

A részecskefizika útkereső kora: megértenénk-e a kérdést, ha a Világegyetem válaszolna?

Varga Dezső
HUN-REN Wigner FK

- Mit jelent egy fizikai törvény, hogyan mérünk (részecske-) fizikai mennyiségeket?
- Kvantummechanika és relativitáselmélet
- A kölcsönhatások rejtvényei
- Megválaszolatlan (rosszul feltett?) kérdések



Atomoktól Csillagokig, ELTE, 2024 február 8.

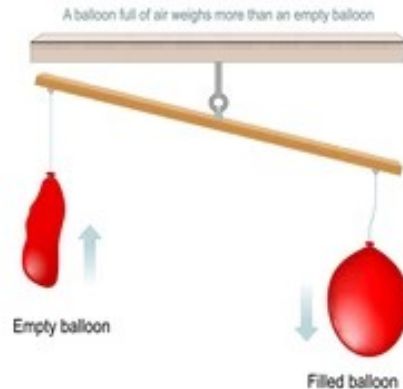


PROJECT
FINANCED FROM
THE NRDI FUND

Fizikai modell: a valóság közelítése

- Newton-törvény: **$F=ma$**
- A tömeg egy paraméter -- hogyan mérjük?

Nyilván “csupasz”
tömegre gondolunk,
pl. lufi leeresztve...



Mi a helyzet, ha nem tudjuk a
tömegpontot elválasztani valamitől
amit cipel...

Pl: elektron tömegébe beleértjük-e az
elektromos terének a tömegét?...

Válasz: hibás kérdés! Az elektron egy
kvantumozott részecske, “hullám”

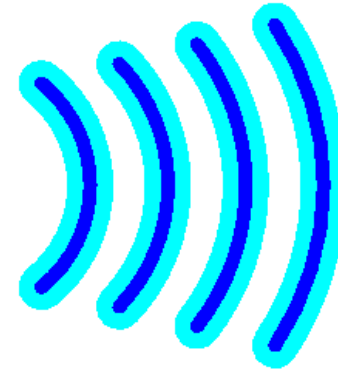
Atomok felépítése: kvantumelmélet

A pontszerű dolgokra mint **hullámokra** gondolunk (anyag hullám)

Pontszerű elektron

vs.

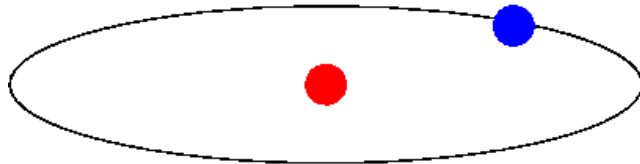
hullámcsomag



Keringő elektron

vs.

elektron-felhő



Elektromos vonzás: itt távoli erő a hullám pontjai között

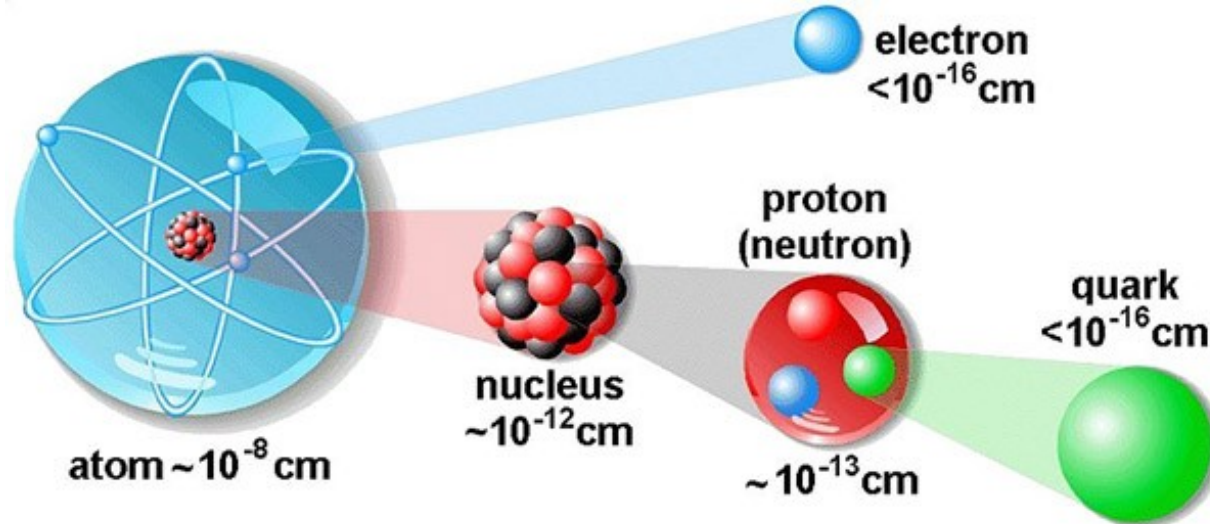
Relativisztikus mezők

- Relativitáselméletben nincs távolhatás: közvetítő részecskék
- Elektromágneses: “foton”
- Erős: “gluon” (kvarkok közt)
- Gyenge: “Z, W”
- Gravitáció: “graviton”?



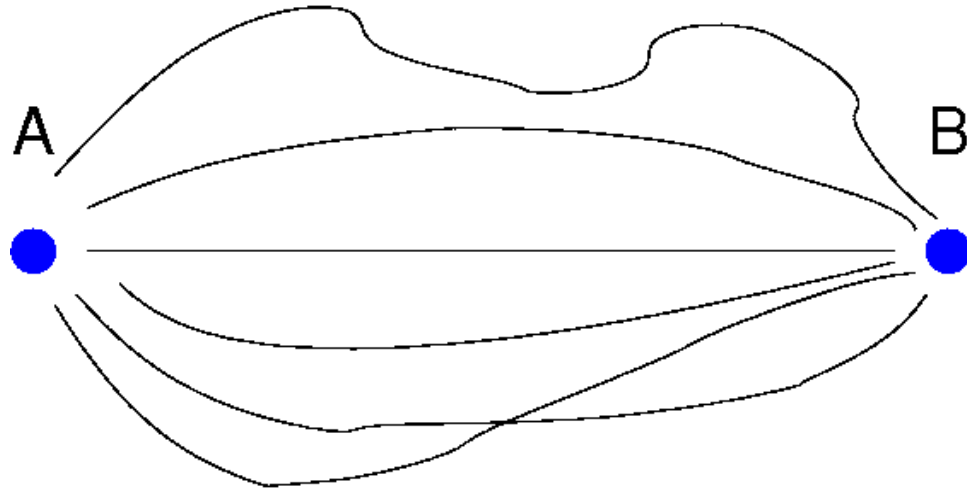
Milyen ismert törvények szerint épül fel a világ?

- Kvantummechanika: kicsi méretek
- Relativitáselmélet: nagy sebességek
- Kölcsönhatások: elektromos/mágneses, magfizikai, tömegvonzás...



Kvantummechanikai pályaintegrál

- Kezdeti és végállapot (hely, sebesség)
- **Mindegyik** pályán mehet, amplitúdó összeg
- **S** hatás a “fizikai modell”



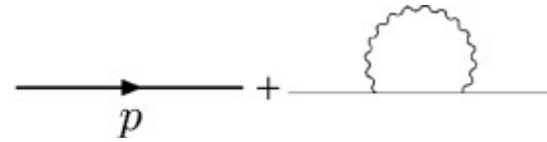
$$\int D e^{iS/\hbar}$$

Számítási módszer: Feynman-diagrammok

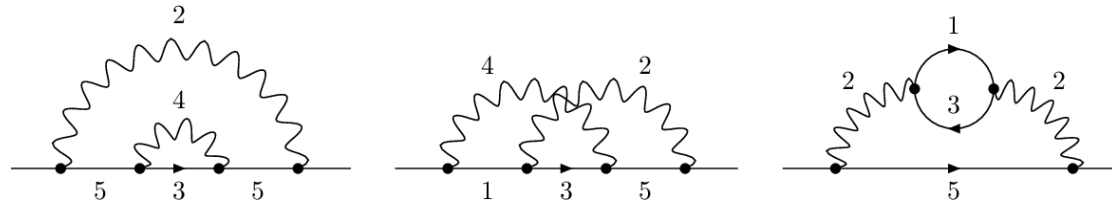
- Számolási segédlet, de akár folyamatnak is gondolhatjuk – sorfejtés α rendjeiben

$$\alpha = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{\hbar c} \approx \frac{1}{137}$$

- Elektron “tömege”: járulék fotonoktól
- 0. és 1. rendben:



- 2. rendben pl:



A “végtelenek problémája”: minden járulékot figyelembe kell venni!

- A végtelen járulékokat bizonyos esetekben bele lehet olvasztani a paraméterekbe: “**renormálás**”
- Mérhető tömeg = renormált tömeg \neq csupasz tömeg
- Mérhető töltés = renormált töltés \neq csupasz töltés
- “**Renormálható**”: csak nagyon speciális esetekben

Történetileg: áttörések és zsákutcák

- Relativitáselmélet, kvantummechanika alapjai
(1925-ig, Einstein, Heisenberg, Schrödinger, Pauli, ...)
- Relativisztikus-szerű kvantummechanika, antirészecskék
(1928-1930 Dirac)
- **Végtelenek problémája**, kiderül: EM értelmes elmélet
(1950 Schwinger, Dyson, Feynman)

Történetileg: áttörések és zsákutcák

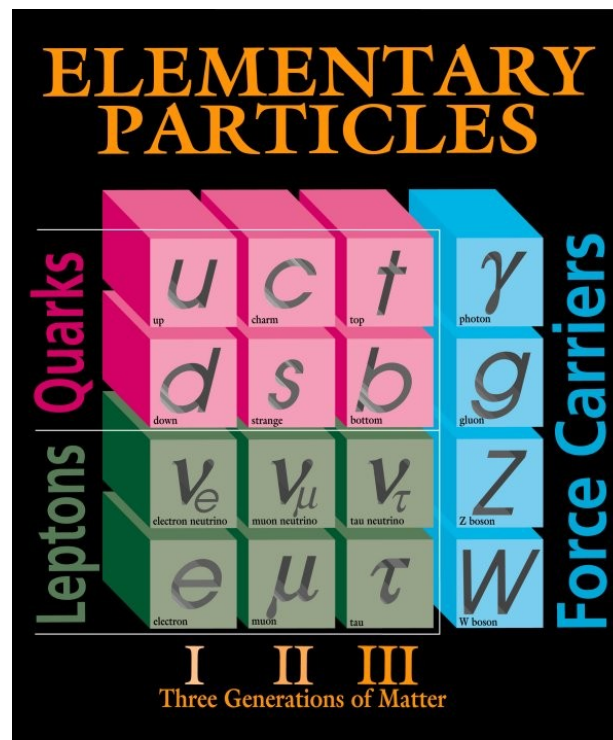
- Relativitáselmélet, kvantummechanika alapjai
(1925-ig, Einstein, Heisenberg, Schrödinger, Pauli, ...)
- Relativisztikus-szerű kvantummechanika, antirészecskék
(1928-1930 Dirac)
- Végtelenek problémája, kiderül: EM értelmes elmélet
(1950 Schwinger, Dyson, Feynman)
- **”Mértékelméletek”**: zérus tömegű közvetítő miatt zsákutca?!
(1955-1960 Yang-Mills, Glashow, Salam)

Történetileg: áttörések és zsákutcák

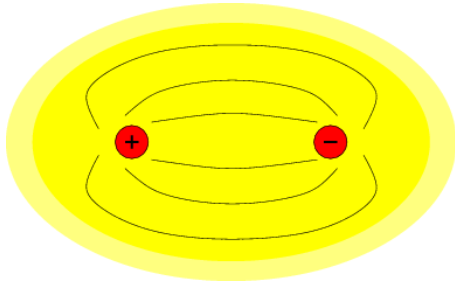
- Relativitáselmélet, kvantummechanika alapjai
(1925-ig, Einstein, Heisenberg, Schrödinger, Pauli, ...)
- Relativisztikus-szerű kvantummechanika, antirészecskék
(1928-1930 Dirac)
- Végtelenek problémája, kiderül: EM értelmes elmélet
(1950 Schwinger, Dyson, Feynman)
- "Mértékelméletek": zérus tömegű közvetítő miatt zsákutca?!
(1955-1960 Yang-Mills, Glashow, Salam)
- Áttörés: **spontán szimmetriasértés**, Y-M elmélet renormálható
(1964-1970 Weinberg, t'Hooft)
- Standard Modell: EM, gyenge, erős kölcsönhatások + Higgs

Erős kölcsönhatás

- Atommagokat összetartja (nukleonok között “másodlagos erő”)
- **Kvarkok között** hat (minden kvark mindegyikkel), **közvetítő gluon**
- ... de szabad kvarkot senki sem látott!
- ... erős (sorfejtés tagok egyre nőnek), nincs esély kiszámolni bármit is!
(a Természet ravaszul elrejtette a megoldást)



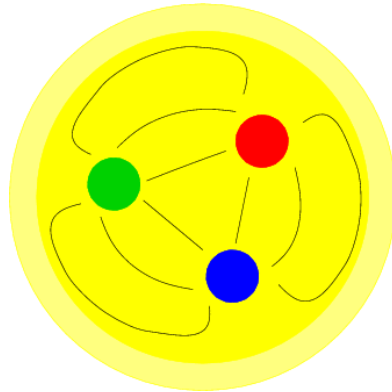
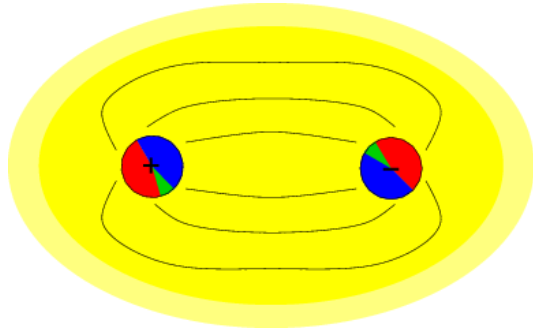
Elektromágneses vs. erős kölcsönhatás: „színes” töltés



Elektromágneses: a töltés egy szám (+ vagy -)

Erős kölcsönhatás: a töltés három szám:

$$2z + 4x - 3y \quad \text{“vektor”}$$

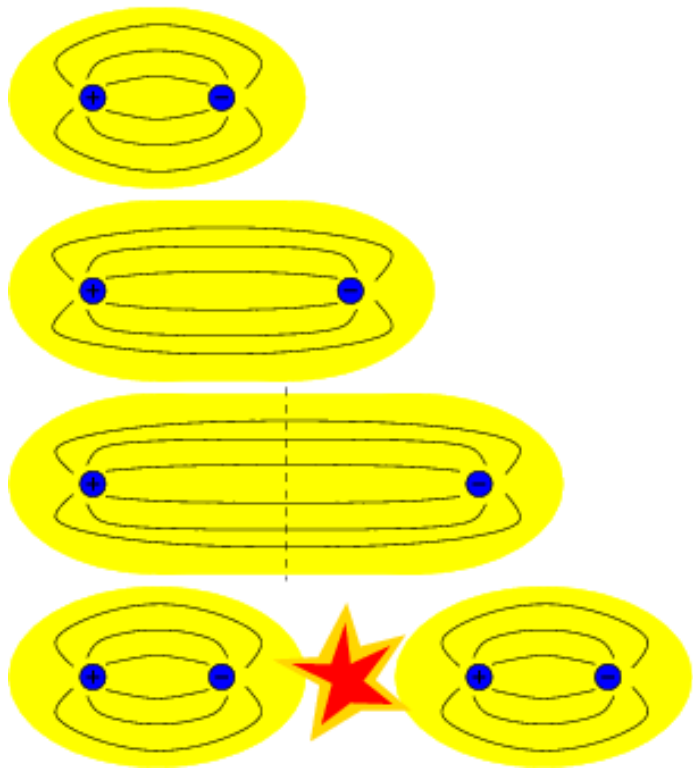


Kétféle “stabil” részecske figyelhető meg:
két kvark (szín - antiszín),
vagy **három kvark** (pl. proton)

Bármilyen kvark bármilyennel kombinálva

Az erős kölcsönhatás igazi érdekessége:
a kölcsönhatást átvivő mezőnek is van töltése!

Kvarkok gluonok mezőjében

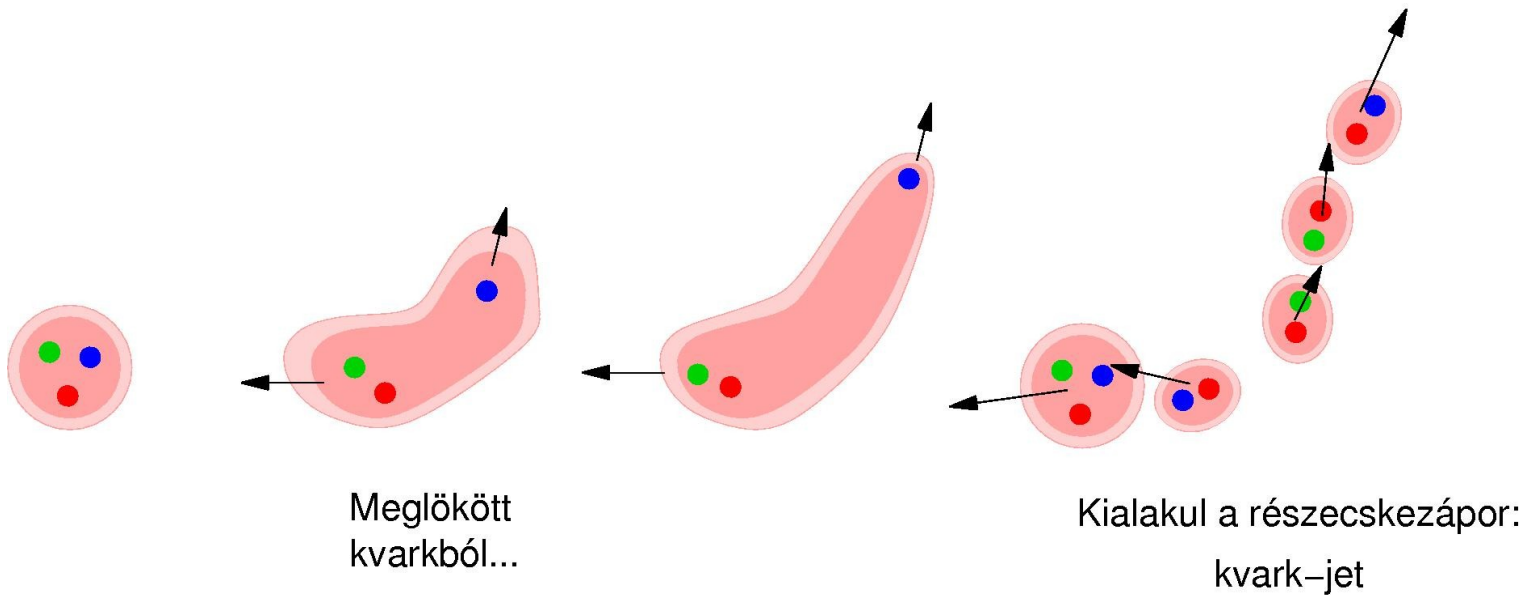


Ha szét akarunk
szedni egy kvark-párt,

széthúzzuk...

de nem engedi őket a
gluon-mező (cső)

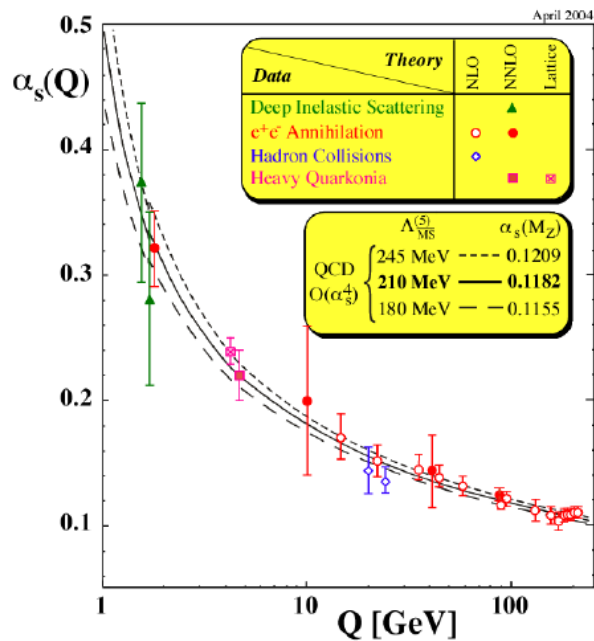
... tovább húzzuk:
QM széthasítja két újabb párra!



Szabad kvarkok nem léteznek:
mindig magukkal rángatnak további kvarkokat...

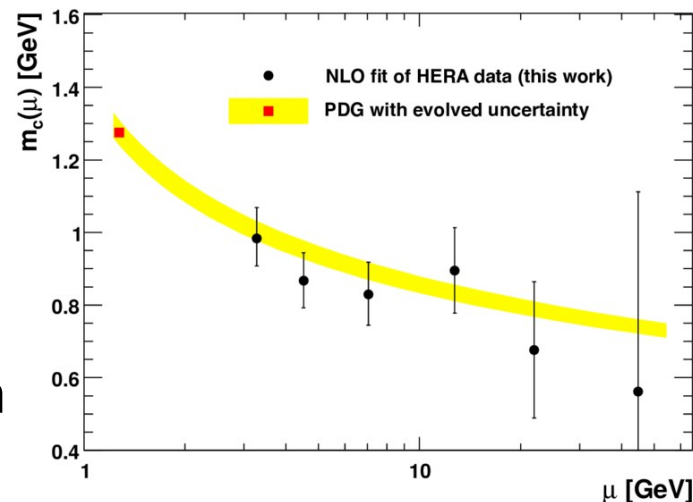
Jóslat: “futó” csatolási állandó (töltés), futó tömeg

- A töltés (bármelyik) nem állandó: végtelenek kiejtése után marad egy energiaskálától függő, szigorúan meghatározott változó tag



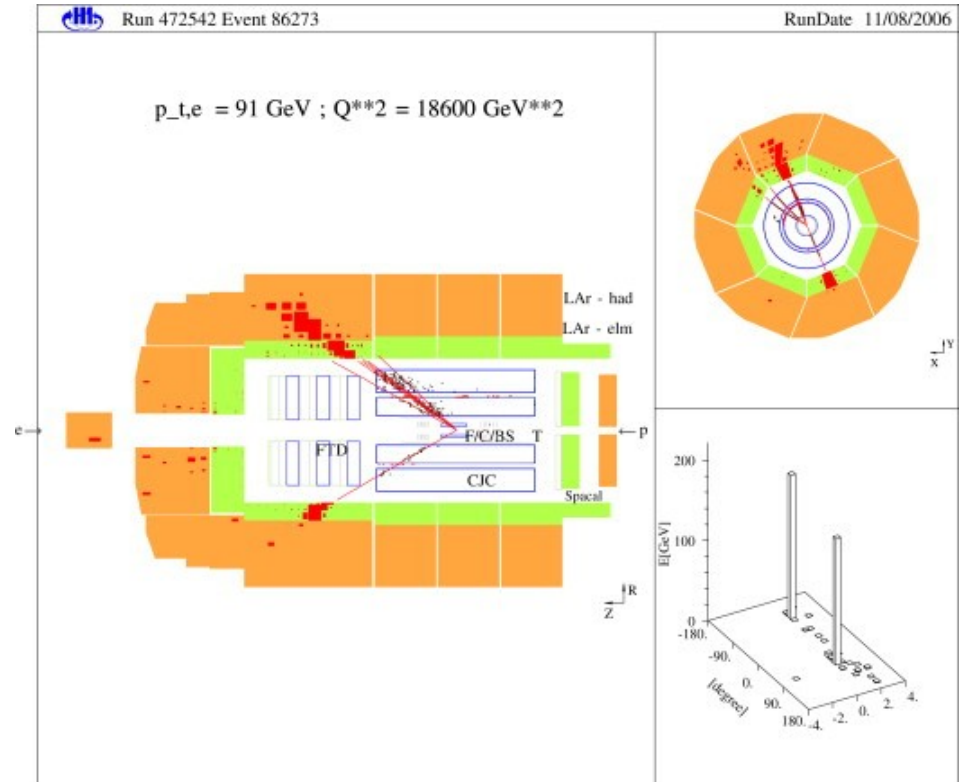
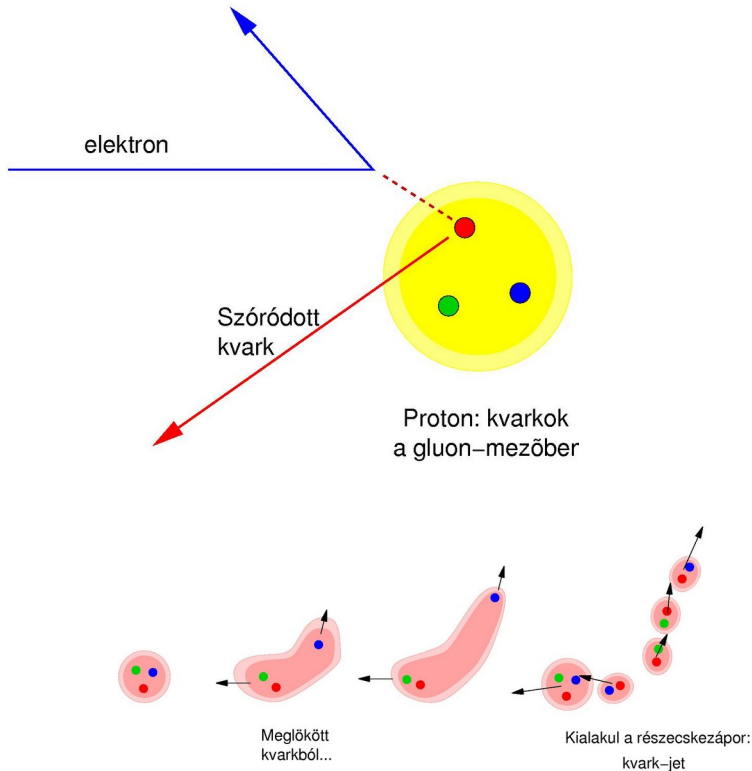
Erős kölcsönhatás:
gyengül nagy energián!

Kvark (c)
tömeg: csökken

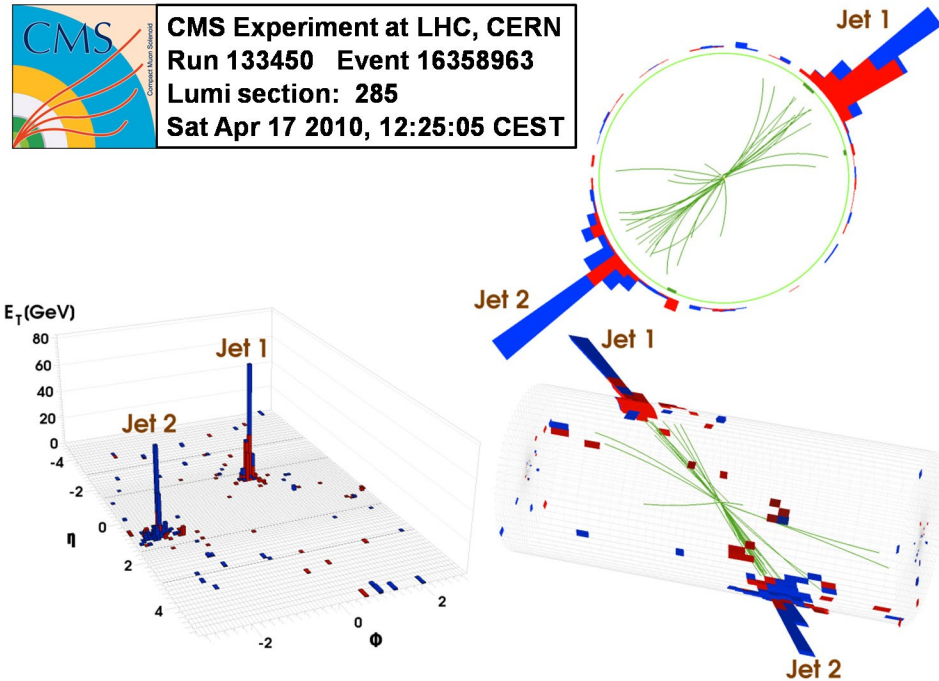


Majdnem-szabad kvark

- Protonból elektronnal kilökött kvark, nagy energián!



LHC: p+p-ben kvark-kvark ütközés (erős k.h.)



- Sok, változatos típusú részecske (főleg pionok, kaonok és könnyű barionok) **záporokban** (jet)

Gyenge kölcsönhatás

- Gyenge, mert a közvetítő részecske nagyon nehéz (alagút-effektus-szerű folyamat)

W részecske tömeg

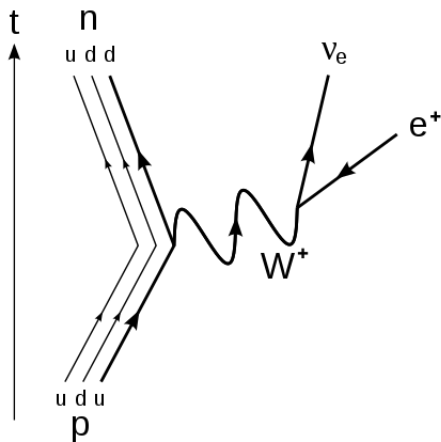


$$\Delta E \Delta t \approx \hbar/2$$

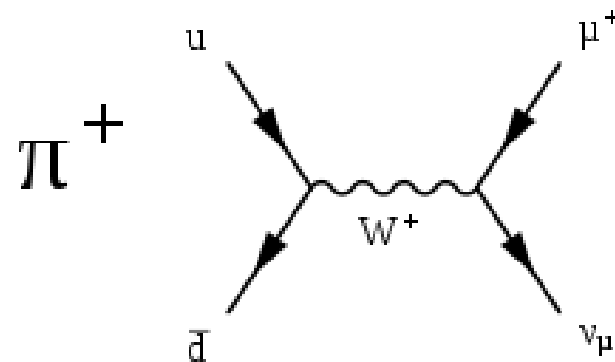
kb 100 proton tömeg!

- **W⁺ és W⁻ illetve Z⁰** Minden (balos) részecskét minden másikkal kapcsolatba hoznak

Atommagban
béta-bomlás

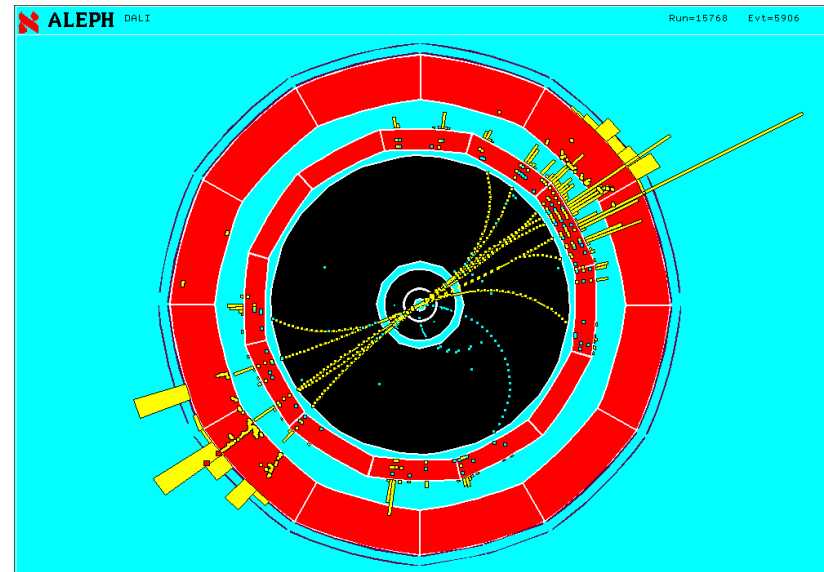
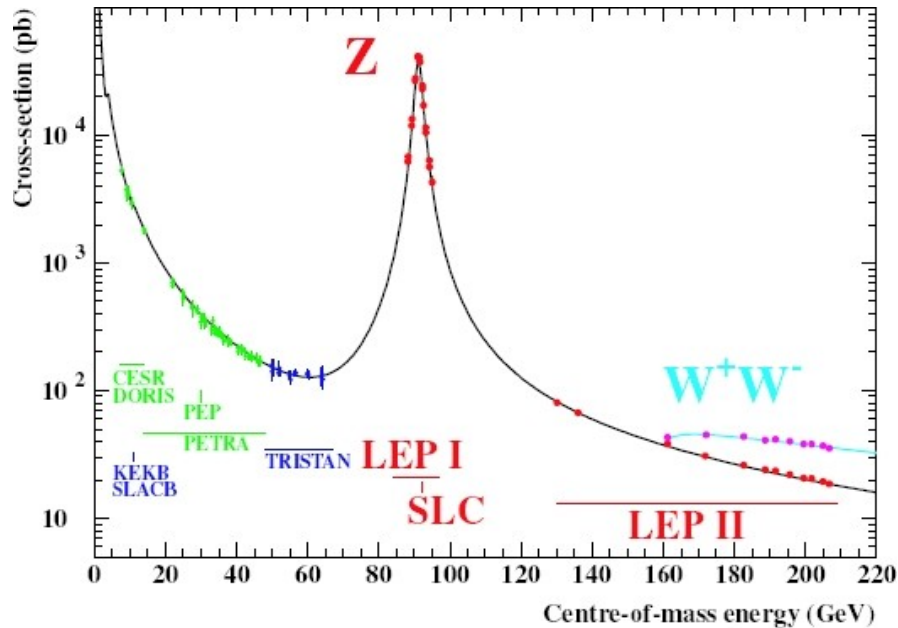


Pion
részecske
bomlás



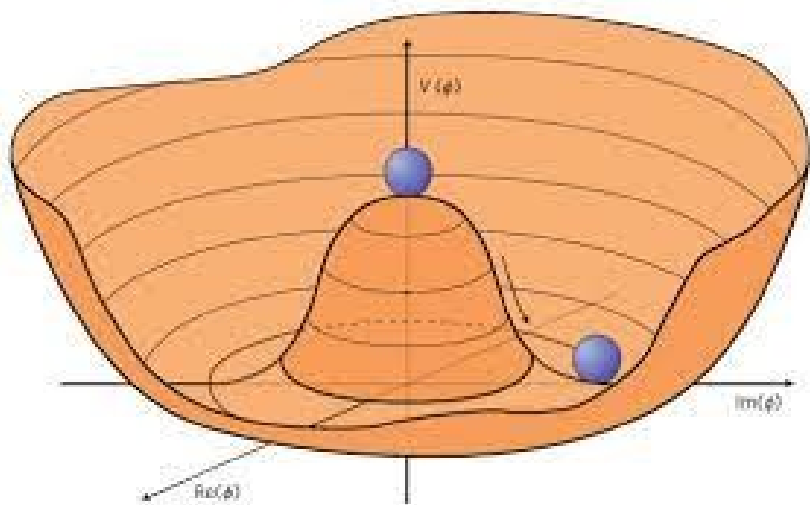
Z részecske a detektorban

- Elektron-pozitron ütközésben, rezonancián



Hogyan kapnak tömeget a részecskék?

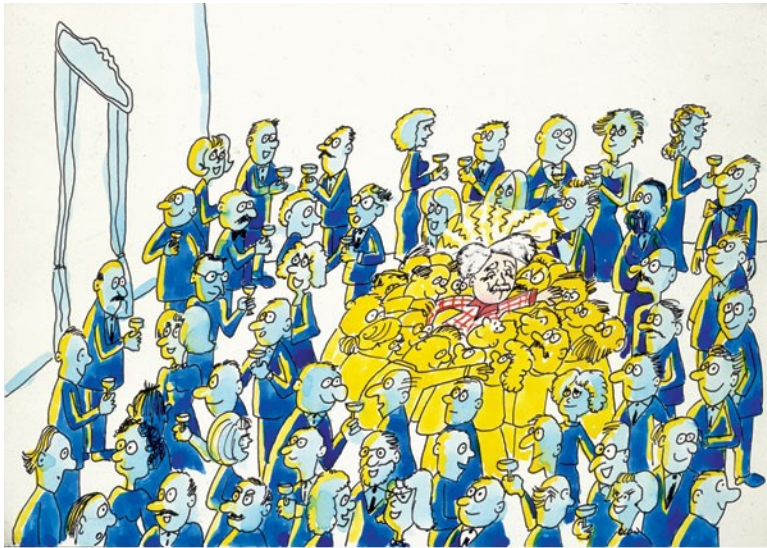
- Higgs-mechanizmus: legalacsonyabb energiájú állapotban a Higgs-mező nem zérus értékű



$$E \propto -\Phi^2 + \lambda \Phi^4$$

(renormálható, a rend kedvéért)

- Mindenkivel kölcsönhat: **csatolás arányos a tömeggel!**



Higgs- mechanizmus

a tömeg eredete

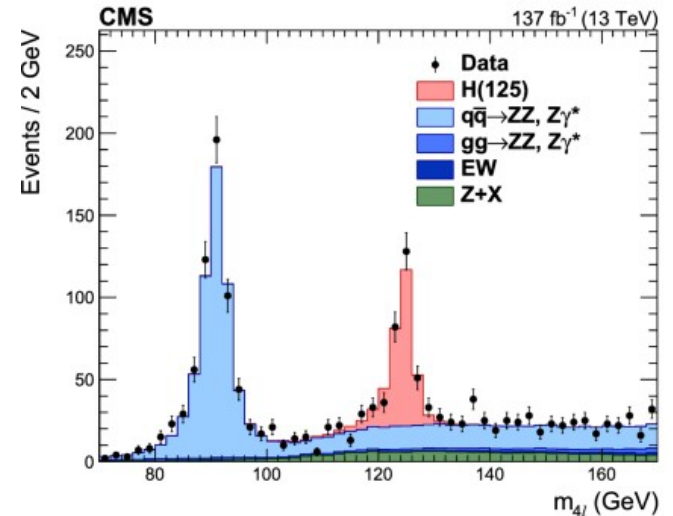
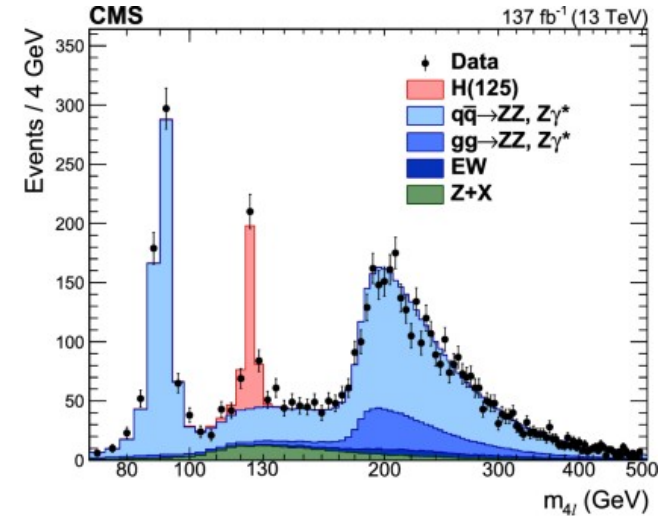
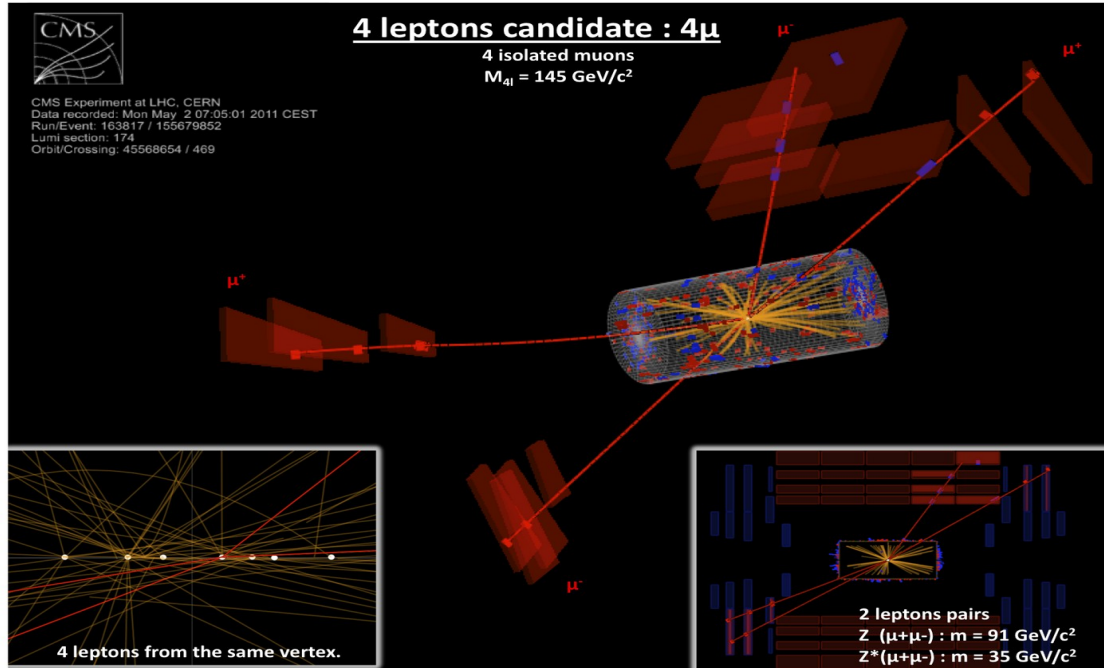
(D. Millertől)

A szobán keresztülhaladó
híres ember körül
összegyűlnek a
kíváncsiskodók... mintha
a saját tömege nőne meg!



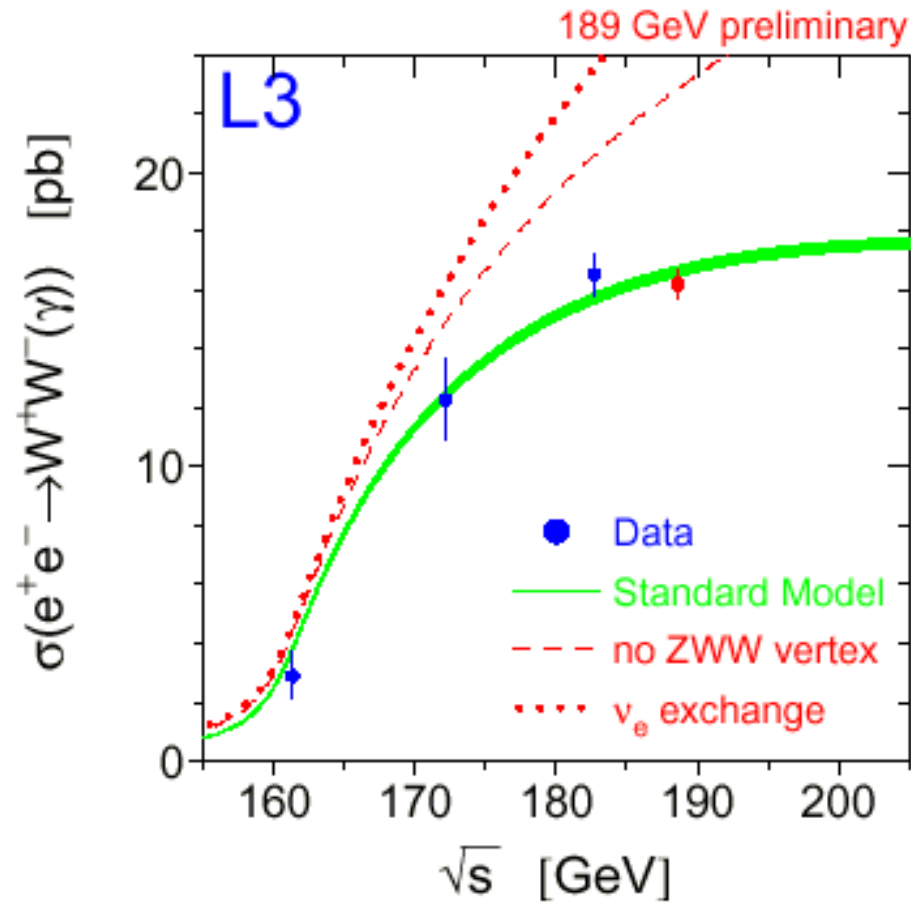
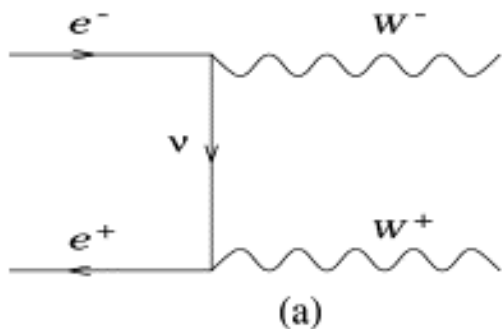
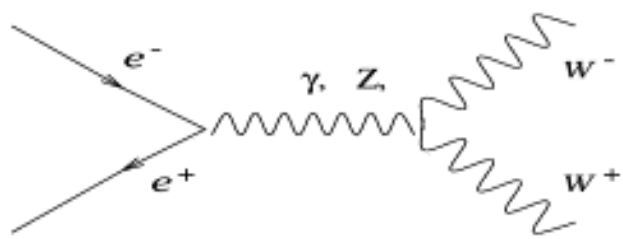
Pletyka terjedése: a Higgs
saját tömege

Az „arany” bomlási csatorna: Higgs \rightarrow 4 (müon + elektron)



A négy részecskére: milyen tömegű lehetett az, amiből feltételezhetően elbomlottak?

- Bizonyíték a gyenge-kölcsönható (W,Z) bozonok közötti kölcsönhatásra



Végtelenbe menő kölcsönhatási valószínűség értelmezhetetlen elméletet jelentene...

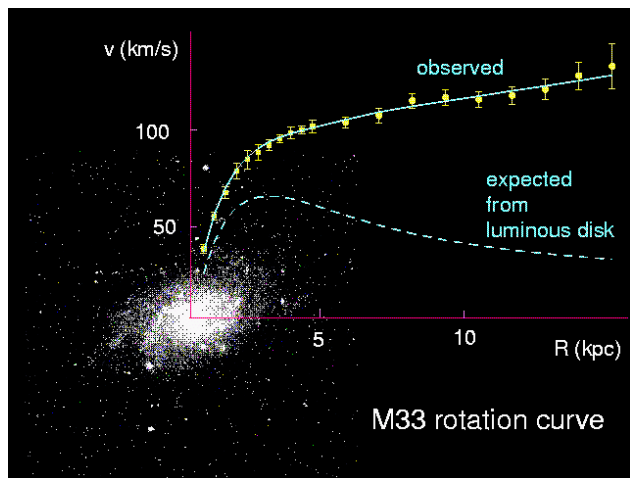
Hogyan tovább?

- A Standard (Salam-Weinberg-Higgs-) modell rendkívül sikeres! **Gravitáción kívül minden** kísérleti eredményt megmagyaráz!
- Standard modell hiányosságai inkább filozófiaiak mint kézzelfoghatók -- pár kivétel mindjárt
- “Standard modellen túl”: óriási kutatási terület évtizedek óta, sok “szép” lehetőség van. Például: **“Nagy Egyesített Elmélet”**

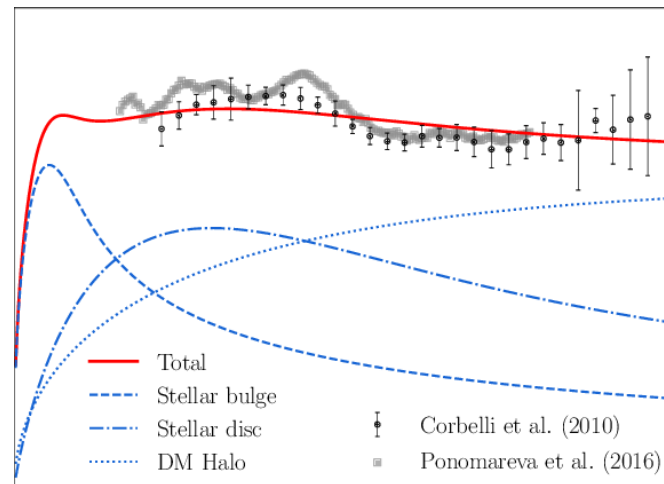
Sötét anyag: létezik, de hol??

- A “Kozmológiai Standard Modell” része hogy **ötször annyi** “sötét anyag” van az Univerzumban, mint “normál” (csillagok, bolygók, ködök, gázok, fekete lyukak ...)

M33



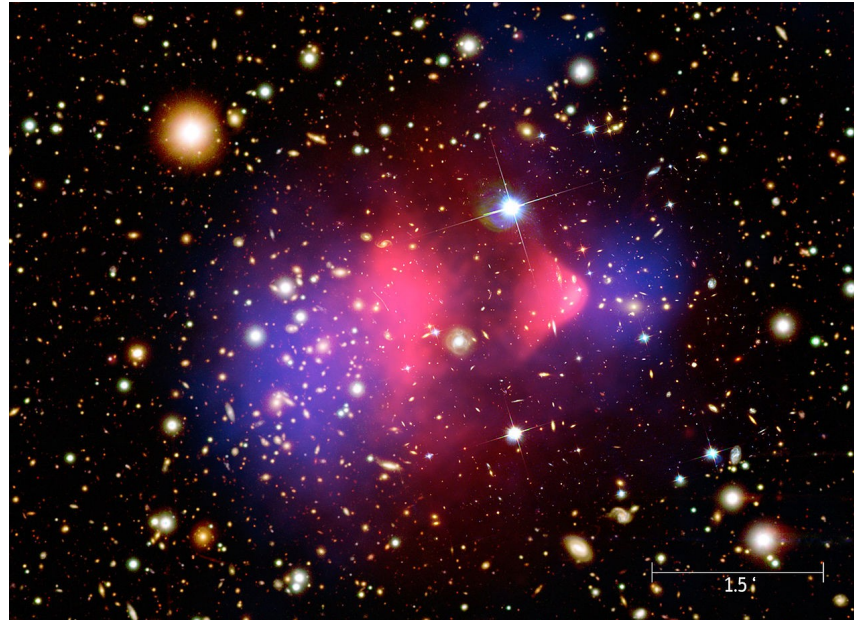
M31



Gravitációs lencsehatás

- Ütköző galaxishalmazok “tömege” le hagyta a halmaz megfigyelhető gáz-tömegét

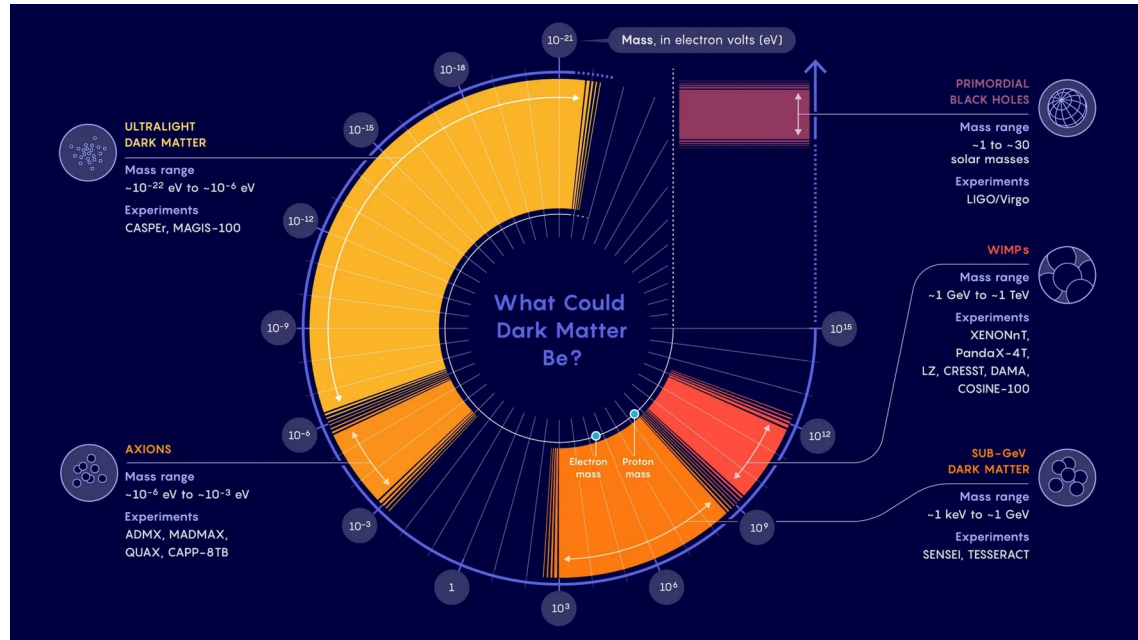
Piros: forró gázok
(Röntgen-kép)



Kék: mért tömeg
(grav. lencse)

Mi lehet a sötét anyag?

- Döbbenetesen széles lehetséges tömegtartomány!



Könnyű sötét anyag:
várhatóan nagy sebességű
(pl neutrínó-szerű)

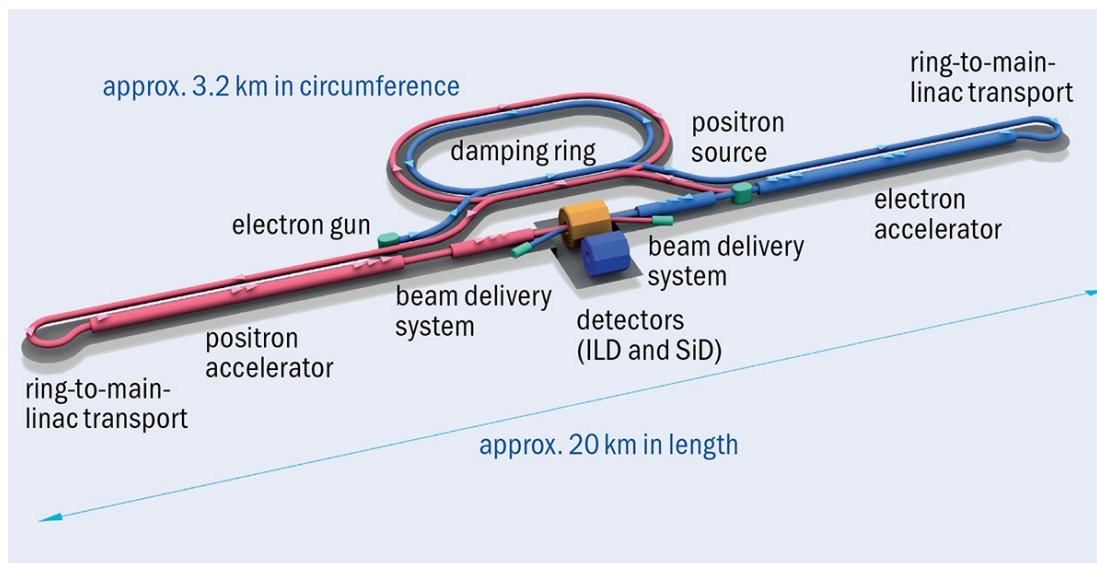
Közepesen nehéz
részecskék:
Kevéssé hat kölcsön, ezért
nem láttuk gyorsítókbán

Nehéz: Nagy Egyesítés

Extra nehéz: pl fekete lyukak

Részecskegyorsítók: poszt-LHC

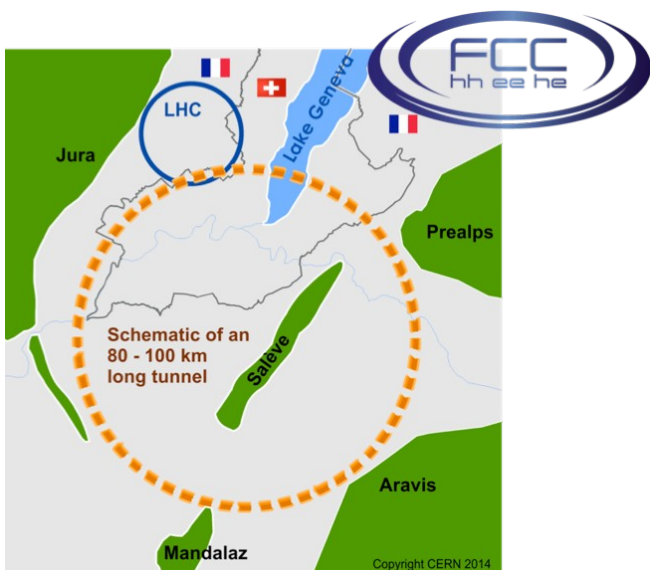
- Elektron-pozitron: nagy energián **lineáris** kell



Higgs-gyár – de a Higgs részecske nem olyan nehéz, mint régebben gondolták

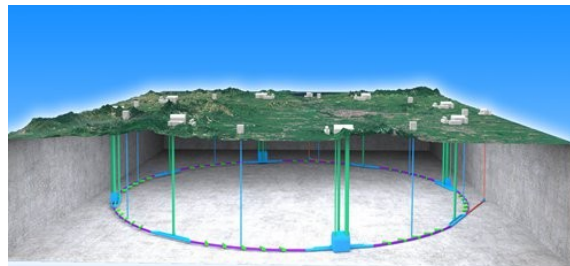
Részecskegyorsítók: poszt-LHC

- Felfedező céllal: szuper-LHC, kör alakú proton-proton



(Lehet hogy elektron-pozitron gyorsítóként kezd?)

Köralakú elektron-pozitron Ázsiában?



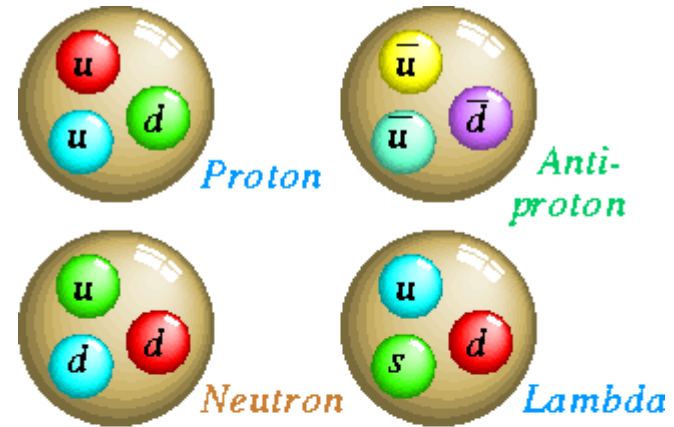
Drága, és a messzi jövőbe kerültek a tervek, hátha az LHC vmit felfedez...

Záró gondolatok

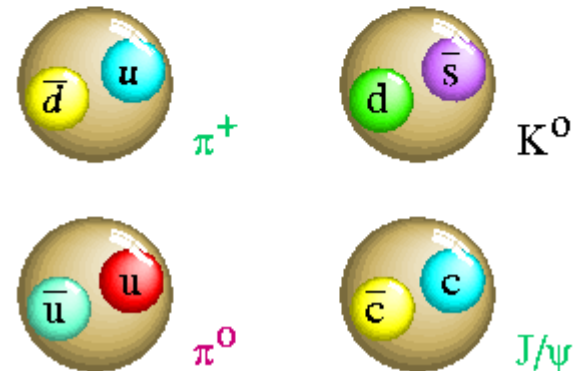
- A részecskefizika rendkívül elegáns, pontos Standard Modellje ravasz trükkökkel a Természetet kiválóan leírja
- Tele vagyunk megválaszolatlan kérdésekkel, különösen a “sötét anyag” mibenléte
- Gyorsítók mellett sokféle módszer jelent meg – sikerül-e fogást találni a Standard Modellen?

Kvarktartalmú részecskék: hadronok

- Barionok (3 kvark)



- Mezonok (kvark – antikvark pár)

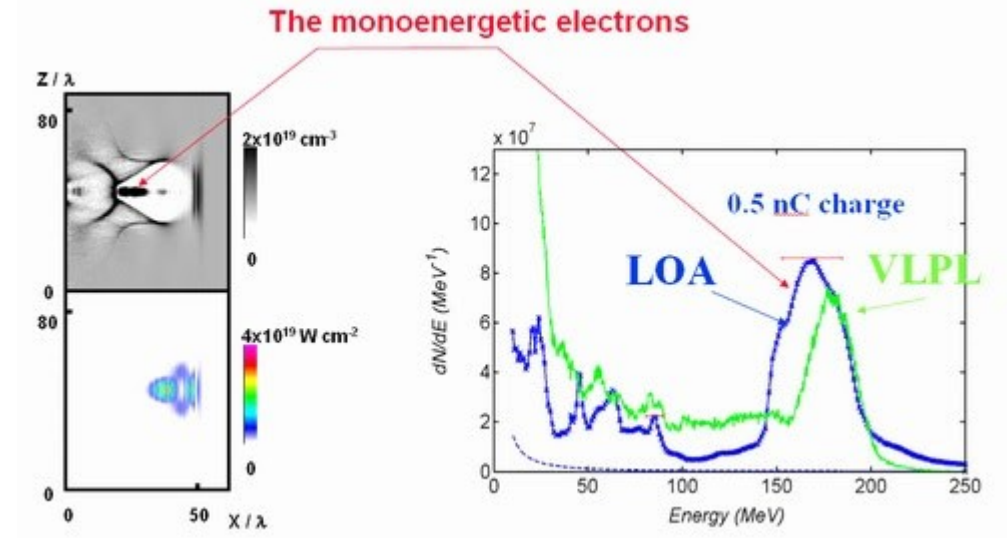
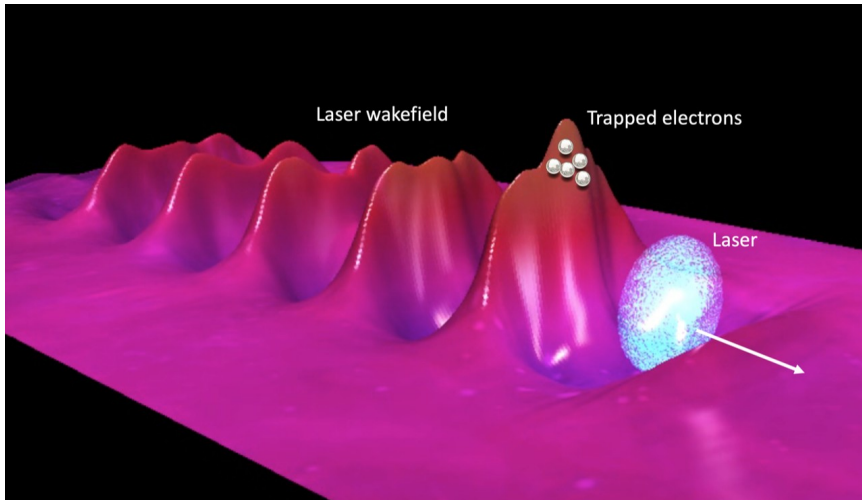


Standard modell “hiányosságok”

- Erős kölcsönhatás miért ilyen egyszerű? Miért nincs bal-jobb (anyag-antianyag) különbség, mint a Gyenge esetén?
- Ha már itt tartunk, az Univerzum anyag-antianyag különbsége honnan jön? SM tartalmaz ilyet, de nem elegendő
- Hogyan kell belerakni a gravitációt?
- Neutrínóknak van tömege (kísérletileg), ezt hogyan kell “szépen” belerakni a SM-be?

Lézeres gyorsítás: ultrarövid impulzus ritka gázban (plazmában)

- Erős lézertimpulzus közel fénysebességgel halad
- Mögötte ugyanilyen gyorsan elektronok (csak!)



Bomlási – kölcsönhatási hierarchia

- Erős kölcsönhatás

$$\Delta^{++} \rightarrow p + \pi^+ \quad (uuu) \rightarrow (uud) + (u\bar{d})$$

- Elektromágneses kölcsönhatás (1/137)

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma \quad (\text{önmagával annihilál})$$

- Gyenge kölcsönhatás (nagy tömegű közvetítő)

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu \quad (u\bar{d}) \rightarrow W \rightarrow \mu \nu$$