

A standard modell és erősen kölcsönható kiterjesztése

Szikszai Lőrinc

Bolyai szeminárium, 2020. szeptember 30.

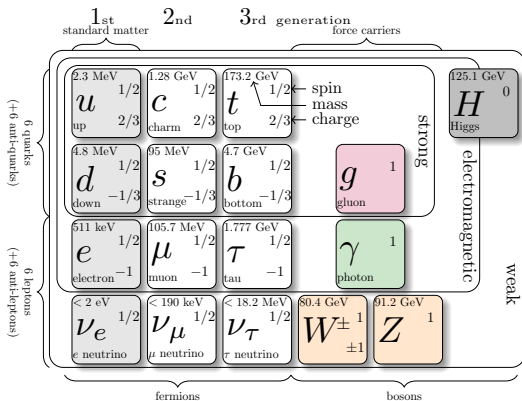
Kivonat

- ▶ Standard modell
- ▶ Hiányosságok a standard modellben
- ▶ Egy lehetséges kiút: összetett Higgs elméletek (sokféle lehetséges megvalósítás)

Standard modell

- ▶ A négy alapvető kölcsönhatásból hármát nagyon pontosan leír (a gravitációt nem.)
- ▶ Jelenlegi megfogalmazása az 1970-es évekre alakult ki.
- ▶ Rendkívül sikeres elmélet: képes az eddigi összes kísérlet eredményeinek reprodukálására →
 - ▶ Az eddig felfedezett elemi részecskék nagyon pontos elmélete.
- ▶ Megjósolt számos részecskét, például: top kvark (1995), tau-neutrino (2000), Higgs (2012.)

Standard modell (SM)



ábra: Elemi részecskék a standard modellben

Standard modell elméleti háttere

Spontán sértett,

nem-ábeli,

kvantumtérelmélet,

$SU(3)_c \otimes SU(2)_w \otimes U(1)_Y$ mértékcsoporttal.

erős kh.

elektrogyenge kh.

Quantum chromodynamics (QCD) az erős kölcsönhatás elmélete.

Glashow–Weinberg–Salam-modell az elektrogyenge kölcsönhatás elmélete.

Példák csoportokra

A fizikában előforduló szimmetriák csoportot alkotnak.

- ▶ $SU(3)$ az egységnyi determinánsú, 3×3 -as unitér mátrixok csoportja.
- ▶ $SU(2)$ az egységnyi determinánsú, 2×2 -es unitér mátrixok csoportja.
 - ▶ unitér mátrix: a mátrix adjungáltja egyben inverzei is ($A^{-1} = A^\dagger$).
- ▶ $U(1)$ egységnyi nagyságú komplex számok csoportja.

Forgás csoport N dimenzióban $SO(N)$,

Galilei csoport, Lorentz csoport, Poincaré csoport.

Mi az a kvantumtérelmélet?

Térelmélet:

$\phi(\vec{x}, t)$ jellegű, vagyis téridőn definiált mennyiségeket ír le. Példa az elektrodinamikában az elektromos és mágneses tér. Végtelen szabadságfok van.

Kvantumfizika:

- ▶ *operátoros megfogalmazás:* a klasszikus fizikai mennyiségeket operátorokra cseréljük és felcserélési relációkat rovunk ki
- ▶ *pályaintegrál:* funkcionál integrál, a kvantummechanikailag lehetséges pályák végtelenjére.

Mi az a mértékelmélet?

Szimmetria: $\phi(\vec{x}, t) \rightarrow T(\vec{x}, t)\phi(\vec{x}, t)$ a fizika mégse változik, ezek a transzformációk csoportot alkotnak (szimmetriacsoport.)

Beszélhetünk globális és lokális szimmetriáról.

- ▶ **Globális szimmetria** esetén T nem függ \vec{x} -től, t -től.
- ▶ **Lokális szimmetria** esetén beszélünk **mértékelmületről**, ebben az esetben **új mértékterek jelennek meg**, amik a kölcsönhatást természetes módon megszabják.

Legismertebb példa: elektrodinamika, a mértékcsoport az $U(1)$.

Miért kell új mértéktér?

Szimmetria: $\phi(\vec{x}, t) \rightarrow T(\vec{x}, t)\phi(\vec{x}, t)$.

Derivált helyett **kovariáns derivált**:

$$\frac{d\phi(x)}{dx} = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{1}{\epsilon} (\phi(x + \epsilon) - \phi(x)) \text{ helyett}$$

$$\lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{1}{\epsilon} (\phi(x + \epsilon) - U(x + \epsilon, x)\phi(x))$$

$U(x + \epsilon, x)$ párhuzamos eltolás operátor.

$U(y, x)$ transzformációja kitalálható:

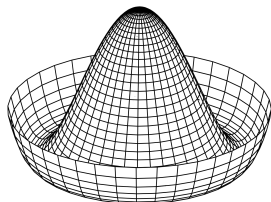
$$U(y, x) \rightarrow T(y)U(y, x)T(x)^{-1}$$

Az $U(y, x)$ -ből kapjuk a mértékteret.

Spontán szimmetria sértés

Nagyon fontos része a standard modellnek.

- ▶ fizikai törvények rendelkeznek valamilyen szimmetriával ($SO(2)$)
- ▶ fizikai rendszer (potenciál plusz golyó) a szimmetria spontán sérülése után az **alapállapot nem szimmetrikus**



ábra: Mexikói kalap (sombbrero) potenciál

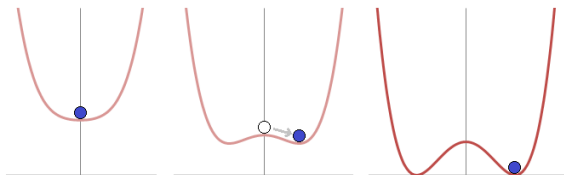
Spontán szimmetria sértés, fázisátalakulás

Példa: ferromágnes, **Curie pont** fázisátalakulás.

- ▶ Alacsony hőmérsékleten sérül a szimmetria (sérült fázis)
- ▶ T_c felett sértetlen a szimmetria (sértetlen fázis)

A standard modellben a golyó szerepét a Higgs-tér játssza.

Fontos tulajdonsága a Higgs térnek, hogy alapállapotban az értéke nem nulla, hanem $\langle H \rangle = 250$ GeV. Ezt nevezzük vákuum várhatóértéknek (VVÉ)



Miért fontos a Higgs?

Kísérletből lehet tudni, hogy a gyenge bozonoknak van tömege (véges hatótáv.) A mértékszimmetria ezt nem engedné.

kiút:

Térelméletben, ha a szimmetria spontán sérül tömegetlen részecskék jelennek meg: **Goldstone bozonok**.

Higgs-mechanizmus: Ha a szimmetria lokális, akkor a Goldstone bozont a mértéktér részecskéje megeszi és tömege lesz.

SM szimmetria sértés: $SU(2)_w \otimes U(1)_Y \rightarrow U(1)_{EM}$

Másik nagyon fontos szerepe, hogy **tömeget ad a fermionoknak**, a Yukawa csatoláson keresztül.

A Higgs felfedezésével **új korszak kezdődött**, ahol SM-től való eltérés keresése került előtérbe.

A legnagyobb részét a szokványos anyagnak az erős kölcsönhatás tartja össze.

Nagyon gazdag elmélet.

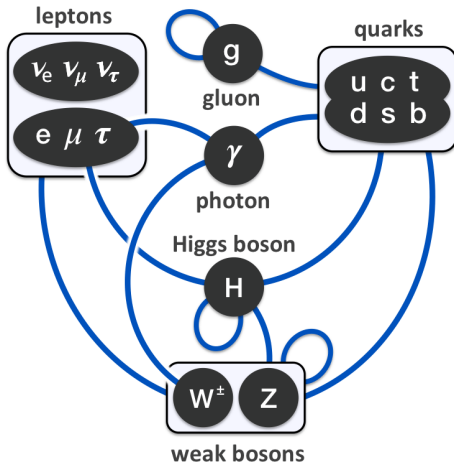
Spontán szimmetria sértés, $\langle q\bar{q} \rangle = (95 \text{ MeV})^3$.

A mérték bozonok nulla tömegűek, a rövid hatótávolság a **bezárásnak** köszönhető.

Ugyanakkor nagy energián a csatolás gyengül (**aszimptotikus szabadság**), nincs trivialitási probléma.

Sokféle technika, van a vizsgálatára, például királis perturbációszámítás, rácstérelmélet.

Kölcsönhatások



Mi a baj a standard modellel?

A kísérleti eredmények egyre csak feljebb nyomják az SM prediktív határát.

Hiányosságok, motiváció az SM kiterjesztésére.

Elméleti kérdések:

- ▶ hierarchia probléma
- ▶ trivialitás
- ▶ erős CP probléma
- ▶ paraméterek száma.

Fenomenológiai problémák

- ▶ Sötét anyag
- ▶ Neutrino tömeg
- ▶ Anyag-antianyag aszimmetria

Müon mágneses dipólus nyomatéka

Hierarchia probléma

A Higgs részecske tömege ($m_{Higgs} = 125 \text{ GeV}$) nagyon érzékeny az új fizikára (ez Λ energián jelenik meg), mivel elemi skalár részecske (az egyetlen.)

$$\delta m_{Higgs}^2 = \frac{-6\Lambda^2}{32\pi^2} y_t^2 + \dots$$

y_t a top kvark Yukawa csatolás.

- ▶ Ha nincs új fizika a Planck-skáláig (10^{19} GeV) akkor két 10^{19} nagyságrendű számot egymásból kivonva kapjuk a Higgs tömegét.

Ez specifikusan a Higgs bozont érinti, nincs új szimmetria, ha a Higgs-tömege nulla.

Higgs-tömeg additív módon függ az új fizikától.

A fermionok tömegét a királ szimmetria védi, tömegük multiplikatív módon függ az új fizikától.

$$\delta m_e \propto m_e \log \frac{\Lambda}{m_e}$$

Kvantum trivialitás

Landau pólus: A csatolási erőssége az energiával nő, s már véges energián divergál, így konzisztens elméletet csak a kölcsönhatás mentes elméletben kapunk. Ez a QED-t és a Higgs-et érinthetheti.

Konkrétan:

$$e(p) = \frac{e(p_0)}{1 - \frac{3}{16\pi^2} e(p_0) \log\left(\frac{p}{p_0}\right)}$$

$e(p)$ divergál, ha

$$p = p_0 \cdot \exp\left(\frac{16\pi^2}{3} \frac{1}{e(p_0)}\right)$$

Higgs-nél és QED-ben is problémás.

Erős CP probléma

QCD-vel kapcsolatos probléma, ezért erős. Miért CP?

C: Charge-conjugation, P: Parity.

$$P : \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} -x \\ -y \\ -z \end{pmatrix} \quad \text{Tértükrözés.}$$

A töltés konjugáció minden részecskét a megfelelő antirészecskére cserél.

QCD-ben lehetséges a CP-sértés, még sincs (kísérletileg nem kimutatható), ezt tudjuk a neutron elektromos dipólusmomentum méréséből.

Erős CP probléma

Lehetséges megoldás:



ábra: Egy hipotetikus részecskét valóban erről a mosószerről nevezett el Frank Wilczek fizikus.

ami még a sötét anyagra is megoldás.

Paraméterek száma

Tíz tömeg (három lepton, hat kvark, Higgs).

Higgs tér alapállapotí értéke.

kvarkeveredés három paraméter, plusz egy CP sértő fázis (CKM mátrixból)

Három mértékcsoporthoz tartozó csatolás.

Sok tömeg paraméter van.

Miért nagyszerű a QCD?

- ▶ Nincs hierarchia probléma
- ▶ Nem triviális
- ▶ Cut-off mentes
- ▶ Összetett részecskék
- ▶ QCD a proton tömeg 99%-át adja

Sokféle SM kiterjesztes

Rengeteg lehetőség, kevés nyom, s lehet, hogy nem is ezekből választott a természet.

Két lehetőség

- ▶ bottom-up: effektív elméleteket vizsgálunk (túl sok együttható, paraméter)
- ▶ sokféle lehetséges fundamentális modellt megvizsgálunk, s összevetjük a kísérletekkel.

Összetett Higgs elméletek:

- ▶ fel kell térképezni a nem-perturbatív dinamikáját minél több erősen kölcsönható mértékelméleteknek.

Technicolor

Tejesen új szektor a Higg-tér helyett. Mivel hasonlít a QCD-re (de ez egy teljesen új kölcsönhatás, új anyagterekkel), használjuk az ott megszokott elnevezéseket (technigluon, technikvark stb.)

Kell választani mértékcsoportot (technicolor), technikvarkok is kellenek, hiszen ezek kondenzátuma fogja átvenni a Higgs-tér VVÉ-et, vagyis a $\langle q\bar{q} \rangle$ fogja spontán sérteni a elektroyenge szimmetriát az elektromágneses és gyenge kölcsönhatásokra.

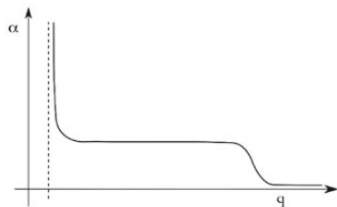
Az SM Higgs szerepét a techni- $\sigma(f_0)$ -mezon veszi át.
Ezek kvantumszáma: $J^{PC} = 0^{++}$.

Modell építés

Olyan elméletet kell találni, ami nem mond ellent az eddigi kísérleti eredményekkel (megfelelő techni-Higgs tömeg, SM kvark tömeg.)

Ennek az elméletnek sok tekintetben másnak kell lennie, mint a QCD.

Érdemes vizsgálni az ún. sétáló mértékelméleteket. Walking technicolor (WTC), amikor a csatolási állandó nagy tartományban lassan változik.



A fő nehézség a nagyon limitált tudásunk az erősen kölcsönható elméletekről, érdemes ezeket vizsgálni.

Saját munka

SU(3) mértékelmélet, $N_f = 2, 3, 4, 5, 6$ fundamentális technikvarkkal

Rácstérelmélet segítségével mértünk több mennyiséget.

A skálát a techni-pion bomlási állandója adja ($f_\pi = 250$ GeV).

Meghatároztuk a techni-rho mezon tömegét, mely a legkönnyebb új részecske lehet.

Azt találtuk, hogy

$$\frac{m_\rho}{f_\pi} \sim 8$$

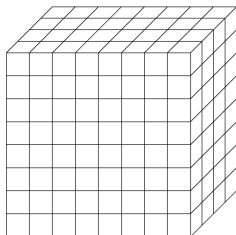
robusztus mennyiség, független N_f -től, (s érdekes módon a rácsállandótól, s a kvarktömegetől is alig függ).

(lásd még: *Nógrádi, Szikszai*: The flavor dependence of m_ρ/f_π , arxiv:1905.01909)

Rácstérelmélet

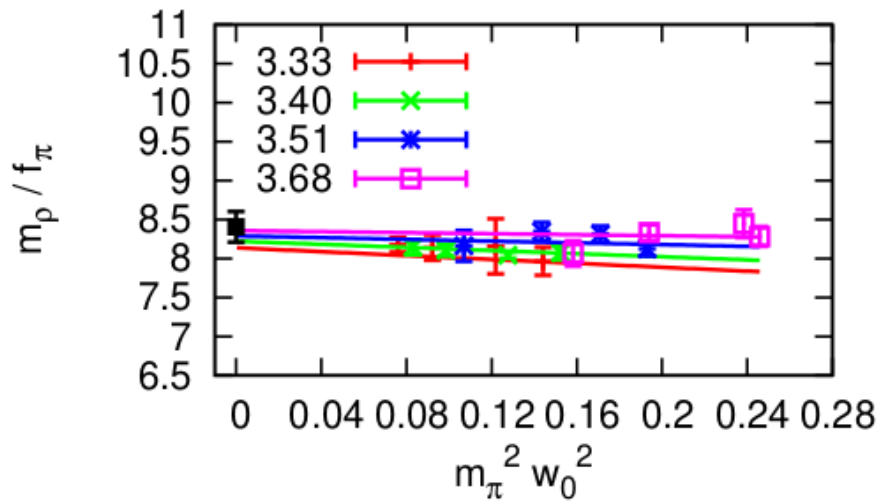
A téridőt diszkrétizáljuk.

- ▶ véges rácsállandó
- ▶ véges térfogat
- ▶ nem nulla fermion tömeg

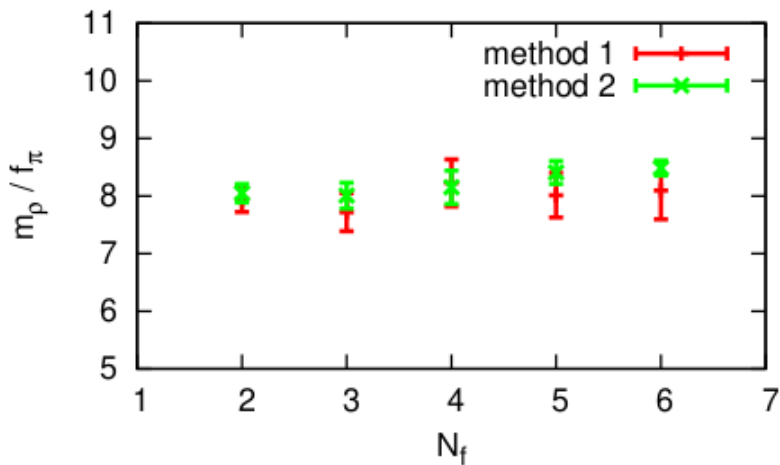


Számítógépes szimulációk lehetségesek.

Kell: kontinuum-limesz, királ-limesz, végtelen térfogat.

$N_f = 5$ $\chi^2/\text{dof} = 0.82$ 

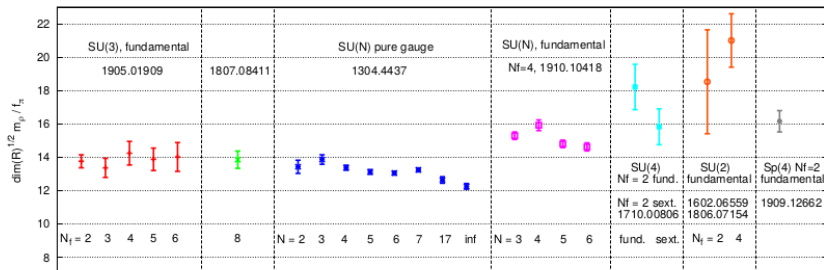
Chiral - continuum limit



Modell függés

Vizsgáljuk, hogy más mértékcsoport, ábrázolás esetén van-e hasonló. Az alábbi kombináció szintén egy robusztus mennyiségnek tűnik:

$$\dim(R)^{1/2} m_\rho / f_\pi$$



(Nógrádi, Szikszai: The model dependence of m_ρ / f_π , arxiv: 1912.04114)

Konklúzió

- ▶ Az m_ρ tömeg alapján a mérékcsoporthat meg tudjuk állapítani, viszont a fermion tartalmat nem.

SU(3) mértékelmélet esetén a munkánk alapján:

$$m_\rho = 2 \text{ TeV}, \Gamma_\rho = 410 \text{ GeV}$$

Fontos mennyiségek kísérleti szempontból.

Konklúzió II.

- ▶ SM kísérletileg kifogástalan egyelőre
 - ▶ LHC run 3 (2022)
- ▶ Elméleti hiányosságok leginkább
- ▶ Összetett Higgs egy lehetőség
- ▶ Sok más kiterjesztés: Grand unified theories (GUT), Supersymmetry (SUSY)
 - ▶ Lehet, hogy nem látunk semmi újat az LHC-ban, lehet, hogy igen, de a természet nem a fentiekből választ.