

A Standard Modellen túl

Cynolter Gábor

MTA-ELTE Elméleti Fizikai Kutatócsoport

2013. február 8. MAFIHE TISK

Vázlat

- 1 A Standard Modell, Higgs, + -
- 2 Nagy Egyesített Elméletek
- 3 Hierarchia Probléma és Megoldásai
- 4 Higgs - új fizika?

Standard Model Anyag-részecskéi

Leptons Quarks	u up	c charm	t top
	d down	s strange	b bottom
	ν_e e^- Neutrino	ν_μ μ^- Neutrino	ν_τ τ^- Neutrino
	e electron	μ muon	τ tau
	I	II	III
	The Generations of Matter		

Részecskének tehetetlen tömege,

$$m_v^{SM} = 0$$

0,01 eV - 0,5 MeV - 173 GeV -ig

de $m_{proton} = 0,938 \text{ GeV}$

$E = mc^2$ $c = 1$: tömeget energiában mérjük,

1 eV egys. töltés 1V gyorsítás,

keV=1000 eV, MeV= 10^6 eV, GeV= 10^9 eV, TeV= 10^{12} eV

e, p(uud) kell tömeg, különben nincs H-atom, per. rendszer

Mi tartja egybe ezeket? -> Kölcsönhatások

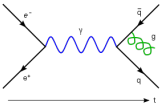
Elektromágnesesség + kvantummechanika

- Elektrodinamika kvantumelmélete: kvantumelektrodinamika



1948: Tomonaga, Schwinger, Feynman, (Nobel-díj: 1965)

- Anyagi részecskék: proton, elektron + semleges neutron, neutrínó

- Kölcsönhatást foton (Einstein 1905) közvetíti :  Feynman-gráfok

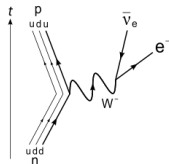
Lélegzetelállító: az el. mágneses momentuma 11 jegyes egyezés

$\mu_e = 1.00115965219$	kísérleti eredmény	
$\mu_e = 1.00115965215$	elméleti számolás	 +...

Gyenge és erős kölcsönhatás

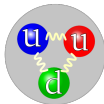
Gyenge kcsh

- β -bomlás, lassú -gyenge, véges hatótáv
- $W^{\pm}, Z$ nehéz mértékbozonok közvetítik



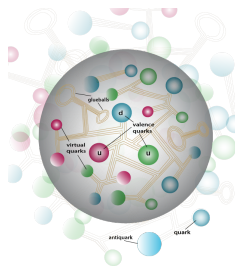
Erős kölcsönhatás

- gyors magfizikai folyamatok
- hadronokban (p, n,...)



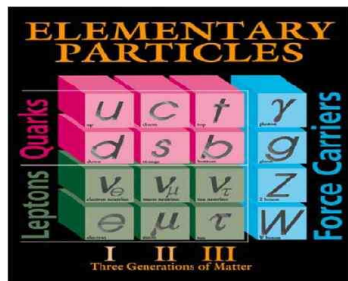
kvarkok közötti kcsh

- gluonok közvetítik ($m=0$)



Standard Modell - sikertörténet

- 1967- erős, gyenge és elektromágneses kölcsönhatások a QED mintájára.
- Szimmetriák + Renormálhatóság -> egyértelmű kölcsönhatások
- Anyagterek - 3 generáció
- Kölcsönhatást közvetítik - bozonok
- Higgs mechanizmus beépítve



1979 Nobel díj Glashow, Salam, Weinberg

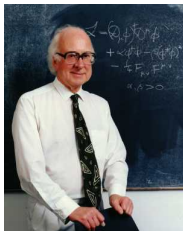


1999 Nobel díj t'Hooft és Veltman -

1972-ben bizonyítják matematikailag értelmes, hála a Higgsnek



Tömeg W, Z-nek majd' 50 éve megvan a magyarázat



Peter Higgs, 1964, Cairngorms nemzeti park, Skócia

Felismerés: új részecske kell - **HIGGS BOZON** (1966)

Sok hasonló ötlet, cikk, ezért néha nevezik

„Anderson-Brout-Englert-Gurlanik-Hagen-Higgs-Kibble”

csatolással arányos tömeg (W,Z és kvark, elektron) -elképzelni?

Higgs Mechanizmus, a Közeg

Képzeljünk el ...



...egy termet tele fizikusokkal (sic!), amint nyugodtan beszélgetnek,
ez olyan mint a tér kitöltve a Higgs részecske mezőjével...
(David J. Miller és CERN)

Higgs Mechanizmus 2, a részecskék tömege



... híres fizikus besétál, zavart kelt, ahogy halad a teremben, és minden lépésével csodálói egy kisebb csoportját vonzza maga köré...



...a csoportosulás miatt egyre nehezebben mozog, azaz tömeget kap, akárcsak egy részecske, amely a Higgs mezőn halad át...

Higgs Mechanizmus 3, a Higgs tömege



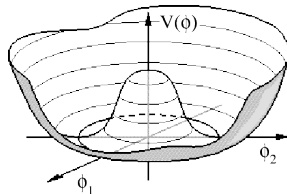
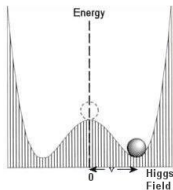
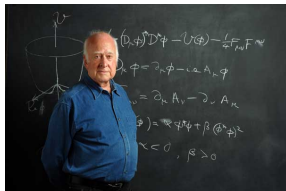
... ha egy pletyka terjed el a teremben, ...



... kis csoportosulást hoz létre, de most a kutatók között.

Az analógiában ezek a csoportosulások a Higgs részecskék.

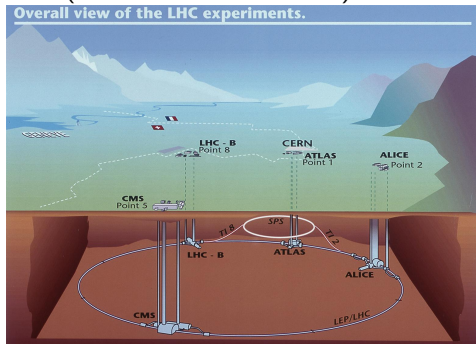
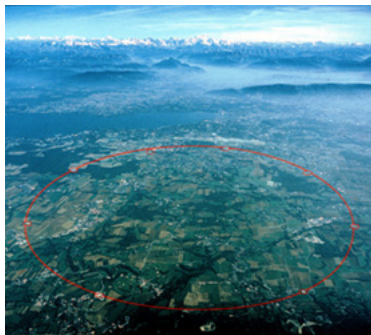
Higgs - Miért nem üres a terem (vákuum)?



- Tér (mező) értéke nem nulla a vákuumban -spec. potenciál
- spontán szimmetriasértés, sérül (tükrözési) a minimumban
- Higgs *gyenge kcs*-ban részt vesz
tömeget ad W, Z-nek -ezért gyenge a weak force
illetve kvarkoknak, elektronnak (μ, τ)
- $m \sim \text{csatolás} \times v$, vákuum érték
ezért rejtőzködő!

LHC Large Hadron Collider 2009-

proton -proton ütközések 8 (7) TeV ($1000 \cdot \text{GeV} = 10^{12} \text{eV}$)



Az LHC (CERN, Svájc) madártávlatból és a szerkezete

A Standard Modell Sikerei

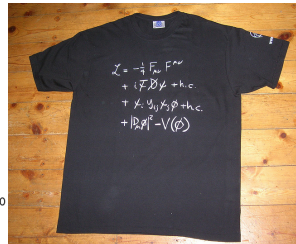
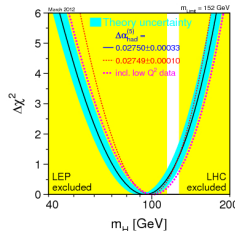
- Leírja az összes nagyenergiás kísérletet, 10^{-18} m-ig ($\mathcal{O}(200)$ GeV-ig)
- 1984 kísérleti igazolásért (W, Z) Nobel díj:



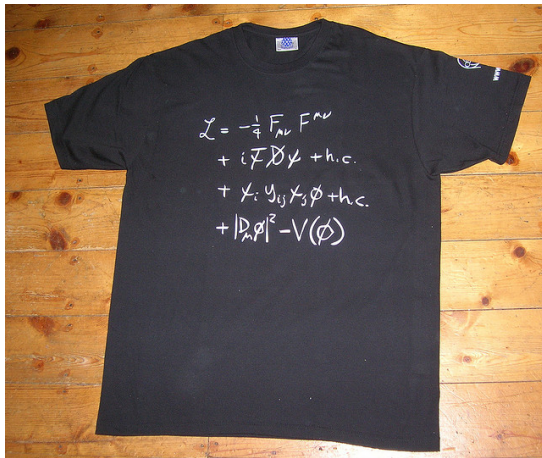
Carlo Rubbia és Simon van der Meer

- Az összes részecskét direkt megfigyeltük, (LEP CERN, Tevatron Fermilab). Talán a **HIGGS BOZONT** is.

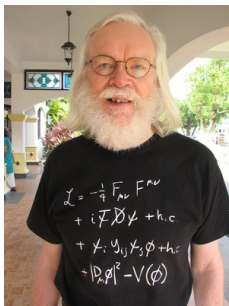
Measurement	Fit	$\sigma^{\text{meas}} / \sigma^{\text{fit}}$
$\Delta\alpha_{\text{had}}^{(5)}$	0.02758 ± 0.00035	0.02768
m_Z (GeV)	91.1875 ± 0.0021	91.1875
Γ_Z (GeV)	2.4952 ± 0.0023	2.4957
σ_{had}^e (nb)	41.540 ± 0.037	41.477
R_b	20.767 ± 0.025	20.744
$A_b^{(1)}$	0.01714 ± 0.00095	0.01645
$A(P)$	0.1465 ± 0.0032	0.1481
R_b	0.21629 ± 0.00066	0.21586
R_c	0.1721 ± 0.0030	0.1722
$A_b^{(2)}$	0.0992 ± 0.0016	0.1038
$A_b^{(3)}$	0.0707 ± 0.0035	0.0742
A_b	0.923 ± 0.020	0.935
A_c	0.670 ± 0.027	0.668
$A(\text{SLD})$	0.1513 ± 0.0021	0.1481
$\sin^2\theta_{\text{eff}}^e(Q_Z)$	0.2324 ± 0.0012	0.2314
m_W (GeV)	80.398 ± 0.025	80.374
Γ_W (GeV)	2.140 ± 0.060	2.091
m_t (GeV)	170.9 ± 1.8	171.3



A Standard Modell - egyszerű?

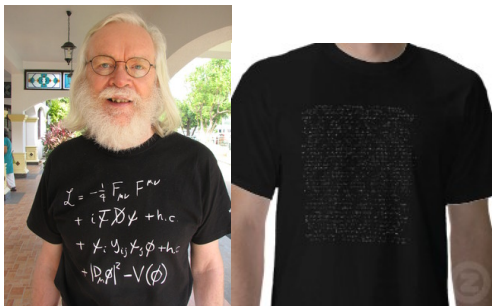


A Standard Modell - egyszerű, vagy mégsem?



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

A Standard Modell - egyszerű, vagy mégsem?



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

(1)

Spontán sértett $SU_C(3) \times SU_L(2) \times U_Y(1)$ mértékelmélet
(Renormálható $\dim \leq 4$ tagok)

- Kvantum=hurok korrekciók szintjén működik ($m_{top}^{dir} = m_{top}^{indirekt}$)
- Megmaradó töltések (véletlen)
B-barionszám

$$Q \rightarrow e^{+i\alpha/3} Q \quad \bar{u} \rightarrow e^{-i\alpha/3} \bar{u} \quad \bar{d} \rightarrow e^{-i\alpha/3} \bar{d}$$

L_f - 3 külön leptonszám, $m_\nu = 0$ esetén

$$L_f \rightarrow e^{+i\alpha} L_f \quad \bar{e}_f \rightarrow e^{-i\alpha} \bar{e}_f$$

- B,L megmarad perturbációs számításban
- B-L nem perturbatíván (korai Univerzum, EW fázisátmenet - szfaleron)
- BSM (SM túl) B,L általában sérül

- Spontán sértett $SU_C(3) \times SU_L(2) \times U_Y(1)$ mértékelmélet nem egyszerű csoport, direkt szorzat, 3 csat-i áll.
- Nem fundamentális elm., $U_Y(1)$ nem aszimptotikusan szabad Landau pólus! $g = \frac{g_0}{g_0 - \beta \ln(\frac{\Lambda}{m})}$

Gravitáció nincs benne, $M_{Planck} = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} \simeq 1.2 \times 10^{19}$ GeV
-kvantumgrav.

- SM önkényes paraméterek, ábrázolások, finom hangolás
- Nem értjük:

anyag ábrázolások (multiplettek), miért 3 család, MFV

Töltés kvantálás $|q_e| = q_{proton} = 3|q_d|$

Miért van véletlen B,L szimmetria, anomáliamentesség?

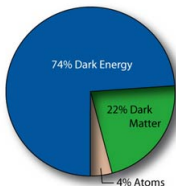
Miért csak L balkezes q, l áramok ?

Tömegspektrum „ $\nu_f \ll u, d, ..q \ll W^\pm, Z, t$ ”

- Sok paraméter:19

g, g', g_s	M_Z, M_H	$3m_l + 6m_q$	CKM θ_i, δ	θ_{QCD}	$m_\nu + \text{CKM}$
3	2	9	3+1	1	7-9(Maj.)

90-es évek végétől a kísérleti evidenciák sokasodnak

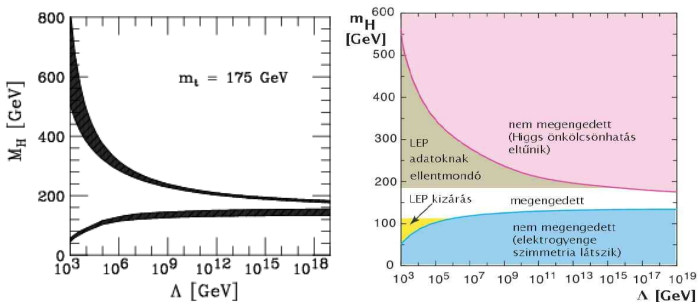


- Nem-barionikus sötét anyag
- Sötét energia ($\sim$ kozmológiai konstans)
- Neutrínóknak tömege van (oszillációból: Nap, atmoszferikus, reaktor)
- Nem ad magyarázatot az univerzum barion asszimetriájára (Fodor Z., Csikor F. és Katz S.)
$$\eta = \frac{n_B - n_{\bar{B}}}{n_\gamma} \simeq 6 \cdot 10^{-9}$$
kezdeti feltételként kimosódna,
Sakharov feltételek dinamikai generáláshoz:
C, CP sértés, nem egyensúly

⇒Valamilyen új fizikának kell lenni a SM-en túl, ezt még nem értük el a gyorsítókban.

A SM megengedett Higgs Λ érvényességi tartománya

$V(H) = \lambda H^4 + m_H^2 H^2$ potenciálra korlátok
 $\lambda(E) \geq 0$, és ne legyen fals EW vákuum



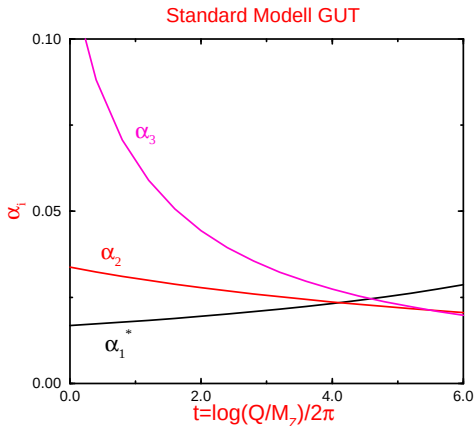
ábra Trócsányi Zoltántól

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

Vázlat

- 1 A Standard Modell, Higgs, + -
- 2 **Nagy Egyesített Elméletek**
- 3 Hierarchia Probléma és Megoldásai
- 4 Higgs - új fizika?

Észrevétel: mért csatolási állandók futása



Közel találkoznak $10^{14} - 10^{16}$ GeV-en - közös eredet?

Felette egy g_{GUT} csatolási állandó csökken, aszimptotikusan szabad (AF)

Idea

- 3 csatolási állandóból egy 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 összefüggések, tömegekre, töltésekre

$$G \supset G_{SM} = SU_C(3) \times SU_L(2) \times U_Y(1)$$

SM csoport rangja (egyszerre felcserélhető op-k száma)

$$2 + 1 + 1 \leq \text{rang}_G.$$

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
3. egyesítés elektromos és gravitáció 1967-1973-1983

Hierarchikus szimmetriasértések

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

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

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

$$\left(\begin{array}{c} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ e^+ \\ -v_e^C \end{array} \right) \left(\begin{array}{ccccc} 0 & u_3^C & -u_2^C & -u_1 & -d_1 \\ & 0 & u_1^C & -u_2 & -d_2 \\ & & 0 & -u_3 & -d_3 \\ & & & 0 & -e^+ \\ & & & & 0 \end{array} \right)_L$$

Fermionok $\bar{5}$ és $10 = 5 * 5$ antiszim. ábrázolást kitöltik

- Töltéskvantálás

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

5: $\text{Tr} Q_{em} = 3Q_{d,3} + Q_{e+} = 0$ azaz $Q_{d,3} = -\frac{1}{3}Q_{e+}$ OK!

10: szorzatábrázolás generátora, rendben.

- Tömegrelációk

Egy multipllettben M_{GUT} felett $m_d = m_e$, $m_s = m_\mu$, $m_b = m_\tau$

Kis energián 10 GeV $m_b/m_\tau \sim 3$ OK

de $m_d/m_{el.} = 15 \ll 200$ kísérlet nem magyarázható.

- 3 családra 3-szor ismételt multipllett - nem értettük meg a családszerkezetet.
- Szimmetriasértést új Higgs skalárok generálják (24 illetve 5 komponensű).

Protonbomlás

SU(5) eredetileg 24 mértékbozon = 8 gluon + 3 SU(2) + 1x U(1)
marad 12 M_{GUT} tömegű új vektorbozon (X, Y),
kvark és lepton átmenet ábr-on belül.

$$\left(\begin{array}{ccc} gluonok & X/ & Y \\ & W_i & W_i \\ Y & & \\ X & & . \end{array} \right) \quad \begin{array}{l} X, Y \\ B_{X,Y} = -\frac{1}{3}, \frac{2}{3} \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{leptokvarkok} \\ \text{de (B-L) megmarad!} \end{array}$$

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

$$\tau_{proton} = \frac{1}{\alpha_{GUT}^2} \frac{M_X^4}{m_p^5} \sim 10^{30-31} \text{év} \quad , \quad M_X \simeq 10^{14-15} \text{GeV}$$

Kísérletek ma már $\tau_{proton} \simeq 1.6 \cdot 10^{33} (10 \cdot 10^{35}) \text{év}$

-> túl gyors protonbomlást jósol!

Legegyszerűbb SU(5) elvetve, SO(10) életképesebb, m_ν is természetes!

GUT csatolási állandók futása

$$\alpha_i = g_i^2/4\pi$$

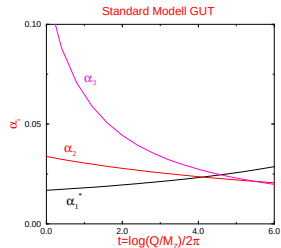
$$\frac{1}{\alpha_i(Q^2)} = \frac{1}{\alpha_i(\mu^2)} + \frac{b_i}{2\pi} \ln\left(\frac{Q^2}{\mu^2}\right)$$

$$b_i^{SM} = \left(\frac{41}{10}, -\frac{19}{6}, -7\right) \quad \begin{array}{ll} b_3 = \frac{4}{3}N_f - 11 < 0 \\ b_2 = \frac{4}{3}N_f - \frac{43}{6} < 0 \\ b_1 = \frac{4}{3}N_f + \frac{1}{10} > 0 \end{array}$$

1-hurok jó!

$$\sin^2 \theta_W(M_{GUT}) \simeq \frac{3}{8}$$
$$\Rightarrow \sin^2 \theta_W(M_Z) \simeq 0.21$$

De 2-hurok: már kís. hibán kívül.



$$M_{GUT} \sim 10^{14} \text{ GeV}$$

Vázlat

- 1 A Standard Modell, Higgs, + -
- 2 Nagy Egyesített Elméletek
- 3 Hierarchia Probléma és Megoldásai
- 4 Higgs - új fizika?

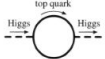
Hierarchia probléma

Hierarchia: 2 távoli skála $M_{EW} \sim 100 \text{ GeV} \ll M_{GUT}$, vagy M_{Planck}

Hierarchia probléma: elemi skalár tömegét kvantumkorrekciók megakarják növelni.

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

Korrekciók Higgs tömeghez ($\Lambda = 10 \text{ TeV}$):

fermion:		$\delta M_H^2 \sim \frac{3}{8\pi^2} \lambda_t^2 \Lambda^2$	$\simeq -(2 \text{ TeV})^2$	*100
mértékbozon		$\delta M_H^2 \sim g^2 \Lambda^2$	$\simeq (700 \text{ GeV})^2$	10
skalár (H)		$\delta M_H^2 \sim \frac{3\lambda}{16\pi^2} \Lambda^2$	$\simeq (500 \text{ GeV})^2$	5

$$M_H^2 = m_{H,tree}^2 + \delta M_{H,f}^2 + \delta M_{H,m}^2 + \delta M_{H,s}^2$$

$M_H = 126 \text{ GeV}$ (117-129 GeV) $m_{H,tree}^2$ finomhangolása minden rendben M_{GUT} vagy M_{Planck} levágással 26-34 jegyre kell beállítani!

Hierarchia probléma gyalogosoknak

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 $r_e \leq 10^{-17} \text{ cm}$ (nem látunk szerkezetet eddig)
 $\Rightarrow \Delta E \simeq 10 \text{ GeV} \gg m_e c^2 = 0.511 \text{ MeV}$.

Kiejtés: *finom hangolás* eredménye lehet *negatív csupasz tömeggel*

$$0.000511 \text{ GeV} = (-3.141082 + 3.141593) \text{ GeV}$$

Kiejtést elekerülni: klassz. ED nem érvényes tovább, mint

$$\left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m_e c^2} \right) \simeq 2.8 \cdot 10^{-13} \text{ cm}.$$

Megoldás: kvantummechanika + antirészecske (e^+).

Coulomb sajátenergia

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

Pozitron (1932 Anderson) + kvantummechanika, vákuumfluktuáció.

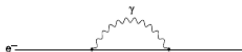
Energia-idő határozatlanság által megengedett időn belül rész-antirész keletkezik-annihilál.

$$\Delta t \sim \hbar / \Delta E \sim \frac{\hbar c}{2m_e c^2} \simeq 200 \cdot 10^{-13} \text{cm}.$$

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

+ folyamat elektron + vákuum-fluktuáció

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



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

$\Delta E \sim m_e$ 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 $P_{L/R} = (1 \pm \gamma_5)/2$.

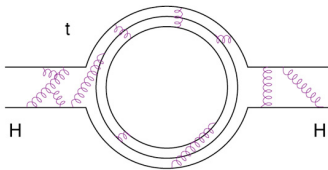
Egzakt szimmetria $\Rightarrow m_e = 0$ és szimmetria miatt a korrekció is 0.
 $m_e \neq 0$ expliciten sérti a szimmetriát, $\Delta E \sim m_e$ a sértés mértékével arányos.

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

Hierarchia probléma megoldási lehetőségei

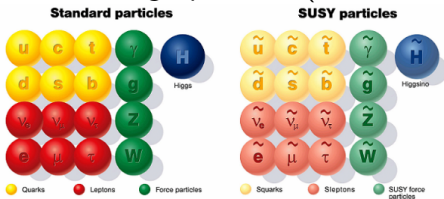
A részecskefizika változtatása kis távon $\sim$ nagy energián

- a Higgs összetett, szerkezete van (Anderson szilárdtestfizika)



1-3 TeV-ig érvényes

- Szuperszimmetria
új szimmetriák, legnépszerűbb (Bozon-Fermion, 0 kísérlet)



- Globális szimmetriák: Higgs pseudo GB (Kis Higgs)
F-F és B-B kiejtések.

Higgs összetett részecske!

Nem perturbatív- nehéz, nem biztos számolások - rács térelmélet?

QCD királis szimmetrisértése a minta

$$\langle \bar{f}_L f_R \rangle_0 \neq 0$$

Királis ábrázolás $\begin{matrix} f_L & SU_L(2) \text{ dublett} \\ f_R & SU_L(2) \text{ szinglet} \end{matrix} \implies SU_L(2) \text{ sértés}$

Nagy $M_{Z,W}$ tömeghez új mértékkölcsönhatás kell :

TECHNICOLOR

3000* felskálázott QCD, technifemionok:

$$\psi_L = \begin{pmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \end{pmatrix}, \quad \psi_R \quad \langle \bar{\psi}_L \psi_R \rangle_0 \neq 0$$

technipionok: felskálázott QCD pionok+ vektormezonok (a, ρ)
(W,Z tömeget összetett GB adják)

teschniskalárok: Higgs(ek)

erős kölcsönhatás TeV skálán!

Fermiontömeg gond:

nincs direkt $\Psi - q_{SM}$ csatolás, $\Rightarrow$ újabb kcsh-k kellene

kiterjesztett modell ETC, $\bar{q}q\bar{\Psi}\Psi/\Lambda_{ETC}^4$, top $\Rightarrow \Lambda$ kicsi

FCNC, ízváltó semleges áram, kísérletben elnyomva $\Rightarrow \Lambda$ nagy .

LEPI-II mérések indirekt sugárzási korrekciók kizárják végleg a legegyszerűbb, 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.

SUSY motiváció: $r_H \sim 10^{-17}$ cm alatt is érvényes.

Pozitron analóg: új szimmetriával duplázzuk a szabadsági fokokat

Minden részecskéhez azonos tömegű és csatolású pár

$$B \rightarrow F$$

$$F \rightarrow B$$

Q_α fermionikus operátor írja le, α spinor index.

top $\rightarrow$ stop $^{s=0}$ ($m_{\tilde{t}}$), párja rendbehozza a Higgs sajátenergiát

$$\Delta m_{stop}^2 = +6 \frac{h_t^2}{4\pi^2} \frac{1}{r_H^2} \sim \Lambda^2$$

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

$\Delta m^2 \sim m_{tree}^2$ könnyű stop $m_{\tilde{t}} = 1\text{-}2$ TeV. (Higgs miatt ~ 400 GeV)

Királis multiplettek: $\frac{\text{kvar} \rightarrow \text{szkvar} (\text{skalár}, s=0)}{\text{lepton} \rightarrow \text{szlepton} (\text{skalár}, s=0)}$

Vektor multiplettek: gauge bozonok $\rightarrow$ gaugínók (fermion, $s=1/2$)

Gond: új 5 dim. op. írja le a proton bomlást $\tau_p \sim \frac{m_s^4}{m_p^5} \simeq 10^{-12} s$

R-paritás globális szimmetriával megtiltható

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

R-paritással B és L sértő kölcsönhatások eltávolítva.

Ált. renormálható mértékszimetrikus Lagrangianban B, L invariáns

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

WIMP miracle - 200 GeV tömeg, weak csatolás $\rightarrow$ jó sötét anyag

Vázlat

- 1 A Standard Modell, Higgs, + -
- 2 Nagy Egyesített Elméletek
- 3 Hierarchia Probléma és Megoldásai
- 4 Higgs - új fizika?**

Higgs - ablak új fizikára

Higgs keltés, új virtuális részecskék
csatolás: q, g és Higgs, $m_{q4} > 400$ GeV
SM3 és SM4 illesztése összes folyamathoz

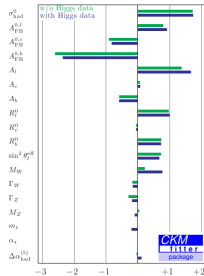
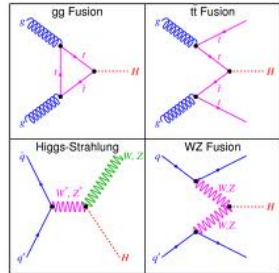
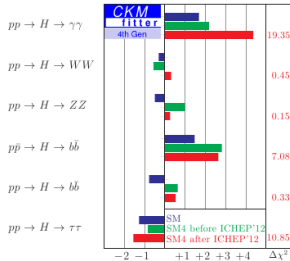


FIG. 1. Deviations of the EWPOs in the Standard Model. The observables were calculated with ZFitter [29,43]. For an observable O with experimental value O_{exp} , experimental error ΔO_{exp} and best-fit prediction O_{fit} we define the deviation as $(O_{exp} - O_{fit})/\Delta O_{exp}$.



PRL109, 241802('12)

SM 4 családdal 5.3σ -val kizárva

Összetett, erősen kölcsönható Higgs általánosan

A SM Higgs az új részecske? mérni tulajdonságait J^{PC}
csatolásait
BSM következmények
Higgs-szerű skalárt paraméterezzük L -ben

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} (\partial_\mu h)^2 - \frac{1}{2} m_h^2 h^2 - \frac{d_3}{6} \left(\frac{3m_h^2}{v} \right) h^3 - \frac{d_4}{24} \left(\frac{3m_h^2}{v^2} \right) h^4 + \dots$$
$$- \left(m_W^2 W_\mu W^\mu + \frac{1}{2} m_Z^2 Z_\mu Z^\mu \right) \left(1 + 2c_V \frac{h}{v} + b_V \frac{h^2}{v^2} + \dots \right)$$
$$- \sum_{\psi=u,d,l} m_{\psi^{(i)}} \bar{\psi}^{(i)} \psi^{(i)} \left(1 + c_\psi \frac{h}{v} + b_\psi \frac{h^2}{v^2} + \dots \right)$$

$\mathcal{O}(p^2)$

SM

$$a=b=c=1$$

$$d_3 = d_4 = 1$$

$$c_V = c_\psi = 1$$

Összes rész.fizikai folyamat számolható

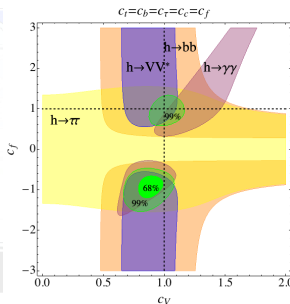
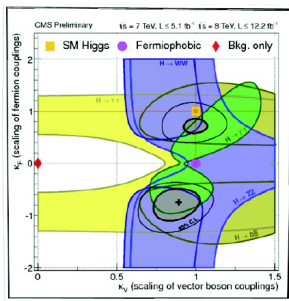
Összetett Higgs 2

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2}(\partial_\mu h)^2 - \frac{1}{2}m_h^2 h^2 - \frac{d_3}{6}\left(\frac{3m_h^2}{v}\right)h^3 - \frac{d_4}{24}\left(\frac{3m_h^2}{v^2}\right)h^4 + \dots$$

$$- \left(m_W^2 W_\mu W^\mu + \frac{1}{2}m_Z^2 Z_\mu Z^\mu\right) \left(1 + 2c_V \frac{h}{v} + b_V \frac{h^2}{v^2} + \dots\right)$$

$$- \sum_{\psi=u,d,l} m_{\psi(i)} \bar{\psi}^{(i)} \psi^{(i)} \left(1 + c_\psi \frac{h}{v} + b_\psi \frac{h^2}{v^2} + \dots\right)$$

$O(p^2)$ paraméter, F, VB csatolás skálázása



SM -OK, fermionfób ($c_f = 0$) kizárva,

SM szimmetriák tesztelhetők

$c_f = -1$ még életben ($H \rightarrow \gamma\gamma$) pozitív interferencia, W, top hurkok

Higgs - van új fizika?

$$V_{\text{eff}}(H) = \lambda H^4 + m_H^2 H^2 + \Delta V$$

$L_{SM} - \lambda(Q^2)$ fut (változik), 1-, 2-hurok+küszöb

$$\begin{aligned} \beta_\lambda^{\text{SM}} = & 12\lambda^2 - (\frac{9}{5}g_1^2 + 9g_2^2)\lambda + \frac{9}{4}(\frac{3}{25}g_1^4 + \frac{2}{5}g_1^2g_2^2 + g_2^4) \\ & + 4\lambda\text{Tr}[3Y_U^\dagger Y_U + 3Y_D^\dagger Y_D + Y_E^\dagger Y_E] \\ & - 4\text{Tr}[3(Y_U^\dagger Y_U)^2 + 3(Y_D^\dagger Y_D)^2 + (Y_E^\dagger Y_E)^2], \end{aligned}$$

$$\frac{d\lambda}{d\ln Q^2} = \frac{1}{16\pi^2} \beta_\lambda^{\text{SM}}, \text{ ahol}$$

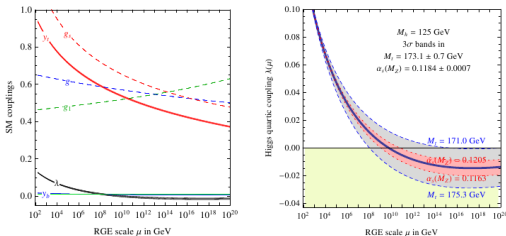


Figure 1: **Left:** SM RG evolution of the gauge couplings $g_1 = \sqrt{5/3}g'$, $g_2 = g$, $g_3 = g_s$, of the top and bottom Yukawa couplings (y_t, y_b), and of the Higgs quartic coupling λ . All couplings are

Instabilitás - fals minimum nagy $|H|$ -re.

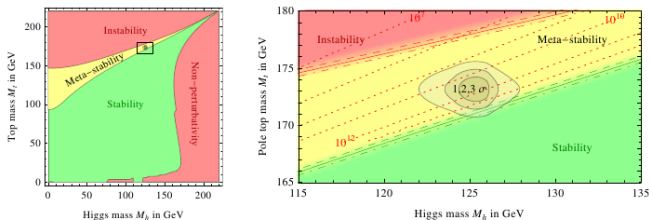
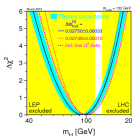


Figure 5: Regions of absolute stability, meta-stability and instability of the SM vacuum in the M_t - M_h plane. **Right:** Zoom in the region of the preferred experimental range of M_h and M_t (the gray areas denote the allowed region at 1, 2, and 3 σ). The three boundaries lines correspond to $\alpha_s(M_Z) = 0.1184 \pm 0.0007$, and the grading of the colors indicates the size of the theoretical error. The dotted contour-lines show the instability scale Λ in GeV assuming $\alpha_s(M_Z) = 0.1184$.

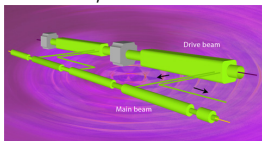
Metastabil: átmenet $\sim \exp(-1/\lambda)$ — $\tau_{UNIVERZUM}$ -nál lassabb

- Standard Modell leírja a kísérleteket
- Új bozon az LHC-n, SM $M_H \sim 126$ GeV



$$M_H = 90^{+30}_{-23} \text{ GeV}$$

- Ellenőrzés, tiszta kísérletben LC = Linear Collider 500 GeV



- Van-e új fizika, mit keresünk, várunk?
Esztétikus-"egyszerű" elveket!
- Gravitációval közös konzisztens elmélet - húrelmélet?



- Leon Lederman: Az isteni a-tom
Mi kérdés, ha a válasz a Világegyetem Typotex 1995



- Harald Fritsch: Kvarkok, Gondolat (1987)

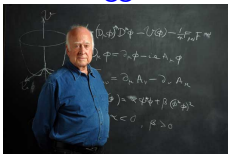


- Brian Greene: Az elegáns Univerzum (húrelméletről)
- Természet Világa Mikrovilág különszám 1 (2000), 2 (2013)
- Az atomoktól csillagokig előadásai (<http://www.atomcsill.elte.hu/>)
 - Katz Sándor: Az elemi részek fizikája és az anyag ... (2010)
 - Veres Gábor: Milyen eszközökkel figyelhetők meg ... (2007)
 - Bajnok Zoltán (2009), Varga Dezső (2010)...

Nobel-díj 20xx?

2010 Sakurai díj megosztva

- Peter Higgs



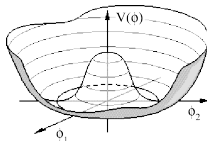
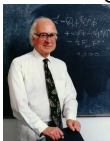
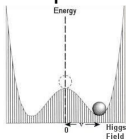
- Kibble, Guralnik, Hagen, Englert, Brout (†)



De Nobel 2008: Spontán szimmetriasértés részecskefizikában
Nambu, Kobayashi és Maskawa



- Legtöbb probléma a tömeget adó **HIGGS skalár** részecskével

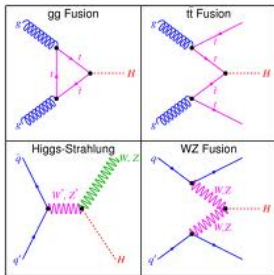
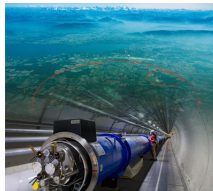
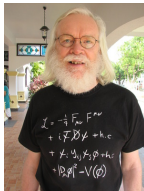


- Egyetlen tömeges paraméter $v = 254 \text{ GeV} \sim 254 \cdot M_{\text{proton}}$
- HIERARCHIA PROBLÉMA:** Miért sokkal gyengébb a gravitáció az elektrogyenge kölcsönhatásnál?
(ha a kvantumkorrekciók összehúzzák őket)
alapvető elméletnek meg kell magyaráznia

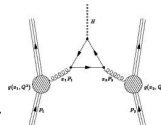
$$v_{SM} = 254 \text{ GeV} \ll M_{PLANCK} \sim 12000000000000000000 \text{ GeV}$$

A SM Higgs keresés

Elmélet:

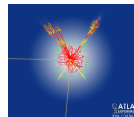
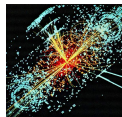


- Ritka folyamatok



- Nagy *háttér*

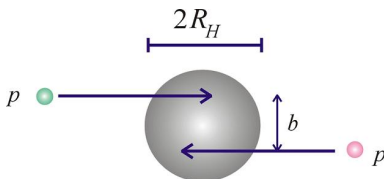
- Szimulációk



Kvantumgravitáció LHC-n, Fekete Lyukak

ADD -> LHC-n Kvantumgravitáció, fekete lyuk!

BH (Fekete Lyuk) kialakul, ha elegendő tömeg a horizonton belül
Föld 6000 km $\rightarrow$ 8 mm



BH kialakul, ha ütközésnél $b < r_H(\sqrt{s})$

$M_{BH} \sim \sqrt{s}$ ütközés energiája

LHC ütközésszámmal $\sim 10^7$ BH/ év
keletkezhet

Sok fekete lyuk, mert csak kis b kell

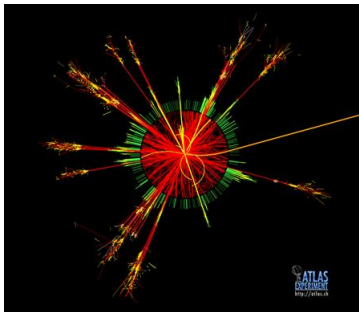
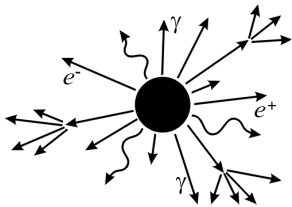
Nem stabilak, nem nyelnek el mindent, nem válnak kis gömböccé!

Fekete Lyuk Bomlás Hawking Sugárzással

Hawking: fekete lyuk hőmérséklete $T \sim 1/M$, $\left(\frac{\hbar c^3}{8\pi k G_N} \cdot \frac{1}{M_*} \right)$

Stefan-Boltzman törvény, sugároz $\sim \sigma T^4 \sim 1/M_*^4$

- Kvantummechanikai folyamat $\Rightarrow$ egyformán kelt minden részecskét



LHC ATLAS jóslat: tűzijáték