Standard Modellen túli elméletek

Cynolter Gábor

ELTE MTA-TKI Elméleti Fizikai Kutatócsoport

MAFIHE TISK Gyenesdiás

2007. február 5.

Kitekintés a SM-ből extra dimenziós térelméletek

- A Standard Modell, sikerei és problémái
- Nagy egyesített elméletek
- Hierarchia probléma és megoldásai
  - szuperszimmetria
  - dinamikai szimmetriasértés
- Első extra dimenziós elméletek Kaluza-Klein (KK)
- Nagy extra dimenziós elméletek
  - Következmények, Fekete lyukak
- Görbült extra dimenziós elméletek
  - LHC jóslatok: KK módusok, még egy skalár: radion

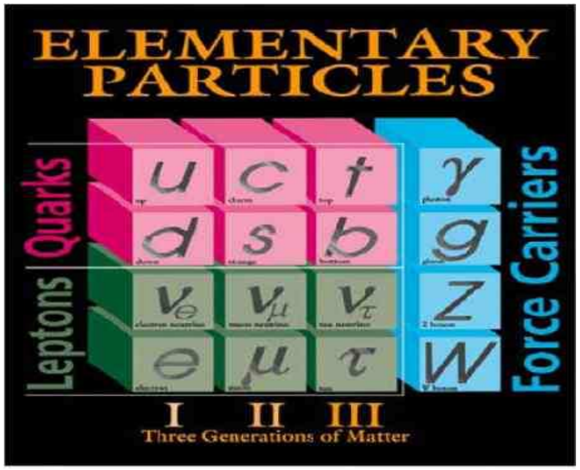
Standard Modell

A gravitáció kivételével egységes keretben írja le az erős, gyenge és elektromágneses kölcsönhatásokat a rendkívül sikeres QED példáját követve.

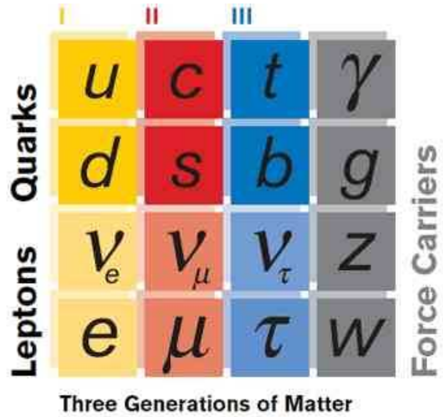
Spontán sértett $SU_C(3)\times SU_L(2)\times U_Y(1)$ *mértékelmélet* $\rightarrow SU_C(3)\times U_{em}(1)$

- Anyagterek -fermionok (feles spin), 3 generáció

- Kölcsönhatást közvetítik - bozonok (egész spin), $8*g,\ \gamma,\ W^{\pm},\ Z$



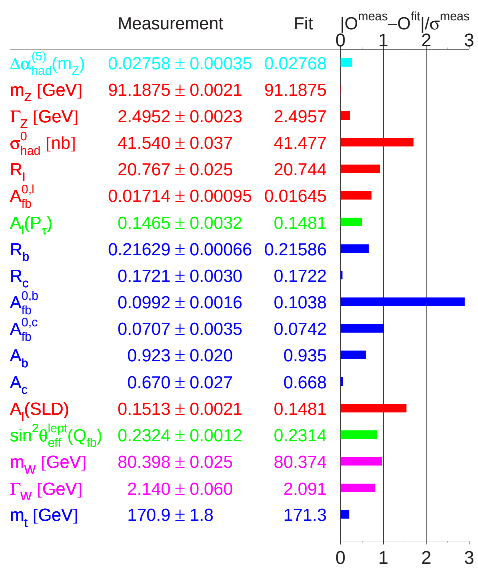
Standard Modell 2

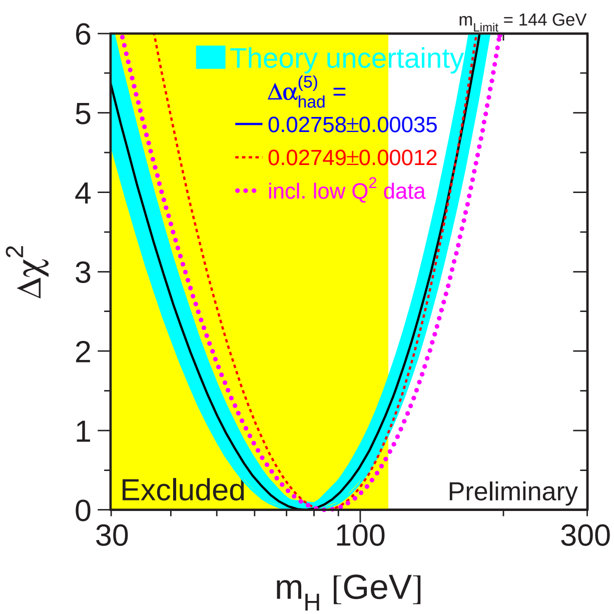


$$
\begin{aligned}
\mathcal{L}_{SM} = & -\frac{1}{4g'^2}B_{\mu\nu}B^{\mu\nu} - \frac{1}{2g^2}\mathrm{Tr}(W_{\mu\nu}W^{\mu\nu}) - \frac{1}{2g_s^2}\mathrm{Tr}(G_{\mu\nu}G^{\mu\nu}) \\
& + \bar{Q}_i i\not{D} Q_i + \bar{L}_i i\not{D} L_i + \bar{u}_i i\not{D} u_i + \bar{d}_i i\not{D} d_i + \bar{e}_i i\not{D} e_i \\
& + (Y_u^{ij}\bar{Q}_i u_j \tilde{H} + Y_d^{ij}\bar{Q}_i d_j H + Y_l^{ij}\bar{L}_i e_j H + \mathrm{h.c.}) \\
& + (D_\mu H)^\dagger (D^\mu H) - \lambda (H^\dagger H)^2 - m^2 H^\dagger H + \frac{\theta}{32\pi^2}\epsilon^{\mu\nu\rho\sigma}\mathrm{Tr}(G_{\mu\nu}G_{\rho\sigma}).
\end{aligned}
\tag{1}
$$

SM sikerei

Leírja gyakorlatilag az összes nagyenergiás kísérletet, 10^{-16}cm-ig (neutrínó hozzáadható), esetenként ezrelék pontossággal. EW mérésekben *3 input paraméter*. Az összes részecskét direkt megfigyeltük, kivéve a HIGGS BOZONT, tömegek igen különbözők $m_{u,d} \sim 5$MeV és $\ll m_{top} = 170.9 \pm 1.8$ GeV, direkt és indirekt





Mérés és elméleti jóslatok (pull)

Higgs mérések, $M_H < 144$ (182) GeV

SM kísérleti problémái

Kb. 1998-ig főként elméleti, esztétikai problémák a SM-lel, azóta a kísérleti evidenciák is sokasodnak

- Nem-barionikus sötét anyag
- Sötét energia (kozmológiai konstans)
- Neutrínóknak tömege van (oszcillációból)
- Nem ad magyarázatot az univerzum barion asszimetriájára (Fodor Zoltán, később Csikor Ferenc is, ELTE)

$\Rightarrow$Valamilyen új fizikának kell lenni a SM-en túl, még nem értük el a gyorsítókban. Eddigi részecske felfedezések többnyire a várakozásnak megfeleltek (kivételek vannak pl. τ).

LHC új tartomány! Ha Higgs, ismeretlen a tömege, vagy más részecske(?) ?

Elméleti problémák (természetességi, esztétikai)

- Sok paraméter, 19 +(7-9 m_ν), nem várnánk fundamentális elmélettől
g_3, g, g', töltött fermionok 9 tömeg, 4 (3+1) CKM mátrix paraméter,
λ_{Higgs}, v és ,θ_{QCD} + neutrínó tömegek, keverési szögek, fázis(ok).

- Nem értjük az anyagtér-multiplettek szerkezetét, miért van 3 generáció.
Tömegspektrum: csak W,Z és top nehéz, a többi könnyű, miért?

- Töltéskvantálás: miért van kapcsolat a kvarkok és leptonok töltése között?

- A szimmetriák kvantumosan miért maradnak meg (anomáliamentes) a speciális kvantumszám választás miatt?

- Miért vannak véletlen szimmetriák (barion-szám megmaradás)?

- U(1), $\lambda\Phi^4$ kölcsönhatás miatt nem aszimptotikusan szabad, csak véges energiáig Λ lehet érvényes $\Rightarrow$ EFFEKTÍV ELMÉLET, egy fundamentális elméletből származik.

Elméleti Problémák (folyt.)

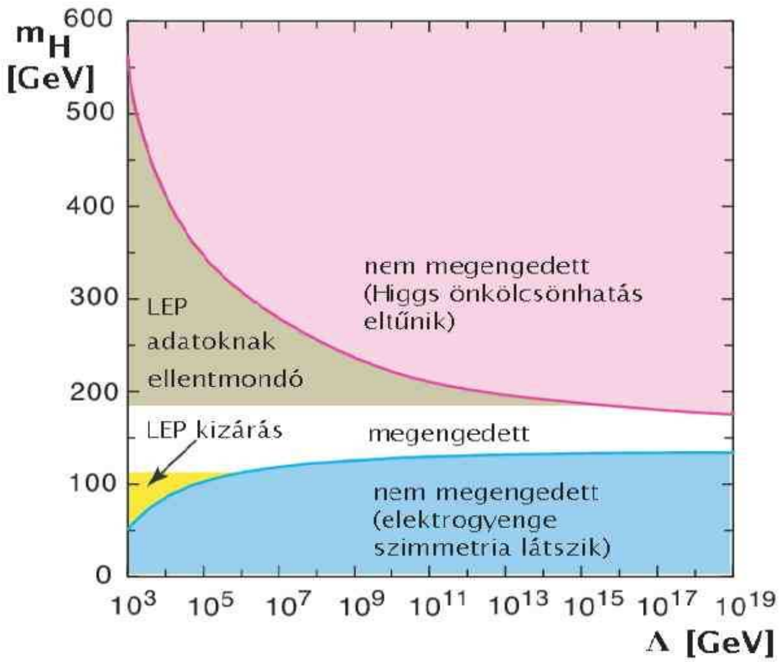
- HIERARCHIA PROBLÉMA: a természetben tapasztalható skálák miért különböznek ennyire. $\mathcal{L}_{\mathcal{SM}}$-nek egyetlen skálája van
  $G_F \sim 10^{-5} GeV^{-2} \gg G_{Newton} \sim 10^{-38} GeV^{-2}$, (ld. később még).
  Másképpen: miért sokkal gyengébb a gravitáció az elektrogyenge kcshatásnál?

- Legtöbb probléma a *HIGGS skalár* részecskével van

$$V(\Phi) = \lambda \left(\Phi^2 - v^2\right)^2 \sim \lambda \Phi^4 - 2\lambda v^2 \Phi^2$$

  - *ad hoc* skalárpotenciál, amely csak leírja a szimmetriasértést, nem magyarázza meg, miért negatív a kvadratikus tag?
  - Nem láttak még elemi skalárokat $\Rightarrow$ Higgs-mentes, összetett-Higgs elm-k.
  - A Higgs elmélet példájában a szupravezetés természetben megfigyelt elméletében a skalár rendparaméter $e^- e^-$ kötött állapot.

A SM megengedett Higgs -Λ érvényességi tartománya



ábra Trócsányi Zoltántól

„Just so" Standard Modell, nem esztétikus, de pl. antropikus elv szólhat mellette.

Nagy egyesítet elméletek (GUT)

Idea

- 3 csatolási állandóból egy csatolási állandó g_{GUT} nagy egyesítési energián,
- $SU_C(3) \times SU_L(2) \times U_Y(1)$ direkt szorzat csoport helyett 1 egyszerű csoport
- 1 ábrázolásban a részecskék $\Rightarrow$ egyszerű öszefüggések, tömegekre, töltésekre

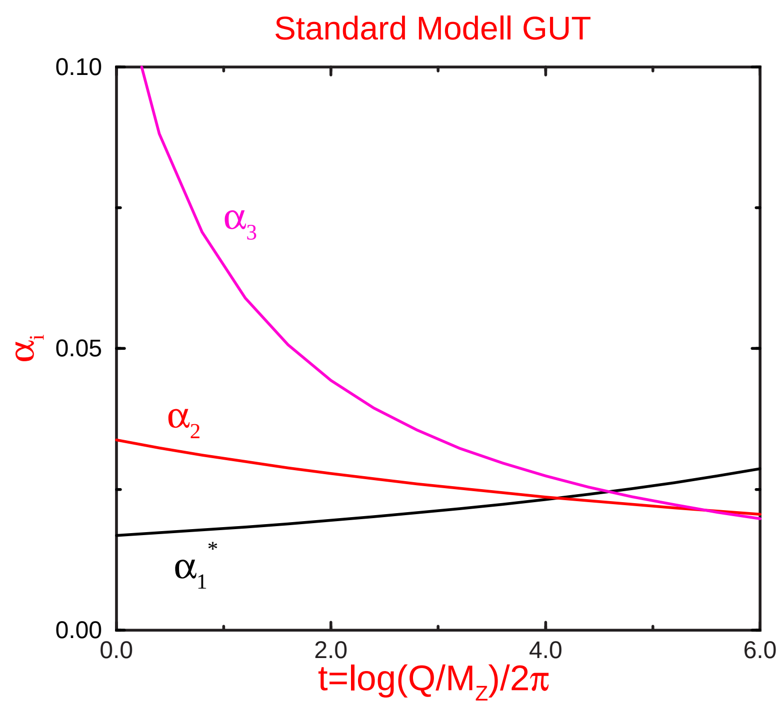
$G \supset G_{SM} = SU_C(3) \times SU_L(2) \times U_Y(1)$
SM csoport rangja (egyszerre felcserálhető op-k száma)
$2 + 1 + 1 \leq rang_G$.

Új „szimmetriák" (generátorok) és vektorbozonok, nem látjuk ezeket, mert nehezek.

1. egyesítés Newton: égi -, Földi mechanika

2. egyesítés a XIX. században: Maxwell elektromos és mágneses kcsh-k.

Kísérleti érv: a mért csatolási állandók nagy energián (kis távolságon) látszólag összetartanak



A nagy egyesítési skála $M_{GUT} \simeq 10^{15-16} GeV$.
Felette egy g_{GUT} csatolási állandó csökken, aszimptotikusan szabad (AF)

Prototípus: Georgi-Glashow SU(5)

Hierarchikus szimmetriasértések

$$G \underset{M_{GUT} \gg}{\longrightarrow} G_{SM} \underset{M_W}{\longrightarrow} SU_C(3) \times U_{em}(1)$$

Egy családban 15 részecske $SU_C(3) \times SU_L(2)$ kvantumszámok, $\tilde{u} = C\bar{u}$

$$\left.\begin{matrix} (u,d) & (e^-,\nu) & \tilde{u} & \tilde{d} & e^+ \\ (3,2) & (1,2) & (3^*,1) & (3^*,1) & (1,1) \end{matrix}\right\} 15\ db$$

$$\begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ e^+ \\ -\nu_e^C \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} 0 & u_3^C & -u_2^C & -u_1 & -d_1 \\ -u_3^C & 0 & u_1^C & -u_2 & -d_2 \\ u_2^C & -u_1^C & 0 & -u_3 & -d_3 \\ u_1 & u_2 & u_3 & 0 & -e^+ \\ d_1 & d_2 & d_3 & e^+ & 0 \end{pmatrix}$$

1. ábra. Kvarkok, leptonok az SU(5) GUT-ban, Ismert fermionok közös ábrázolásban, ne legyen üres hely újaknak, $5^* + 10$ (5x5 antiszimmetrikus) ábrázolás

GUT jó hír - rossz hír

Ábrázolásból tudjuk (SU(N) generátorok spúrja 0), hogy

5: $\mathrm{Tr} Q_{em} = 3Q_{d,3} + Q_{e^+} = 0$ azaz $Q_{d,3} = -\frac{1}{3} Q_{e^+}$ a *töltéskvantálás* kijött!

10: szorzatábrázolás generátora, rendben.

Egy multiplettben GUT energián azonos tömegek. Ezeket a tömegeket a mai ismert energiákra visszafuttatva (csatolási állandókhoz hasonlóan) egyes arányok magyarázhatók, de $m_{d\ kvark}/m_{el.} = 15$ nem magyarázható.

3 családra 3-szor ismételt multiplett - nem értettük meg a családszerkezet.

Szimmetriasértést új Higgs skalárok generálják (24 illetve 5 komponensű).

SU(5) eredetileg 24 mértékbozon = 8 gluon +3 SU(2) +1x U(1) marad 12 M_{GUT} tömegű új vektorbozon (X, Y), amely kölcsönhatásokat közvetít az egy ábrázolásban levő kvarkok és leptonok között.

Protonbomlás

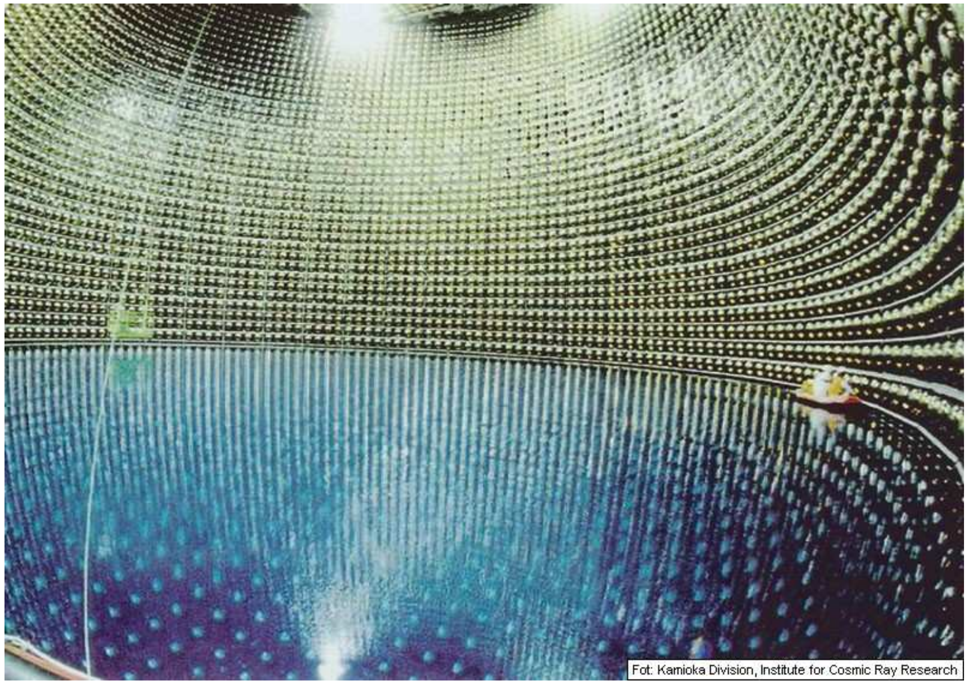
$$\begin{pmatrix} gluonok & X/ & Y \\ & & \\ Y & W_i & W_i \\ X & W_i & . \end{pmatrix}$$

X, Y leptokvarkok,dikvarkok
$B_1 = -\frac{1}{3},\ B_2 = \frac{2}{3}$ B-L megmarad

(X, Y) mértékbozonok -leptokvarkok cseréje kvark -lepton átmenetetre vezethet
$p \longrightarrow e^+\pi^0$, $\alpha_{GUT} = \frac{g^2_{GUT}}{4\pi}$

$$\tau_{proton} = \frac{1}{\alpha^2_{GUT}} \frac{M_X^4}{m_p^5} \sim 10^{30-31} \text{év} \quad , \quad M_X \simeq 10^{15} GeV$$

Kísérletek ma már $\tau_{proton} \simeq 1.6 \cdot 10^{33} (10 \cdot 10^{35})$év -> túl gyors protonbomlást jósol! Legegyszerűbb SU(5) elvetve, SO(10) életképesebb.



Superkamiokande kiserlet

Hierarchikus skálák az elméletben, amelyet a kvantumkorrekciók egymás közelébe szeretnének hozni -> *gauge hierarchia probléma*, oka elemi skalár az elméletben (lásd később).

Továbbra is sok (*ad hoc*) paraméter van az elméletben, a gyors protonbomlást tiltani kell, csatolási állandók nem pontosan találkoznak.
M_{GUT}-ig nagy sivatag lenne új fizika nélkül.

Új jelenségek küszöbén, új küszöb

Heisenberg határozatlansági reláció $\Delta x \cdot \Delta p \sim \hbar$

Eddigi részecskefizikai skálák származtatottak.
Atomi skála (1900) $r_B = \frac{\hbar^2}{e^2 m_e} \simeq 10^{-8}$cm elektron tömegéből!

Erős kölcsönhatás skálája csatolási állandóból (1950) $r_S = M e^{-\frac{8\pi^2}{g_S^2(M_0 b_0)}} \simeq 10^{-13}$cm, ez elemi részek tömkelegéhez vezetett (ZOO).

AF aszimptotikusan szabad elmélet, ahol g_S erőssé válik (~ 1) ott $\rightarrow \Lambda_{QCD}, r_S$.

Jelenleg $\mathcal{O}(200)$ GeV-ig, $10^{-16} cm$ vannak kísérletek.

$\mathcal{L}_{SM}$-ben egyetlen skála $v = 250$GeV

$$d = \hbar c / v = 0.8 \cdot 10^{-16} cm$$

$r \ll d$ fizikát keressük $\Rightarrow$ELMÉLETI PROBLÉMA

Hierarchia probléma, gyalogosoknak: pozitron

Klasszikus elektrodinamika (ED), e^-, $\underline{E}$, $\underline{B}$ írja le és

$$\Delta E_{Coulomb} = \frac{1}{4\pi}\frac{e^2}{r_e}$$

$r_e$az elektron *mérete*, végtelen Coulomb sajátenergia levágásával vezetjük be.
Minden e^--ra van, ez e^-nyugalmi energiájának a része

$$(m_e c^2)_{megfigyelt} = (m_e c^2)_{csupasz} + \Delta E_{Coulomb}$$

De! Kísérletekben $r_e \leq 10^{-17}$cm (nem látunk szerkezetet eddig)

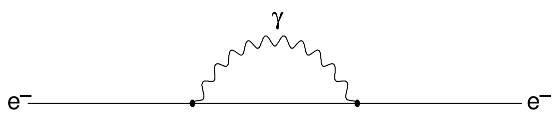
$\Rightarrow \Delta E \simeq 10$GeV $\gg m_e c^2 = 0.511$MeV.
Kiejtés: *finom hangolás* eredménye lehet *negatív* csupasz tömeggel

$$0.000511 GeV = (-3.141082 + 3.141593)\ GeV$$

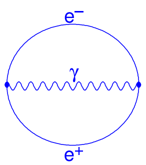
Kiejtés elekerüléséhez klassz. ED nem érvényes tovább, mint
$\left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m_e c^2}\right) \simeq 2.8 \cdot 10^{-13}$*cm.*
Megoldás: kvantummechanika + antirészecske (e^+).

Coulomb sajátenergia

T rendezett perturbációszámítás $1/r_e \to \Lambda$ lineárisan divergál, $\Delta E \sim \Lambda$.



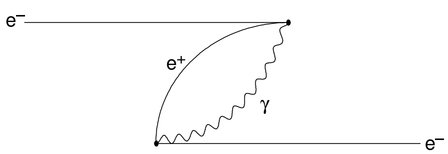
Pozitron (1932 Anderson) + kvantum-mechanika, vákuumfluktuáció.



Energia-idő határozatlanság által megengedett időn belül rész-antirész keletkezik-annihilál.
$\Delta t \sim \hbar/\Delta E \sim \frac{\hbar c}{2m_e c^2} \simeq 200 \cdot 10^{-13}$cm.

Klassz. ED már rég nem használható $\gg 2.8 \cdot 10^{-13}$cm !

+ folyamat elektron + vákuum-fluktuáció



Weisskopf (Fury ! előjelhiba) kiejtik egymást, log. divergencia marad.

$$\Delta E = \Delta E_{Coulomb} + \Delta E_{parkeltes} = \frac{3\alpha}{4\pi} m_e c^2 \log \frac{\hbar}{m_e c r_e}$$

$\Delta E \sim m_e$ fontos, így nem additív, hanem százalék korrekció

$$(m_e c^2)_{megfigyelt} = (m_e c^2)_{csupasz} \left[1 + \frac{3\alpha}{4\pi} m_e c^2 \log \frac{\hbar}{m_e c r_e}\right]$$

logaritmikus, még Planck méret esetén is csak 9%.

$\Delta E \sim m_{csupasz}$ szimmetria eredménye: *KIRÁLIS SZIMMETRIA*

Kiralitás: R, jobbra, L balra polarizált fermionok külön transzformálhatók, $1 = P_L + P_R$ projektálhatók $P_{L/R} = (1 \pm \gamma_5)/2$.

Egzakt szimmetria $\Rightarrow m_e = 0$ és szimmetria miatt a korrekció is 0.
$m_e \neq 0$ expliciten sérti a szimmetriát, $\Delta E \sim m_e$ a sértés mértékével arányos.

Szabadsági fokok (rész-antirész) duplázása révén az elmélet kisebb távolságokig lett természetesen használható.

Hierarchia probléma a SM-ben

$$V(H) = \lambda H^4 + m_H^2 H^2, \;\; v^2 = -m^2/2\lambda^2 = (250\ GeV)^2$$

Perturbatív unitaritás ($\lambda \leq 1$), vagy LEPI-LEPII indirekt modellfüggő jóslatok miatt

$$m_H \sim \mathcal{O}(100) GeV$$

m^2kvadratikusan divergens sajátenergiás korrekciókat kap, pl. top hurok

$$\Delta m_{top}^2 = -6 \frac{h_t^2}{4\pi^2} \frac{1}{r_H^2}$$

r_H a Higgs bozon mérete, $h_t \simeq 1$ top-Higgs Yukawa csatolás.
Úgy,mint előbb, SM nem alkalmazható 10^{-17}cm-nél kisebb méretekre csak óriási természetellenes finomhangolások árán. Érvényes lehet akár $M_{Pl} \sim 10^{19}$GeV-ig is, de a perturbációszámítás minden rendjében 33-34 jegyre kell hangolni a csupasz Higgs tömeget újra és újra.

H.P.megoldása: dinamikai szimmetriasértés

Nincs elemi Higgs skalár: hiányzik, vagy összetett részecske (kötött állapot), véges méreténél új fizika kezdődik.

Technicolor: új erős kcsh. L, R új fermionok a gyenge SU(2) különböző ábrázolásaiban (L-dublett $\begin{pmatrix} \chi_1 \\ \chi_2 \end{pmatrix}_L$ és R-szinglet χ_R). Létrejön kis energián egy $\left\langle \bar{\Psi}_{(L)} \Psi_{(R)} \right\rangle \neq 0$ kondezátum, amely sérti a királis és az ábr. miatt az SU(2) szimmetriát. Higgs nehéz, erősen kölcsönható, nem rezonancia ezért nem látható.

Példa a QCD, ahol van $\langle \bar{q} q \rangle \neq 0$ kondezátum. A TC $3000\times$ felskálázott változata.

H.P.megoldása: dinamikai szimmetriasértés 2

Problémák: fermion tömegek -> kiterjesztett modell ETC, magasab dim. kcsh
generálja a tömeget $\bar{q}q\bar{\Psi}\Psi/\Lambda^4_{ETC}$, top $\Rightarrow$ Λ kicsi
FCNC, ízváltó semleges áram, kísérletben elnyomva $\Rightarrow$ Λnagy .
LEPI-II mérések indirekt sugárzási korrekciók (kvantummechanika!)
kizárják végleg a legegyszerúbb, QCD mintájú TC-ket.

Módosítások: QCD-től eltérő dinamika, lassan változó csat. Walking TC.
extra globális szimmetria, mint $(m_\pi \ll m_{proton})$
$\Rightarrow$ kis Higgs elméletek, Higgs= pszuedo goldstone bozon

Legnagyobb gond a jó, megbízható nem perturbatív számolási módszer hiánya.

H.P. megoldása: szuperszimmetria

SUSY motiváció: $r_H \sim 10^{-17}$cm alatt is használhatóvá, érvényessé tenni.

Pozitron analógia: duplázzuk a szabadsági fokokat, egy expliciten sértett új szimmetriával!

Megoldás: minden részecskének legyen azonos, és tömegű csatolású párja, de

$$B \longrightarrow F$$

$$F \longrightarrow B$$

Q_α femionikus operátor írja le, α spinor index. top $\longrightarrow$stop (s=0,$m_{\tilde{t}}$), párja rendbehozza a Higgs sajátenergiát $\Delta m^2_{stop} = +6\frac{h_t^2}{4\pi^2}\frac{1}{r_H^2}$

$$\Delta m^2_{stop} + \Delta m^2_{stop} = -6\frac{h_t^2}{4\pi^2}\left(m_t^2 - m_{\tilde{t}}^2\right)\log\left(\frac{1}{r_H^2 m_{\tilde{t}}^2}\right)$$

Különbség: $m_{\tilde{t}} =?$ ismeretlen. Ahhoz, hogy $\Delta m^2 \sim m^2_{tree}$ legyen, stop-nak az EW skála (v) közelében kell lennie, max 1-2 TeV.

Szuperszimmetria (folyt.)

2x szabadsági fokokat SM-ben
kvark $\longrightarrow$ szkvark (skalár, s=0)
lepton $\longrightarrow$ szleptonok (skalár, s=0)
gauge bozonok $\longrightarrow$ gaugínók (fermion, s=1/2)

Gond: új 5 dimenziós operátor írja le a proton bomlást $\tau_p \sim \frac{m_{\tilde{s}}^4}{m_p^5} \simeq 10^{-12} s$

R-paritás globális szimmetriával megtiltható

$$R = (-1)^{3B+L+2s} = \begin{cases} uj\ reszecske & -1 \\ standard\ resz. & +1 \end{cases}$$

R-paritással B és L sértő kölcsönhatások, folyamatok nem maradnak. A legáltalánosabb renormálható mértékszimmetrikus Lagrangianban már nincs B, L sértés, a proton kellően hosszú élettartamú.

LSP - legkönnyebb(L) szuperszimmetrikus (S) részecske (P) stabil, általában semleges $\longrightarrow$ideális sötét anyag jelölt (neutralínó, gravitínó,..).

Szupertér formalizmus

Szuperszimmetriát praktikusan le lehet írni, ha

$$x^\mu \longrightarrow (x^\mu, \theta^\alpha, \bar{\theta}_{\dot{\alpha}})$$

áttérünk 4+4 dimenzióra. Új fermionikus dimenziókat $\theta^\alpha, \bar{\theta}_{\dot{\alpha}}$ bevezetve.

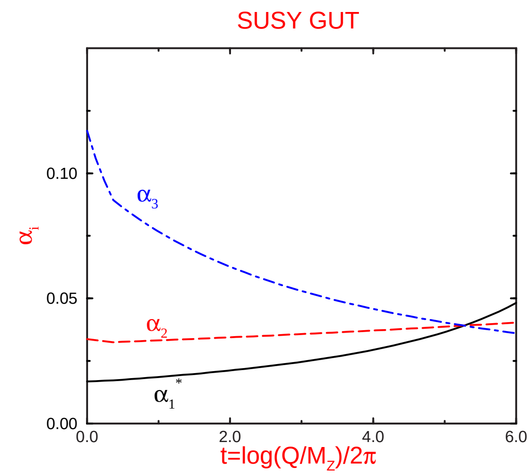
$\theta^\alpha, \bar{\theta}_{\dot{\alpha}}$ Grassmann változók, ld. Patkós András előadását.

SM+SUSY = MSSM

Minimális Szuperszimmetrikus Standard Model: első számú SM kiterjesztés

✔ Hierarchia problémát megoldja, csendesíti

✘ Problémás a szuperszimmetriasértés, spontán sértés nem működik, rejtett sértés egy közvetítő szektoron át (gravitáció-MSUGRA, gauge- GMSB). Tudatlanságunkat paraméterezzük sok soft-sértő taggal



✔ Csatolási állandók találkoznak SUSY-GUT-ban

MSSM 2

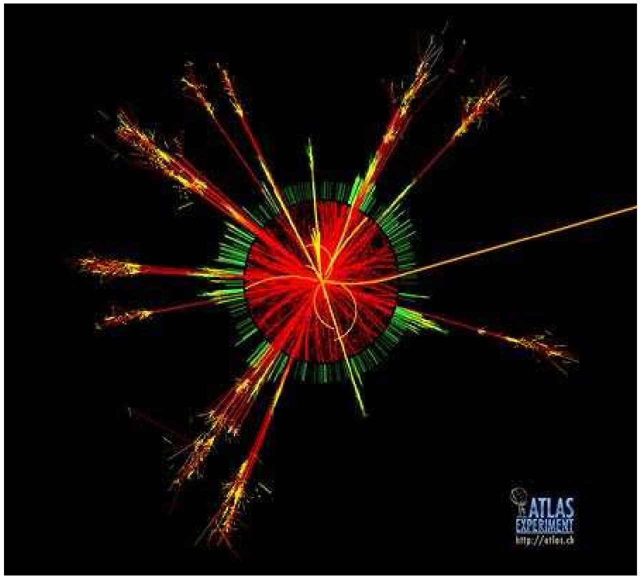
✘ Sok parméter (124)

✔ Nehéz top kvark, V(H) potenciálban $-m^2$ természetes.

MSSM-ben 2 Higgs dublett 8-3=5 fizikai skalárral (Horváth Dezső előadása)

LHC: egyik fontos feladata eldönteni, van-e szerepe a H.P. megoldásában SUSY elméleteknek, találunk-e alacsony energiás szuperpartnereket.

Következőkben az utóbbi 10 évben született radikális, a gravitációt is érintő megoldásokat fogjuk tárgyalni.



Fekete lyuk keltési folyamat, LHC-ATLAS detektor