

Obsah

Obsah	5
Předmluva k druhému vydání	11
Předmluva	13
Značení, konvence, jednotky a experimentální data	19
1 Základy kvantové mechaniky	23
1.1 Základní principy	23
1.2 Matematické schéma kvantové teorie	26
1.2.1 Sternovy-Gerlachovy experimenty	26
1.2.2 Operátory	33
1.2.3 Časový vývoj v kvantové teorii	33
1.2.4 Stacionární stavy	34
1.2.5 Vlastnosti hermitovských operátorů	36
1.2.6 Nejednoznačnost v určení stavu	38
1.2.7 Rabiho metoda měření magnetických momentů	39
1.3 Systémy s větším počtem stupňů volnosti	41
1.3.1 Střední hodnoty operátorů a jejich časový vývoj	41
1.3.2 Kanonické kvantování	42
1.3.3 Harmonický oscilátor	44
1.3.4 Abstraktní řešení	45
1.3.5 Maticová reprezentace	47
1.3.6 Diracova δ -funkce	48
1.3.7 Souřadnicová reprezentace	49
1.3.8 Hybnostní reprezentace	52
1.3.9 Gaussovo klubko a vztah neurčitosti	53
1.4 Poznámky na závěr	55
2 Přibližné metody kvantové mechaniky	57
2.1 Variační metoda	58
2.1.1 Ritzův variační princip	58
2.1.2 Optimalizace nelineárních parametrů	58
2.1.3 Optimalizace lineárních parametrů	59

2.2	Poruchová metoda	63
2.2.1	Samostatné hladiny	63
2.2.2	Degenerované hladiny	65
2.2.3	Poznámka o chybě poruchové metody	67
3	Atom vodíku a struktura jeho spektrálních čar	69
3.1	Částice v elektromagnetickém poli	69
3.2	Hrubá struktura	70
3.2.1	Problém 2 částic	70
3.2.2	Elektrostatický potenciál	72
3.2.3	Jednotky	73
3.2.4	Sférické souřadnice	74
3.2.5	Řešení pro s -stavy	75
3.2.6	Porovnání s experimentem	78
3.3	Hyperjemná struktura	78
3.3.1	Magnetické pole dipólu	78
3.3.2	Hamiltonián částice se spinem ve vnějším elektromagnetickém poli	81
3.3.3	Hyperjemné štěpení základního stavu atomu vodíku	83
3.3.4	Klasifikace stavů pomocí integrálů pohybu	85
3.4	Orbitální moment hybnosti	90
3.4.1	Význam momentu hybnosti	90
3.4.2	Úhlové funkce p -stavů	92
3.4.3	Náhodná degenerace	94
3.5	Jemná struktura	95
3.5.1	Relativistické opravy	95
3.5.2	Jemné štěpení hladiny $n = 2$	98
3.5.3	Klasifikace stavů pomocí integrálů pohybu	100
3.6	Hamiltonián dvou částic s přesností do α^4	101
3.6.1	Magnetické pole pohybujícího se náboje	102
3.6.2	Hamiltonián dvou částic ve vnějším elektrostatickém poli	104
3.6.3	Případ heliu podobného atomu	106
3.6.4	Případ vodíku podobného atomu	107
3.6.5	Poznámky na závěr	108
4	Poklady ukryté v komutátorech	109
4.1	Obecné řešení momentu hybnosti	109
4.2	Skládání momentů hybnosti	112
4.3	Rungeho-Lenzův vektor	118
4.3.1	Rungeho-Lenzův vektor v klasické mechanice	118
4.3.2	Rungeho-Lenzův vektor v kvantové mechanice	120
4.4	Maticové elementy vektorových operátorů	121
4.4.1	Motivace	121
4.4.2	Komutační relace	122
4.4.3	Výběrová pravidla v m	122
4.4.4	Výběrová pravidla v l	123

4.4.5	Nenulové maticové elementy – závislost na m	124
4.4.6	Zobecnění	126
4.4.7	Zeemanův jev	127
4.4.8	Nenulové maticové elementy – závislost na l a n	129
4.4.9	Tvar kulových funkcí	130
4.5	Atom vodíku – obecné řešení	132
4.5.1	Maticové elementy Rungeho-Lenzova vektoru	133
4.5.2	Radiální funkce a energetické spektrum atomu vodíku	134
4.5.3	Starkův jev	136
4.5.4	Parabolické souřadnice	137
4.6	Rozklad rovinné vlny do kulových vln	138
4.7	Ještě jeden způsob řešení atomu vodíku	140
4.7.1	Algebra radiálních operátorů a úplná diskrétní báze	140
4.7.2	Vztah vodíkové a úplné diskrétní báze	143
4.8	Poznámky na závěr	143
5	Atom helia	145
5.1	Symetrie v atomu helia	146
5.1.1	Antisymetrie vlnové funkce a hodnota celkového spinu	146
5.1.2	Odkud se bere nerozlišitelnost?	148
5.1.3	Další symetrie	148
5.1.4	Spektroskopické značení	149
5.2	Variační metoda s Hartree-Fokovou funkcí	149
5.2.1	Multipólový rozvoj	150
5.2.2	Poznámka o Legendreových polynomech	152
5.2.3	Výpočet integrálů	154
5.2.4	Optimalizace parametrů	155
5.3	Variační metoda – konfigurační interakce	158
5.3.1	Přizpůsobení báze symetrii	158
5.3.2	Úhlová integrace – Wignerův-Eckartův teorém	160
5.3.3	Úhlová integrace – výpočet redukováných maticových elementů	163
5.3.4	Výpočet jednoelektronových maticových elementů	164
5.3.5	Integrace přes radiální proměnné	165
5.3.6	Konvergence variační metody	169
5.3.7	Porovnání s experimentem	169
5.3.8	Poznámka o paritě	171
5.3.9	Poznámka o složitějších atomech	171
5.4	Poznámky na závěr	172
6	Dynamika – nerelativistická teorie	175
6.1	Kvantování elektromagnetického pole	176
6.1.1	Proč kvantovat?	176
6.1.2	Jak kvantovat?	176
6.1.3	Klasická elektrodynamika v obvyklém formalismu	176
6.1.4	Kalibrační invariance a počet stupňů volnosti	178
6.1.5	Coulombova kalibrace	178

6.1.6	Hamiltonián volného elektromagnetického pole	180
6.1.7	Zákon zachování energie pro soustavu N nabitých částic a EM pole	181
6.1.8	Klasická elektrodynamika v Hamiltonově formalismu	183
6.1.9	Polarizace	185
6.1.10	Kvantované elektromagnetické pole	186
6.1.11	Přechod ke komplexní bázi	187
6.1.12	Přechod ke spojitě bázi	188
6.1.13	Stavy pole	189
6.2	Spontánní emise	190
6.2.1	Úvodní poznámky	190
6.2.2	Interakční reprezentace	190
6.2.3	Časová poruchová metoda a Fermiho zlaté pravidlo	191
6.2.4	Integrace stupňů volnosti EM pole	193
6.2.5	Elektrické dipólové záření	194
6.2.6	Poznámka o kruhové polarizaci	195
6.2.7	Polarizace a úhlové rozdělení vylétávajících fotonů	196
6.2.8	Doba života stavů	198
6.2.9	Kruhové stavy a souvislost s klasickou teorií	199
6.2.10	Zakázané přechody	201
6.2.11	Záření spojené se změnou spinu	202
6.3	Fotoelektrický jev	203
6.3.1	Úvodní poznámky	203
6.3.2	Parabolické souřadnice	207
6.3.3	Vlnové funkce spojitého spektra	209
6.3.4	Přechod z diskrétní do spojitě části spektra	212
6.3.5	Úhlové a energetické rozdělení vylétávajících elektronů	214
6.3.6	Excitace a ionizace atomu elektronem	217
6.4	Rozptyl fotonu na atomu	221
6.4.1	Lippmannova-Schwingerova rovnice	221
6.4.2	Integrace stupňů volnosti EM pole	223
6.4.3	Rayleighův, Ramanův a rezonanční rozptyl	227
6.4.4	Sčítání a středování přes polarizace a úhly	231
6.4.5	Výpočet výrazů obsahujících funkci Hamiltonova operátoru	232
6.4.6	Vlnové funkce spojitého a diskrétního spektra ve sférických souřadnicích	233
6.4.7	Rozptyl fotonu na atomu vodíku	236
6.4.8	Thomsonův rozptyl	238
6.5	Virtuální procesy	239
6.5.1	Úvodní poznámky	239
6.5.2	Lambův-Retherfordův experiment	241
6.5.3	Vlastní energie – Betheho odhad	241
6.5.4	Vylepšený Betheho odhad	245
6.5.5	Výměna fotonu – okamžité působení	247
6.5.6	Výměna fotonu – vliv zpoždění	249
6.5.7	Výměna dvou fotonů – nízké energie	252

6.6	Formalismus druhého kvantování	255
6.6.1	Kvantování volných polí	255
6.6.2	Stavy volného elektronového pole	258
6.6.3	Elektronové pole působící samo na sebe	259
6.7	Poznámky na závěr	261
7	Dynamika – relativistická teorie	263
7.1	Relativistická rovnice pro elektron	264
7.1.1	Relativistické značení	264
7.1.2	Kleinova-Gordonova rovnice	266
7.1.3	Diracova rovnice	267
7.1.4	Vnější EM pole	268
7.1.5	Potíže s fyzikálním výkladem Diracovy rovnice a jejich rozuzlení	271
7.2	Hamiltonián kvantové elektrodynamiky	272
7.2.1	Kvantování elektron-pozitronového pole	272
7.2.2	Interakční hamiltonián	275
7.2.3	Poznámka o nábojové symetrii	277
7.2.4	Poznámka o kalibrační invarianci	279
7.3	Obyčejná poruchová metoda	280
7.3.1	Interakce vázaného elektronu s fluktuacemi polí	281
7.3.2	Pozitronium I	286
7.4	Feynmanův časoprostorový přístup	295
7.4.1	Elektron ve vnějším EM poli	295
7.4.2	Elektron interagující se svým vlastním EM polem	301
7.4.3	Propagátor fotonu a časově uspořádaný součin operátorů . . .	302
7.4.4	Vlastní energie elektronu – vyjádření pomocí Greenových funkcí	305
7.4.5	Integrace přes k_0	306
7.4.6	Vlastní energie elektronu – vyrušení nekovariantních členů . . .	307
7.4.7	Polarizace vakua – kovariantní vyjádření	310
7.4.8	Diskuse Lorentzovy invariance	310
7.4.9	Jaký pohled na pozitrony je správný?	312
7.4.10	Poznámka o Feynmanových diagramech a Feynmanových pravidlech	314
7.5	Vlastní energie elektronu – výpočet	316
7.5.1	Regularizace	316
7.5.2	Integrace čtyř-hybnosti virtuálního fotonu	317
7.5.3	Renormalizace hmotnosti	322
7.5.4	Výpočet pozorovatelné části efektu	325
7.5.5	Nízkoenergetická část efektu	330
7.5.6	Vysokoenergetická část efektu	332
7.5.7	Anomální magnetický moment elektronu	333
7.5.8	Lambův posun	334
7.5.9	Započtení pohybu jádra	335
7.6	Polarizace vakua – výpočet	336
7.6.1	Rozvoj propagátoru	336
7.6.2	Kalibrační invariance a stupeň divergence	341

7.6.3	Poznámka o hmotném vektorovém poli	342
7.6.4	Renormalizace náboje	343
7.6.5	Výpočet pozorovatelné části efektu	345
7.6.6	Porovnání s experimentem	346
7.7	Výměna dvou fotonů – vysoké energie	348
7.7.1	Podélné fotony	349
7.7.2	Výměna dvou fotonů ve Feynmanově pohledu	350
7.7.3	Propagátor fotonu a časově uspořádaný součin operátorů . . .	351
7.7.4	Poznámka o kalibrační invarianci	354
7.7.5	Podélná část interakce	355
7.7.6	Zbývající část interakce	359
7.7.7	Porovnání s experimentem	360
7.8	Pozitronium II	361
7.8.1	Virtuální anihilace pozitronia ve Feynmanově pohledu	361
7.8.2	Korekce od polarizace vakua	362
7.8.3	Korekce od výměny fotonu mezi elektronem a pozitronem . . .	364
7.8.4	Korekce od dvoufotonové anihilace	375
7.8.5	Porovnání s experimentem	376
7.9	Poznámky na závěr	378

Doslov: Elektrodynamika jako součást většího celku 379

D.1	Problém β -rozpadu	379
D.2	Fermiho teorie	380
D.3	Weylova reprezentace	382
D.4	Feynmanova – Gell-Mannova teorie	384
D.5	Zachování leptonového čísla a zobecnění elektrodynamiky	386
D.6	Glashowova teorie elektroslabých interakcí	388
D.7	Rozšíření na kvarky	391
D.8	Rozšíření na nukleony	392
D.9	Efektivní interakce při nízkých energiích	394
D.10	Hmotnosti bosonů W a Z	395
D.11	Elektroslabé neutrální proudy v atomech	396
D.12	Poznámky na závěr	398

Seznam úkolů 399

Literatura 401

Rejstřík 407