

# A Higgsen túl

*Jelentős mérföldkő a részecskefizikai kutatásokban a 2012 nyarán bejelentett új (skalár) részecske felfedezése. De milyen következményei lehetnek, ha a Higgs egyedülálló részecske, ha egy szuperszimmetrikus elméletből származik, illetve ha valamilyen új erős kölcsönhatás első hírnöke? Írásunkban e kérdésekre keressük a választ.*

**H**osszú éveken át a részecskefizikusok azt ismételték, hogy kutatásuk messze legfontosabb feladata a Higgs-részecske felfedezése. 2012. július 4-én az ATLAS és a CMS kísérlet nyomán bejelentették, hogy külön-külön is elegendő adat gyűlt össze, amelyek megerősítik egy, a Higgs tulajdonságait mutató, körülbelül 125–126 GeV tömegű bozon létezését. Ezzel a nappal megváltozott a helyzet, a kutatók most már szeretnék alaposan felderíteni a Higgs tulajdonságait és feltárni teljes szerepét az elektromgyenge szimmetriasértésben. (Kicsit túloztunk az első kijelentésben, hiszen valójában az LHC egyik legfontosabb célja kezdettől fogva az elektromgyenge szimmetriasértés igazi természetének felderítése, amelyre egyfajta biztos eredményt ígérő „no-lose” tételek is születtek, mint utólag látjuk helyesen.)

Az LHC másik fő feladata bármilyen Standard Modellen (SM) túli új fizika, a (népszerűsége és a fizikusok elfoglaltsága miatt) elsősorban az alacsonyenergiás szuperszimmetria felfedezése. A SM még mindig az abszolút nyerő, azaz már-már aggasztó pontossággal írja le az eddigi nagy energiás kísérleteket a LEP-en, Tevatronnál és immár az LHC-nál is. Leszámítva talán az LHCb kísérletnél  $c$  kvarkot tartalmazó D mezonok bomlásában észlelt CP sértést, eddig semmilyen, a SM-en meggyőzően túlmutató új fizikát sem fedeztek fel az LHC-n. Éppen ezért lehet még fontosabb a Higgs.

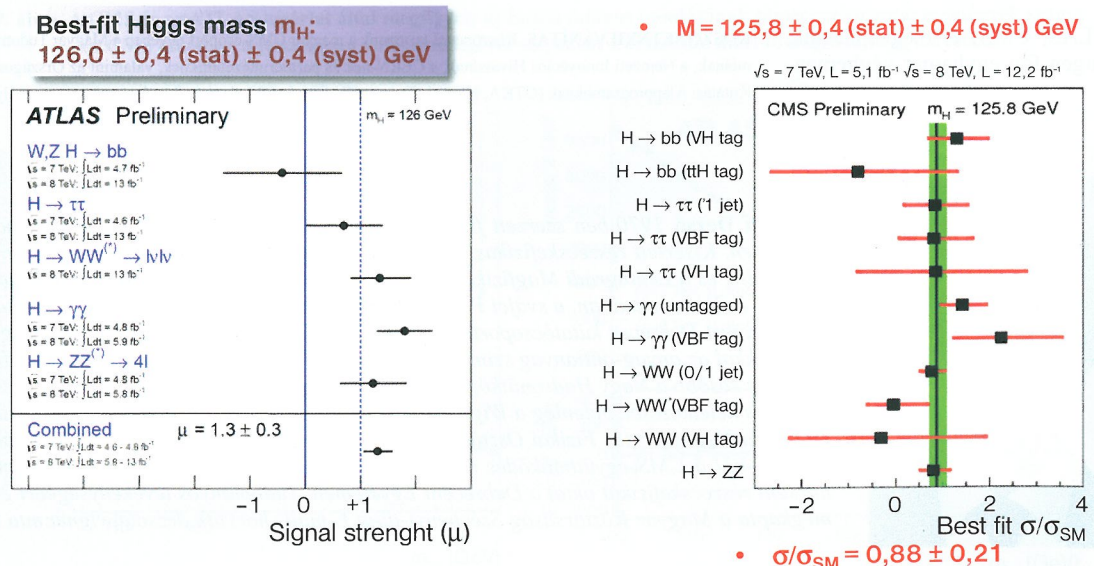
Új jelenségek bármilyen direkt megfigyelésének hiányában ugyanis az (volt) a fizikusok reménye, hogy a Higgs bozonon keresztül jutunk a legtöbb vagy legjobb információhoz az esetle-

ges új fizikáról. Az LHC további működése során és a már tervezett új gyorsítókon a következő kérdésekre kell a kutatóknak választ találniuk.

- Mik a Higgs kvantumszámái, spin, paritás (P), töltésparitás (C),  $SU(2) \times U(1)$  elektromgyenge töltései, mekkorák a Higgs csatolásai a bozonokhoz, fermionokhoz, mekkora a Higgs öncsatolása?
- Milyen fizika árnyékolja le a hierarchia problémához vezető kvantumkorrekciókat, amelyek így nem tudják a Higgs tömegét nagy értékek felé vinni?
- Elemi skalár részecskét találtunk, vagy összetett, elemibb részecskék kötött állapotát fedeztük fel, mint amilyen a 3 kvarkból álló proton vagy kvark-antikvark párból álló  $\pi$ -mezon?
- Egyedülálló részecskével van dolgunk vagy egy gazdagabb kiterjesztett szektor első tagjával?
- Kaput nyit-e az új részecske a SM-semleges, azaz az eddigi belső szimmetriákra (elektromos, gyenge, erős) érzéketlen új fizika irányába?

Ezek a kérdések mind régóta foglalkoztatták a fizikusokat, de az ilyen irányú kutatások már a 2011. decemberi CERN sajtótájékoztatót követően is robbanásszerűen megsokszorozódtak. Akkor az LHC kísérletek még csak egy szűk tartományra szorították be a Higgs lehetséges tömegét. Az elméleti fizikusok többsége mégis meg volt győződve róla, hogy (hamarosan) megvan a Higgs, lásuk hát, mi következik belőle.

1. ábra. A Higgs mért és számított bomlási hatáskeresztmetszetének aránya (ATLAS és CMS kísérlet, 2012. november)



Mi sem bizonyítja ezt jobban, minthogy az alternatív, Higgs nélküli elméleteket vizsgáló PhD diákok nagyon gyorsan hasonló elméletből származó, de összetett Higgsek tulajdonságait, jelenségeit kezdték el kutatni. Arra keressük tehát a választ ebben a cikkben, hogy a középső három kérdés nyomán mi vár ránk a Higgsen túl?

## Helyzetkép – 2012 ősz

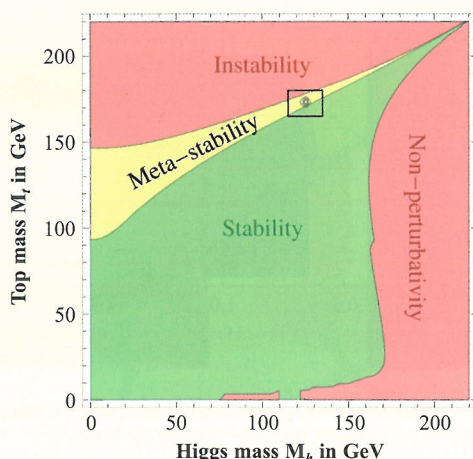
Mint ahogy azt *Horváth Dezső* ebben a kiadványban és *Pásztor Gabriella* a Fizikai Szemle 2012/10-es, CERN különszámában is érdeklődően leírta, a CERN 2012. július 4-ei sajtótájékoztatója a tudomány igazi ünnepe volt. Eufórikus hangulatban a már említett CMS és ATLAS kísérlet is egy új részecske felfedezését jelentette be, amelynek tömegét 125,5 GeV körül egy százaléknyi pontossággal határozták meg. Az eredményt azóta megerősítették és publikálták is. A felfedezett új részecske rendkívül gyorsan elbomlik, ezért csak a bomlási végállapotokból lehet rekonstruálni. A bomlási arányok nagyjából összhangban vannak a SM Higgs részecskére vonatkozó jóslataival (**1. ábra**).

Az elméleti fizikusok mindig a jóslatoktól való kisebb-nagyobb eltéréseket vadásszák, mert ezek újabb, eddig ismeretlen fizika jelei lehetnek, újabb kihívások elé állítva őket. Ezért fogadták izgatott örömmel azt, hogy megvan a Higgs, de a vártnál jó 50%-kal nagyobb arányban bomlik két fotonra és a jósoltnál kissé ritkábban b kvarkokra és  $\tau$  mezonra. Rengeteg új elméleti cikk jelent meg, amelyben ezeket az eltéréseket igyekeztek megmagyarázni. Talán ezek a kis eltérések összeállnak egy jelentős deviációvá, ami miatt a fizikusok azt gondolhatják, hogy a Higgs-részecske felfedezése nem a SM lezárását és kőbe vésését fogja jelenteni, hanem egy új korszak, a SM végének kezdetét ígéri. Miért is örülünk a SM jóslataitól való eltérésnek, milyen következménye lehet a mért 125,5 GeV-es Higgs-tömegnek az új fizikára nézve?

## Vákuum stabilitás

A mért Higgs-tömegnek messzesemenő következményei vannak a világunk vákuumának stabilitására nézve. A Higgs öncsatolásait és tömegét a Higgs-potenciál határozza meg, amely egy negyedrendű tagot is tartalmaz,  $\lambda \cdot |H|^4$ . Ismerve a Higgs tömegét és vákuumbeli (vákuum várható) értékét, legegyszerűbb közelítés-

2. ábra. A Standard Modell (skalár szektorának) stabilitási térképe a top és a Higgs tömeg függvényében



ben kiszámolható az öncsatolás erőssége, ez  $\lambda \approx 0,13$ . De csak úgy, mint ahogy a mérték csatolási állandók változnak a jellemző energiaskálával, nagy energiákon a potenciálban is a  $\lambda(E)$  futó csatolási állandót kell tekinteni. Ha a Higgset leválasztjuk a többi anyagtól és kölcsönhatástól, akkor  $\lambda$  egyre nő az energiával, míg nem felrobban egy Landau-pólusban. Ez lényegében a **2. ábrán** nem-perturbatívként jelölt tartomány. Vegyük figyelembe a fermionok és a Higgs csatolását is, amely a fermionok tömegéért felelős és azzal arányos. Ez a Yukawa-csatolás éppen ellenkezőleg hat, az energia növelésével csökkenti  $\lambda$  értékét, igyekszik negatív értékek felé vinni azt. Ha nagy energiákon  $\lambda$  pozitív marad, akkor stabil a potenciál, ha pedig negatívvá válik, akkor instabil.

A kísérletekben mért nagy top (173 GeV) és kisebb Higgs-tömeg esetén  $\lambda$  kis negatív értékig fut, de ez mégsem jelenti az elmélet végét. A kis értékű negatív  $\lambda$  egy, az általunk ismertnél mélyebb energiájú abszolút minimumot jelöl ki, de szerencsére ebbe a másik minimumba való kvantummechanikai alagút-effektussal való átmenet  $\exp(-1/\lambda)$ -val arányos. Mivel az átmenet élettartama az Univerzum életkoránál jóval nagyobb, metastabil az a minimum, ahol a mi világunk van, és mi magunk is élünk, ezért még hosszú ideig biztonságban vagyunk.

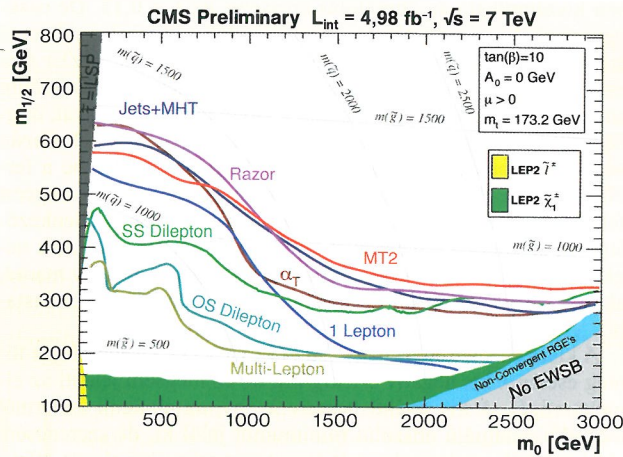
Ha feltételezzük, hogy nincs a SM-t követően semmilyen új fizika a mindmáig rejtélyes kvantumgravitációig, a  $10^{19}$  GeV-es Planck-tömegig, akkor kapjuk a **2. ábra** szerinti képet. Egy metastabil pontban vagyunk nagyon közel, de éppen kívül a stabilitási tartományon. Elképzelhető tehát, hogy a SM jelen formájában akár a Planck-skáláig érvényes, de ekkor több paraméter értéke önkényes és – mint azt látni fogjuk –  $\lambda$ -t 32 jegy pontossággal kell finoman hangolni a számolások minden egyes rendjében, hogy visszakapjuk a mért Higgs-tömeget. Ez lenne a rémálom forgatókönyv, mert leírtuk ugyan az elemi részecskék világát, de messze nem értettük meg teljesen, és reménytelenül messzire kerülnének az útmutatást nyújtó új kísérleti jelenségek.

## Elemi-e a Higgs?

Korábban a természetben talált elemi részecskék mind az anyagot alkotó fermionok vagy a kölcsönhatásokat közvetítő 1-spinű bozonok voltak. A Higgs felfedezésének különlegességét az is adhatja, ha tényleg megerősítést nyer, ez lehet az első felfedezett elemi skalár részecske. Az eredeti szimmetriasértési mechanizmus-hoz ötletet adó szupravezető szilárdtest-fizikai rendszerben is a skalár két elektron kötött állapota volt. Csak az a gond, hogy az elemi skalárokat sújtja a *Takács Gábor* cikkében is említett hierarchia probléma, miszerint a kvantumeffektusok az elektroyenge skálát és a Higgs tömegét is destabilizálják, és csak a paraméterek extrém finom hangolásával kapjuk vissza a mért Higgs-tömeget. A szuperszimmetria (SUSY) megszelídíti a kvantumeffektusokat és megszabadítja az elméletet a finomhangolástól.

A SUSY minden egyes bozonhoz egy új fermion párt, míg fermionhoz egy bozon párt rendel, azonos tömegekkel és csatolásokkal. Mivel az ismert részecskéink (pl. elektron, foton) szuperpárját nem láttuk eddig, ezért a szuperszimmetriának kicsit sérülnie kell, de nem messze az elektroyenge skálától (246 GeV), hogy ne hozzuk vissza a finomhangolást. A szuperszimmetria direkt keresése viszont mindeddig negatív eredményt hozott, sőt a **3. ábrán** látható módon a szuperpartnereknek egyre nehezebbnek és nehezebbnek kell lenniük.

Az igazi nehézséget azonban a 126 GeV-es Higgs-tömeg származtatása okozza. Kiderül, hogy a szuperszimmetrikus elméletekben legalább két, egyenként 4 szabadsági fokú Higgs-mezőnek (dublettnek) kell lennie, és ebből 5 fizikai Higgs részecske marad. Három semleges, köztük két CP páros (h,H), mint a SM Higgs, egy 1 CP páratlan (A) és két ellentétesen töltött (H<sup>±</sup>). A szuperszimmetria olyan erős megszorításokat ad, hogy a legkönnyebb



3. ábra. Korlátok a korlátozott szuperszimmetrikus Standard Modell jellemző skalár és fermion tömegére

h Higgs első közelítésben nem lehet nehezebb a Z bozonnál, azaz 91 GeV-nél. A szuperszimmetria hívei eleinte örömmel fogadták a „könnyű” Higgset, hiszen azt le tudja írni a SUSY elmélet.

De milyen áron? A top kvark szuperpárjának, a sztopnak a kvantumkorrekciói képesek a Higgs-tömeget 126 GeV-re emelni, de ehhez a sztopnak viszonylag könnyűnek kell lennie és a további csatolásokat legjobb esetben is százalékos pontossággal kell beállítani. Ezzel visszahoztuk a kiindulási problémát, a finomhangolást egy sokkal összetettebb, több ismeretlen paramétert tartalmazó elméletben, amelyet éppen a természetellenes hangolások elkerülése érdekében dolgoztunk ki.

A legegyszerűbb szuperszimmetrikus elméletekben a 2012-es előzetes eredmények alapján a szuperpartnerek tömegének már közel 1 TeV felett kell lenniük, ezzel a SUSY elméletek elvesztették vonzerűjüket. Az alacsonyenergiás SUSY, amelyet a gyorsítóknak szeretnénk látni, igen rossz helyzetben van. A SUSY megmaradhat, de kiterjesztett formában, pl. úgy, hogy még további, teljesen új mezőket adunk az elmélethez, vagy a SUSY egy része rejtve marad vagy az új szuper-részecskék egészen nagy tömegűek (ez a „split SUSY”). Továbbra is rengeteg fizikus keresi a SUSY-t a kísérleti adatokban, koncentrálna a finomhangolást elkerülő természetességet ígérő paramétertartományokban. Az LHC ontja a kísérleti adatokat, hétről-hétre születnek új eredmények, de ezek eddig rendre csak kizárási tartományok. Tehát ha a Higgs elemi részecske, azt várjuk, hogy a SM Higgs mellett további elemi skalár részecskéket találhatunk az LHC-n, illetve néhány TeV-ig egyes szuperpartnerek is megmutatkozhatnak a kísérletekben.

Az elemi skalárok létfontosságúak a szuperszimmetria szempontjából is. A szuperszimmetria alapvető része a húrelméleteknek is és ezáltal a sok érdekes eredményt produkáló görbült hátterű gravitáció-szuperszimmetrikus mértékelmélet dualitás megalkotásához is elengedhetetlen (l. Bajnok Zoltán cikkét ebben a számban). Ezeket az ideákat is megerősítene a Higgs elemi volta, de sok kutató keresi annak a lehetőségét, hogy lehet-e mégis a Higgs valamilyen új, ismeretlen összetevők kötött állapota.

### Összetett Higgs

Tudjuk, hogy a SM nem lehet az elemi részecskék végső elmélete, mert sújtja a hierarchia probléma, eddig nem sikerült a gravitációval közös leírást adnia és nem képes leírni az összes észlelt jelenséget sem (l. Takács Gábor cikkét). A hierarchia-problémát megoldhatja, ha feltételezzük, hogy a Higgs nem elemi részecske,

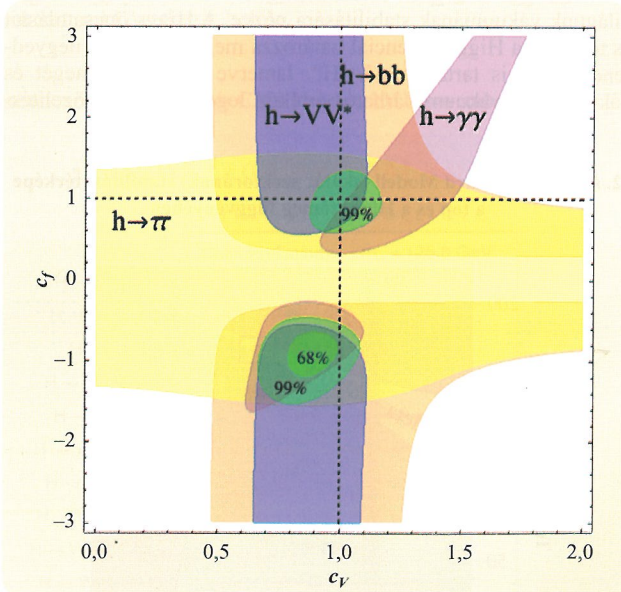
hanem kvark-szerű részecskék kötött állapota, amelyeket valamilyen új „erős kölcsönhatás” tart egyben. Kiderül, hogy ez többféleképpen megtehető. A jól működő modellek közös tulajdonsága, hogy ezekben a Higgs az erős kölcsönhatás pionjaihoz hasonló lesz. Általános tétel biztosítja, hogy egy folytonos szimmetria spontán kisebbre sértésével kapott részecskék, a Goldstone bozonok, első közelítésben nulla tömegűek lesznek és ami a további közelítésekben is kicsi marad\*.

Megfelelő szimmetriacsoport (SO(5) → SO(4) belső 5 és 4 dimenziós térben vett forgatások csoportjának) választásával a kapott pszeudo Goldstone-bozon éppen a Higgs-tér tulajdonságával rendelkezik. (Azért pszeudo mert végül a tömege 0 helyett 126 GeV lesz.)

Az elméletben alacsony energián a SM részecskéket kapjuk egy keskeny rezonanciaként viselkedő Higgs-bozonnal. Az új erős kölcsönhatás további kötött állapotai nagyobb energián érhetőek el csakúgy, mint a például szolgáló kvantum-szindinamikában, ahol a pionok jóval könnyebbek a további mezonoknál, bariónoknál pl. a protonnál. Az új rezonanciák változhatnak modellről modellre. Ezek az elméletek hatással lehetnek a Higgs keresésre azáltal, hogy módosítják a Higgs csatolásait a standard részecskékhez. Természetesen ez modelltől függ, de több esetben folytonosan változtatható, hogy a Higgs elemi vagy teljes egészében összetett állapot.

Az LHC kísérletekkel való összevetésre azonban célszerűbb a Higgs ismert részecskékhez való csatolásait szabad paraméternek tekinteni, és ezek értékeit megszorítani. A legegyszerűbb közelítésben két paraméterünk van, egyik a bozonokhoz való csatolás közös szorzója ( $c_V$ ), a másik az összes fermion csatolásé ( $c_f$ ). A SM természetesen a  $c_V=1, c_f=1$  pont. Minden különböző végállapotú Higgs-mérés kiválaszt egy tartományt, ezt 1s sávokkal ábrázoltuk a 4. ábrán. Az LHC Higgs-mérések együtt kiválasztanak tartományokat, ezek 68 illetve 99% CL-lel láthatók. A SM végül jó összhangban van az adatokkal, de ugyanakkor megjelenik egy kedvezőbb pont is, ahol a Higgs vektorbozonokhoz és fermionokhoz való csatolása ellenkező előjelű. A mérések többsé-

4. ábra. A Higgs-mérések megszorításai a két paraméteres síkon



\*Térelméletben jártasabb olvasók számára megjegyezzük, hogy a Goldstone-bozonok a mexikói kalap formájú potenciálban a minimumon „körbégördülő” módusoknak megfelelő részecskék. Az SO(5)/SO(4) példában 4 Goldstone-ból három adja a  $W_{\pm, Z}$  longitudinális komponensét, negyedik a Higgs-t.)

généál az előjel nem számít, mert az eseményszámok a csatolási állandók négyzetével arányosak, kivéve a 2 fotonos végállapotot. A  $H \rightarrow \gamma\gamma$  esetén a W bozon, illetve top kvark hurkokon át történő két bomlás akkor erősíti egymást interferenciával, ha a  $c_V, c_F$  ellenkező előjelűek. Ekkor a Higgs gyakrabban bomlik két fotonra jól egyezve a mérésekkel.

Várhatóan további mérési eredmények kiértékelésével a SM lesz a preferált elmélet, miközben jelenleg még nem ismert olyan elmélet, amelyben természetesen ellenkező előjelű a fermion és bozon csatolás.

Több különböző, kiváló fizikusokból álló csoport is megkapta az 4. ábra szerinti eredményt, aminek egyik fontos üzenete, hogy a fermion fóbias (fermion kerülő) elméletek ki vannak zárva, ez lenne a  $c_F=0$  pont környéke. Azaz a felfedezett, Higgs tulajdonságait mutató részecske egyaránt csatolódik a kölcsönhatásokat közvetítő mértékbozonokhoz és fermionokhoz is, közel akkora csatolással, amely a megfelelő tömegek generálásához kell. A CMS kísérlet legújabb eredményei szerint a Higgs két Z bozonra történő bomlásában a leptonok szögeloszlása enyhén arra utal, hogy a Higgs valóban skalár és nem pszeudoskalár részecske. Nagyon pontosan kell meghatározni a felfedezett skalár részecske összes csatolását, hogy ki tudjuk zárni a Higgs összetett voltát. Természetesen az összetett skalárt eredményező erős dinamika sok új kötött állapotot, továbbá új  $W', Z'$  közvetítő bozonokat is

jósol, de ezek várhatóan mind csak a 1–10 TeV-es energiatarományban jelentkezhetnek közvetlenül.

**Összefoglalva:** a részecskefizika igazi sikere a Higgsre emlékeztető új részecske felfedezése, amelynek tömegét csak mérésből határozhattuk meg. Fontos, hogy a SM nem magyarázza meg az elektroyenge elmélet energiaskáláját ( $v = 246$  GeV). Ha tényleg a Higgset fedeztük fel, kérdés, hogy az elektroyenge skála „természetesen” származik-e egy szuperszimmetrikus, vagy erősen kölcsönható elméletből, vagy meg nem érthető finomhangolások árán kapjuk csak meg. A részecskefizikusok többsége bízott benne, hogy a Higgs csatolásaiban, tulajdonságaiban kimért eltérések utat mutatnak majd a következő érdekes fizikai energiatarományok és jelenségek irányába, de a mérések egyelőre egyre jobban egy SM Higgs felfedezését támogatják. Ekkor viszont a gravitáció és az elektroyenge skála közötti hatalmas különbség és a hierarchia probléma továbbra is magyarázatra vár.

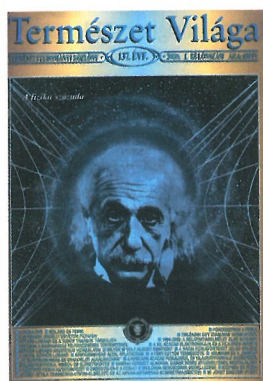
Amint láthatjuk, sok kérdés maradt még nyitva. Van-e köze a sötét anyagnak az elektroyenge fizikához, kijelöl-e a neutrínótömegek generálásának egyszerű modellje, a „see-saw” mechanizmus egy valódi új, köztes energiaszintet, egyesülnek-e az alapvető kölcsönhatások egy nagy elméletben? Részben ezek lehetnek az LHC további, nagyobb energiájú és eseményszámú futásainak, a következő gyorsítók és a jövő fizikusainak nagy kihívásai.



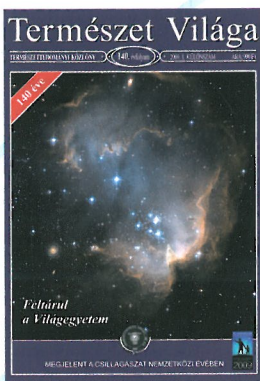
**Cynolter Gábor** (1969) PhD, tudományos főmunkatárs az MTA-ELTE Elméleti Fizikai Kutatócsoportjában. A Fővárosi Fazekas Mihály Gimnáziumban érettségizett matematika tagozatos osztályban. Fizikus diplomát, majd részecskefizikusként PhD fokozatot szerzett az Eötvös Loránd Tudományegyetemen. Hosszabb ideig dolgozott Müncheni Technische Universitat-en, illetve Zürichben az ETH-n, rövidebb ideig a CERN Elméleti Osztályán. Fő kutatási területe a Higgs-bozonhoz és a Standard Modellen túli fizikához kapcsolódó részecskefizikai jelenségek elméleti, fenomenológiai vizsgálata. E-mail: cyn@general.elte.hu

## A Természet Világa különszámai

(amelyek még megvásárolhatók)



A fizika százada (2005)  
Ára: 400 Ft



Feltárul a Világegyetem (2010)  
Ára: 700 Ft



Emberközelben a fizika KFKI-60 (2011)  
Ára: 690 Ft

A különszámok korlátozott példányban megrendelhetők a Kiadónknál, a Tudományos Ismeretterjesztő Társulatnál (1088 Budapest, Bródy Sándor utca 16. Telefon: 327 8965, fax: 327 8969, e-mail: titlap@telc.hu)