

Tartalomjegyzék

Előszó	13
I. Részecskefizikai fenomenológia	19
1. Részecskék és szimmetriák	19
1.1. Szimmetriák a részecskefizikában	19
1.2. Szimmetriacsoportok és perdület	20
1.3. Fermionok és bozonok	21
1.4. Koordinátatükrozés: paritás	23
1.5. Töltéstükrozés	25
1.6. CPT -invariancia	25
1.7. Izospin és ritkaság	26
Feladatok	28
2. Kvarckmodell	29
2.1. Színes kvarkok	29
2.2. Színkölsönhatás, kvantum-színdinamika	30
2.3. Emlékeztető: a perdületek összegzése	31
2.4. A legkönnyebb mezonok	31
2.5. Mezon-nonett (íz- $SU(3)$)	31
2.6. Alapállapotú barionok	34
2.7. Barion-multiplettek	35
2.8. A három fermioncsalád	35
Feladatok	37
3. Dirac-egyenlet	39
3.1. Kovariáns formalizmus	39
3.2. Gamma-mátrixok	40
3.3. Spinorok bilineáris szorzatai	40
3.4. Szabad fermion	41
3.5. Lagrange-függvény és mozgásegyenlet	42
3.6. A fermionáram megmaradása	42
3.7. Izospin-algebra és -megmaradás	43
3.8. Proton mint kvarkatom	44

Feladatok	45
4. Kölcsönhatások	47
4.1. Háromféle kölcsönhatás	47
4.2. Elektromágneses kölcsönhatás	48
4.3. Kvantum-elektrodinamika (QED)	49
4.4. Mandelstam-változók	50
4.5. Erős kölcsönhatás	53
4.5.1. Színtöltés	53
4.5.2. Magerők	53
4.5.3. Lokális $SU(3)$ invariancia	54
4.5.4. Gluonok	54
4.6. Elektroyenge kölcsönhatás	56
4.7. Elemi bozonok	58
Feladatok	59
II. Kísérleti módszertan	63
5. Részecskegyorsítók	63
5.1. Mágnesek: terelés és fókuszálás	64
5.2. Részecskegyorsítás	64
5.3. Ütközőnyalábok	65
5.4. Fluxus és luminozítás	65
5.5. Nyalábhűtés	66
5.6. A CERN gyorsítókomplexuma a LEP időszakában	66
5.6.1. Elektronok és pozitronok	67
5.6.2. Protonok	69
5.6.3. Nehéz ionok	69
5.6.4. Antiprotonok	69
5.7. Más gyorsítók	69
5.7.1. A Fermilab Tevatronja	70
5.7.2. HERA DESY-ben	70
5.7.3. RHIC a Brookhaveni Nemzeti Laboratóriumban	70
5.8. A CERN gyorsítóberendezései az LHC időszakában	71
5.8.1. LHC, a Nagy Hadronütköztető	71
5.8.2. Neutrínók	73
5.8.3. Antiprotonok	73
Feladatok	76
6. Detektorok, kalorimetria	77
6.1. Kalorimetria	77
6.2. Energiavesztés anyagban	78
6.3. Részecskék azonosítása	81
6.4. Detektortípusok	82

6.4.1.	Sokszálas kamrák	82
6.4.2.	Szcintillációs detektorok	83
6.4.3.	Zápor-detektor	84
6.4.4.	Cserenkov-detektor	85
6.4.5.	Átmeneti sugárzás	86
6.5.	A CMS (Compact Muon Solenoid) detektor	86
	Feladatok	87
7.	Eseményregisztráció	89
7.1.	LEP-események	90
7.2.	Merőleges lendület, (pszeudo)rapiditás	91
7.3.	A t-kvark megfigyelése	92
7.4.	Rejtélyes események	93
	Feladatok	93
8.	Adatelemzés	95
8.1.	A részecskefizikusok statisztikus módszerei	95
8.2.	A statisztikus analízis alapfogalmai	97
8.3.	Paraméterillesztés	98
8.3.1.	Az illesztés jósága	98
8.3.2.	Konfidenciaszint	99
8.4.	Paraméterek becslése (illesztése)	100
8.4.1.	Számtani közép és standard deviáció	100
8.4.2.	Lineáris illesztés	101
8.4.3.	Nemlineáris illesztés	102
8.5.	Bizonytalanságok	103
8.6.	Alsó-felső határ	105
8.7.	Monte-Carlo-szimuláció	106
8.8.	Eseményválogatás	106
	Feladatok	107
III. Alapvető kísérletek		111
9.	A kvarkmodell kísérleti ellenőrzése	111
9.1.	Amit mérünk	111
9.1.1.	Hatáskeresztmetszet	111
9.1.2.	Rezonancia	112
9.2.	Három leptoncsalád	113
9.2.1.	Z-szélesség	113
9.2.2.	Láthatatlan szélesség és családok	114
9.3.	Kvarkok és gluonok: hadronzáporok	115
9.4.	Tört töltésértékek	116
9.4.1.	Semleges vektormezonok	116
9.4.2.	Pionszóródás	116
9.5.	Színek	117

Feladatok	118
10. Paritássértés, kaon, müon	121
10.1. Paritássértés	121
10.1.1. A $\tau - \Theta$ paradoxon	121
10.1.2. Wu kísérlete	121
10.1.3. Paritássértés pionbomlásban	122
10.1.4. Müonspin-rotáció (μ SR)	123
10.2. A müon anomális mágneses momentuma	124
10.2.1. $(g - 2)_\mu$: nemrelativisztikus mérés	125
10.2.2. $(g - 2)_\mu$ relativisztikus müonokkal	125
10.2.3. $(g - 2)_\mu$ mágikus lendülettel	126
Feladatok	127
11. Kaonok és CP -sértés	129
11.1. Kaonok	129
11.2. Semleges kaonok	130
11.2.1. Kaonrezgés	131
11.3. CP -sértés	132
Feladatok	134
12. Neutrínók	137
12.1. A neutrínók megfigyelése	137
12.1.1. Gyenge áramok	137
12.1.2. A neutrínók tömege	138
12.2. Neutrínós rejtélyek	139
12.2.1. A Nap neutrínói	139
12.3. A neutrínó ízrezgése	140
12.3.1. Fenomenológia	140
12.3.2. A Szuper-Kamiokande-kísérlet	141
12.3.3. A SNO-kísérlet (1999–2003)	142
12.3.4. Steril neutrínók?	143
12.3.5. Nagy távolságú neutrínókísérletek	144
12.4. A neutrínóknak tömege van	145
Feladatok	146
13. A Higgs-bozon	147
13.1. A Higgs-bozon keresése	147
13.2. Kizárás a LEP-nél	149
13.3. Megfigyelés az LHC-nál	150
13.3.1. A sajtó reakciói	152
13.3.2. A megfigyelések	153
13.3.3. Az valóban a Higgs-bozon?	153
13.4. A vákuum stabilitása	154
13.5. BEH-tér és infláció	156
Feladatok	157

14. Nehézion-fizika	159
14.1. Hadronzápor-kioltás	161
14.2. Nehézion-fizika az LHC-nál	161
Feladatok	162
15. Gyakorlati alkalmazás	163
15.1. Informatika	163
15.1.1. Világháló	163
15.1.2. Számítógépes gridhálózat	164
15.1.3. Számítógépes szimuláció	164
15.2. Sugárzás	164
15.3. Részecskegyorsítók	165
15.4. Orvosi diagnosztika	165
15.5. Terápia besugárzással	166
15.6. Teleterápia	167
15.7. Neutronterápia	168
15.8. Összegzés	168
Feladatok	168
16. Színes ábrák	169
IV. Az elemi részek standard modellje	203
Előszó az elméletet tárgyaló részhez	203
17. Mértékelméletek a standard modellben	205
17.1. A standard modell mértékcsoportja	205
17.2. A QED alapjai	206
Feladatok	210
17.3. Hatáskeresztmetszet	211
Feladatok	214
17.4. Kvantum-színdinamika	214
Feladatok	218
17.5. A színalgebra alapjai	219
Feladatok	221
17.6. Tudunk mindent?	222
17.7. A klasszikus Lagrange-függvény szimmetriái	224
17.8. $SU(N)$ amplitúdók fagráf-közelítésben	228
17.9. Spinorhelicitás-formalizmus	229
Feladatok	233
18. Elektron-positron szétsugárzása hadronokba	235
18.1. Elektron-positron szétsugárzás értelmezése a perturbációszámításban	235

18.2. A QCD ultraibolya-renormálása	236
Feladatok	242
18.3. A futó csatolás	242
Feladatok	247
18.4. A kvarkok tömege és QCD kvarktömegek nélkül	248
18.5. A renormálás és a renormálásicsoport-egyenlet következményei	250
Feladatok	252
18.6. $R_{e^+e^-}$ NLO-pontossággal	252
18.6.1. Virtuális korrekció	252
18.6.2. Valós korrekció négy téridő-dimenzióban	259
18.6.3. Valós korrekció tetszőleges téridő-dimenzióban	261
Feladatok	266
18.7. A szingularitások fizikai okai	268
18.7.1. Alakváltozók	269
Feladatok	270
18.7.2. Záporalgoritmusok	271
Feladat	276
18.8. $ \mathcal{M}_n ^2$ faktorizációja a lágygluon-kibocsátás határesetében	276
18.9. Faktorizáció a párhuzamos határesetben	278
Feladatok	281
18.9.1. A valós korrekciók regularizációja levonással	282
19. Mélyen rugalmatlan lepton-proton ütközések	285
19.1. Az ütközések kinematikája	285
19.2. A céltárgy szerkezetének parametrizációja	286
19.3. DIS a partonmodellben	287
Feladat	288
19.4. A proton szerkezetének meghatározása	289
Feladat	290
19.5. A feljavított partonmodell: perturbatív QCD	290
Feladat	293
19.6. Faktorizáció a DIS-ben	293
Feladat	294
19.7. DGLAP-egyenletek	295
Feladat	298
20. Hadronütközések	299
20.1. A faktorizációs tétel	299
20.2. Elégedettek vagyunk?	301
20.3. Események modellezése	301
20.4. Összefoglalás	303

21. Elektroyenge kölcsönhatás a standard modellben	305
21.1. Weinberg-keveredés	305
Feladat	308
21.2. $U(1)$ Brout–Englert–Higgs-mechanizmus	309
21.3. BEH-mechanizmus a standard modellben	312
Feladatok	315
21.4. A Glashow–Iliopoulos–Maiani-mechanizmus	315
21.5. A fermionok tömegei	316
Feladatok	317
21.6. Ízek keveredése	318
Feladatok	320
21.7. A standard modell paraméterei és Feynman-szabályai	321
Feladatok	324
21.8. Neutrínók keveredése és ízrezgése	325
Feladat	333
21.9. Anomáliák kiejtése	334
Feladat	338
Zárszó	339
Irodalomjegyzék	341