

Horváth–Trócsányi

Bevezetés az elemi részek fizikájába

Horváth Dezső
Trócsányi Zoltán

Bevezetés az elemi részek fizikájába

Második, javított
és bővített kiadás

A könyv a Magyar Tudományos Akadémia támogatásával készült.



© Horváth Dezső, Trócsányi Zoltán, Typotex, Budapest, 2017, 2021

Engedély nélkül semmilyen formában nem másolható!

ISBN 978 963 493 163 8

ISSN 1788-2494

Kedves Olvasó!

Köszönjük, hogy kínálatunkból választott olvasnivalót!

Újabb kiadványainkról és akcióinkról a www.typotex.hu

és a [facebook.com/typotexkiado](https://www.facebook.com/typotexkiado) oldalakon értesülhet.

Typotex Kiadó

Alapította Votisky Zsuzsa, 1989

A kiadó az 1795-ben alapított Magyar Könyvkiadók
és Könyvterjesztők Egyesületének tagja.

Felelős kiadó: Németh Kinga

Főszerkesztő: Horváth Balázs

A kötetet gondozta: Erő Zsuzsa

A borítót készítette: Szalay Éva

Nyomdai kivitelezés: Belvárosi Nyomda Zrt.

Felelős vezető: Derecskey László

Tartalomjegyzék

Előszó	13
--------	----

I. Részecskefizikai fenomenológia

1. Részecskék és szimmetriák	19
1.1. Szimmetriák a részecskefizikában	19
1.2. Szimmetriacsoportok és perdület	20
1.3. Fermionok és bozonok	22
1.4. Koordinátatükörzés: paritás	23
1.5. Töltéstükörzés	25
1.6. CPT -invariancia	25
1.7. Izospin és ritkaság	27
Feladatok	29
2. Amit a kísérletben mérünk	31
2.1. Hatáskeresztmetszet	31
2.2. Rezonancia	32
Feladatok	33
3. Kvarkmodell	35
3.1. Színes kvarkok	35
3.2. Színkölcsonhatás, kvantum-színdinamika	36
3.3. Emlékeztető: a perdületek összegzése	37
3.4. A legkönnyebb mezonok	38
3.5. Mezon-nonett (íz- $SU(3)$)	38
3.6. Alapállapotú barionok	41
3.7. Barion-multiplettek	41
3.8. A három fermioncsalád	42
Feladatok	44
4. Dirac-egyenlet	45
4.1. Kovariáns formalizmus	45
4.2. Gamma-mátrixok	46
4.3. Spinorok bilineáris szorzatai	46

4.4.	Szabad fermion	47
4.5.	Lagrange-függvény és mozgásegyenlet	48
4.6.	A fermionáram megmaradása	48
4.7.	Izospin-algebra és -megmaradás	49
4.8.	Proton mint kvarkatom	50
	Feladatok	51
5.	Kölcsönhatások	53
5.1.	Háromféle kölcsönhatás	53
5.2.	Elektromágneses kölcsönhatás	54
5.3.	Kvantum-elektrodinamika (QED)	55
5.4.	Mandelstam-változók	56
5.5.	Erős kölcsönhatás	59
5.5.1.	Színöltés	59
5.5.2.	Magerők	59
5.5.3.	Lokális $SU(3)$ invariancia	60
5.5.4.	Gluonok	60
5.6.	Elektrogyenge kölcsönhatás	62
5.7.	Elemi bozonok	64
	Feladatok	64

II. Kísérleti módszertan

6.	Részecskegyorsítók	69
6.1.	Mágnesek: terelés és fókuszálás	69
6.2.	Részecskegyorsítás	70
6.3.	Ütközőnyalábok	71
6.4.	Fluxus és luminozítás	71
6.5.	Nyalábhűtés	72
6.6.	A CERN gyorsítókomplexuma a LEP időszakában	72
6.6.1.	Elektronok és pozitronok	73
6.6.2.	Protonok	74
6.6.3.	Nehéz ionok	75
6.6.4.	Antiprotonok	75
6.7.	Más gyorsítók	75
6.7.1.	A Fermilab Tevatronja	75
6.7.2.	HERA DESY-ben	76
6.7.3.	RHIC a Brookhaveni Nemzeti Laboratóriumban	76
6.8.	A CERN gyorsítóberendezései az LHC időszakában	76
6.8.1.	LHC, a nagy hadronütköztető	77
6.8.2.	Neutrínók	79
6.8.3.	Antiprotonok	79
	Feladatok	81

7.	Detektorok, kalorimetria	83
7.1.	Kalorimetria	83
7.2.	Energiaveszteség anyagban	84
7.3.	Részecskék azonosítása	87
7.4.	Detektortípusok	88
7.4.1.	Sokszálas kamrák	88
7.4.2.	Szcintillációs detektorok	89
7.4.3.	Zápor-detektor	91
7.4.4.	Cserenkov-detektor	91
7.4.5.	Átmeneti sugárzás	92
7.5.	A CMS- (Compact Muon Solenoid-) detektor	92
	Feladatok	93
8.	Eseményregisztráció	95
8.1.	LEP-események	96
8.2.	Merőleges lendület, (pseu)rapiditás	96
8.3.	A t-kvark megfigyelése	98
8.4.	Rejtélyes események	99
	Feladatok	99
9.	Adatelemzés	101
9.1.	A részecskefizikusok statisztikus módszerei	101
9.2.	A statisztikus analízis alapfogalmai	103
9.3.	Paraméterillesztés	104
9.3.1.	Az illesztés jósága	104
9.3.2.	Konfidenciaszint	105
9.4.	Paraméterek becslése (illesztése)	106
9.4.1.	Számtani közép és standard deviáció	106
9.4.2.	Lineáris illesztés	108
9.4.3.	Nemlineáris illesztés	108
9.5.	Bizonytalanságok	110
9.6.	Alsó-felső határ	112
9.7.	Monte-Carlo-szimuláció	113
9.8.	Eseményválogatás	113
	Feladatok	114

III. Alapvető kísérletek

10.	A kvarkmodell kísérleti ellenőrzése	119
10.1.	Három leptoncsalád	119
10.1.1.	Z-szélesség	119
10.1.2.	Láthatatlan szélesség és családok	120
10.2.	Kvarkok és gluonok: hadronzaporok	121
10.3.	Tört töltésértékek	121

10.3.1. Semleges vektormezonok	122
10.3.2. Pionszóródás	122
10.4. Színek	123
Feladatok	124
11. Paritássértés, kaon, müon	127
11.1. Paritássértés	127
11.1.1. A $\tau - \Theta$ paradoxon	127
11.1.2. Wu kísérlete	127
11.1.3. Paritássértés pionbomlásban	128
11.1.4. Müonspin-rotáció (μ SR)	129
11.2. A müon anomális mágneses momentuma	130
11.2.1. $(g - 2)_\mu$: nemrelativisztikus mérés	131
11.2.2. $(g - 2)_\mu$ relativisztikus müonokkal	131
11.2.3. $(g - 2)_\mu$ mágikus lendülettel	132
Feladatok	133
12. Kaonok és CP -sértés	135
12.1. Kaonok	135
12.2. Semleges kaonok	136
12.2.1. Kaonregzés	137
12.3. CP -sértés	138
Feladatok	140
13. Neutrínók	143
13.1. A neutrínók megfigyelése	143
13.1.1. Gyenge áramok	143
13.1.2. A neutrínók tömege	144
13.2. Neutrínós rejtélyek	145
13.2.1. A Nap neutrínói	145
13.3. A neutrínó ízregzése	146
13.3.1. Fenomenológia	146
13.3.2. A Szuper-Kamiokande-kísérlet	147
13.3.3. A SNO-kísérlet (1999–2003)	148
13.3.4. Steril neutrínók?	149
13.3.5. Nagy távolságú neutrínókísérletek	150
13.4. A neutrínóknak tömege van	150
Feladatok	151
14. A Higgs-bozon	153
14.1. A Higgs-bozon keresése	153
14.2. Kizárás a LEP-nél	155
14.3. Megfigyelés az LHC-nál	156
14.3.1. A sajtó reakciói	158
14.3.2. A megfigyelések	159
14.3.3. Az valóban a Higgs-bozon?	159

14.4. A vákuum stabilitása	160
14.5. BEH-mező és felfűvódás	162
Feladatok	163
15. Nehézion-fizika	165
15.1. Hadronzápor-kioltás	167
15.2. Nehézion-fizika az LHC-nál	167
Feladatok	168
16. Gyakorlati alkalmazás	169
16.1. Informatika	169
16.1.1. Világháló	169
16.1.2. Számítógépes gridhálózat	170
16.1.3. Számítógépes szimuláció	170
16.2. Sugárzás	170
16.3. Részecskegyorsítók	171
16.4. Orvosi diagnosztika	171
16.5. Terápia besugárzással	172
16.6. Teleterápia	172
16.7. Hadronterápia	173
16.8. Neutronterápia	173
16.9. Összegzés	174
Feladatok	174
17. Színes ábrák	177
IV. Az elemi részek standard modellje	
Előszó az elméletet tárgyaló részhez	211
18. Mértékelméletek a standard modellben	213
18.1. A standard modell mértékcsoportja	213
18.2. A QED alapjai	214
Feladatok	218
18.3. Hatáskeresztmetszet	219
Feladatok	222
18.4. Kvantum-színdinamika	222
Feladatok	227
18.5. A színelgebra alapjai	227
Feladatok	229
18.6. Tudunk mindent?	230
18.7. A klasszikus Lagrange-függvény szimmetriái	232
Feladatok	235
18.8. $SU(N)$ amplitúdók fagráf-közelítésben	236

18.9. Spinorhelicitás-formalizmus	237
Feladatok	241
19. Elektron-pozitron szétsugárzása hadronokba	243
19.1. Elektron-pozitron szétsugárzás értelmezése a perturbációs számításban	243
19.2. A QCD ultraibolya-renormálása	244
Feladat	249
19.3. A futó csatolás	250
Feladat	254
19.4. A kvarkok tömege és QCD kvarktömegek nélkül	256
19.5. A renormálás és a renormálás csoport-egyenlet következményei	258
Feladatok	259
19.6. $R_{e^+e^-}$ NLO-pontossággal	260
19.6.1. Virtuális korrekció	260
19.6.2. Valós korrekció négy téridő-dimenzióban	267
19.6.3. Valós korrekció tetszőleges téridő-dimenzióban	269
Feladatok	274
19.7. A szingularitások fizikai okai	276
19.7.1. Alakváltozók	277
Feladatok	278
19.7.2. Záporalgoritmusok	279
Feladat	283
19.8. $ \mathcal{M}_n ^2$ faktorizációja a lágygluon-kibocsátás határesetében	284
19.9. Faktorizáció a párhuzamos határesetben	286
Feladatok	288
19.9.1. A valós korrekciók regularizációja levonással	289
20. Mélyen rugalmatlan lepton-proton ütközések	293
20.1. Az ütközések kinematikája	293
20.2. A céltárgy szerkezetének parametrizációja	294
20.3. DIS a partonmodellben	295
20.4. A proton szerkezetének meghatározása	297
Feladat	298
20.5. A feljavított partonmodell: perturbatív QCD	298
Feladat	301
20.6. Faktorizáció a DIS-ben	301
Feladat	302
20.7. DGLAP-egyenletek	303
Feladat	306
21. Hadronütközések	307
21.1. A faktorizációs tétel	307

21.2. Elégedettek vagyunk?	309
21.3. Események modellezése	309
21.4. Összefoglalás	311
22. Elektroyenge kölcsönhatás a standard modellben	313
22.1. Weinberg-keveredés	313
Feladat	316
22.2. $U(1)$ Brout–Englert–Higgs-mechanizmus	317
22.3. BEH-mechanizmus a standard modellben	319
Feladat	323
22.4. A Glashow–Iliopoulos–Maiani-mechanizmus	323
22.5. A fermionok tömegei	324
Feladat	325
22.6. Ízek keveredése	326
Feladat	328
22.7. A standard modell paramétereit és Feynman-szabályait	329
Feladatok	332
22.8. Neutrínók keveredése és ízrezgése	333
Feladat	341
22.9. Anomáliák kiejtése	341
Feladat	345
Zárszó	347
Irodalomjegyzék	349
Tárgymutató	353

Előszó

MOTTÓ:

- Olvasd föl – parancsolta a Király a fehér Nyuszinak. A fehér Nyuszi feltette pápaszemét.
- Hol kezdjem, felség? – kérdezte.
- Kezdd a kezdetén – mondta a Király –, és leghelyesebb, ha a végén végzed.

*Lewis Carroll: Alice Csodaországban
(Kosztolányi Dezső fordítása)*

A Természet tanulmányozásának egyik alapvető módszere az anyag szerkezetének egyre mélyebb, azaz egyre kisebb részletekre terjedő tanulmányozása, ami egyre kisebb méretű dolgok vizsgálatát jelenti. A természettudományok történetében egyre újabb részecskék jelentek meg, amelyeket *eleminek* gondoltunk: Anaximenesz és Demokritosz négy *atomja* (*a-tom: oszthatatlan*), *atomok/elemek* Daltonnál és Mengyelejevnél, Rutherford *atommagja*, majd a sok, fokozatosan felfedezett „elemi” részecske, amelyek közül a legismertebb az elektron, a proton, a neutron és a neutrínók. 1930 és 1960 között sok száz ilyen részecskét fedeztek fel, tehát az *elemi részecske* új, mélyebb szintjére volt szükség, és megszületett a kvarkmodell. Látni fogjuk, hogy a klasszikus részecskéink közül az elektron és a neutrínók valóban elemiek, de a proton és a neutron összetett részecske. Ezt a fejlődést a standard modell (SM) megszületése zárta le a hatvanas évek végén, és máig valamennyi kísérleti adat igazolni látszik.

Tankönyvünkben összegezzük a részecskefizika jelenlegi állását bevezető szinten, fizikushallgatók számára. Az első három részt (legnagyobb rész Horváth Dezső műve) haladó BSc- és kezdő MSc-hallgatóknak szánjuk, míg a negyedik, elméleti rész (Trócsányi Zoltán tollából) részecskefizikára szakosodó haladó MSC- és kezdő PhD-hallgatóknak szól, megkísérelve a bevezetést a meglehetősen bonyolult matematikai formalizmusba. A kétlépcsős megközelítésben ugyanazoknak a jelenségeknek egyre mélyebb megértését kínáljuk. Célunk az, hogy átfogó és remélhetőleg felfogható képet nyújtsunk a témáról olyan szinten, amelyet heti 10 órában egy akadémiai év alatt el lehet sajátítani. Ha az olvasónak helyenként olyan érzése támad, hogy nem teljes az adott információ, az nem az elmélet, hanem a szerzők hibája. Az elmélet egészen pontos, és előrejelzéseit minden konkrét kísérleti adat a legnagyobb pontossággal igazolja. A kísérleteket átfogóan összegzi az évente megújított és két évente újrapublikált *Particle Physics Review* [Zyla et al., 2020]; a mélyebben érdeklődő hallgatóknak elméleti bevezetesként Halzen

és Martin [Halzen and Martin, 1984], Collins, Martin és Squires [Collins et al., 1989], valamint Perkins [Perkins, 1982] könyveit ajánljuk. Az utóbbi szemlélteti a klasszikus alapvető kísérleteket is.

A kísérleti részecskefizikát nagyenergiás fizikának is szokták hívni, mert a nagy energiájú részecskék ütköztetése a kísérletek alapvető módszere. Az energiát *elektronvolt*, *eV* egységben mérjük: erre tesz szert egy elektron 1 V feszültségen való áthaladásakor. Az anyag finomszerkezetének kutatása az optikai mikroszkóppal kezdődött; annak térbeli felbontását az ~ 1 eV energiájú látható fény 10^{-5} m-es hullámhossza korlátozta a baktériumok méretére. Kisebb részletek megismeréséhez rövidebb hullámhossz szükséges: az atomok (10^{-10} m) vizsgálatára röntgen- vagy elektronnyaláb keV energiával ($1 \text{ keV} = 1000 \text{ eV}$), az atommagéra (10^{-14} m) már MeV (10^6 eV) és GeV (10^9 eV) közöttiekre, amíg az eddig megismert legkisebb összetevőkére, a pontszerűnek feltételezett, de 10^{-18} m-nél kisebb kvarkokéra már TeV (10^{12} eV) felettire. Nagyobb energia rövidebb hullámhosszt, azaz kisebb részletekre való érzékenységet jelent, az anyag szerkezetének finomabb tanulmányozását. Jelen tudásunk szerint az anyag legkisebb alkatrészei, a standard modell alapvető részecskéi valóban elemiek: pontszerűek és belső szerkezet nélküliek.

Könyvünkben a részecskefizika *természetes* egységrendszerét¹ alkalmazzuk, amelyben a vákuumbeli fénysebesség és a redukált Planck-állandó egységnyi: $c = 1$, $\hbar = h/(2\pi) = 1$; ebben a rendszerben a távolság és a idő egysége egyaránt inverz energia, a részecskefizikában meghonosodott rendszerben GeV^{-1} (1. táblázat).

Mennyiség	MKS	részecskefizika	természetes egység	$\hbar = 1$ $c = 1$
Energia	1 J	$6,24 \cdot 10^9 \text{ GeV}$	GeV	GeV
Lendület	1 kg m/s	$5,61 \cdot 10^{26} \text{ GeV}/c$	GeV/c	GeV
Tömeg	1 kg	$5,61 \cdot 10^{26} \text{ GeV}$	GeV/c^2	GeV
Távolság	1 m	$5,07 \cdot 10^{15} \text{ GeV}^{-1}$	$\hbar c/\text{GeV}$	$1/\text{GeV}$
Idő	1 s	$1,52 \cdot 10^{24} \text{ GeV}^{-1}$	\hbar/GeV	$1/\text{GeV}$
Elektron-töltés	$1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$	$\sqrt{4\pi\epsilon_0\alpha\hbar c}$	$\sqrt{4\pi\epsilon_0\hbar c\alpha}$	$\sqrt{4\pi\epsilon_0\alpha}$

1. táblázat. A részecskefizika természetes egységei: $\alpha \sim 1/137$ a finomszerkezeti állandó és $\epsilon_0 = 8,8 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$ a vákuum elektromos permeabilitása. Az utolsó oszlopban csak energiaegységek jelennek meg, ami lehetővé teszi, hogy *tömegegységet* használjunk, a hosszúság egysége például GeV^{-1}

¹ Egy tudományág természetes egységei más tudományágak művelői számára egészen bizarrak lehetnek!

Az 1. táblázat egységeit használjuk tehát két kivétellel. Az első a lendület, amelyet ugyan energiaegységben, például GeV-ben mérnénk, de a félreértés elkerülése végett GeV/c-ben írjuk ki. A másik az elektromos töltés, amelyre többnyire csak a hagyományos, $\sqrt{4\pi\alpha}$ jelölést tekintjük, azaz $\epsilon_0 = 1$ -et használunk, de ezek egyike sem okozhat zavart a tárgyalásban.

Tankönyv lévén, nem monográfia, csupán a tudománytörténeti szempontból kiemelt jelentőségű eredeti publikációkra hivatkozunk. Az olvasó, érdeklődési szintjének megfelelően, minden kérdésére választ talál a világhálón, bár elsősorban angol nyelven. Egyszerű magyarázatokat a Wikipédia (<http://en.wikipedia.org/> vagy <https://hu.wikipedia.org/wiki/>), a Hyperphysics (<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hph.html>) és a Google Scholar (<http://scholar.google.com/>) kínál, az inSpire (<http://inspirehep.net/>) viszont a részecskefizika teljes publikációs adatbázisát tartalmazza könnyen kereshető formában. A már korábban emlegetett *Particle Physics Review* [Zyla et al., 2020] is kitűnő – és főleg megbízható – áttekintő cikkeket tartalmaz. A részecskefizikában a megbízhatóság különösen fontos, hiszen a fizikai kutatás nemzetközi élvonalát képviseli, tehát tele van spekulációval, ellenőrizetlen ötlettel és nem megerősített (többnyire később meg is cáfolt) kísérleti eredménnyel.

A szerzők kutatómunkájuk és a jelen könyv kiadásának támogatásáért köszönettel tartoznak az Országos Tudományos Kutatási Alapprogramoknak (OTKA K101482, K103917, K109703 pályázatok), az új Széchenyi-tervnek (TÁMOP 412D) és a Magyar Tudományos Akadémiának.