU(3) szimmetria
- 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  $\rightarrow$  8-féle gluon van



A vertex (= csomópont) mindig “színtelen”, azaz a színtöltés megmarad!

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



$\rightarrow$  Ez okozza a különbséget az EM és az erős kölcsönhatás tulajdonságaiban!

# GYENGE KÖLCSÖNHATÁS

- A gyenge mértékbozonok tömege nem nulla:  $m_Z \sim 91 \text{ GeV}$ ,  $m_W \sim 80 \text{ GeV}$   
→ sérti az elmélet mértékszimetriáját
- EM és erős kölcsönhatás rendben volna, hisz a foton és a gluon tömege nulla
- Hogyan tehető konzisztens a gyenge kölcsönhatás elmélete?
- Vezessünk be spontán szimmetriasértést!

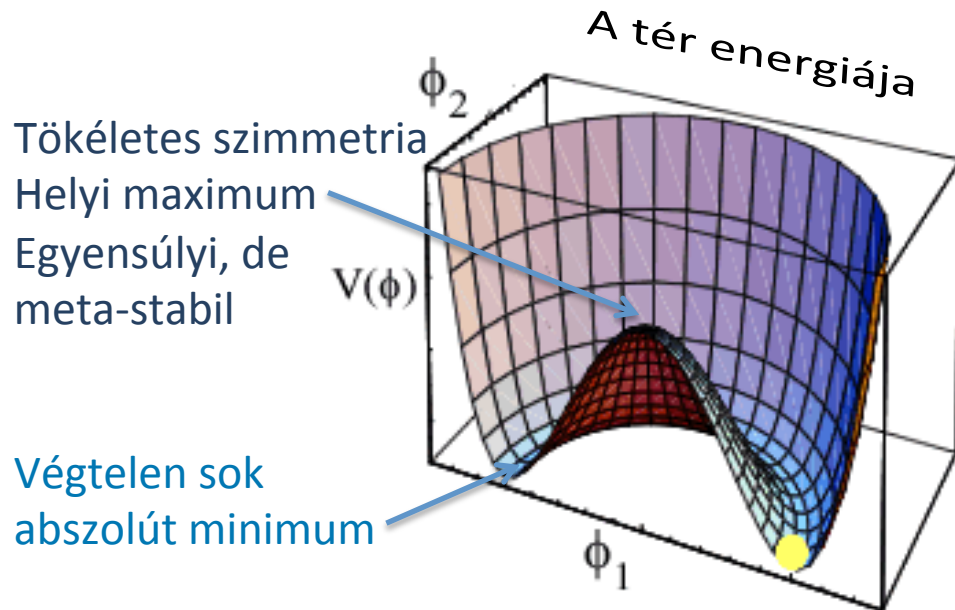
# SPONTÁN SZIMMETRIASÉRTÉS

Analógia: Emberke a sombrérón

- A sombréro 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)

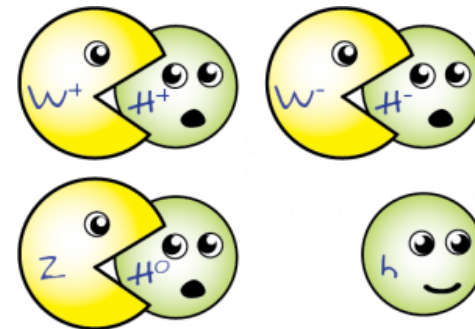


# BROUT – ENGLERT – HIGGS (BEH) MECHANIZMUS ÉS AZ ELEKTROGYENGE SZIMMETRIA SPONTÁN SÉRTÉSE

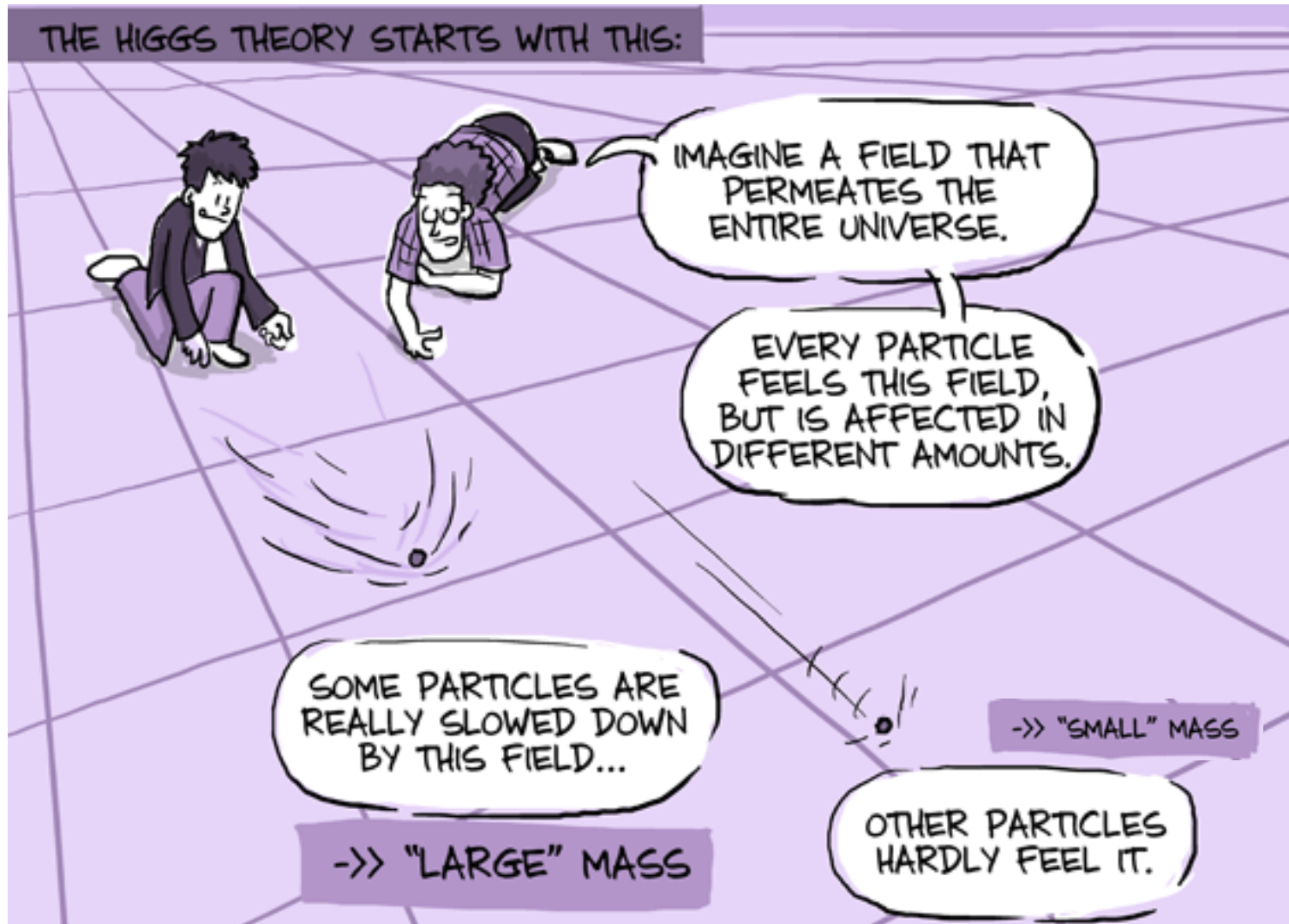


- 4-komponensű skalár tér (nincs kitüntetett irány) „mexikói kalap” potenciállal
- A terek a minimális energiájú értéket szeretik felvenni, és értékük ekörül rezeg
- Rezgő tér = részecske
- Potenciál görbülete  $\rightarrow$  tömeg

- Körív menti mozgás:  $m=0$  részecske
- A 3 tömegtelen részecske adja a  $W^+$ ,  $W^-$ , Z bozonok tömegét
- Sugárirányú rezgés: Higgs bozon



# A HIGGS TÉR ÉS A TÖMEG



# 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...

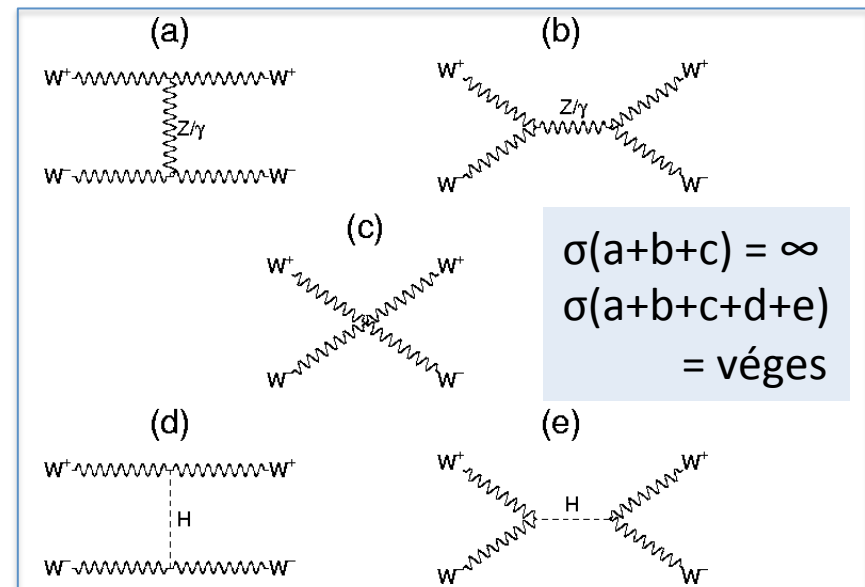


...ezúttal maguk a tanárok között  
→ analógiánkban, ezek a csoportok a Higgs-bozonok



# A TÖMEG EREDETE ÉS A HIGGS-BOZON

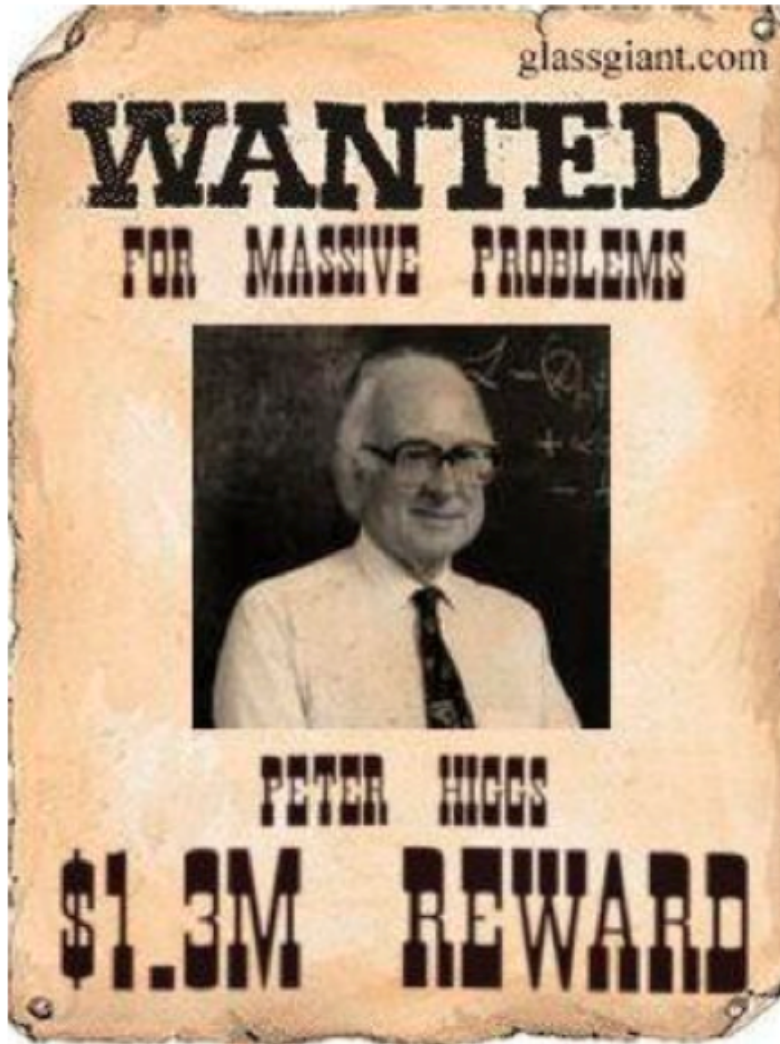
- A Standard Modellben az elemi részecskék tömege csupán egy bemenő paraméter
- **Kulcs kérdés: honnan származik a tömeg és miért van a különböző elemi részecskéknek eltérő tömege?**
- 1964-ban Peter Higgs, és függetlenül F. Englert, R. Brout valamint G. Guralnik, C.R. Hagen és T. Kibble javasolta megoldást:  
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 kcsk-ban divergenciák (végtelenek) is megjelennek



# ÉLEKTROGYENGE KÖLCSÖNHATÁS

- Az elektromágneses és gyenge kölcsönhatás egyesítése a Higgs-mechanizmus közreműködésével
- Szimmetria csoport:  $SU(2)_L \times U(1)_Y$   
Spontán szimmetriasértés után:  $U(1)_Q$
- Közvetítők
  - Nulla-tömegű foton
  - Nehéz  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z$  (tömegüket a szimmetriasértés során kapják)

# HIGGS TÖRTÉNET DIÓHÉJBAN



## 1964: BEH-mechanizmus

- Robert Brout, Francois Englert
- Peter Higgs (**spin=0 bozon**)

## 1967: Standard Modell

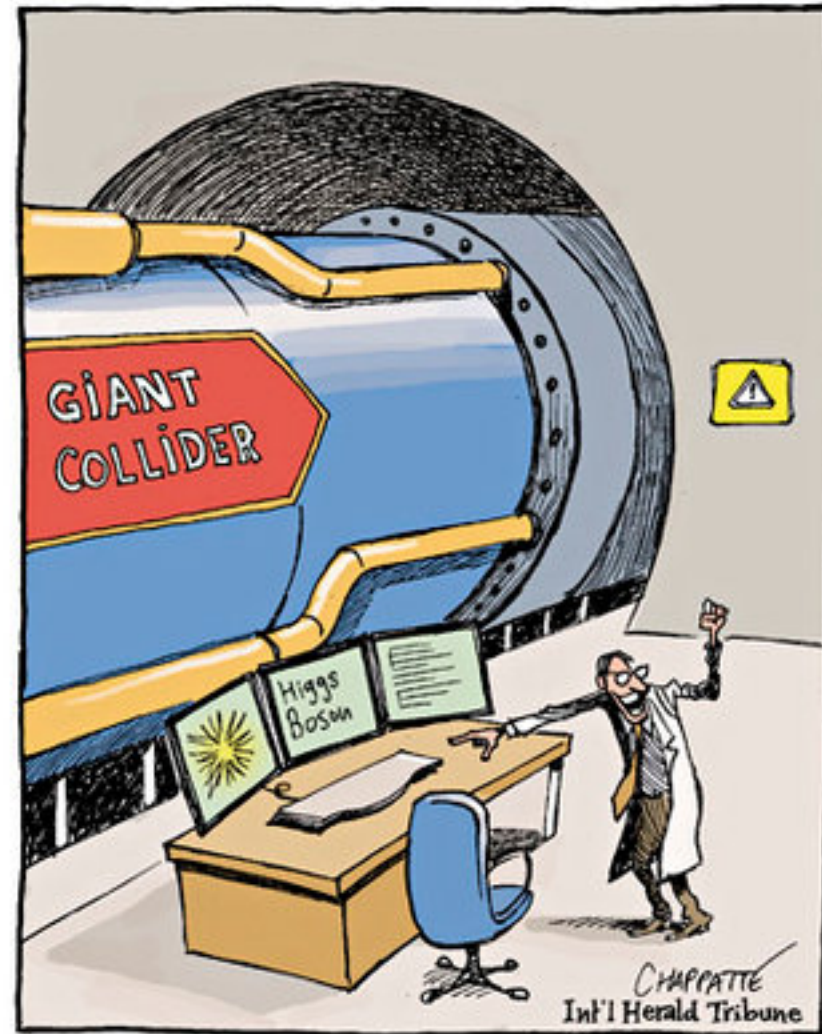
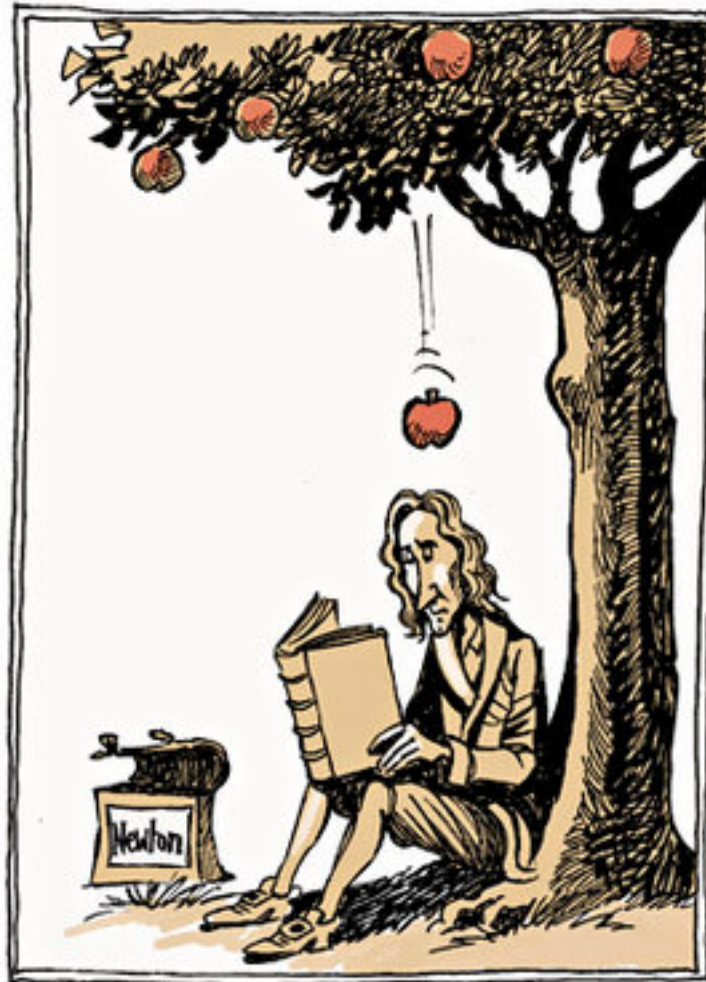
- Salam, Weinberg és sokan mások  
[Kísérleti bizonyítékok sora támasztja alá a SM-t, de a Higgs-bozon rejtve marad]

## 2012 nyár: LHC (ATLAS és CMS) felfedez egy Higgs-szerű részecskét

2013 tavasz: A részecske tulajdonságai jól egyeznek a Higgs várakozással (csatolások, spin)

## 2013 ősz: Fizikai Nobel díj: Englert és Higgs

# Collisions That Changed The World





# Az LHC

**Tömegközépponti energia: 14 TeV**

7 TeV @ 2011

8 TeV @ 2012

13 TeV @ 2015

**Csomag találkozás: 40 MHz**

20 MHz @ 2011-12

**Adatrögzítés (ATLAS, CMS):**

~400 Hz @ 2011-12

~1000 Hz @ 2015

→ ~1/40 000 nyalábtalálkozás

**Proton/csomag:  $1.15 \cdot 10^{11}$**

$1.7 \cdot 10^{11}$  @ 2012

**Csomag/nyaláb: 2808**

1380 @ 2012

**Pillanatnyi luminozitás:  $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$**

$0.33 \cdot 10^{34}$  @ 2011

$0.77 \cdot 10^{34}$  @ 2012

**Integrált luminozitás:**

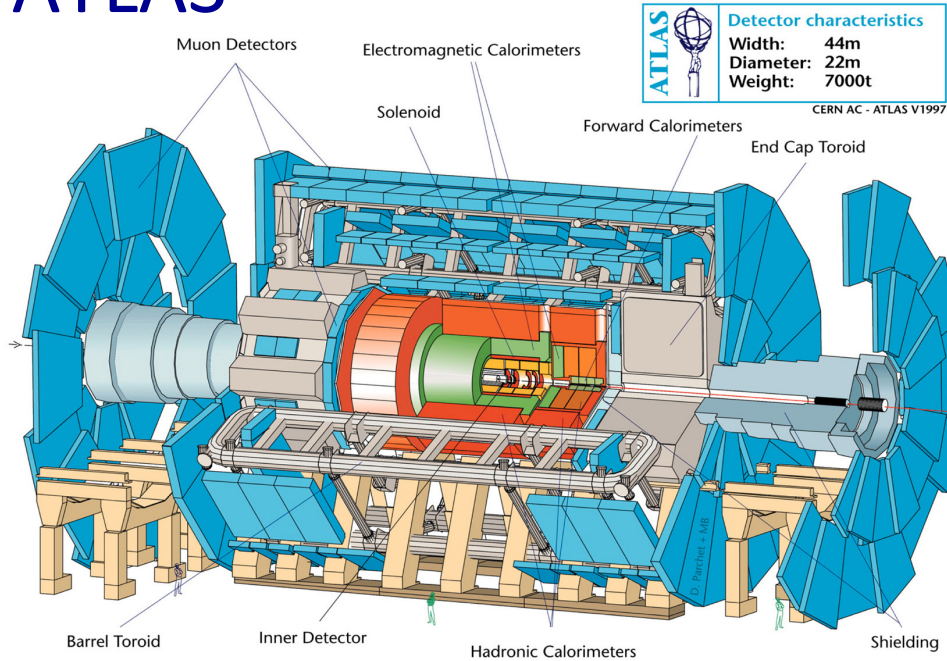
$0.04 \text{ fb}^{-1}$  @ 2010 ("beindítás")

$6.1 \text{ fb}^{-1}$  @ 2011 ("megismerés")

$23.3 \text{ fb}^{-1}$  @ 2012 ("termelés")



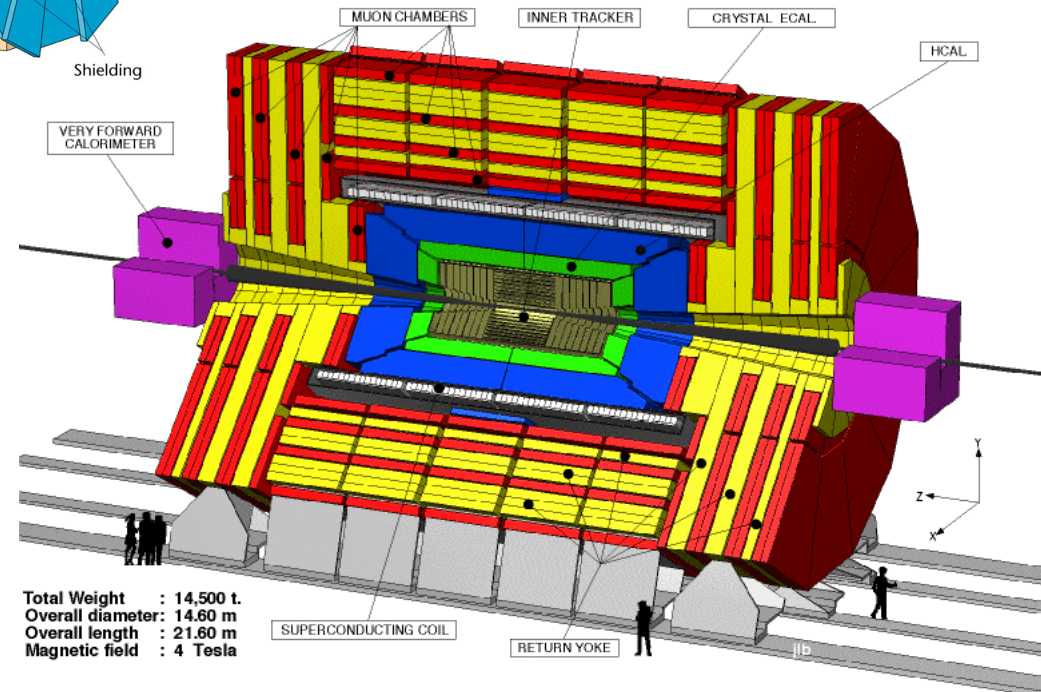
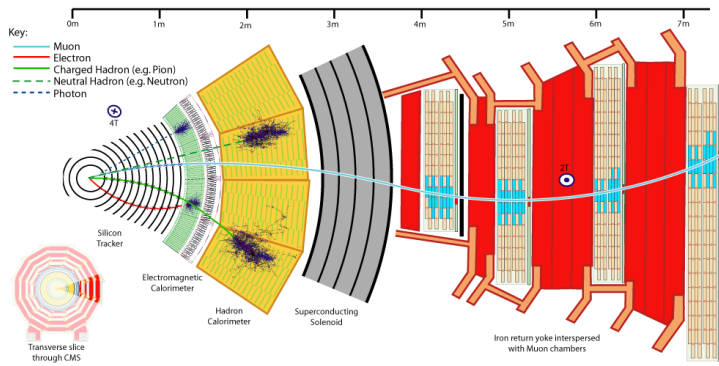
# ATLAS



## AZ LHC SOK-CÉLÚ DETEKTORAI

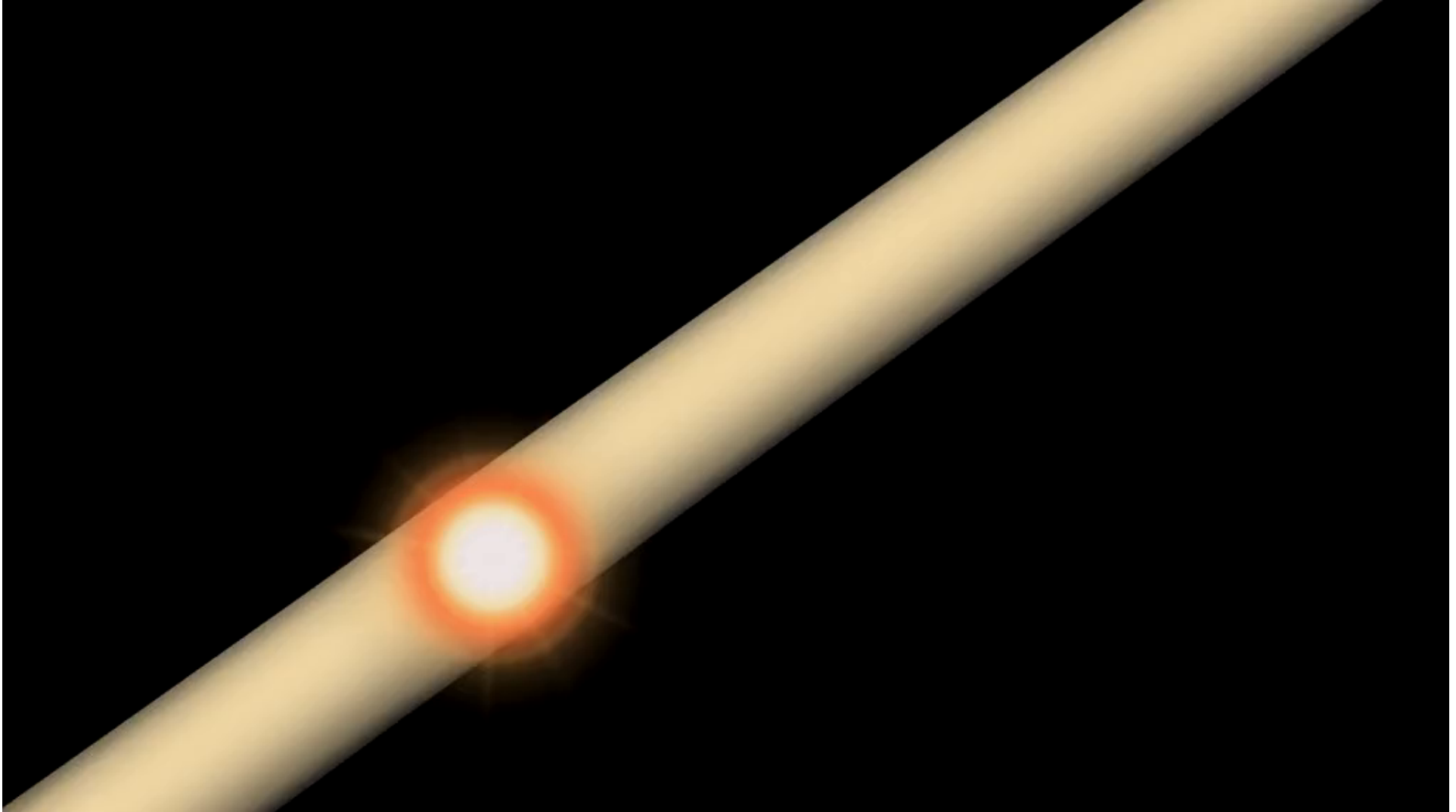
- Különböző filozófia a tervezésben
- Hasonló pontosság

# CMS

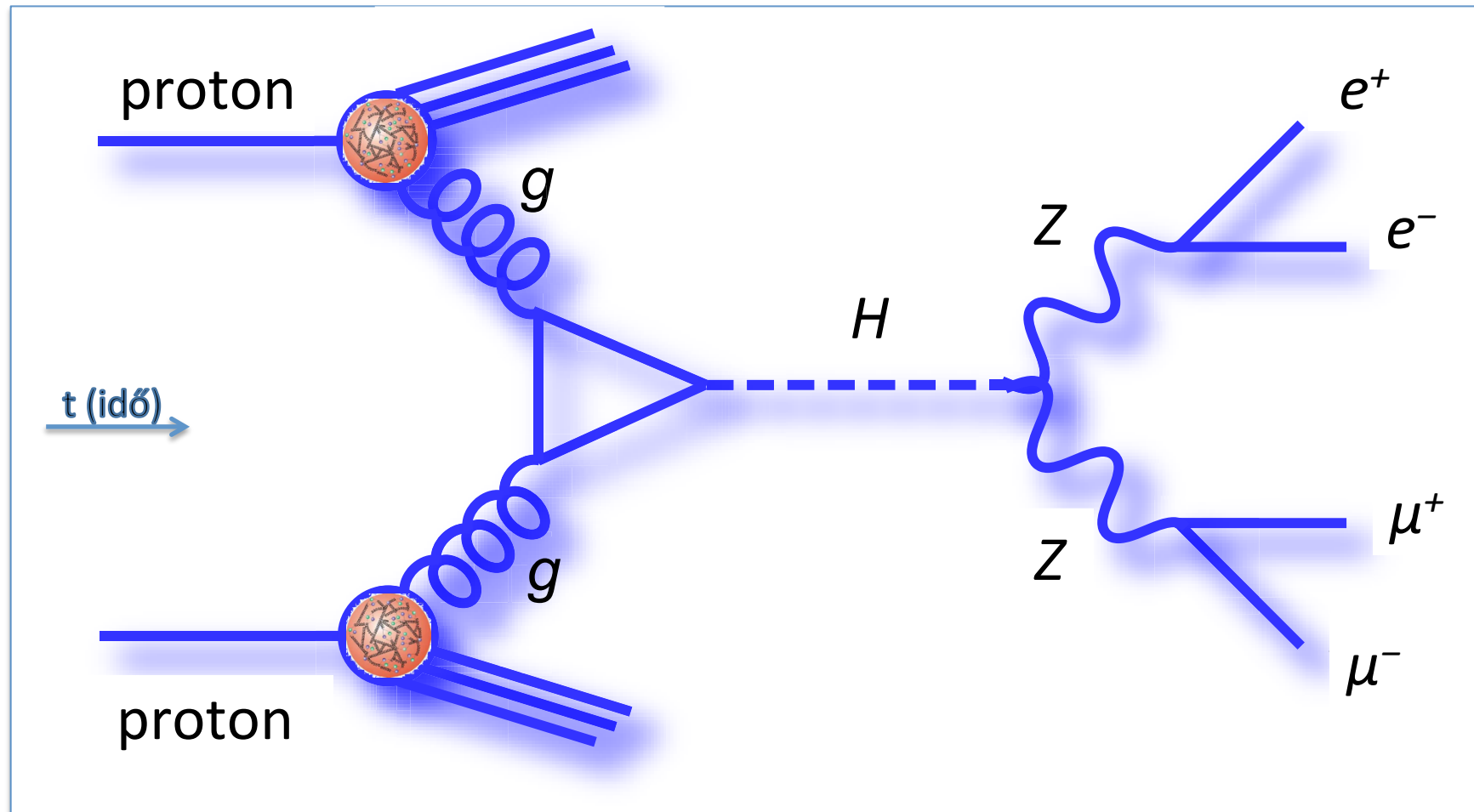


# PROTON-PROTON ÜTKÖZÉS AZ ATLAS DETEKTORBAN

<http://cds.cern.ch/record/1406038?ln=en>



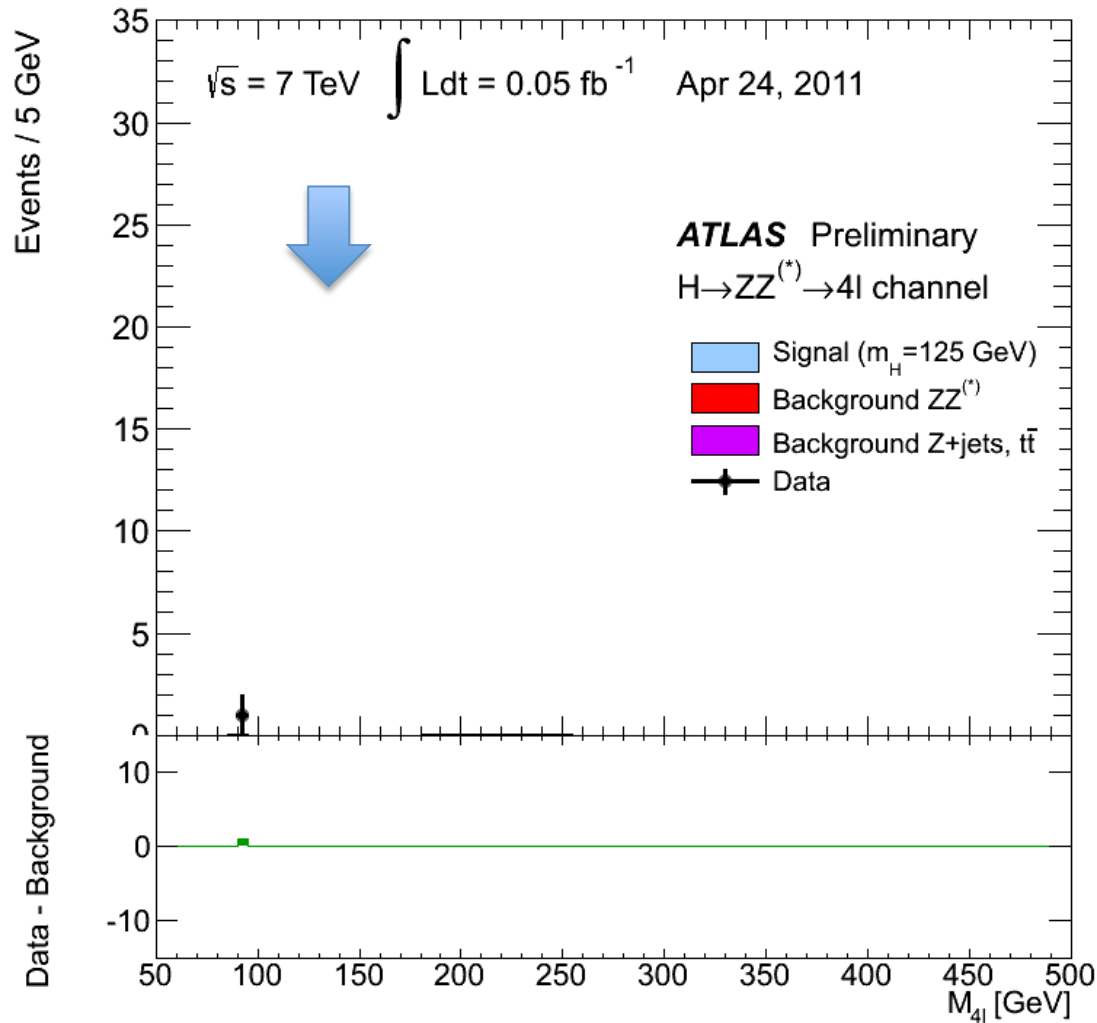
# HIGGS-BOZON KELETKEZÉS AZ LHC-N





# $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$ : FELFEDEZÉS FOLYAMATA

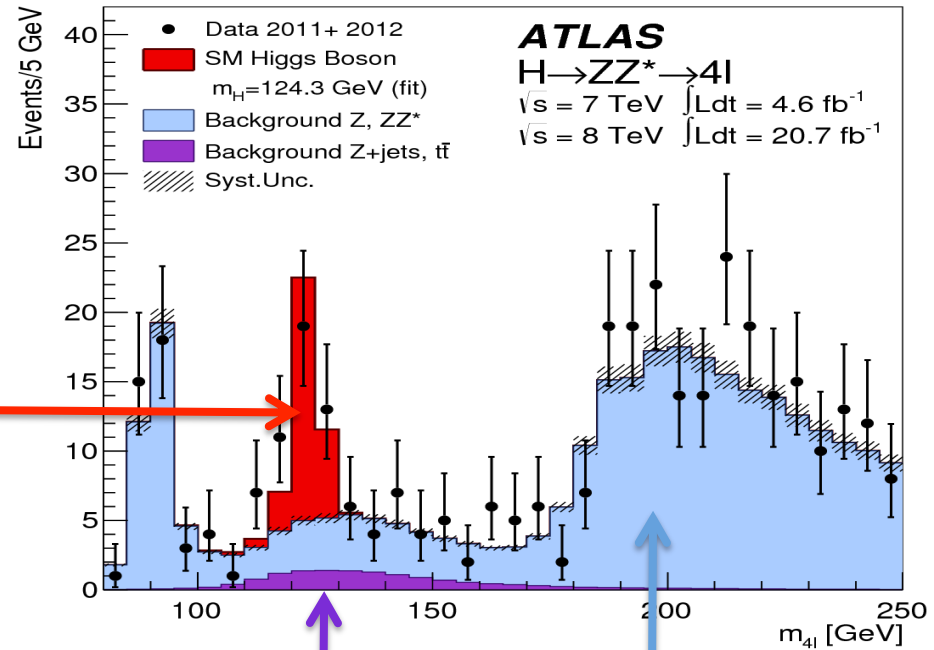
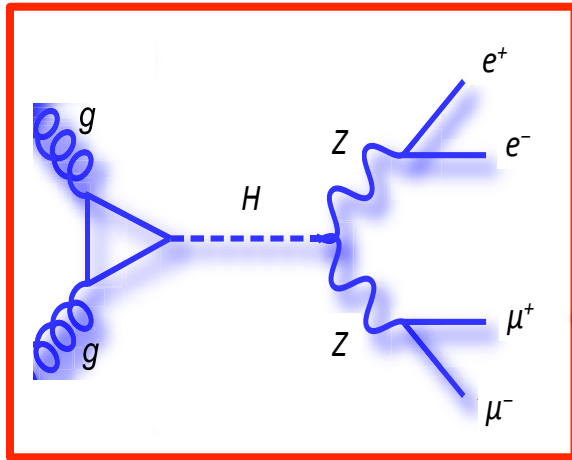
Higgs-jelölt eseményekben rekonstruált 4-lepton tömeg



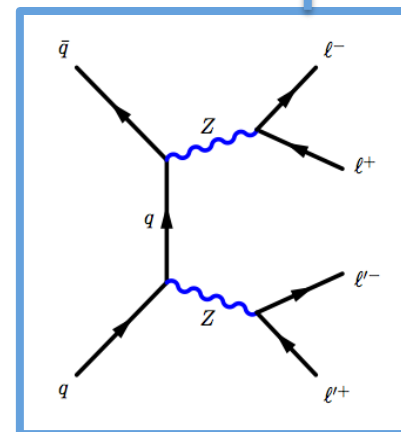
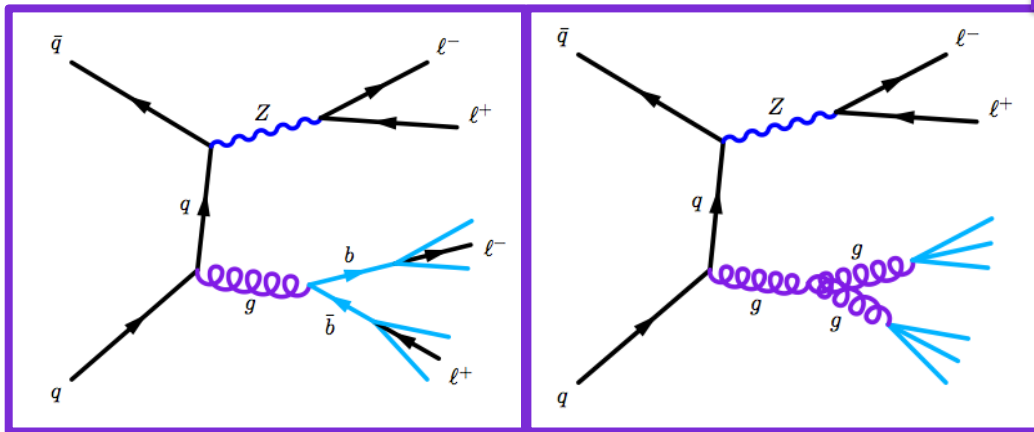
Esemény többlet 125 GeV-nél  
( $\sim 130 \times$  proton tömeg)  
egy jelentős háttér felett

# A MÉRT 4-LEPTON TÖMEGSPEKTRUM

## JEL (Higgs keletkezés)

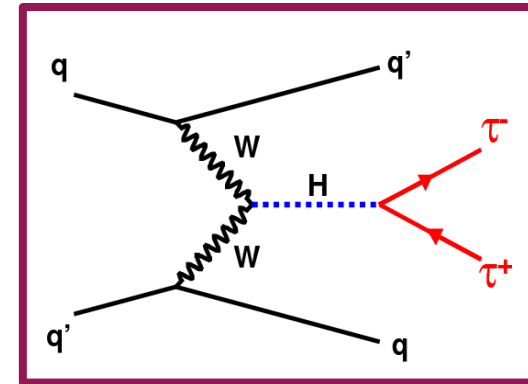
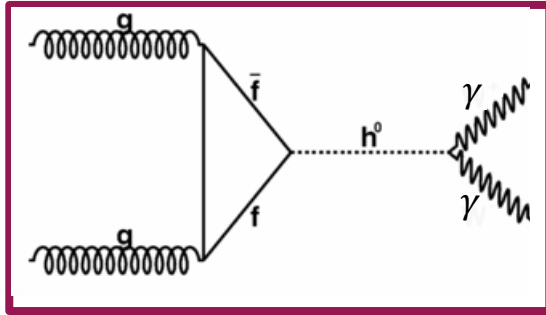


## Háttér (csökkenthető)

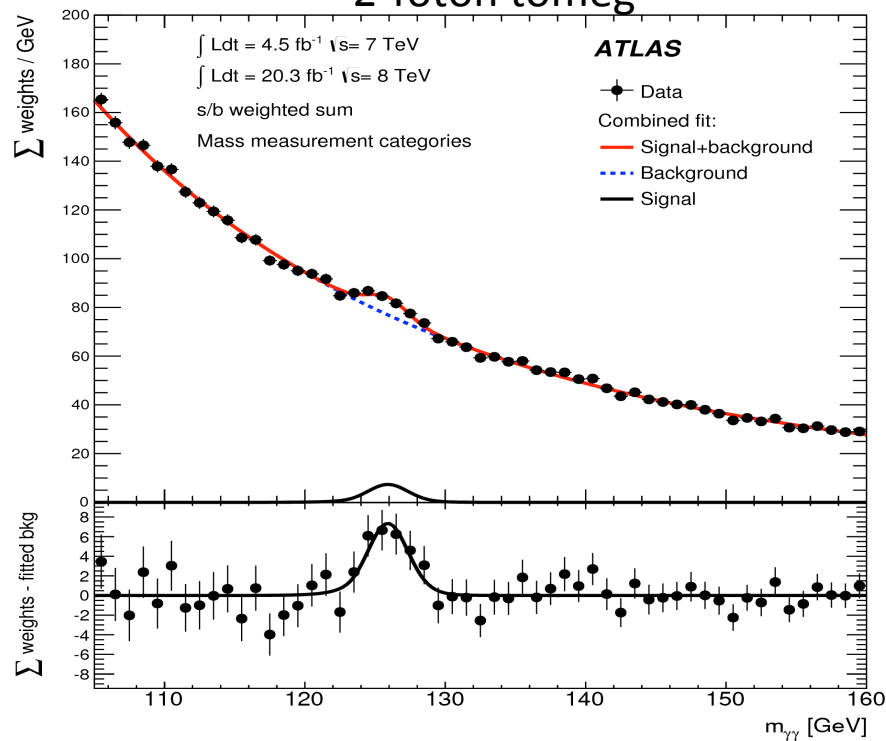


Háttér (nem csökkenthető, azonos végállapot!)

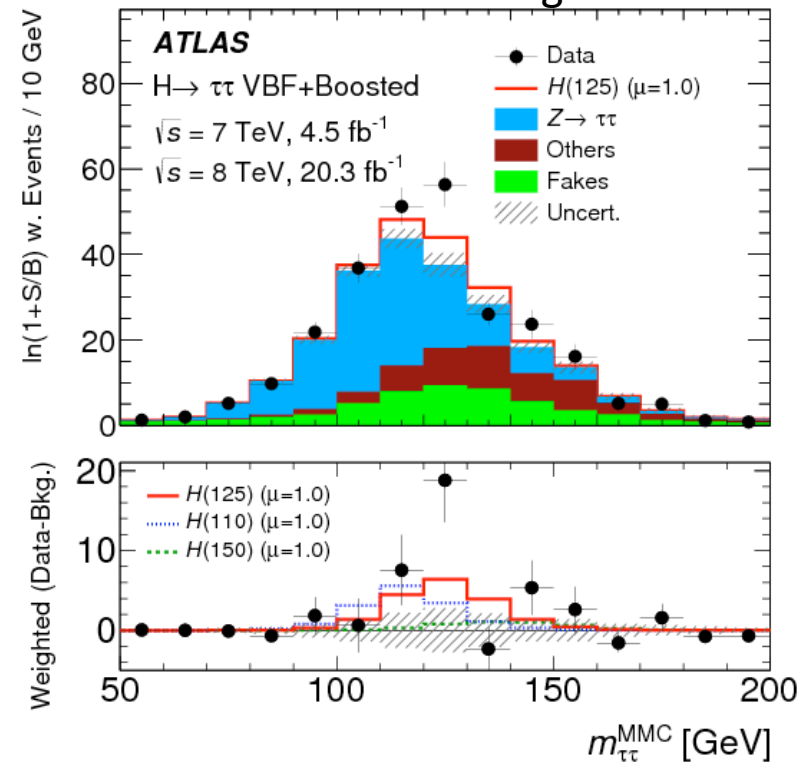
# A BIZONYÍTÉK: KONZISZTENS EREDMÉNY TÖBB MÉRÉSBEN



2-foton tömeg



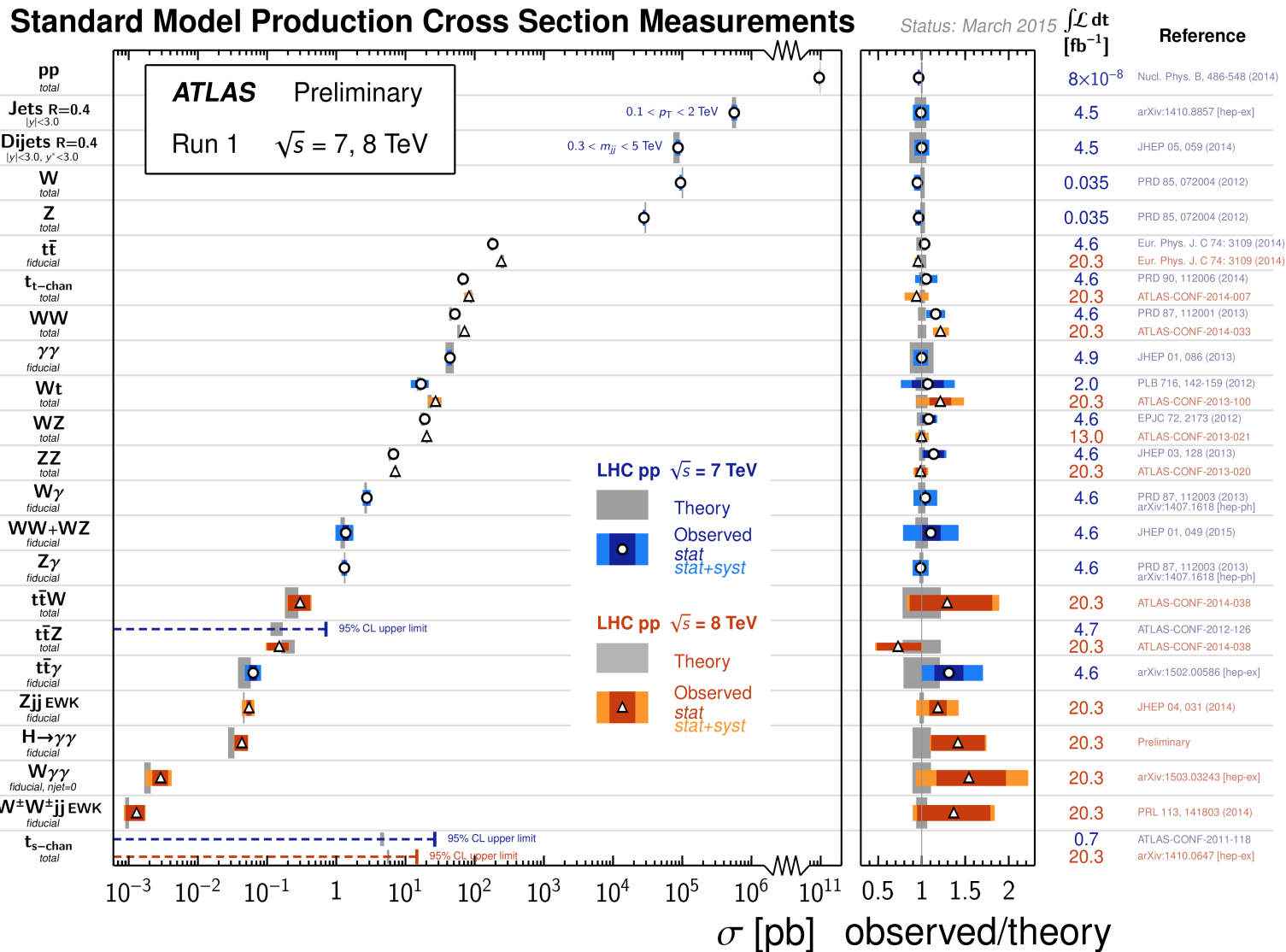
2-tau tömeg



# HIGGS - ÖSSZEFOGLALÓ

- A Higgs-bozon (pontosabban a BEH-mechanizmus) a SM kulcs fontosságú része, nélküle a SM nem lenne konzisztens
- Szükséges az elemi részecskék tömegének magyarázatához
- Az ATLAS és CMS kísérletek 2012-ben felfedeztek egy új részecskét, amelynek tulajdonságai (a mérési pontosságon belül) megegyeznek a Standard Modellben a Higgs-bozonra várt értékekkel
  - Tömege a várt tartományban van
  - Bozon (egész-spinű), hiszen  $\gamma\gamma$ , ZZ és WW végállapotokban észleltük
  - Az mért adatok a spin=0 értéket preferálják (minden más vizsgált hipotézissel szemben)
  - A keletkezés hatáskeresztmetszete a várakozásnak megfelelő minden mért végállapotban
  - A különböző részecskékhez a várakozásoknak megfelelően csatolódik
- Még több adatra van szükség, hogy a mérés pontosságát javítsuk és a SM-től való esetleges (kis) eltéréseket kimutassuk

# A STANDARD MODELL SIKERE



14 nagyságrenden át az LHC adatok és az elmélet egyezik!

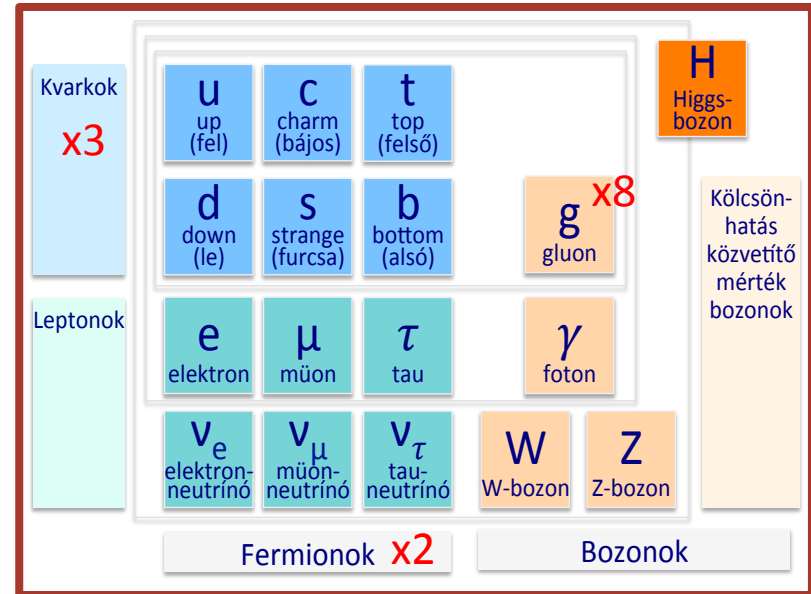
A SM jól leírja a megfigyeléseink az LHC-n és más gyorsítók adataiban is.

# 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:  $\gamma$ , Z,  $W^+$ ,  $W^-$ , 8 gluon
- 1 Higgs-bozon
- 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**

## Mi van a Standard Modellen túl?

- *Hogyan illenek ebbe a képbe a neutrínók???*
- *Milyen elmélet adhat választ a Standard*
- *Modell nyitott kérdéseire?*



Richard Thompson