



Péli Zoltán
ELTE TTK Fizikai és Csillagászati Intézet



Elektrogyenge fizika

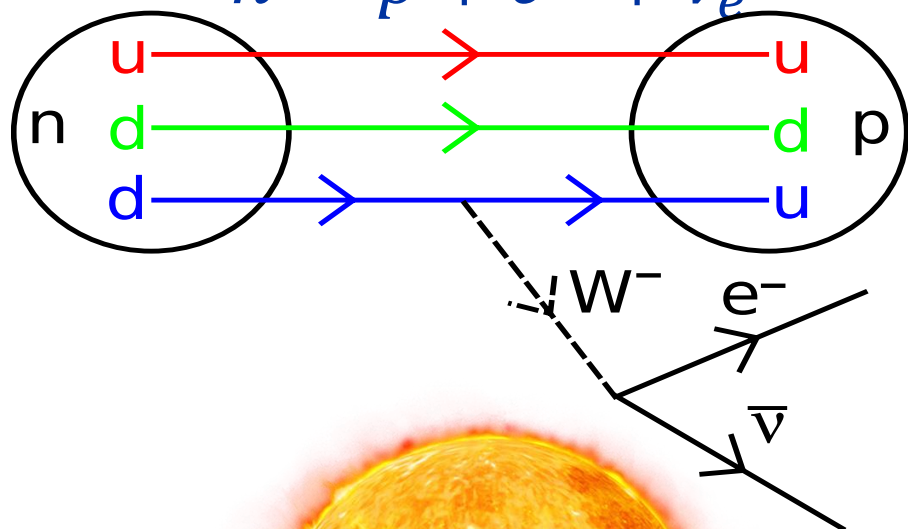
2024. május 15.

Humán Tudományok Kutatóháza - Konferenciaterem



Gyenge kölcsönhatás a természetben:

Radioaktív β -bomlás:



Proton-proton reakció a csillagokban:



Az elméleti leíráshoz vezető út

- A gyenge kh. nehéz ($\sim 100 \text{ GeV}/c^2$), töltött részecskék cseréje lehet (W^\pm)
- **1961, Glashow**: E.M. + gyenge kölcsönhatások egyesíthetők, ha létezik egy nehéz ($\sim 100 \text{ GeV}/c^2$), elektromosan semleges részecske is (Z^0)
- Nem vették komolyan, mert az elméleti leírásban nem lehet tömege a közvetítő részecskéknek ☹
- **1964, Brout, Englert és Higgs (BEH)**: a közvetítőknek mégis lehet tömege a **BEH mechanizmussal**, ha létezik egy további részecske is (H)
- 3 év volt összerakni a kettőt...
- **1967, Weinberg és Salam**: BEH mechanizmus Glashow '61-es modelljében → **elektrogyenge egyesítés**
- **1973, 't Hooft és Veltman**: az elektrogyenge modell **renormálható**: minden folyamat valószínűsége 0 és 1 közé esik

A Z^0 -bozon közvetett felfedezése: CERN, 1973

Neutrínók szóródása elektronokon

*Antirészecskék jelölése: időirány és a fermionon a nyíl iránya ellentétes: ld. Antirészecskék, antianyag

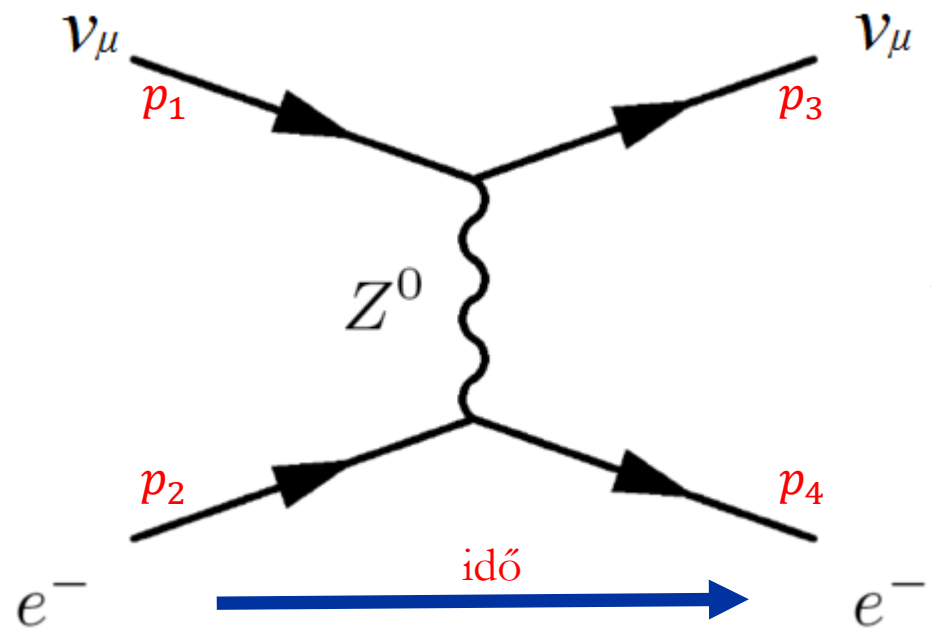
Kezdeti állapot (i)

Végállapot (f)

$$p_\mu p^\mu = p^2 = \frac{E^2}{c^2} - \vec{p}^2 = m^2 c^2$$

Természetes egységek: $c = 1$

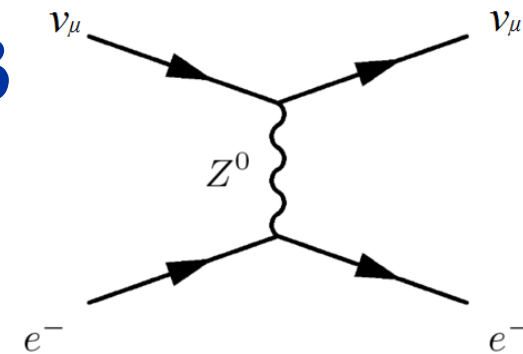
$$E_{TKP}^2 = s = (p_1 + p_2)^2$$



Feynman-gráf: a részecskeütközési folyamat szemléletes összekötése a kvantummechanikai amplitúdóval $\langle f|S|i \rangle$

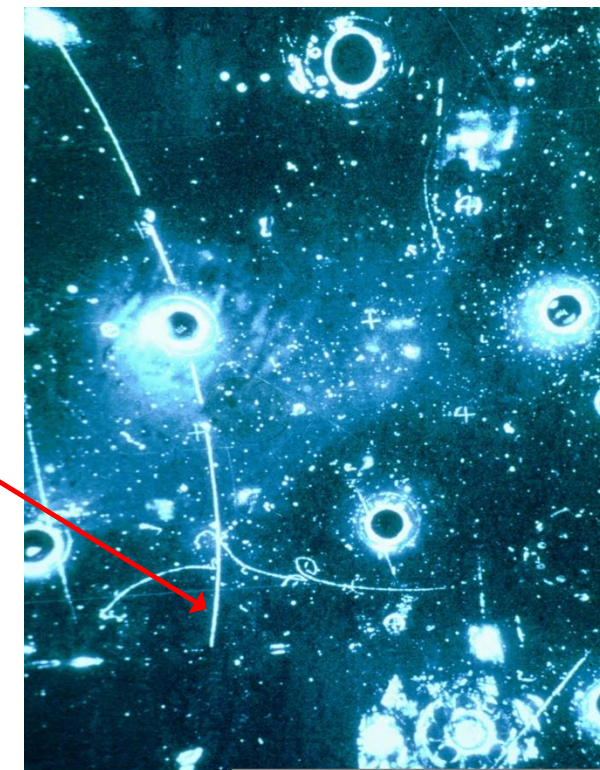
A Z^0 -bozon közvetett felfedezése: CERN, 1973

- Müon-neutrínó/antineutrínó nyalábot a Gargamelle buborékkamrára
- A **semleges** neutrínó **nem hagy nyomot** a kamrában
- A neutrínó szóródhat atommagokon és elektronon
- Az elektron nyomai könnyen azonosíthatók



A Gargamelle buborékkamra

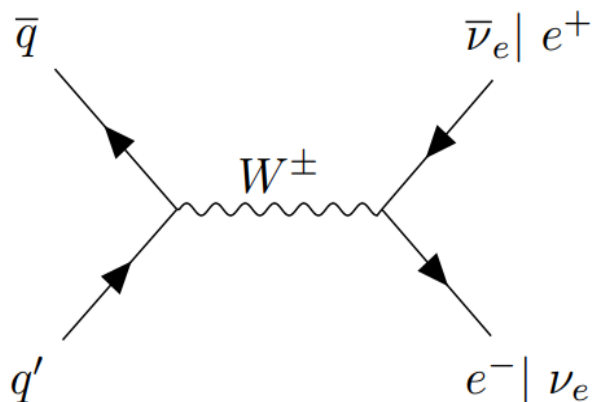
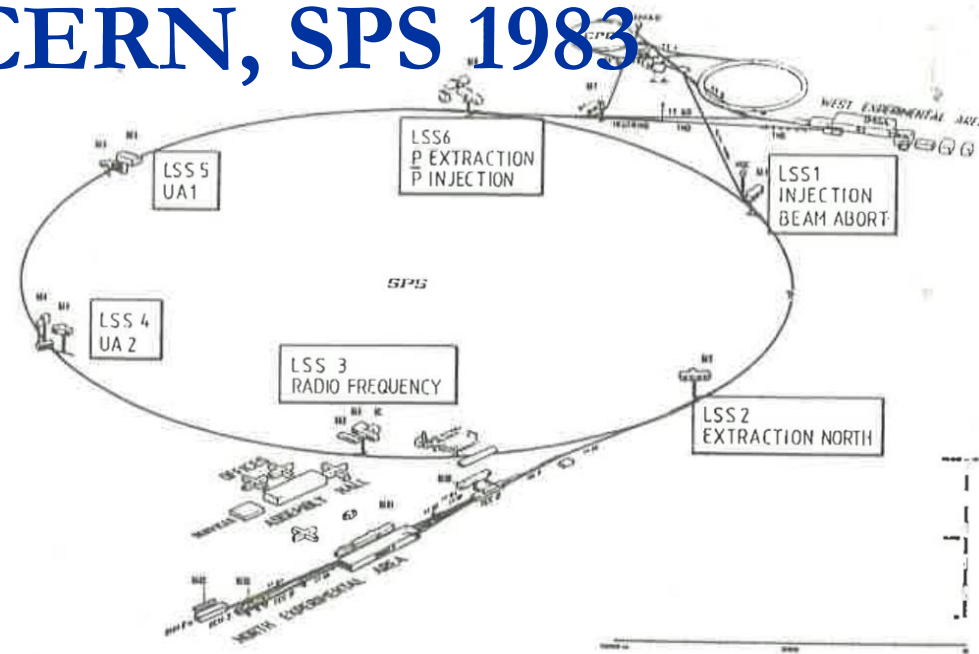
- A neutrínó meglöki az elektront, amely így lendületet nyer!
- A kamrában „**semmiből**” kiinduló **elektronnyom**
- > 1 millió képen összesen 3 esemény!
- Glashow, Weinberg és Salam 1979-ben Nobel díjat kap



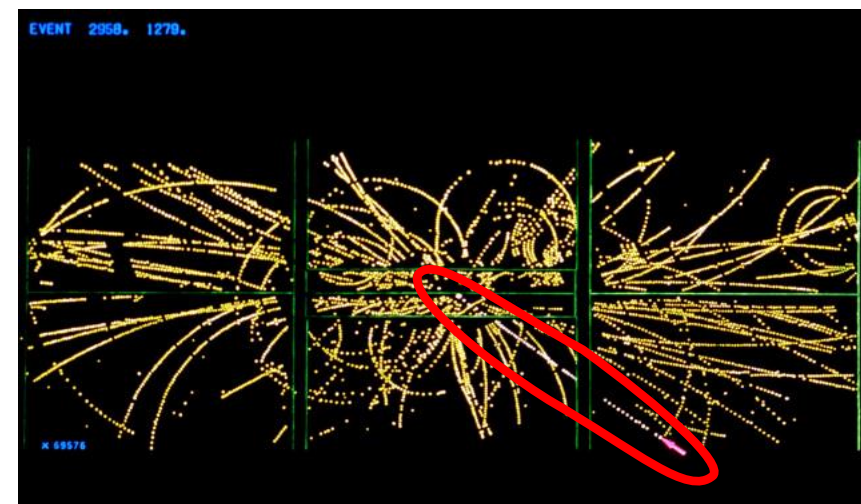
cds.cern.ch/record/39468

A W^\pm/Z^0 -bozonok megfigyelése: CERN, SPS 1983

- Eddigre elég adat: M_W és M_Z kicsivel $100 \text{ GeV}/c^2$ alatt
- $\sim 300 \text{ GeV}$ energiájú p és \bar{p} nyalábok ütköztetése ($Sp\bar{p}S$)
- Az ütköztető Rubbia javaslatára (gyorsítóból ütköztető), a van der Meer által kidolgozott sztochasztikus hűtéssel (nyalábenergia tuning)
- A TKP energia ($2 \times 300 \text{ GeV}$) bőven elég W^\pm és Z^0 bozonok keltésére!
- Elektronnyom + hiányzó energia keresése



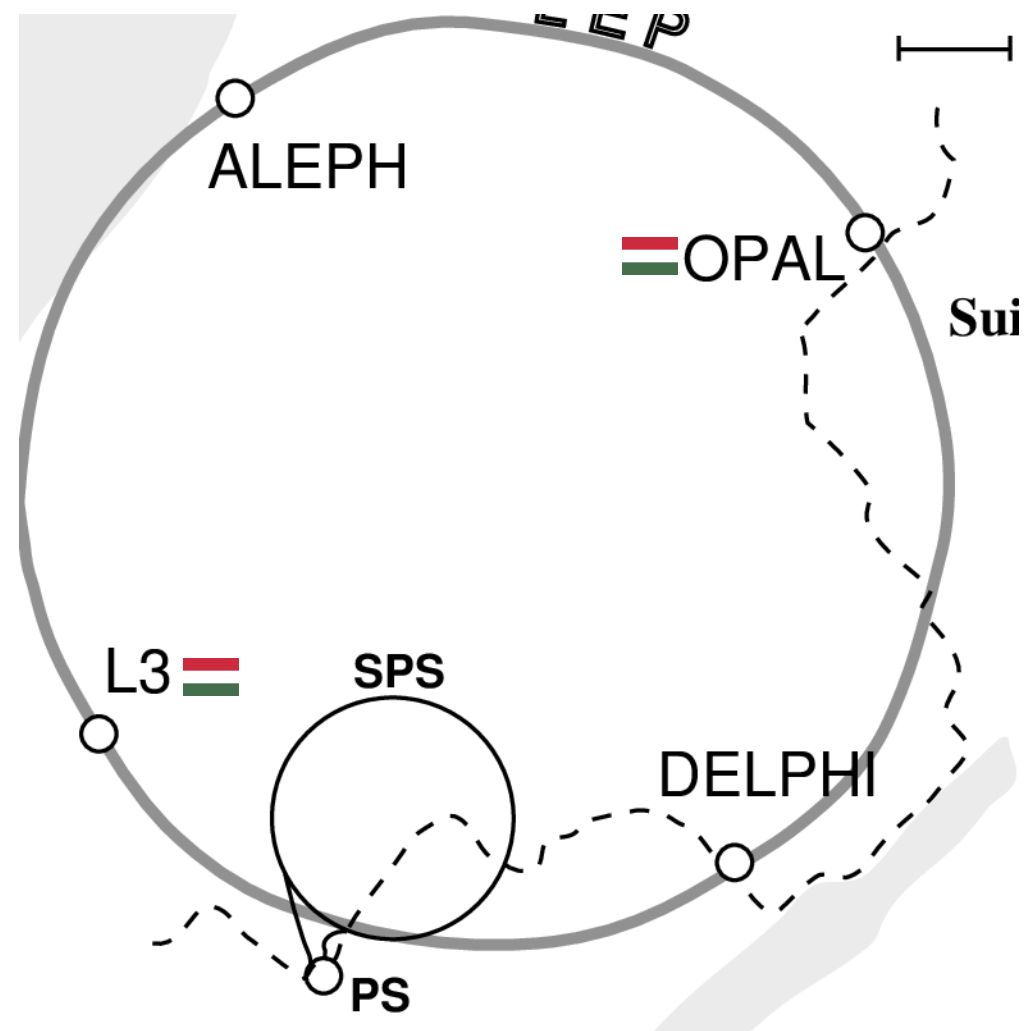
- Az UA1 (Rubbia) és az UA2 kísérletek figyelték meg először a W bozont
- Rubbia és van der Meer 1984-ben Nobel díjat kap



ods.cern.ch/images/CERN-EX-69576-1

Elektrogyenge anatómia: CERN, LEP, 1989-2000

- Nagy (27 km) elektron pozitron ütköztető (LEP), **elemi részecskéket ütköztet!**
- A nyalábenergiát idővel növelik (45 GeV → 104.5 GeV)
- **Elektrogyenge fizika precíziós vizsgálata:** megfigyelhető mennyiségek a tömegközépponti energia (\sqrt{s} = nyalábenergia kétszerese) függvényeként



Magyarok a CERN-ben

- **Magyar csoportok** és egyéni kutatók is dolgoztak a **LEP-en** (OPAL és L3), de később az **LHC-ban** (CMS) is
- Jelentős hozzájárulás az 1995 utáni LEP2-ben: pl. Higgs keresés
- A **Higgs-bozon megtalálása az LHC-ban**
- A **készülő HL-LHC detektor-fejlesztéseiben** is sok magyar:
 - ATOMKI – Müon GEM
 - DE – MTD
 - Gyöngyös – PPS
 - ELTE – BRIL
 - Wigner – SI nyomkövető

NINETY-FIFTH COUNCIL SESSION

Geneva - 26 June 1992

ACCESSION OF THE REPUBLIC OF HUNGARY

A. The Past

8. The wish of Hungary to join CERN is based upon the existence of a community of scientists who have the qualities and potential necessary to carry out high level research on an international basis at their universities and research centres around the country.

B. The Present

17. While most of the activities in high energy physics are concentrated in CRIP and at the Eötvös University in Budapest (a small group emerged only recently at Kossuth University, Debrecen), the subjects are rather diverse. The reason is, on the one hand, that the possibilities for doing front line high energy physics in Dubna became limited, and, on the other hand, no institutional relationship exists with another large institute. Therefore participation in large projects is mainly the result of individual effort.

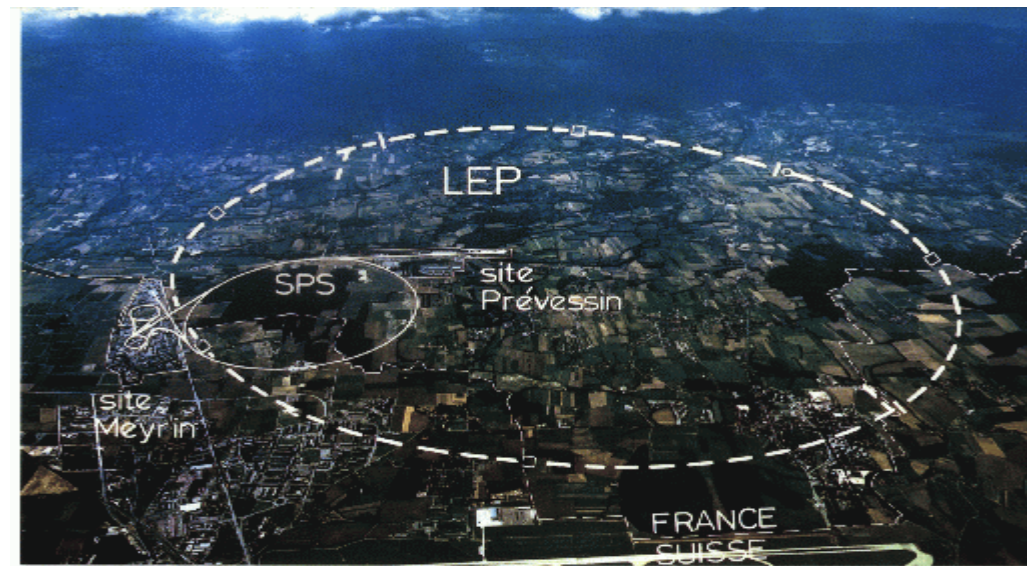
Ma a Wigner FK

Elektrogyenge anatómia: CERN, LEP, 1989-2000

- A nyalábenergiát idővel növelik (45 GeV \rightarrow 104.5 GeV)
- Elektrogyenge fizika precíziós vizsgálata: megfigyelhető mennyiségek a tömegközépponti energia (\sqrt{s} = nyalábenergia kétszerese) függvényeként
- Egyik legfontosabb a $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$ folyamat (bármilyen fermion - antifermion) **hatáskeresztszete** (\sim valószínűsége):

$$\sigma(s) = \sigma_\gamma(s) + \sigma_{\gamma Z}(s) + \sigma_Z(s)$$

$$\sigma(s) \propto \left| \begin{array}{c} e^+ \\ \quad \searrow \\ \quad \quad \gamma/Z^0 \\ \quad \nearrow \\ e^- \\ \quad \nearrow \\ \quad \quad f \\ \quad \searrow \\ \quad \quad \bar{f} \end{array} \right|^2$$



Természetes egységekben $c = 1$

$$\sigma_\gamma(s) \propto 1/s \quad \sigma_{\gamma Z} \propto (s - M_Z^2)$$

$$\sigma_Z(s) \propto \frac{s}{(s - M_Z^2)^2 + M_Z^2 \Gamma_Z^2}$$

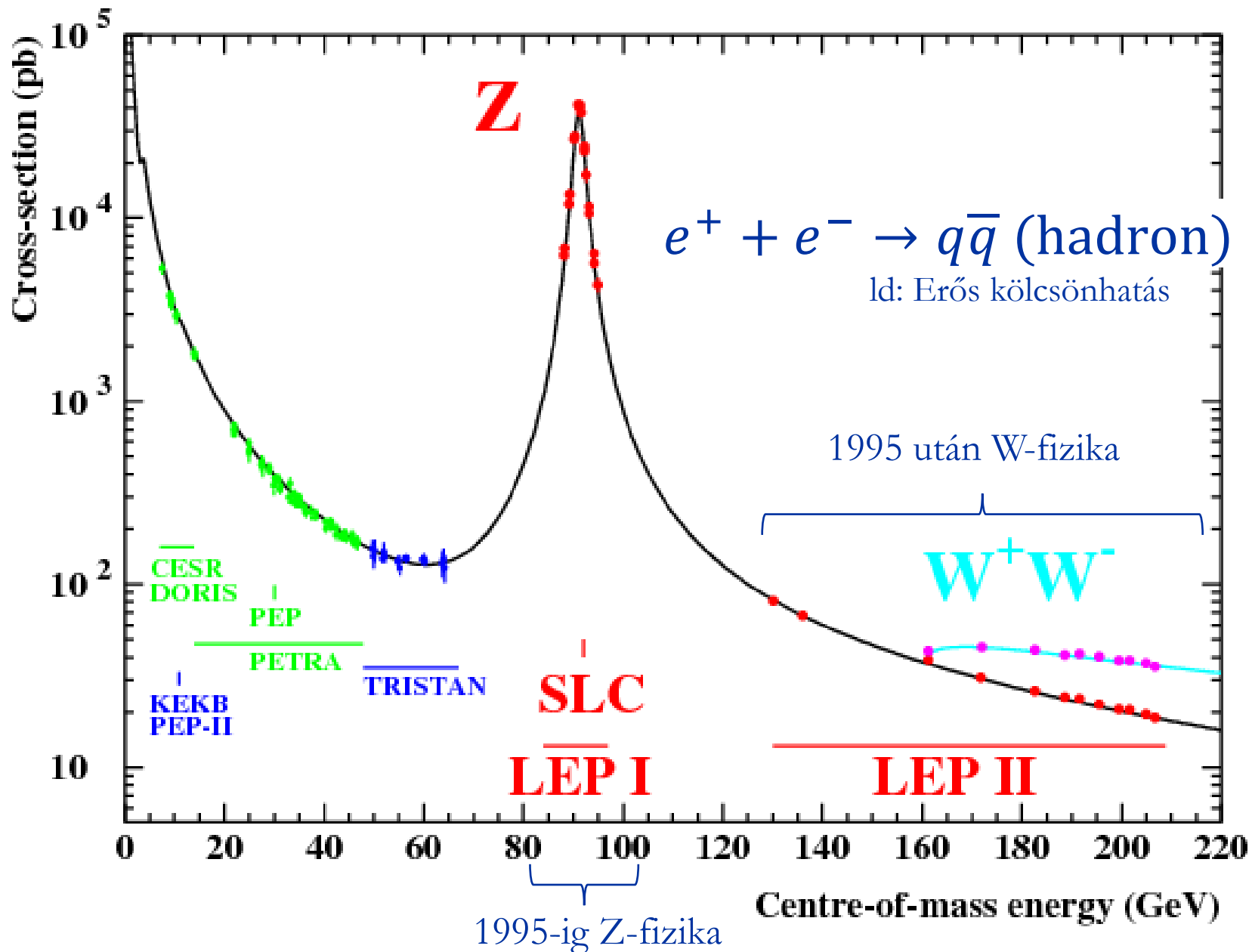
$$\Delta E \Delta t \geq \hbar/2 \rightarrow \Gamma_Z \sim (\text{élettartam})^{-1}$$

A Z-csúcs

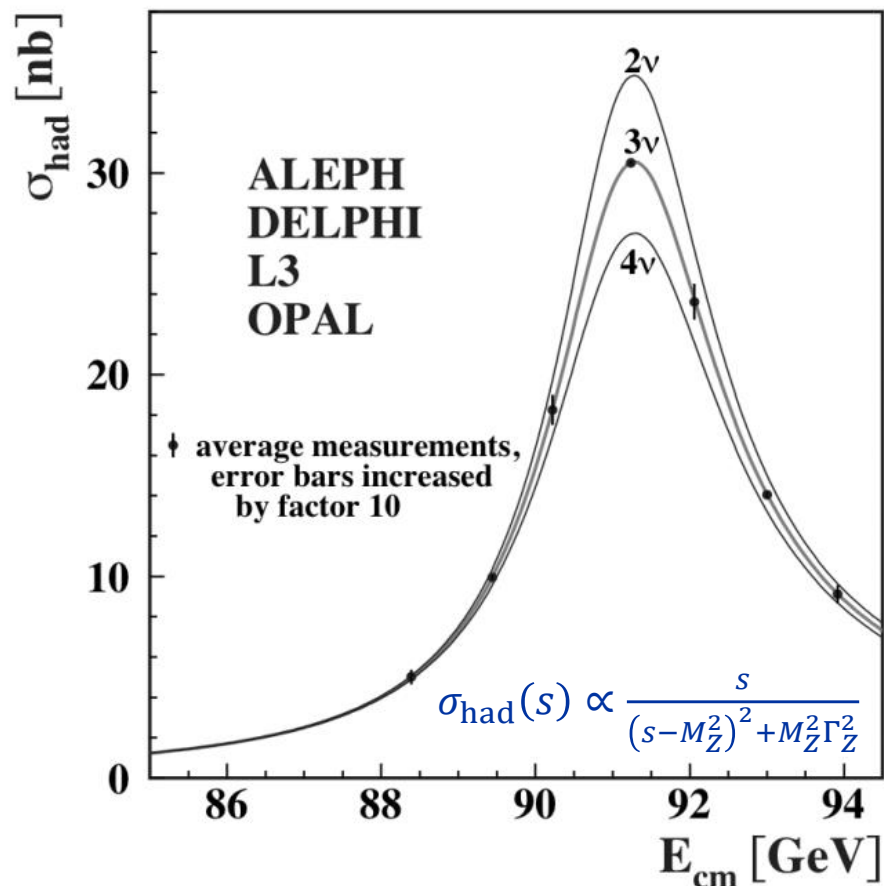
$$M_Z = 91\,187.5 \pm 2.1 \text{ MeV}$$

$$\Gamma_Z = 2\,495.2 \pm 2.3 \text{ MeV}$$

- Ez $\sim 0.002\%$ bizonytalanság M_Z -ben!
- 91200 MeV TKP energián kellett 10 MeV-es bizonytalanságot kézben tartani!
- Pl.: a Hold keringéséből és a közelben elhaladó TGV vonatokból a kóboráram



Hány család elemi részecske van?



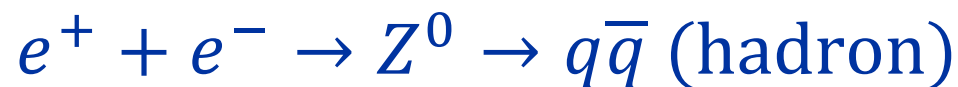
- Mire bomolhat Z^0 ?
- Minden olyan f fermionpárra amire

$$M_Z > 2 m_f$$

- A teljes bomlási szélesség ekkor:

$$\Gamma_Z = \Gamma_{ee} + \Gamma_{\mu\mu} + \Gamma_{\tau\tau} + \Gamma_{\text{had.}} + N_\nu \Gamma_{\nu\nu}$$

$$N_\nu = 2.9840 \pm 0.0082$$

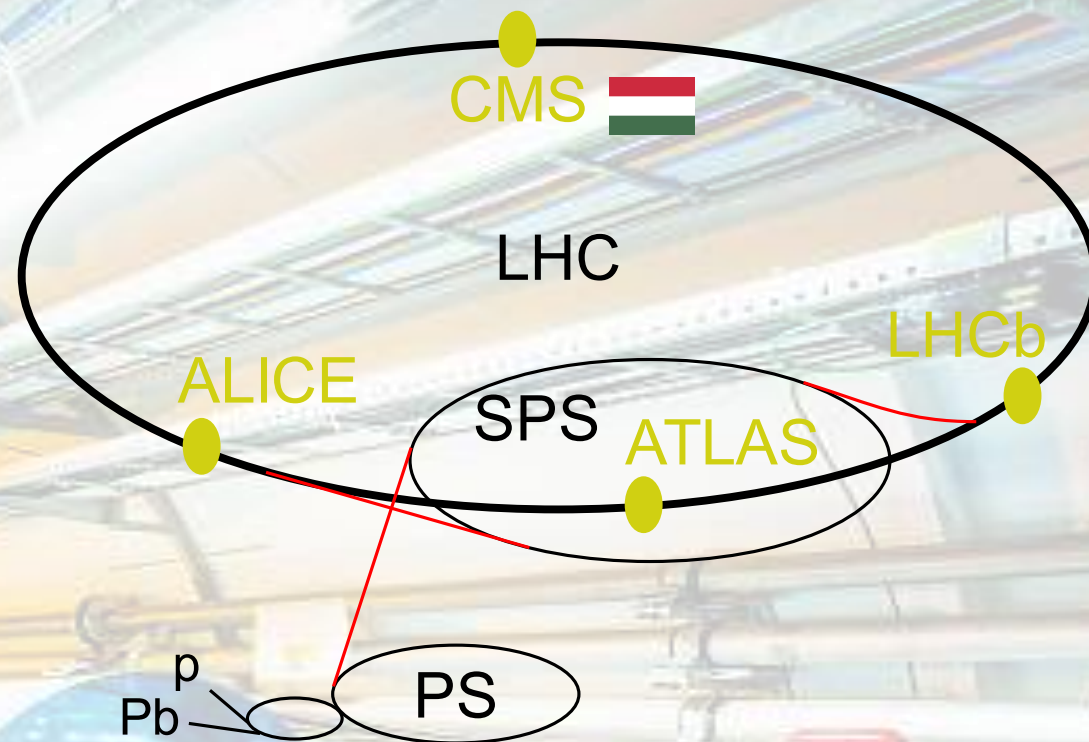


Az LHC korszak: 2008-

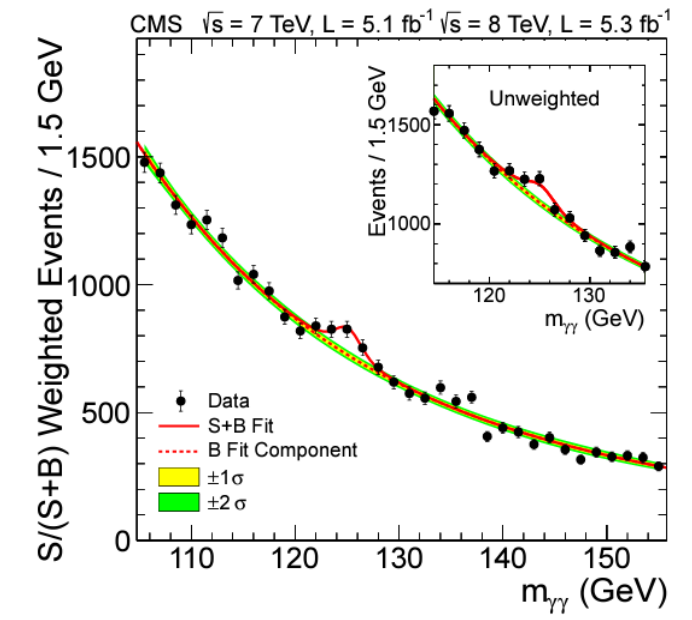
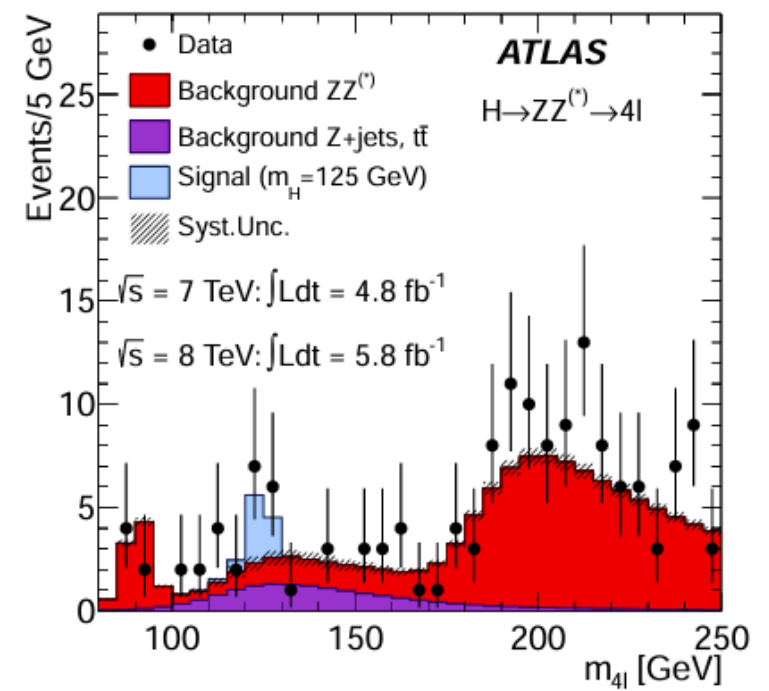
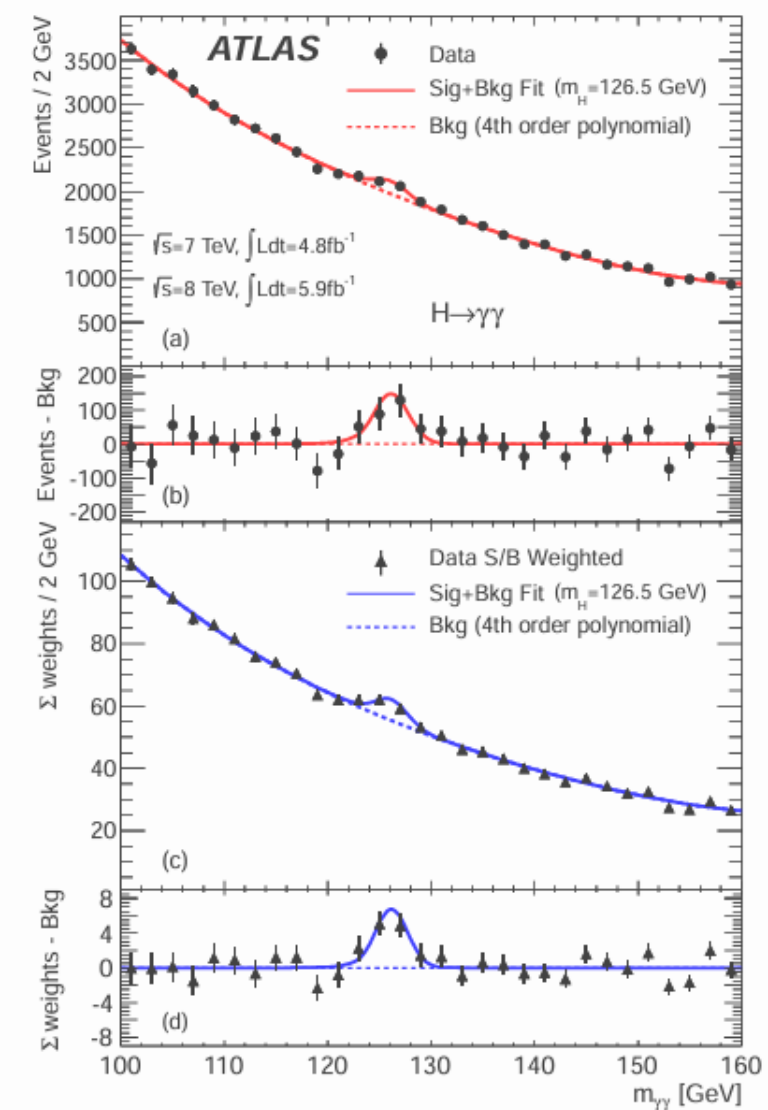
- A **LEP** alagút újrahasznosítása
- $p + p$ és $p + Pb$ ütköztető
- Első $p + p$ ütközések **2009-ben**
- **2010-ben már 3500 GeV nyalábenergia!**

Célja a fizikában:

- **Higgs-részecske felfedezése**
- Standard modellen túli fizika vizsgálata: szuperszimmetria, extra dimenziók, új részecskék?
- Mi a sötét anyag eredete?
- Természetben nagy energiákon lehet egyesíteni az elektromgyenge és erős kölcsönhatásokat?



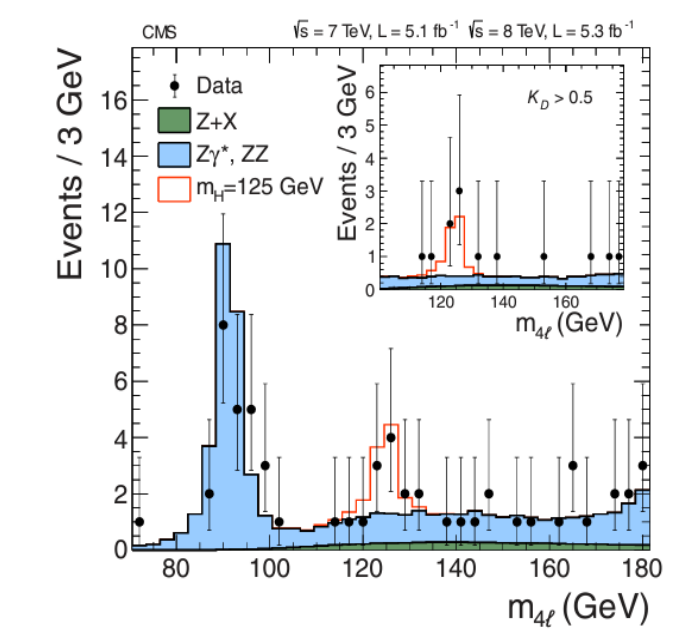
- Kvar-k-gluon plazma vizsgálata
- Anyag-antianyag aszimmetria oka?
- És persze: **a „Higgs-szektor”** **tényleg olyan-e mint ahogyan azt az elektromgyenge elmélet jósolja?**



A Higgs-bozon megfigyelése 2012

$$p + p \rightarrow H \rightarrow \gamma\gamma$$

$$p + p \rightarrow H \rightarrow \ell_1^+ \ell_1^- \ell_2^+ \ell_2^-$$

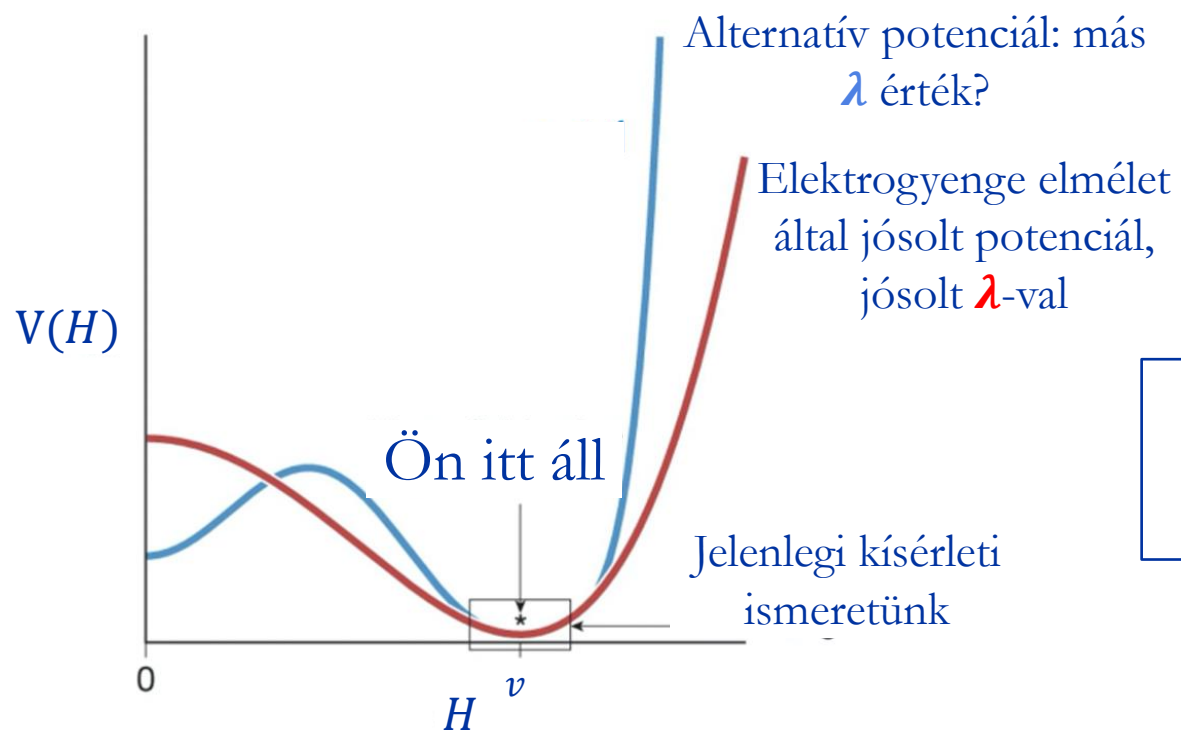


Englert és Higgs 2013-ban Nobel díjat kap

Hogyan néz ki a Higgs potenciál? HL-LHC

Az elektroyenge modell jóslata:

$$V(H) = -\frac{M_H^2}{4} (v + H)^2 + \frac{\lambda}{4} (v + H)^4 \quad \text{ahol } M_H^2 = 2\lambda v^2$$

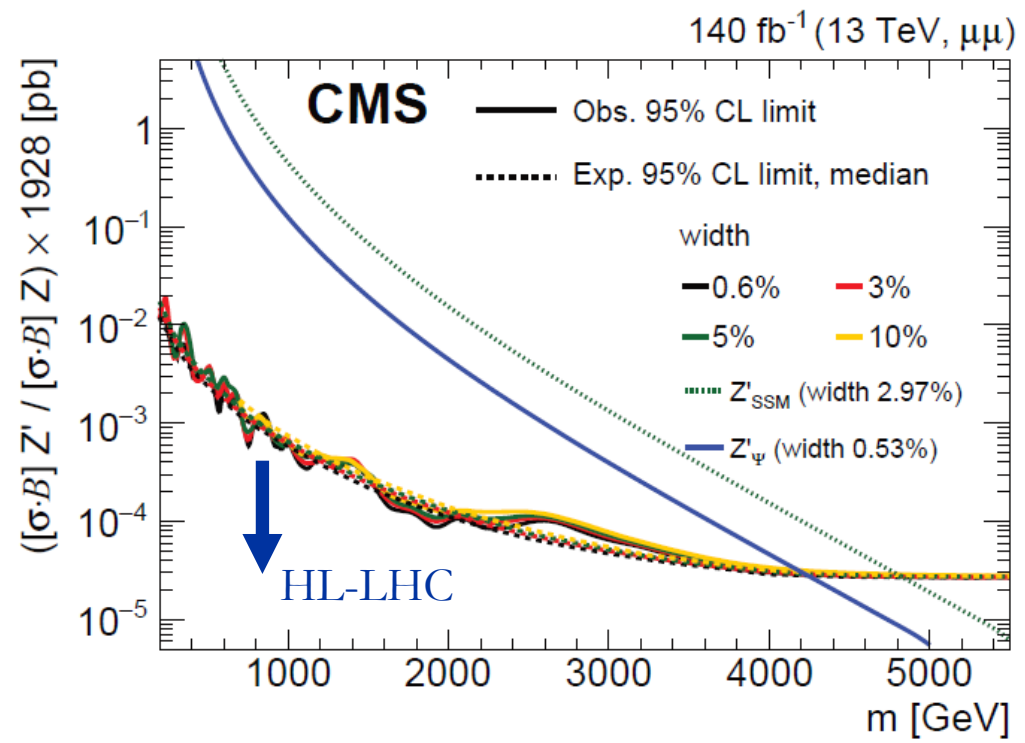


Részecskék életidejének a pontos méréséből

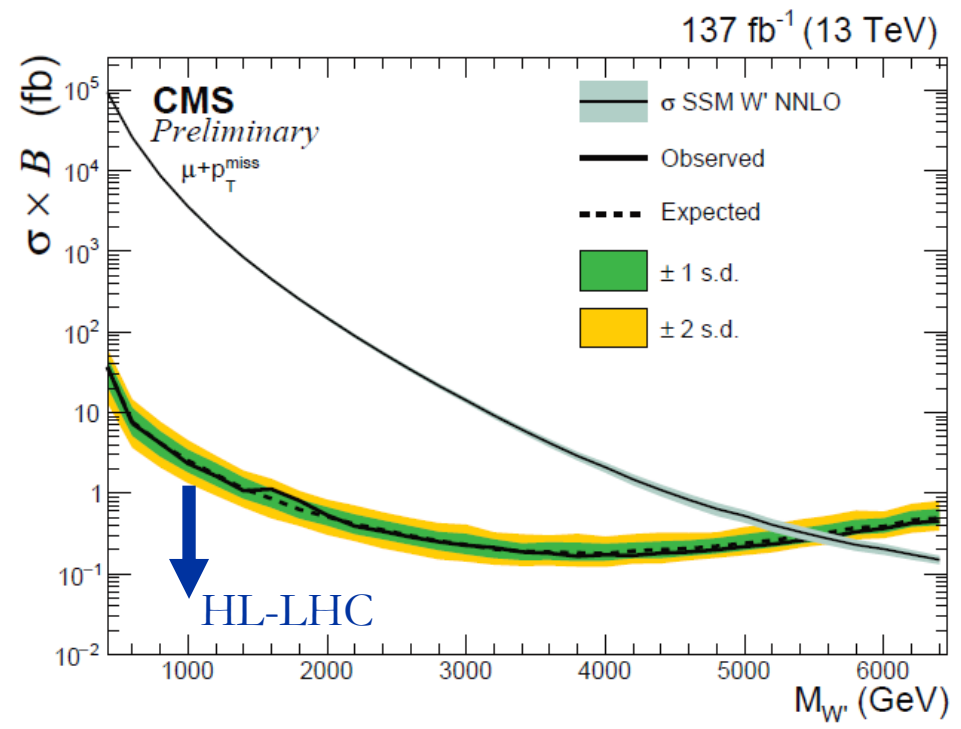
λ mérhető lesz a HL-LHC-ban!
Új fizika?

Új részecskék az SM-en kívül? HL-LHC!

- Átfogó keresési program a LEP-ben és az LHC-ban is
- Van esetleg a gyengénél is gyengébb kölcsönhatás, új erő? Ezt új részecskék közvetítenék!
- Könnyen elbújhat, hiszen a folyamatok valószínűsége extrém kicsi is lehet: esetleg sötét anyag? (ld. Sötét anyag keresése)



$$p + p \rightarrow Z' \rightarrow \mu^+ + \mu^-$$



$$p + p \rightarrow W' \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

Út a jövő felé

- Ennyi volt, mindent megmértünk?
- Ha ez tényleg így van...
 - De tényleg? Biztosra kéne menni: a fizika precíziós tesztelése szükséges
- ... akkor az azért izgalmas: egy korszak vége csak egy új kezdete, amit a fiatalok formálhatnak
- Ha nem így van... akkor pedig azért izgalmas:
 - Elméleti oldalról modellépítés, jóslatok számítása
 - Kísérleti oldalról egzotikus részecskék keresése, legyen az akár nagyon gyengén kölcsönható vagy nagyon nehéz

Köszönöm a figyelmet!