

Van-e valami a részecskefizika
Standard Modelljén túl?
Ha igen, mi, ha nem, miért nem?

Nógrádi Dániel

Atomoktól a csillagokig – 2022 – ELTE

2016 április 14 Atomoktól a csillagokig

Mi az, amit értünk az elemi részecskék világában, és mi az, amit nem?

Főleg: amit értünk, végén röviden, amit nem

Nem baj, ha ezt nem hallottuk, de jobb, ha igen (youtube-on meg lehet nézni)

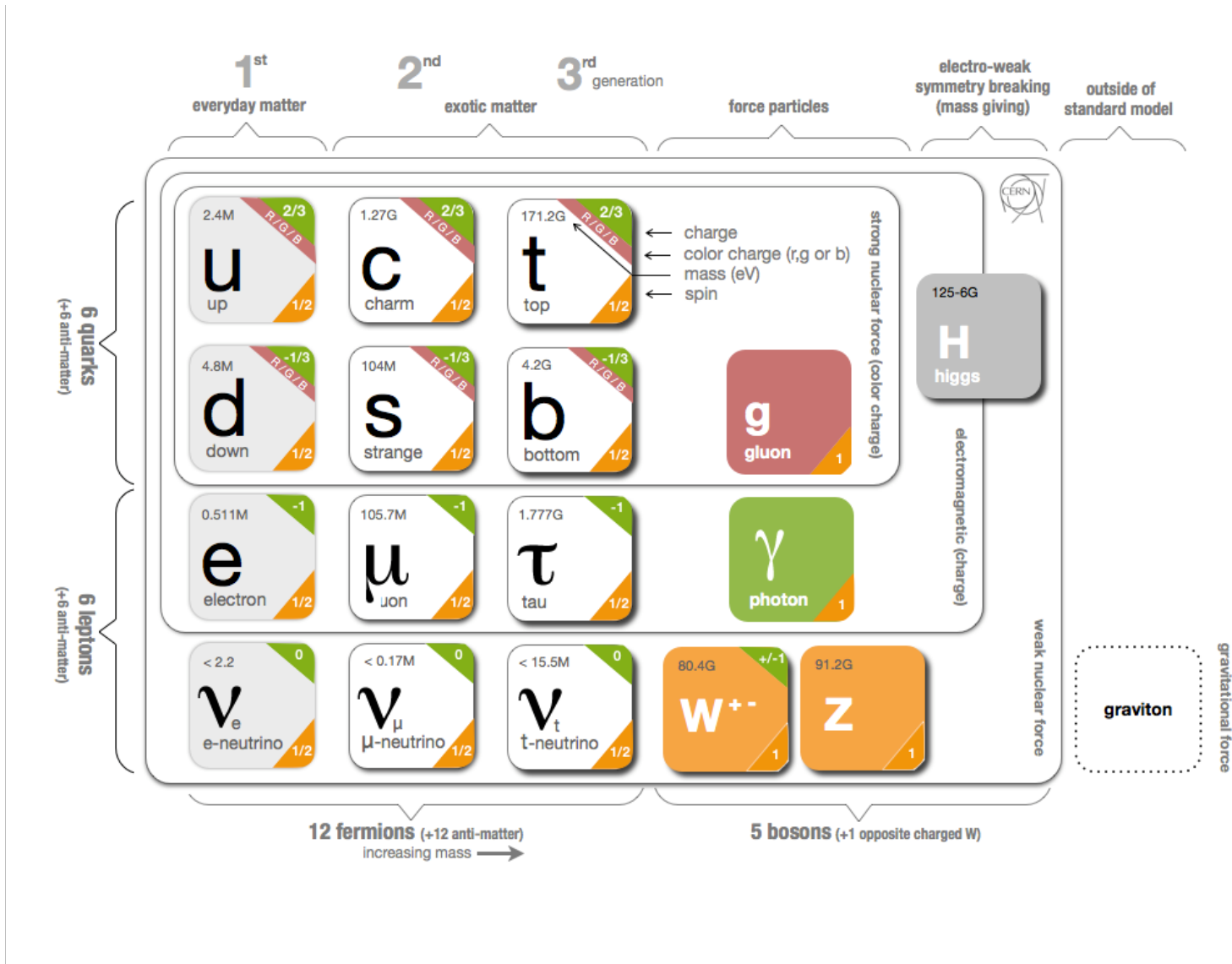
Standard Model

- Kialakulása
- Kísérleti / elméleti sikerek
- Problémák röviden

Most:

Problémák részletesebben, lehetséges kiutak, vagy azok hiánya

Standard Model



Standard Model

Sikeres elmélet

Elméleti számítások egyeznek a kísérleti mérésekkel



Mit jelent ez pontosan?

Elmélet / kísérlet egyezés mit jelent?

Elméleti számolások végeredménye: szám, valami bizonytalansággal (hiba)

Hiba: elhanyagolt effektusok, túl komplikált számolás, ezek mesterséges leegyszerűsítése, ...

Kísérleti mérések végeredménye: szám, hibával

Hiba: statisztikus hiba főleg (valamennyi szisztematikus is, amiatt, hogy nem teljesen tökéletesen ismerjük a berendezéseket). Minnél tovább csináljuk a mérést, annál pontosabb lesz.

Elmélet / kísérlet egyezés mit jelent?

Egyezés: 2 eredmény hibán belül átfed. PI: 2.12(3) és 2.14(2)

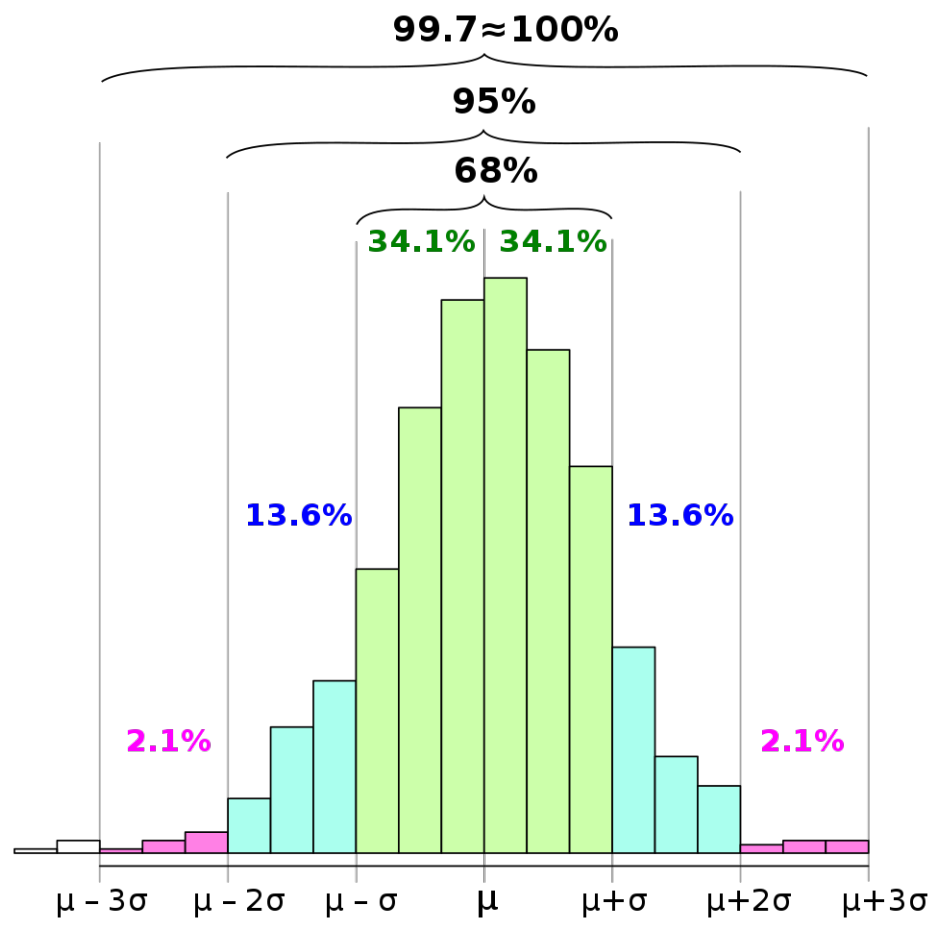
Mennyire kell átfedni? Ha nem fednek át, akkor biztos valami baj van?

A mérések statisztikus jellege miatt nem triviális kérdések



Elmélet / kísérlet egyezés mit jelent?

Nagy számok törvénye



Gauss görbe, valamilyen középértékkel és varianciával

Elmélet / kísérlet egyezés mit jelent?

- 1-sigma, 68%
- 2-sigma, 95%
- 3-sigma, 99.7 %
- 5-sigma: 99.9999 %

Kísérleteknél elvárás: 5-sigma, 1.000.000 mérésből 1 eltér, „elég” valószínűtlen

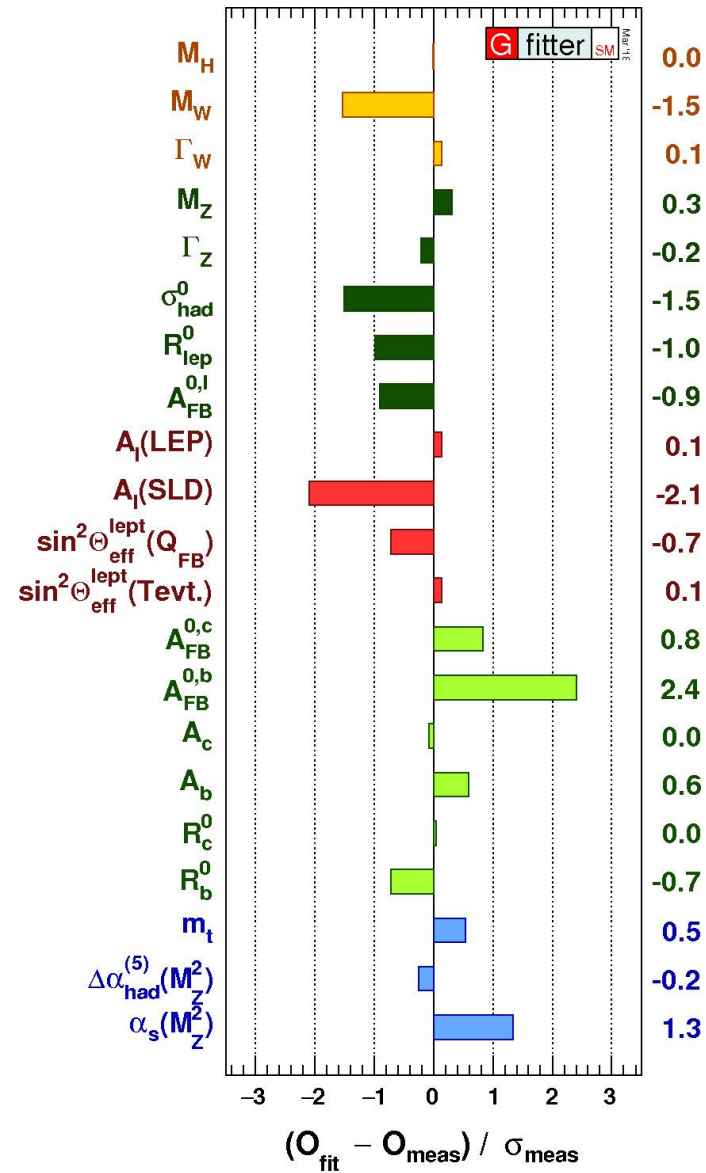
Elmélet / kísérlet egyezés mit jelent?

100 mérés

- 30 eltérhet 1-szigmára
- 5 eltérhet 2-szigmára
- 1 eltérhet 3-szigmára

Standard Modellel kapcsolatban: több száz mérési eredmény

Elmélet / kísérlet egyezés mit jelent?



Elmélet / kísérlet egyezés mit jelent?

Kiszemelni 1-1 eredményt megtévesztő lehet (cherry picking)



Ezen alapján: Standard Model *egyezik* a mérésekkel

Bár van néhány 2-sigma, 3-sigma eltérés

Standard Model problémái

Legalább 5 probléma

- Sötét anyag
- Barion aszimmetria
- Finomhangolás
- Túl sok paraméter
- Kvantumgravitáció

Van más is...

Standard Modellen túli elméletek

- Szuperszimmetria
- Nagy egyesített elméletek (GUT)
- Összetett Higgs bozon
- Extra dimenziók
- ...

Sötét anyag

Standard Model, definíció szerint, a „látható” univerzumot írja le

Ha van valami, ami gravitál (tömege van), de nem vesz részt a Standard Model által leírt kölcsönhatásokban, akkor az kimaradt a leírásból

Kérdés, hogy van-e ilyen „anyag”. Ha igen, hívjuk inkább „sötét anyagnak”.

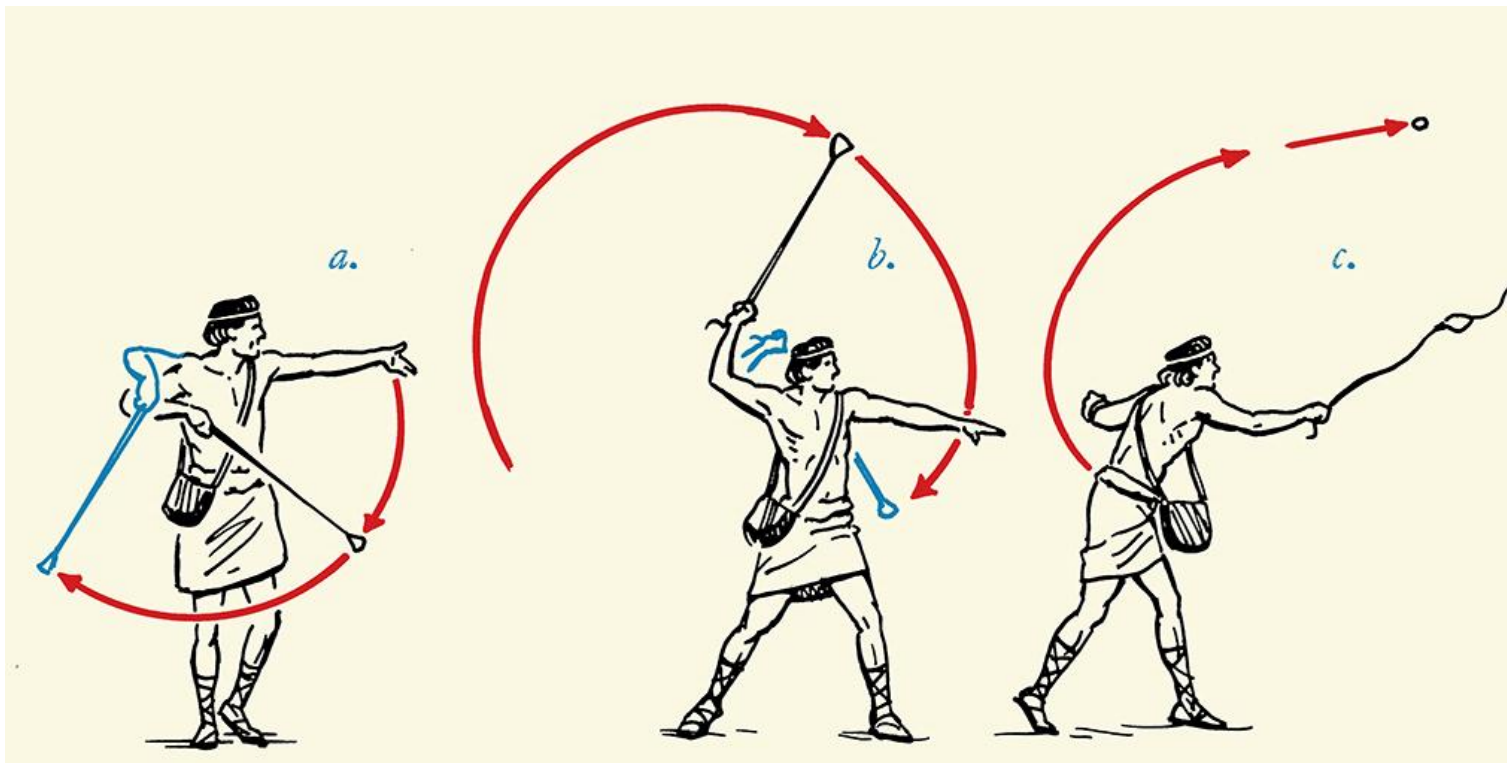


Sötét anyag

Úgy tűnik, hogy van ilyen

Galaxisokban vagy galaxis klaszterekben mozgó csillagok pályáját a környezetükben levő tömeg határozza meg

Pályákból $\rightarrow M_{grav}$



Sötét anyag

Galaxisból jövő elektromágneses (Standard Model által leírt) jelekből: részecskefizikai kölcsönhatásokban részt vevő anyag tömege

→ M_{SM}



A két tömegmeghatározás között eltérés van: $M_{SM} < M_{grav}$

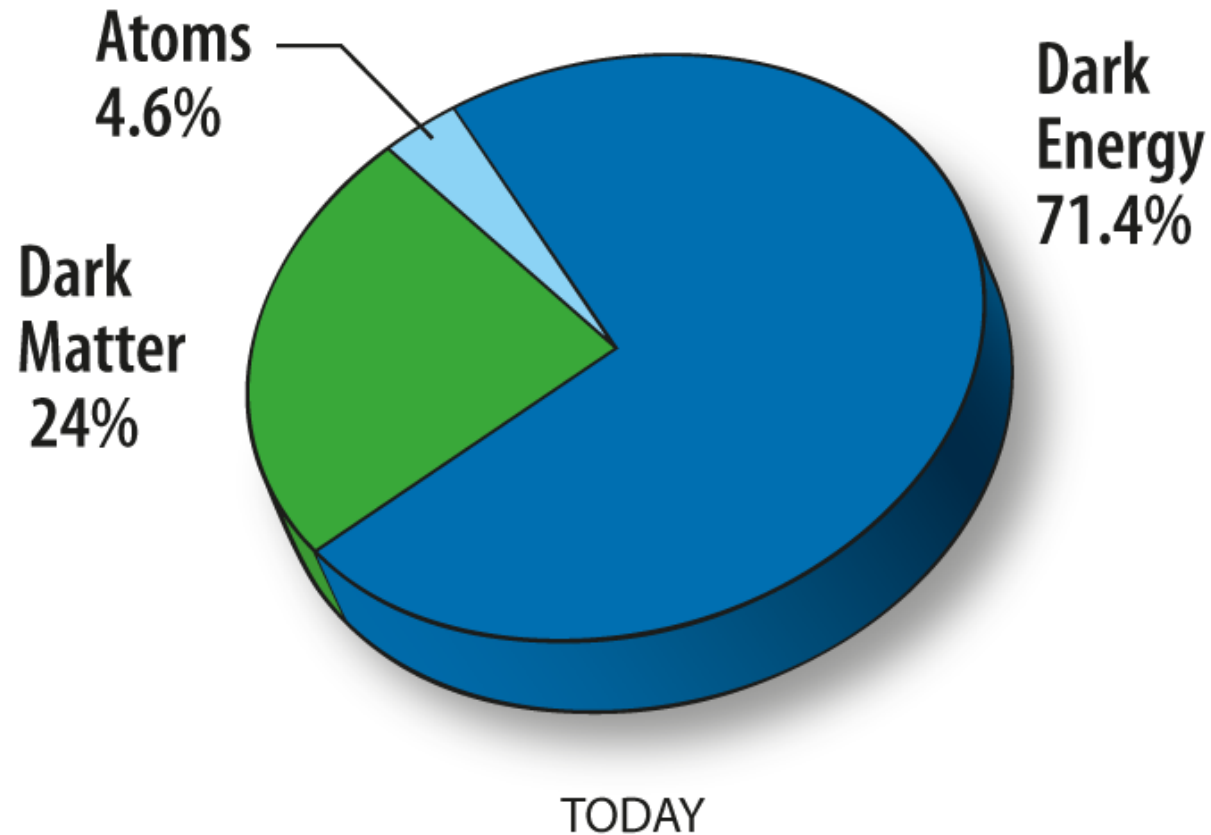
Sötét anyag

Első észrevétel: 1933, Fritz Zwicky



Konvencionális feltételezés: valami új részecske létezik, ami nem hat kölcsön, vagy csak nagyon gyengén hat kölcsön, a Standard Modelbeli részecskékkel, de tömeges

Sötét anyag



Másik opció: Standard Model rendben, nincs új részecske, de a gravitáción kell módosítani

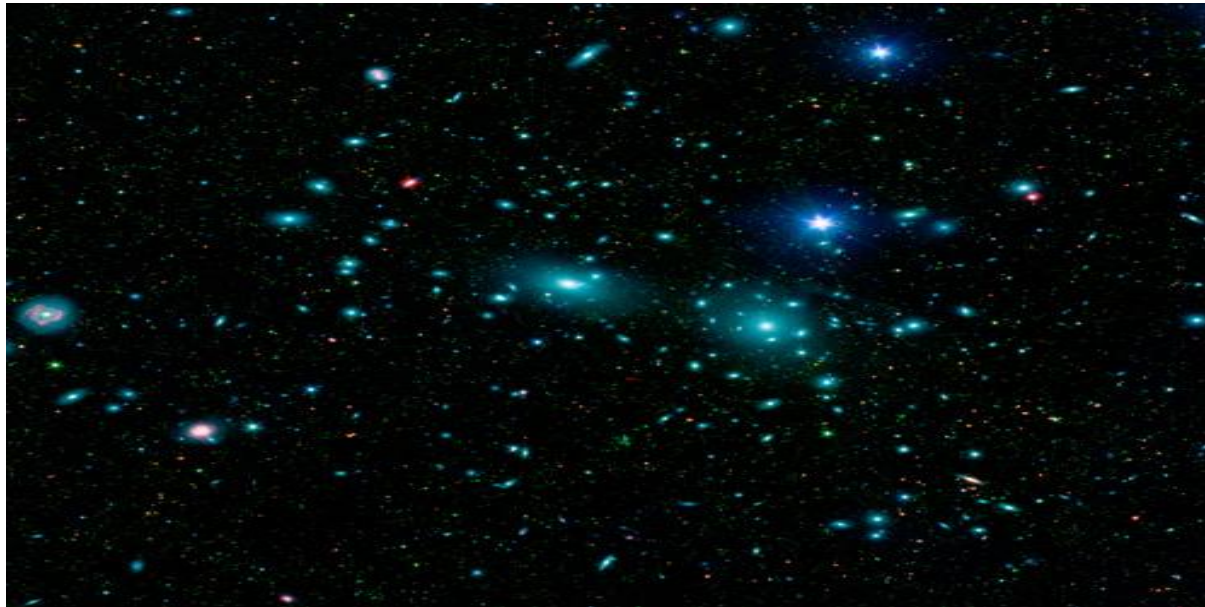
Ilyen próbálkozások is vannak (MOND, ...)

Sötét anyag

Elméleti oldalról: kell valahogy módosítani a Standard Modelt, hogy legyen egy új részecske, ami a sötét anyag szerepét játssza

Csatolás elég kicsi kell legyen

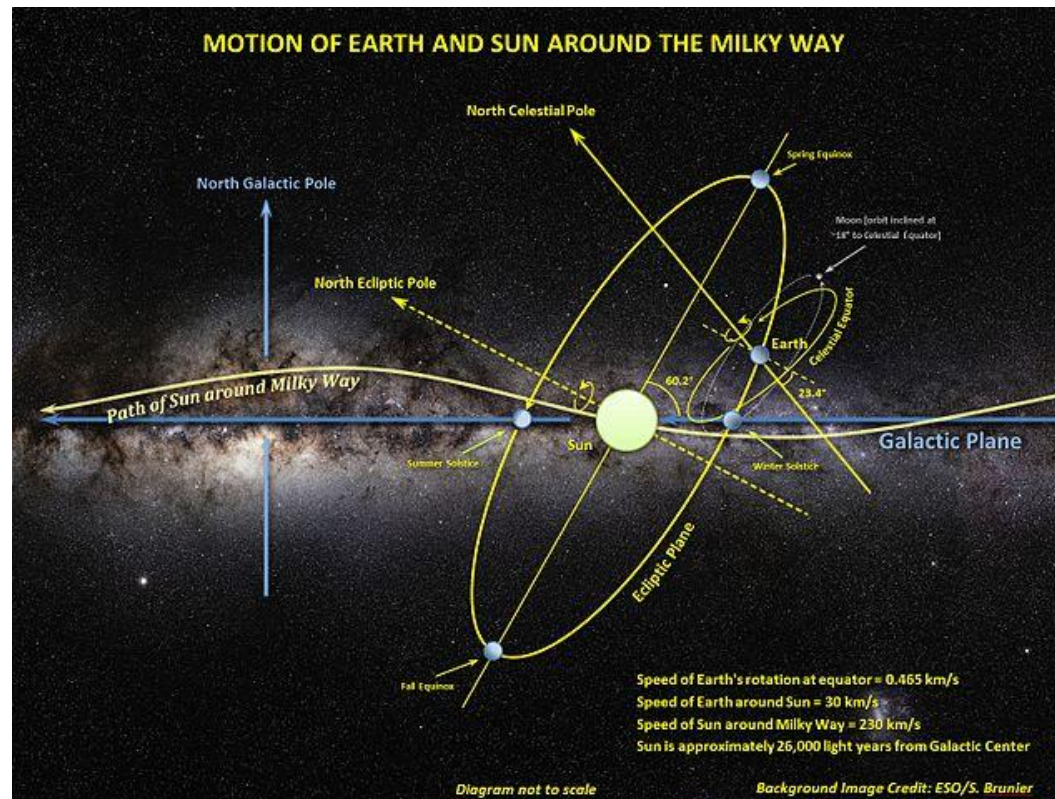
Különböző Standard Modellen túli elméletekben különböző sötét anyag jelölt bukkan fel



Sötét anyag

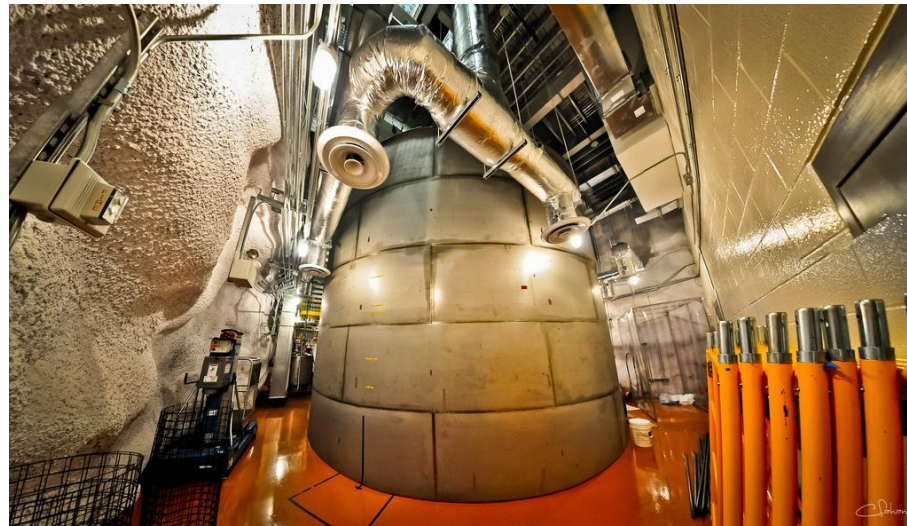
Kísérleti oldalról: próbáljuk elkapni a sötét anyag részecskéket valahogy

Föld kering, folyamatosan ütközik sötét anyag részecskékkal, amik tömegesek



Sötét anyag

Ha el tudjuk kapni, ahogy egy nehéz sötét anyag részecske nekiüt-
közik pl. egy neutronnak vagy protonnak, akkor ezzel közvetlenül
is ki tudnánk mutatni



Egyelőre nincs közvetlen kísérleti eredmény bármilyen sötét anyag
részecske létezésére

Barion aszimmetria

Leginkább szembeötlő probléma



Hogy-hogy létezik az univerzum?

Barion aszimmetria

Standard Model leírja az elemi részecskéket

Ezek között vannak olyan párok, amik egymás anti-részecskéi

Elektron - pozitron, neutrínó - anti-neutrínó, kvark - anti-kvark, ...

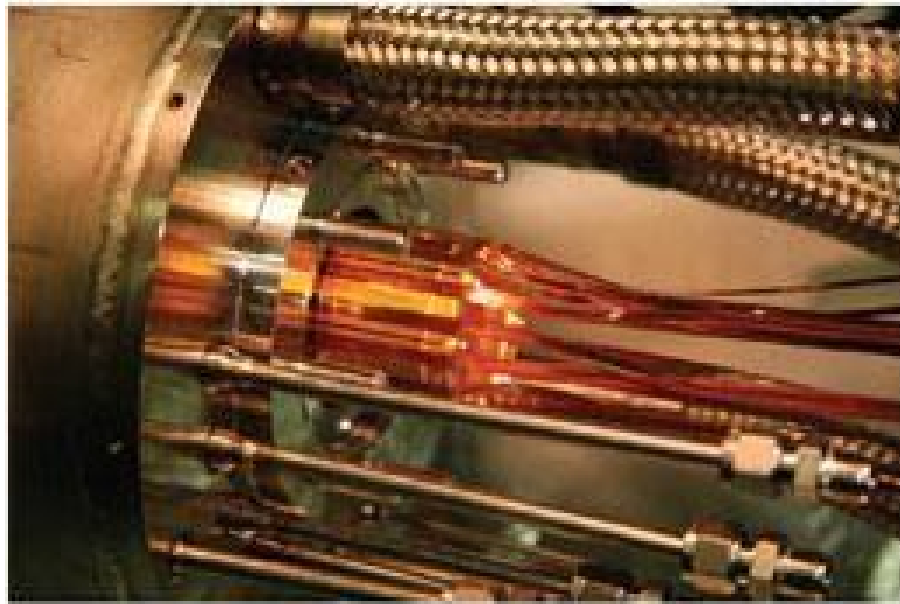
Van, ami saját maga anti-részecskéje: Higgs, foton

Minket körülvevő anyag (szék, asztal, egyetem, emberek, állatok, bolygók, csillagok, stb) nagyrésze: atomokban (proton, neutron, elektron)

Barion aszimmetria

Létezik anti-atom is (anti-proton, anti-neutron, pozitron)

Ilyeneket létre tudunk hozni mesterségesen

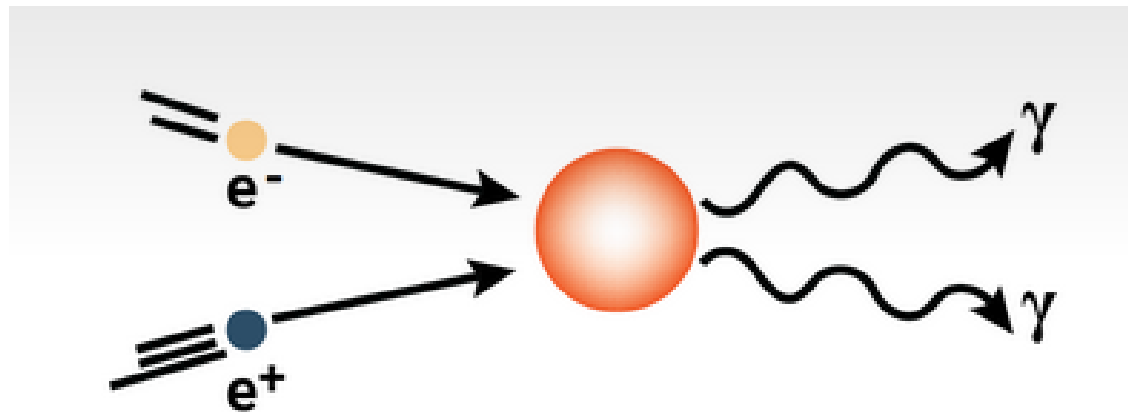


CERN ALPHA - Nature 2010

Mégis nyilvánvaló, hogy jelenleg elhanyagolható az anti-atomok száma az atomokhoz képest

Barion aszimmetria

Miért van ez? Részecske – anti-részecske találkozáskor „megsemmisülnek”



Ha szimmetrikus kezdőállapotból indulunk, Big Bang után, hogy alakult ki nem szimmetrikus helyzet mára?

Barion aszimmetria

Feltételek:

- Nyilván barionszámnak sérülni kell
De ha ugyanolyan valószínűséggel nő, mint amivel csökken →
hosszú távon nem változik
- Töltés konjugációnak is sérülni kell (részecske – anti-részecske
tükrözés)
- Van egy harmadik feltétel ...

Barion aszimmetria

Standard Modelben részecske – anti-részecske tükrözés sérül kicsit
 $\delta_K \sim 10^{-3}$

QCD-ben ha van is, kicsi (önmagában fontos téma, strong CP-problem)

Standard Modelben barionszám is sérül anomália miatt (sphaleron)

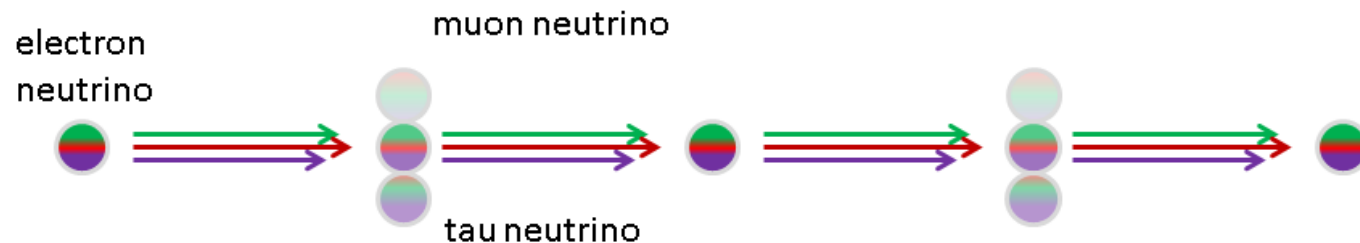


Barion aszimmetria

Összes Standard Model sérülés < szükséges sérülés

Végülis nem tudjuk, hogy miért létezik az univerzum, miért nincs kb. ugyanannyi anyag – anti-anyag, miért nem lett belőlük csak sugárzás

Elméleti próbálkozások: összekötik a neutrínó tömegek problémáját (erről nem beszéltünk) a bariogenezissel → izgalmas ma is aktív kutatási téma



M. Strassler 2011

Finomhangolás – hierarchia probléma

Elektrogyenge skála $\Lambda_{EW} \sim 10^2 GeV$ és Planck skála $\Lambda_{Planck} \sim 10^{19} GeV$

$$m_H = 10000000000000000000125 - 10000000000000000000000 = 125$$

Lehet, hogy csak „ez van”, csak esztétikai probléma

De jó lenne körüljárni, hogy mi van ha mégse



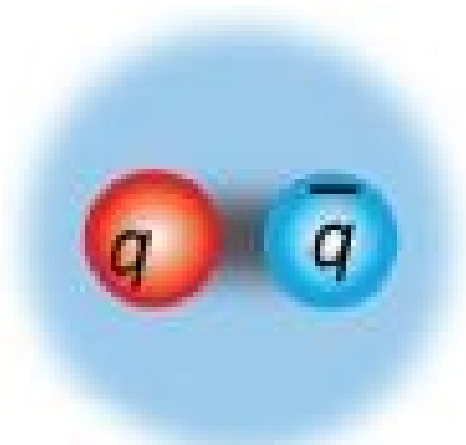
Finomhangolás – hierarchia probléma

Standard Model egy része: kvantumszíndinamika (QCD)

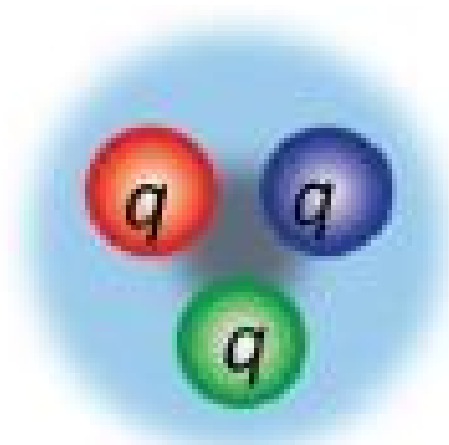
Kvarkok és gluonok elmélete, leírja a protont/neutront (3 kvark) és többi bariont és mezonokat (kvark – anti-kvark) és ezek kölcsönhatásait

Mint Standard Model része, nagyon jól működik

Nincs benne finomhangolási probléma, egy skála Λ_{QCD}



Meson

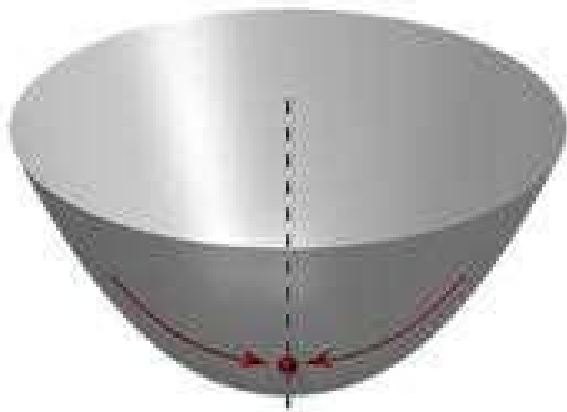


Baryon

Finomhangolás – hierarchia probléma

Tömegek mind $O(\Lambda_{QCD})$ nagyságrendűek, kivéve pion (mezon), ami könnyebb, de értjük, hogy miért

Unbroken Symmetry



Broken Symmetry



Spontán szimmetriasértés

Finomhangolás – hierarchia probléma

QCD-ben a stabil részecskék: nem gluonok vagy kvarkok, hanem összetett részecskék, barionok és mezonok, köztük skalár is

Higgs bozon tömegének problémája: elemi skalár

Ezek szerint ha Higgs bozon összetett lenne, és a leírása hasonlítana QCD-re, nem lenne finomhangolási probléma

A Higgs megfelelne a jól ismert QCD-beli skalár mezonnak (elméletek egyik családja) vagy QCD-beli pionnak (elméletek másik családja)

Sok új elmélet: összetett Higgs, erősen kölcsönható Higgs, little Higgs, ...

Összetett Higgs

Ilyen új elméletek kísérleti tesztjei

Ha Higgs-nek vannak elemi összetevői (hasonlóan a protonnak az elemi összetevői a kvarkok), akkor ezek összeállhatnak máshogy is (ahogy a kvarkok se csak protonként tudnak összeállni, hanem más barionokba/mezonokba is)

Ezek hipotetikus új részecskék, részecskegyorsítóknál látni kéne

Összetett Higgs

Ha az új elmélet adott, a jóslatok viszonylag egyértelműek



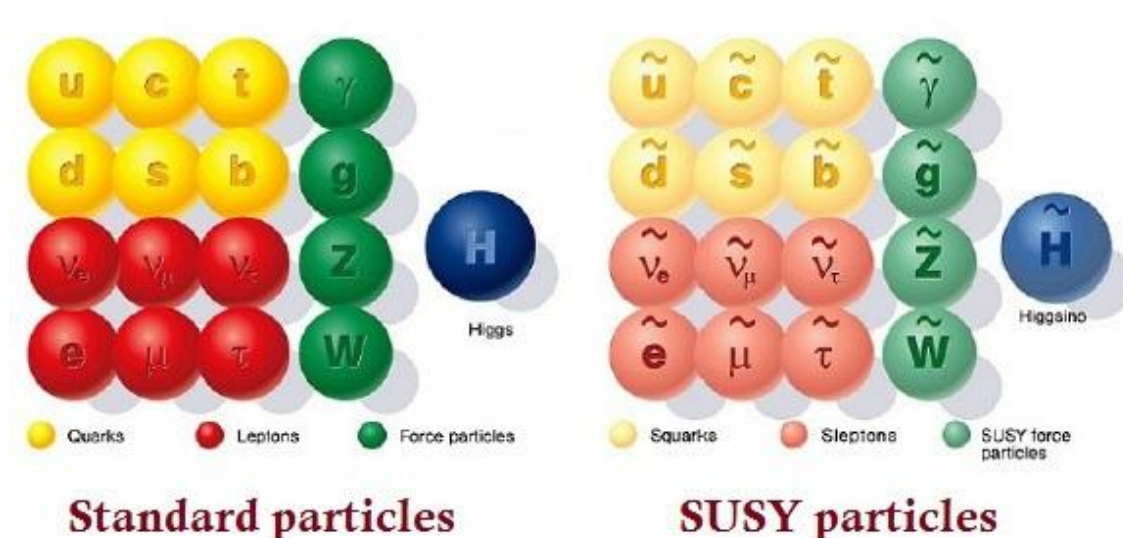
Egyelőre nincs kísérleti eredmény, ami arra utalna, hogy ezek az elméletek (bármelyik) helyes lenne

Finomhangolás – hierarchia probléma

Másik megközelítés: a zavaróan nagy kiejtés a Higgs tömegben nem „véletlen”, hanem valamilyen dinamikai mechanizmus miatt „kötelező”

Szuperszimmetria: egy új, Standard Modelben nem szereplő, szimmetria

Ha van szuperszimmetria: minden elemi részecskének van egy ugyanolyan tömegű párja (fermion - bozon)



Szuperszimmetria

A Standard Modelből jövő nagy járulék kiesik a szuperszimmetrikus párokból jövő nagy járulékkal együtt

Előjelek természetes módon ellentétesek

Ha szuperszimmetria kicsit sérül, akkor a kiejtés nem teljes, de legalább nem olyan nagy, mint szuperszimmetria nélkül

Standard Model nagyon jól működik: szuperszimmetria biztos sérül, nem egzakt

Magasabb energián meg kéne találni a szuperszimmetrikus partner részecskéket

Egyenlőre nincs kísérleti eredmény, ami arra utalna, hogy szuperszimmetrikus elméletek (bármelyik) helyes lenne

Finomhangolás – hierarchia probléma

Más megközelítés

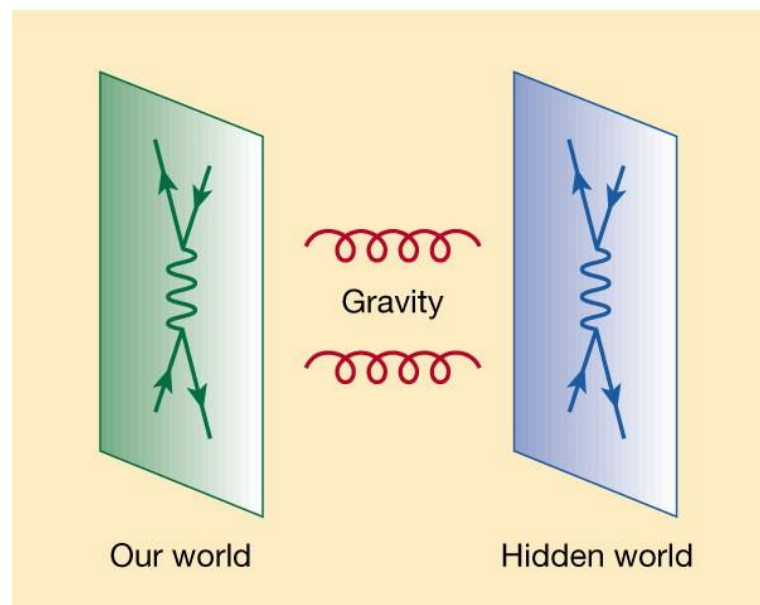
Standard Model karakterisztikus skálája $\sim 10^2 GeV$ és gravitáció skálája $\sim 10^{19} GeV$ közti különbség

Azért, mert nagyon máshogy viselkednek

Hagyományosan: $3+1$ dimenziós téridő, részecskefizika és gravitáció ugyanabban a téridőben operál

Extra dimenziók elképzelés: vannak további dimenziók, $+1$, $+2$, stb, gravitáció 5 , 6 , stb, dimenzióban hat, részecskefizika (Standard Model) csak egy 4 dimenziós felületen (brane)

Extra dimenziók

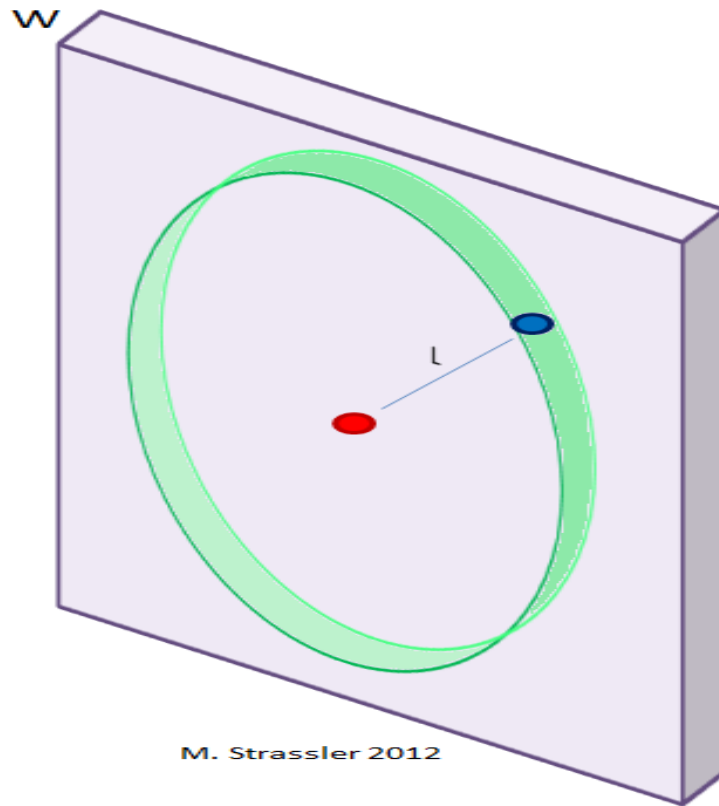


Sok különböző változat, tipikusan plusz 1 dimenzió

Extra dimenzió lehet kicsi kompakt (Randall-Sundrum model) vagy pont, hogy nagy (large extra dimension)

Extra dimenziók

Hogyan tudnánk kimérni az n extra dimenziókat?



Szokásos Newton törvény: $F \sim \frac{1}{L^2}$

Extra dimenziók

Nagy L -re mindenképpen $F \sim \frac{1}{L^2}$

Kis L -re ha $F \sim \frac{1}{L^{2+n}}$: elvileg mérhető

Gravitáció módosul

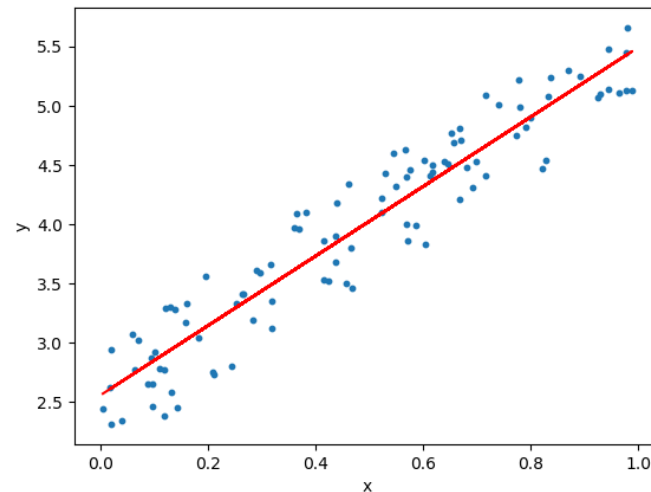
Egyenlőre nincs kísérleti eredmény, ami arra utalna, hogy extra dimenziók léteznek (se kicsi, se nagy)

Túl sok paraméter – egyszerűbb elmélet kéne

Standard Modelben szabad paraméterek

Elmélet nem jósolja meg őket, minden jóslat ezen szabad paraméterek függvénye

Általában: minél kevesebb szabad paraméter, annál „jobb” elmélet (prediktív)



Kísérletből kell őket illeszteni

Túl sok paraméter – egyszerűbb elmélet kéne

18 paraméter (neutrínók nélkül)

- 6 kvark tömeg
- 3 lepton tömeg
- 1 Higgs tömeg
- 1 Higgs önkölcsönhatás
- 3 csatolási állandó
- 4 mixing mátrix

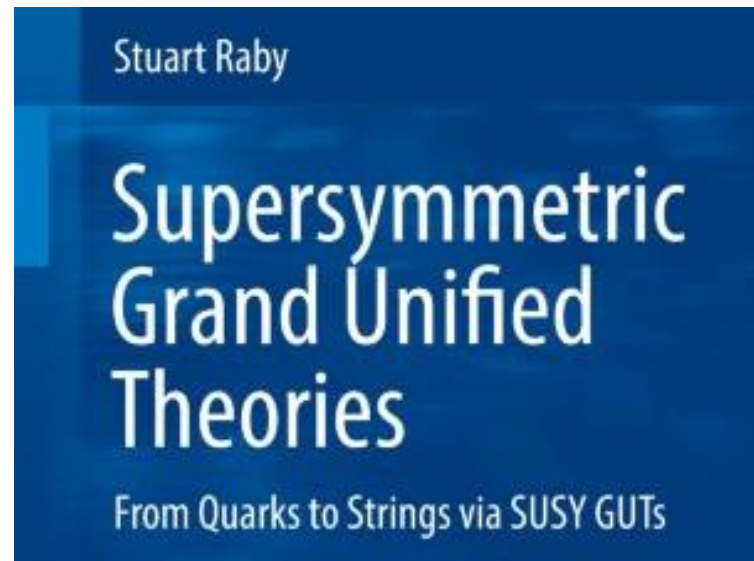
Tömeges neutrínókkal együtt: $18 + 3(\text{tömeg}) + 4(\text{mixing}) = 25$

Túl sok paraméter – egyszerűbb elmélet kéne

Standard Modelt a szimmetriák meghatározzák egyértelműen

Mégis kicsit sok a szabad paraméterek száma

Tetszetősebb lenne egy egyszerűbb elmélet



Nagy egyesítés – GUT

Elektromos jelenségek - mágneses jelenségek: elektromágnesség

Elektromágnesség - gyenge kölcsönhatás: elektrogyenge elmélet
(Glashow, Salam, Weinberg; Nobel prize 1979)

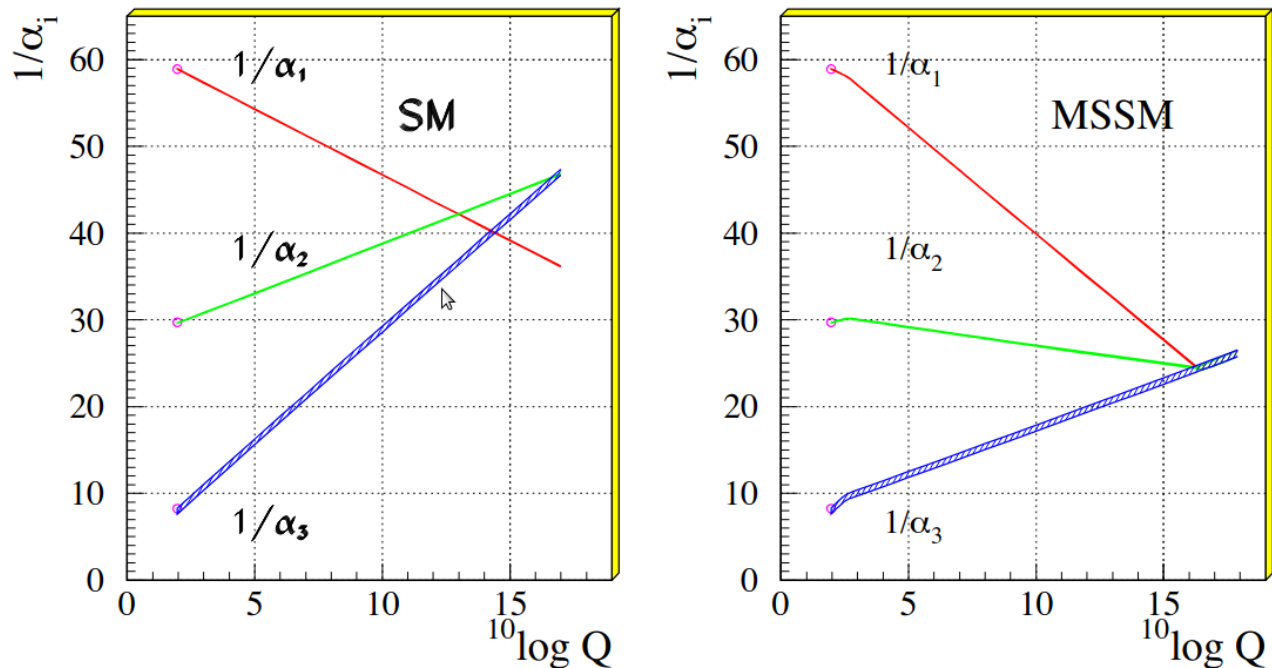
Hasonló: tér - idő: speciális és általános relativitáselmélet

Standard Model: elektrogyenge kölcsönhatás, erős kölcsönhatás

4 kölcsönhatás, de össze van tákolva kissé mesterkélten módon

Esztétikai probléma, de sok kutatást motivált

Nagy egyesítés – GUT



Magas energiaskálán 3 különböző kölcsönhatás helyett csak egy

Tetszetős elképzelés, szuperszimmetriával összekombinálva működhet

Egyelőre nincs kísérleti eredmény, ami arra utalna, hogy GUT elméletek (bármelyik) helyes lenne

Összefoglalás

Problémák kétfélék

- Inkább esztétikaiak (finomhangolás, túl sok paraméter)
- Konkrétabbak (sötét anyag, barion aszimmetria)

Kvantumgravitáció ?? (amíg nincs kísérleti motiváció, inkább esztétikai)

Összefoglalás

Megoldáshoz Standard Modellen túli elméletek

Fő nehézség: nagyon nem térhet el Standard Modeltől

Standard Model túl jó :)

Jelölt van sok: szuperszimmetria, extra dimenziók, összetett Higgs, neutrínó tömegek, ...

Egyelőre nincs befutó



Összefoglalás

Amíg nincs kísérleti támogatás egyik elmélet mellett se:

Szeretjük ha egy probléma megoldására javasolt elmélet más problémát is megold (vagy többet is)

Szeretjük ha kevés paraméter van az új elméletben

Szeretjük ha legalább elvileg kizárható / megerősíthető kísérletileg

Összefoglalás

Hogyan tovább?

Kísérleti előrehaladás nélkül semmit nem tudunk mondani

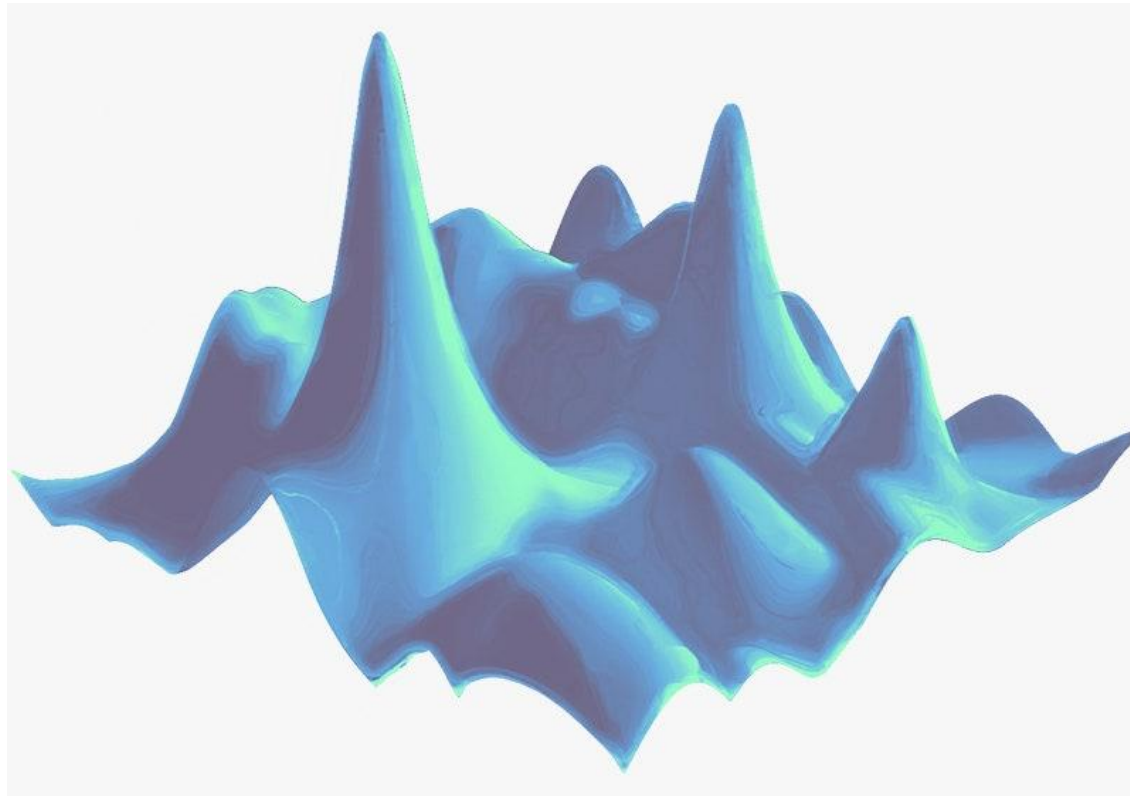
Kísérleti előrehaladás gyorsítókkal

- Nagyobb energiák felé, nagyobb gyorsító (FCC, ...)
- Pontosabb eredmények, kisebb hibák (gyűrű, LHC, FCC, vagy egyenes, ILC)
- Egyéb (sötét anyag detektorok, ...)

Második opció: $g - 2$ kísérlet

Összefoglalás

A csak gravitáció által motivált elméletekre: nincs esély részecskefizikai kísérletekkel tesztelni őket egyelőre



Összefoglalás

Lehet, hogy a Standard Model igaz a Planck skáláig?

Végülis lehet

Nincs szuperszimmetria, erősen kölcsönható kiterjesztés, little Higgs, extra dimenziók

Csak kvantumgravitáció valahogy Planck skálánál

Finomhangolás / hierarchia probléma: csak esztétikai „ez van”

Sötét anyag nincs, gravitációs megoldás (fekete lyukak, kicsit más gravitáció)

Barion aszimmetria véletlen

Lehet, de nem túl valószínű

Összefoglalás

LHC-től, jelenlegi kísérletektől még sokat várunk

Mi életünkben: $O(10-100 \text{ TeV})$ belátható, FCC, ILC, ...

Előbb-utóbb tisztázódnak a kérdések

Hogy a válasz unalmas (csak a Standard Model) vagy izgalmas (valami azon túl) nem rajtunk múlik

Köszönöm a figyelmet!