
Indice

1	Introduzione. Note storiche e concetti fondamentali	1
1.1	Introduzione	1
1.2	Notizie storiche. La scoperta delle particelle	3
1.3	Il concetto di atomo. Indivisibilità	5
1.4	Il Modello Standard del Microcosmo. Fermioni e Bosoni fondamentali	10
2	Rivelazione e rivelatori di particelle	13
2.1	Introduzione	13
2.2	Passaggio di particelle cariche nella materia	14
2.2.1	Perdita di energia per ionizzazione e per eccitazione	14
2.2.2	Calcolo “classico” della perdita di energia per ionizzazione	15
2.2.3	Bremsstrahlung (perdita di energia per radiazione)	20
2.3	Interazioni dei fotoni	23
2.3.1	Effetto fotoelettrico	23
2.3.2	Effetto Compton	24
2.3.3	Creazione (produzione) di coppie	26
2.4	Sciami elettromagnetici	27
2.5	Interazioni dei neutroni	29
2.6	Significato qualitativo di una misura di sezione d’urto totale	30
2.7	Tecniche di rivelazione delle particelle	31
2.7.1	Caratteristiche generali	32
2.8	Rivelatori a ionizzazione	33
2.9	Contatori a scintillazione	36
2.10	Rivelatori a semiconduttore	40
2.11	Contatori di Cherenkov	41
2.12	La camera a bolle	42
2.13	Calorimetri elettromagnetici e adronici	44

3	Acceleratori di particelle ed esempi di rivelazione	47
3.1	Perché è necessario utilizzare acceleratori	47
3.2	Acceleratori lineari e circolari	51
3.2.1	Acceleratori lineari	52
3.2.2	Acceleratori circolari	53
3.3	Collider (o collisionatori) e luminosità	53
3.3.1	Esempio: il complesso di acceleratori del CERN	55
3.4	Conversione di energia in massa	57
3.4.1	Uso degli acceleratori con bersaglio fisso	57
3.4.2	Conservazione del numero Barionico	59
3.5	Produzione di particelle in un fascio secondario	60
3.5.1	Spettrometro a tempo di volo	60
3.6	Camere a bolle esposte a fasci di particelle cariche	63
3.6.1	Alcune leggi di conservazione all'opera	63
3.6.2	La "spirale" di un elettrone	67
3.6.3	Una coppia elettrone-positrone	68
3.6.4	Un "albero" di elettroni e positroni	68
3.6.5	Decadimenti di particelle cariche	70
4	Il paradigma delle interazioni: il caso elettromagnetico	77
4.1	L'interazione elettromagnetica	78
4.1.1	La costante di accoppiamento	80
4.1.2	La teoria quantistica dell'elettromagnetismo	81
4.2	Richiami di meccanica quantistica	83
4.2.1	Equazione di Schrödinger	83
4.2.2	Equazione di Klein-Gordon	84
4.2.3	Equazione di Dirac	85
4.3	Probabilità di transizione in teoria perturbativa	86
4.4	Il propagatore bosonico	89
4.5	Sezioni d'urto, vite medie: teoria ed esperimento	90
4.5.1	Sezione d'urto	91
4.5.2	Decadimento di particelle e vita media	92
4.6	I diagrammi di Feynman	94
4.7	Alcuni processi elettromagnetici	98
4.7.1	Scattering Rutherford da un centro diffusore	98
4.7.2	La reazione $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$	102
4.7.3	Diffusione elastica elettrone-positrone (scattering Bhabha)	103
4.7.4	Annichilazione $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$	104
4.7.5	Verifiche di QED	104

5	Primo sguardo alle altre interazioni fondamentali	107
5.1	Introduzione	107
5.2	L'interazione gravitazionale	107
5.3	L'interazione debole	109
5.4	L'interazione forte	113
5.5	Classificazione delle particelle	116
5.5.1	Classificazione secondo la <i>stabilità</i>	116
5.5.2	Classificazione secondo lo <i>spin</i>	117
5.5.3	Classificazione secondo il numero Barionico e Leptonico	117
6	Principi di invarianza e di conservazione	119
6.1	Introduzione	119
6.2	Richiami: principi di invarianza	120
6.2.1	Invarianza in meccanica classica	120
6.2.2	Invarianza in meccanica quantistica	121
6.2.3	Trasformazioni continue: traslazioni e rotazioni	124
6.3	Connessione spin-statistica	125
6.4	Parità	126
6.5	Spin-parità del mesone π	128
6.5.1	Parità particella-antiparticella	131
6.6	Coniugazione di carica	132
6.6.1	Coniugazione di carica in processi EM	133
6.6.2	Violazione di C nell'interazione debole	134
6.7	Inversione temporale	135
6.8	CP e CPT	138
6.9	Carica elettrica e invarianza di gauge	139
7	Interazioni tra adroni a basse energie e il modello statico a quark	141
7.1	Adroni e quark	141
7.1.1	Il modello di Yukawa	142
7.2	Simmetria protone-neutrone: lo spin isotopico	143
7.3	La sezione d'urto per l'interazione forte	145
7.3.1	Libero cammino medio	147
7.4	Collisioni adrone-adrone alle basse energie	148
7.4.1	Gli antibarioni	148
7.4.2	Le risonanze adroniche	150
7.5	Equazione di Breit-Wigner per le risonanze	154
7.5.1	La risonanza $\Delta^{++}(1232)$	156
7.5.2	Formazione e produzione di risonanze	158
7.5.3	Distribuzione angolare del decadimento della risonanza	159
7.6	Produzione e decadimento di particelle strane	161
7.7	Classificazione degli adroni composti dai quark u, d, s	163
7.8	Il decupletto barionico $J^P = 3/2^+$	165
7.8.1	Le prime indicazioni per il numero quantico di colore	167

XII Indice

7.9	L'ottetto barionico $J^P = 1/2^+$	169
7.10	I mesoni pseudoscalari	171
7.11	I mesoni vettoriali	172
7.12	Conservazione di stranezza e isospin	173
7.13	I sei quark	175
7.14	Alcune verifiche del modello statico a quark	178
7.14.1	Decadimenti leptonic dei mesoni vettoriali neutri	178
7.14.2	Produzione di coppie di leptoni	179
7.14.3	Rapporto tra sezioni d'urto totali adrone-adrone ad alta energia	180
7.14.4	Momenti magnetici dei barioni	180
7.14.5	Relazioni di massa	183
7.15	La ricerca dei quark liberi e limiti del modello	183
8	Caratteristiche delle interazioni deboli e i neutrini	187
8.1	Introduzione	187
8.2	L'ipotesi del neutrino e il decadimento beta	189
8.2.1	Il decadimento β dei nuclei e l'energia mancante	189
8.2.2	Il disperato rimedio di Pauli	190
8.2.3	La storia del neutrino (e non solo)	191
8.3	La teoria di Fermi del decadimento β	192
8.3.1	Il decadimento del neutrone	193
8.3.2	La costante di Fermi dal decadimento β del neutrone ..	195
8.3.3	La costante α_W dalla teoria di Fermi	195
8.4	Universalità delle interazioni deboli (I)	196
8.4.1	Vita media del muone	196
8.4.2	La regola di Sargent	197
8.4.3	Il triangolo di Puppi	197
8.5	La scoperta del neutrino elettronico	199
8.5.1	Il progetto Poltergeist	199
8.6	Tipi di transizione nel decadimento β	203
8.6.1	La sezione d'urto del β inverso	206
8.7	Famiglie di leptoni	207
8.8	Violazione della parità nel decadimento β	210
8.9	La teoria a due componenti del neutrino	213
8.10	Il decadimento dei pioni carichi	215
8.11	Decadimenti delle particelle strane	217
8.12	Universalità delle interazioni deboli (II). L'angolo di Cabibbo ..	220
8.13	Interazione debole a corrente neutra	222
8.14	Le interazioni deboli e i quark	224
8.14.1	L'hamiltoniana debole e il meccanismo GIM	224
8.14.2	Indizi sul quarto quark dalle correnti neutre	226
8.14.3	I sei quark e la matrice di Cabibbo-Kobayashi-Maskawa ..	227
8.15	Produzione dei bosoni vettori $W^\pm$ e Z^0	229
8.16	L'interazione V-A delle interazioni deboli	231

8.16.1	Forme bilineari di fermioni di Dirac	231
8.16.2	Interazione debole corrente-corrente	235
9	Scoperte con collisioni positrone-elettrone	239
9.1	Introduzione	239
9.2	Sezione d'urto elettrone-positrone	241
9.2.1	La reazione $e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow \mu^+\mu^-$	242
9.2.2	Il numero quantico di colore	242
9.3	La scoperta dei quark c e b	245
9.3.1	Mesoni con quark c , $\bar{c}$	245
9.3.2	La risonanza J/ψ	246
9.3.3	Mesoni con quark b , $\bar{b}$	247
9.4	Spettroscopia dei mesoni pesanti e stima di α_S	247
9.5	Il leptone τ	249
9.6	Apparati sperimentali ed esempi di eventi al LEP	250
9.6.1	I rivelatori al LEP	250
9.6.2	Eventi in rivelatori 4π al LEP	253
9.7	Collisioni e^+e^- a $E_{cm} \sim 91$ GeV. Il bosone Z^0	259
9.7.1	La risonanza Z^0	260
9.7.2	Larghezze totale e parziali della Z^0	261
9.7.3	Grandezze misurabili, Γ_{invis} e il numero di famiglie di neutrini leggeri	263
9.7.4	Le asimmetrie avanti-indietro A_{FB} ("forward-backward")	265
9.7.5	Modello della produzione multiadronica	268
9.8	Collisioni e^+e^- per $\sqrt{s} > 100$ GeV a LEP2	269
9.8.1	Sezioni d'urto $e^+e^- \rightarrow W^+, W^-, Z^0 Z^0$	269
9.8.2	La massa e la larghezza del bosone W	273
9.8.3	La misura di α_S	274
9.8.4	Ricerche del bosone di Higgs al LEP	275
10	Interazioni ad alta energia e il modello dinamico a quark	277
10.1	Introduzione	277
10.2	Collisioni leptone-nucleone ad alta energia	278
10.3	Diffusione elastica elettrone-protone	281
10.3.1	Variabili cinematiche	281
10.3.2	Fattori di forma del protone	282
10.4	Sezione d'urto inelastica ep	287
10.4.1	I partoni nei nucleoni: natura e spin	290
10.4.2	Carica elettrica dei partoni	293
10.5	Sezione d'urto per collisioni $\nu_\mu N$ a CC	295
10.5.1	Confronto coi risultati sperimentali	300
10.5.2	La sezione d'urto neutrino-nucleone	301
10.6	Modello dinamico a quark "naive" ed "evoluto"	302
10.6.1	Dipendenza da Q^2 delle funzioni di struttura	303

10.6.2	Riepilogo dei risultati del DIS	308
10.7	Collisioni adrone-adrone alle alte energie	309
10.8	Sezioni d'urto elastiche e totali ad alta energia	311
10.8.1	Sezioni d'urto differenziali elastiche	313
10.8.2	Misure di sezioni d'urto totali	315
10.9	Collisioni adroniche inelastiche ad alta energia e a basso p_t ...	317
10.9.1	Cenni sulle collisioni nucleo-nucleo ad alte energie	317
10.10	LHC e la ricerca del bosone di Higgs	319
10.10.1	Produzione del bosone di Higgs in collisioni pp	320
10.10.2	I modi di decadimento del bosone di Higgs	323
10.10.3	Strategie di ricerca a LHC	324
11	Il Modello Standard del Microcosmo	327
11.1	Introduzione	327
11.2	Divergenze nelle WI e il problema dell'unitarietà	328
11.3	Le teorie di gauge	330
11.3.1	Scelta del gruppo di simmetria	331
11.3.2	Invarianza di gauge	333
11.4	Invarianza di gauge nell'interazione elettrodebole	337
11.4.1	Densità di lagrangiana della teoria elettrodebole	338
11.5	Rottura spontanea della simmetria. Il meccanismo di Higgs ...	339
11.6	La corrente neutra	345
11.7	Le masse dei fermioni	348
11.8	I parametri dell'Interazione Elettrodebole	348
11.8.1	Schermatura della carica elettrica in QED	350
11.8.2	Diagrammi di Feynman di ordine superiore, infiniti e rinormalizzazione in QED	351
11.9	L'interazione forte	353
11.9.1	La Cromodinamica Quantistica (QCD)	353
11.9.2	Schermatura della carica di colore in QCD	355
11.9.3	Fattori di colore	357
11.9.4	La costante di accoppiamento forte α_S	357
11.10	Il Modello Standard: riepilogo	359
12	Violazione di CP e oscillazioni di particelle	361
12.1	Il problema dell'asimmetria materia-antimateria	361
12.2	Il sistema $K^0 - \bar{K}^0$	362
12.2.1	Sviluppo temporale di un fascio di K^0 . Rigenerazione di K_1^0 . Oscillazioni in stranezza	364
12.3	Violazione di CP nel sistema $K^0 - \bar{K}^0$	368
12.3.1	Il formalismo e i parametri della violazione di CP	368
12.4	A cosa è dovuta la violazione di CP ?	373
12.5	Violazione di CP nel sistema $B^0 - \bar{B}^0$	375
12.5.1	Prossimi esperimenti per violazione di CP	379
12.6	Oscillazioni dei neutrini	379

12.6.1	Il caso particolare di oscillazione tra due sapori	380
12.6.2	Oscillazioni tra tre sapori	383
12.6.3	L'approssimazione di neutrino con massa dominante . . .	383
12.6.4	Oscillazioni dei neutrini nella materia	385
12.7	Neutrini dal sole e studi sulle oscillazioni	387
12.8	Oscillazioni dei neutrini atmosferici ed esperimenti	392
12.8.1	Esperimenti long baseline	395
12.9	Conseguenze delle oscillazioni dei neutrini	396
13	Microcosmo e Macrocosmo	401
13.1	La Grande Unificazione	403
13.1.1	Decadimento del protone	405
13.1.2	Monopoli magnetici	406
13.1.3	Cosmologia. Primi attimi dell'universo	407
13.2	Supersimmetria (SUSY)	408
13.2.1	Modello Standard Supersimmetrico Minimale (MSSM) .	410
13.2.2	Supergravità. SUGRA. Supercorde	413
13.3	Modelli composti (compositi)	414
13.4	Particelle, astrofisica e cosmologia	417
13.5	La materia oscura	420
13.6	Il Big Bang e l'universo primordiale	424
14	Aspetti fondamentali delle interazioni tra nucleoni	433
14.1	Introduzione	433
14.2	Proprietà generali dei nuclei	435
14.2.1	La carta dei nuclidi	438
14.2.2	Energia di legame nucleare	439
14.2.3	Dimensioni dei nuclei	439
14.2.4	Proprietà elettromagnetiche dei nuclei	442
14.3	Modelli nucleari	443
14.3.1	Modello a gas di Fermi	443
14.3.2	Modello a goccia di liquido	444
14.3.3	Il modello a shell	447
14.4	Proprietà dell'interazione nucleone-nucleone	450
14.5	Decadimenti radioattivi e datazione	452
14.5.1	Decadimenti in cascata	453
14.6	Decadimento γ	455
14.7	Decadimento α	456
14.7.1	Teoria elementare del decadimento α	457
14.7.2	Calcolo media prevista per il nucleo ${}^{238}_{92}\text{U}$	459
14.8	Decadimento β	460
14.8.1	Teoria elementare del decadimento β dei nuclei	461
14.9	Reazioni nucleari e fissione	463
14.9.1	Fissione nucleare	463
14.9.2	Reattori nucleari a fissione	466

XVI Indice

14.10 Fusione nucleare	467
14.10.1 Fusione nelle stelle	468
14.10.2 Formazione degli elementi superiori al Fe	470
14.10.3 Datazione della Terra e del sistema solare	472
14.11 Fusione in laboratorio	474
A Appendici	477
1 Tabella periodica degli elementi	478
2 Le unità di misura naturali in fisica subnucleare	479
3 Richiami di relatività ed EM classico	483
4 Equazione e formalismo di Dirac	487
5 Costanti fisiche e astrofisiche	497
Riferimenti bibliografici	499
Indice analitico	507