

HORVÁTH DEZSŐ

A HIGGS-BOZON



TYPOTEX

Tartalomjegyzék

Bevezető	1
1. A standard modell	9
1.1. Szimmetriák	9
1.2. Elemi részecskék	12
1.3. Kvantumszámok	15
1.4. Tükrözési szimmetriák	16
1.5. Perdület (spin)	18
1.6. Fermionok és bozonok	18
1.7. Izospin	20
1.8. Kölcsönhatások	21
1.9. Kvarckmodell	21
1.10. Elemi kölcsönhatások	23
1.11. Bozonok	24
2. Sérülő szimmetriák	27
2.1. Mértékelmélet	27
2.2. Sérülő szimmetriák	29
2.3. Spontán szimmetriasértés	31

2.4.	A BEH-mechanizmus	33
2.5.	Tömegek létrehozása	34
2.6.	Rejtélyes neutrínók	36
2.7.	Kísérleti ellenőrzés	39
3.	Nagyenergiás mérés technika	41
3.1.	Mikroszerkezet és energia	41
3.2.	Részecskegyorsítók: LEP	44
3.3.	LHC, a nagy hadronütköztető	46
3.4.	Az LHC indulása	48
3.5.	Részecskeészlelés	50
3.6.	A CMS detektor	51
3.7.	Az ATLAS detektor	55
3.8.	ATLAS és CMS	56
3.9.	Eseményanalízis	57
4.	A standard modell Higgs-bozonja	59
4.1.	A Higgs-bozon tulajdonságai	59
4.2.	A Higgs-bozon keletkezése	60
4.3.	A Higgs-bozon bomlása	61
5.	A Higgs-részecske keresése	63
5.1.	LEP, TEVATRON: nincs meg	64
5.2.	LHC: megvan!	67
6.	LHC-eredmények 2013 végén	71
7.	Zárszó	75

Függelék	79
A. Részecskefizikusok, akik a könyvben szerepelnek	81
Satyendra Nath Bose	82
Georges Charpak	84
Pavel Alekszejevics Cserenkov	85
Raymond Davis	86
Paul Dirac	87
Albert Einstein	88
François Englert	90
Enrico Fermi	91
Richard Feynman	92
Murray Gell-Mann	94
Sheldon Glashow	96
Stephen Hawking	97
Werner Heisenberg	99
Peter Higgs	101
Kosiba Maszatosi	102
Leon Lederman	103
Tsung-Dao Lee	104
Emmy Noether	105
Wolfgang Pauli	107
Bruno Pontecorvo	109
Abdus Salam	111
Gerardus t'Hooft	112
Simon van der Meer	114
Martinus Veltman	115
Steven Weinberg	117

Wigner Jenő	118
Frank Wilczek	120
Chien-Shiung Wu	121
Chen-Ning Yang	122
Yukawa Hideki	123
B. Fizikai fogalmak	125
U(1), SU(2), SU(3)	125
Fermionok és bozonok	126
A CPT-invariancia	127
A Dirac-egyenlet	128
Yukawa-potenciál	129
Virtuális részecskék	130
Hatáskeresztmetszet	132
Luminozitás	132
Az LHC működése	133
A paritásértés felfedezése	134
A BEH-mechanizmus	136
A Higgs-bozon tulajdonságai	139
Bomló részecske tömege	140
A Higgs-bozon keresése a LEP gyorsítónál	141
A Higgs-bozon tömege	143
Cserenkov-sugárzás	144
Rejtélyes neutrínók	145
Szuperszimmetria	147
Irodalom	149
Képmelléletek	153

Bevezető

Mottó:

A fizika olyan, mint a szex: biztosan van gyakorlati haszna, de mi nem azért csináljuk.

Richard P. Feynman (*szájhagyomány szerint*)

Éppen negyven évvel ezelőtt nyerte el jelenlegi, végleges¹ formáját a részecskefizika elmélete, amelyet történeti okokból *standard modell*nek hívnak. A világhálón rengeteg leírás található erről az elméletéről és kísérleti igazolásáról. Az érdeklődő olvasónak elsősorban a Wikipédiát ajánlanám, mint eléggé hiteles ismeretforrást. Az persze elsősorban angol nyelvű [1], de egyre bővül a magyarul elérhető szócikkgyűjtemény is [2]. A *Természet Világa* két különszámot is szentelt a részecskefizikának [3] sok színes cikkel. Magam is több ismeretterjesztő cikket írtam róla [4, 5], azok anyagát részben fel is használtam ebben a könyvben. Több előadásom is szerepel a tudományos előadások magyar Videotorium gyűjteményében [6] és két Higgs-bozonos a YouTube-on: egy (remélhetőleg) közérthető, a Typotex Kiadó szerkesztésében [7], egy pedig kimondottan tudományos [8]. Ez utóbbi elsősor-

¹A tudományos kutatásban, természetesen, nincs *végleges*, csak *éppen most legjobbnak látszó!*

ban fizikusoknak szól, a nagyközönség számára is érthető azonban Trócsányi Zoltán előadása, ugyancsak a YouTube-on [9].

Az elmúlt 40 évben a világ adófizetői egyre nagyobb részecskegyorsítókát finanszíroztak számunkra (egymással versenyezve Amerikában, Oroszországban és Nyugat-Európában, Svájc és Franciaország határán), hogy bizonyíthassuk vagy megcáfolhassuk a standard modell érvényét. Valóban, minden elemét sikerült 1995-ig azonosítani, a Higgs-bozon kivételével. 2012-ben azután a világ legnagyobb mérőműszerénél, a Genf közepében, 100 méterrel a föld alatt, 27 km-es köralagútban épített nagy hadron-ütköztető (Large Hadron Collider, LHC) részecskegyorsítónál végre találtunk egy új részecskét a Higgs-bozon tulajdonságaival (vegyük észre az óvatos fogalmazást!). A két nagy LHC-kísérlet, az ATLAS és a CMS összes, 2012-ben gyűjtött adatának elemzése azután megmutatta, hogy az újonnan felfedezett részecske valóban (egy) Higgs-bozon, és legnagyobb valószínűséggel éppen az, amelyet a standard modell alapján megjósoltak. Ez teljesen igazolta a standard modell tömegképződési mechanizmusát (e mechanizmus nélkül a részecskék tömege nem illeszkedik az elméletbe), tehát nem volt meglepő, hogy 2013 októberében a fizikai Nobel-díjat François Englert és Peter Higgs (90. és 101. o.), a mechanizmus első kidolgozói kapták. Bennünket, kísérletezőket, elégedettséggel töltött el, hogy a Nobel-bizottság a díj rövid indoklásában megemlítette a két kísérletet, mint amelyeknek eredménye alapján kapták meg az elméleti fizikusok a díjat.

A felfedezés nem csak a fizikusokat, a közvéleményt is felvillanyozta, hiszen egy olyan részecske, amelyet a világ sok ezer

kutatója 40 évig keres, dollármilliárdokat költve rá, biztosan nagyon érdekes. Jó néhány vicc is kering róla a világhálón. Mivel a Higgs-bozont eredményező matematikai bűvészkedés teszi lehetővé az elemi részecskék tömegének elméleti bevezetését is, a viccek részben a tömeggel kapcsolatosak, habár a tárgyak tömege elsősorban energia eredetű, és nem a Brout–Englert–Higgs-mechanizmus következménye (Robert Brout már nem érte meg a felfedezést, így lemaradt a Nobel-díjról).

A CERN bejelentése előtt és után másféle Higgs-bozonos viccek keletkeztek. Közös bennük a hiábavaló keresés motívuma és az, hogy a nagyközönség nem érti. Előtte:

- A bárba besétál egy Higgs-bozon. Azt mondja neki a csapos: *Vigyázzon, magát sokan keresik!*
- A bárba besétál egy Higgs-bozon. A csapos nem érti...
- *Szeretnék végre látni egy jó Higgs-bozonos viccet. Biztosan létezik, de évekbe telhet, amíg rátalálunk.*
- A templomba besétál egy Higgs-bozon. Azt mondja neki a pap: *Magát nem szívesen látjuk itt.* Mire ő: *Pedig nélkülem itt soha nem lesz tömeg!* Angolul az igazi: *But without me how can you have mass?* – ugyanis *mass* a tehetetlen tömeg és embertömegén kívül még *misét* is jelent.

A megfigyelés bejelentése után:

- A bárba besétál egy Higgs-bozon. A csapos megkérdezi: *Na mi van?* Mire ő: *Én!*

- A Higgs-bozon felfedezése rossz viccek ősrobbanásához vezetett.
- A Higgs-bozon felfedezését a fizikusok *tömegesen* ünnepelték.
- A Higgs-mező szabályozása valóban lehetővé tenné a *tömegpusztító* fegyvereket.
- *Nem értem, mi a csuda az, de klassz, hogy felfedezték!*
- *Gondosan ellenőrizni kell. A múltkor is azt hittem, Higgs-bozont találtam az ágyam alatt, de csak egy üveggolyó volt!*
- *Jó, hogy megvagy, Isten-részecske. Én csak egy átlagember vagyok, aki nem ért téged.*
- Összeveszett a top-kvark a Higgs-bozonnal. A kvark elrohant, mert a bozon csak a tömegét emlegette, semmi más nem mondott magáról.

Az utolsó vicc szakértelemről árulkodik, a Higgs-bozon ugyanis arról nevezetes, hogy egyetlen jellemző tulajdonsága a tömeg, valamennyi egyéb részecskejellemzője (töltés és perdület) zérus értékű.

Néhány évvel ezelőtt egy fiatal angol hölgy, Katherine McAlpine (*Alpinekat*, magyarul kb. *Alpesi macska* művésznéven) néhány vidám kollégájával készített *Large Hadron Rap* címen egy klipet, és kitette a YouTube-ra [10]. Ő csodálkozott a legjobban a felvétel hihetetlen népszerűségén, 2012 márciusáig csaknem 8 millió internetező nézte meg. A dal vicces stílusban, de igencsak

pontosan leírja az LHC fizikáját, többek között a Higgs-bozon, az antianyag, a sötét anyag és az őanyag keresését, illetve vizsgálatát.

Könyvemben először vázolom a részecskefizika elméletét: a részecskéket és kölcsönhatásaikat, majd a Higgs-bozont létrehozó mechanizmust. Mivel az utóbbi szimmetriasértésen alapul, és az elméletben minden más szimmetriákon, a bemutatást a szimmetriákkal kell kezdenem. Az elméleti fejezetet a Brout–Englert–Higgs-mechanizmusnak nevezett spontán szimmetriasértés leírása zárja; az adja a neutron és az atommag bomlását előidéző gyenge kölcsönhatás pontos matematikai leírását.

A fizika kísérleti tudomány. Az elmélet bemutatása után tehát vázolnom kell a részecskefizika kísérleti módszereit: a részecskegyorsítókat és -detektorokat, valamint az adatkezelés módszereit. Ezután jön a lényeg: a Higgs-részecske tulajdonságainak leírása, keresési módszerei és az eddig elért eredmények. Végül a zárszóban a kilátásokat foglalom össze. A könyv végén két függelék található: az elsőben (81. o.) a standard modell (némileg véletlenszerűen kiválogatott) megalkotóinak életrajzát foglalom össze ábécésorrendben, a másodikban (125. o.) olyan részecskefizikai alapfogalmakat, amelyek könyvemben többször előfordulnak, de leírásuk megtörné a szöveg logikáját.

A fizikában általában, a részecskefizikában pedig különösen minden leírás a matematika nyelvén történik: egy elméletet akkor fogadunk el, ha annak egyenleteivel a kísérletileg mérhető mennyiségeket ki tudjuk számítani, és a számítások eredménye egyezik a mérésekével. A matematikai leírás alapvető szerepére kitérő példa a kvantumfizika valószínűségi természete. Az atomi

pályákon az elektronok nem mozognak, hanem különböző pontokon különböző valószínűséggel tartózkodnak. Amikor egy pontszerű elektron repül, akkor a tér különböző pontjain különböző, időben változó valószínűséggel tartózkodik. Amikor keletkezik és amikor elnyelődik, pontszerű részecskeként kezelhető, de mozgása valószínűségi hullámként írható csak le, hiszen, például, úgy viselkedik, mintha egy fésű valamennyi részén egyidejűleg áthaladna. Ennek leírására a mindennapi életben használatos fogalmaink nem alkalmasak, de a matematikai egyenleteink minden az elektronokkal kapcsolatos, mérhető mennyiséget tökéletesen visszaadnak, tehát jól írják le azt. Egy orvos barátom, amikor fizikáról beszélgettünk, egyszer csak felkiáltott: *Hiszen nektek, fizikusoknak, mindig egyenletek motoszkaílnak a fejetekben, amikor fizikáról beszéltek! Ezt mindig említsd meg, hogy értsék, miért küzdesz a szavakkal.*

Minden olyan elméletet, amely nem vezet mérhető eredményekre, (nem fizikai) spekulációnak tekintünk. Azoktól az amatőr fizikusoktól, akik azzal jelentkeznek, hogy új, a korábbiaknál jobb elméletet dolgoztak ki valamire, azt szoktuk kérdezni: hány jegy pontossággal egyeznek a számításai a mérések eredményeivel. Ugyanakkor persze könyvemben a matematikai levezetések nem fognak szerepelni: Stephen Hawking (97. o.) szerint minden egyes egyenlet felére csökkenti egy könyv eladhatóságát, de a világhálón, például a Wikipédiában is, az érdeklődő olvasó megtalálja őket tetszőleges mélységben. A részecskefizika meglehetősen bonyolult matematikai apparátusát hihetetlenül egyszerűvé, áttekinthetővé és szemléletessé teszi a *Richard Feynman* (92. o.)

által kidolgozott gráftechnika, amely az egyenleteket folyamat-ábrákká alakítja.

A részecskefizikai kutatóintézetek folyamatosan fejlesztik oktatóanyagukat. Érdeemes nézni a CERN angol nyelvű lapjait [11]. Nagyon sok érdekes blog is olvasható a részecskefizikáról angolul, itt csak néhány igazán hiteles forrásra említenék példát: sok részecskefizikus vesz részt a *Quantum Diaries (Kvantumnapló)* [12] és a *Science 2.0* [13] vezetésében, figyelemre méltó Jester [14] és Matthew Strassler blogja [15]. Az amerikai Particle Data Group (részecskefizikai adatok csoportja) is üzemeltet egy *Részecskeka-land (Particle Adventure)* című cikkgyűjteményt [16]. Magyarul Simon Tamás (origo) üzemeltet bloggyűjteményt a CERN főbb eseményeiről [17]. 2006 óta minden év augusztusában magyar nyelvű továbbképzést szervezünk hazai fizikatanárainknak a CERN-ben, azok lapjain [18] megtalálható az előadások teljes anyaga, videofelvétellel együtt.

Köszönöm Trócsányi Zoltánnak, kollégámnak és barátomnak a kézirat elolvasását és hasznos megjegyzéseit, valamint a Magyar Tudományos Akadémia Fizikai Osztályának e könyv megjelentetéséhez nyújtott erkölcsi és anyagi támogatását. A kutatómunkát az Országos Kutatási Alapprogramok (OTKA K103917 és K109703) támogatta.