

Obsah

Obsah	5
Předmluva	11
Značení	17
1 Základy kvantové mechaniky	21
1.1 Základní principy	21
1.2 Matematické schéma kvantové teorie	24
1.2.1 Sternovy-Gerlachovy experimenty	24
1.2.2 Operátory	31
1.2.3 Časový vývoj v kvantové teorii	31
1.2.4 Stacionární stavy	32
1.2.5 Vlastnosti hermitovských operátorů	34
1.2.6 Nejednoznačnost v určení stavu	36
1.2.7 Rabiho metoda měření magnetických momentů	37
1.3 Systémy s větším počtem stupňů volnosti	39
1.3.1 Střední hodnoty operátorů a jejich časový vývoj	39
1.3.2 Kanonické kvantování	40
1.3.3 Harmonický oscilátor	42
1.3.4 Abstraktní řešení	43
1.3.5 Maticová reprezentace	45
1.3.6 Diracova δ -funkce	46
1.3.7 Souřadnicová reprezentace	47
1.3.8 Hybnostní reprezentace	50
1.3.9 Gaussovo klubko a vztah neurčitosti	51
1.4 Poznámky na závěr	53
2 Přibližné metody kvantové mechaniky	55
2.1 Variační metoda	56
2.1.1 Ritzův variační princip	56
2.1.2 Optimalizace nelineárních parametrů	56
2.1.3 Optimalizace lineárních parametrů	57
2.2 Poruchová metoda	61
2.2.1 Samostatné hladiny	61

2.2.2	Degenerované hladiny	63
2.2.3	Poznámka o chybě poruchové metody	65
3	Atom vodíku a struktura jeho spektrálních čar	67
3.1	Částice v elektromagnetickém poli	67
3.2	Hrubá struktura	68
3.2.1	Problém 2 částic	68
3.2.2	Elektrostatický potenciál	69
3.2.3	Jednotky	70
3.2.4	Sférické souřadnice	71
3.2.5	Řešení pro s -stavy	72
3.2.6	Porovnání s experimentem	74
3.3	Hyperjemná struktura	75
3.3.1	Magnetické pole dipólu	75
3.3.2	Hamiltonián částice se spinem ve vnějším elektromagnetickém poli	78
3.3.3	Hyperjemné štěpení základního stavu atomu vodíku	80
3.3.4	Klasifikace stavů pomocí integrálů pohybu	82
3.4	Orbitální moment hybnosti	87
3.4.1	Význam momentu hybnosti	87
3.4.2	Úhlové funkce p -stavů	89
3.4.3	Náhodná degenerace	91
3.5	Jemná struktura	92
3.5.1	Relativistické korekce	92
3.5.2	Jemné štěpení hladiny $n = 2$	95
3.5.3	Klasifikace stavů pomocí integrálů pohybu	97
3.6	Hamiltonián dvou částic s přesností do α^4	98
3.6.1	Magnetické pole pohybujícího se náboje	99
3.6.2	Hamiltonián dvou částic ve vnějším elektrostatickém poli	101
3.6.3	Případ heliu podobného atomu	103
3.6.4	Případ vodíku podobného atomu	104
3.6.5	Poznámky na závěr	104
4	Poklady ukryté v komutátorech	105
4.1	Obecné řešení momentu hybnosti	105
4.2	Skládání momentů hybnosti	108
4.3	Rungeho-Lenzův vektor	114
4.3.1	Rungeho-Lenzův vektor v klasické mechanice	114
4.3.2	Rungeho-Lenzův vektor v kvantové mechanice	116
4.4	Maticové elementy vektorových operátorů	117
4.4.1	Motivace	117
4.4.2	Komutační relace	118
4.4.3	Výběrová pravidla v m	118
4.4.4	Výběrová pravidla v l	119
4.4.5	Nenulové maticové elementy – závislost na m	120
4.4.6	Zobecnění	122

4.4.7	Zeemanův jev	123
4.4.8	Nenulové maticové elementy – závislost na l a n	125
4.4.9	Tvar kulových funkcí	125
4.5	Atom vodíku – obecné řešení	127
4.5.1	Maticové elementy Rungeho-Lenzova vektoru	127
4.5.2	Energetické spektrum atomu vodíku	128
4.5.3	Starkův jev	129
4.5.4	Radiální funkce atomu vodíku	130
4.5.5	Parabolické souřadnice	131
4.6	Rozklad rovinné vlny do kulových vln	132
4.7	Ještě jeden způsob řešení atomu vodíku	135
4.7.1	Algebra radiálních operátorů a úplná diskretní báze	135
4.7.2	Vztah vodíkové a úplné diskretní báze	137
4.8	Poznámky na závěr	138
5	Atom helia	139
5.1	Oddělení pohybu těžiště	140
5.2	Symetrie v atomu helia	140
5.2.1	Antisymetrie vlnové funkce a hodnota celkového spinu	141
5.2.2	Odkud se bere nerozlišitelnost?	143
5.2.3	Další symetrie	143
5.2.4	Spektroskopické značení	143
5.3	Variační metoda s Hartree-Fokovou funkcí	144
5.3.1	Multipólový rozvoj	145
5.3.2	Poznámka o Legendreových polynomech	147
5.3.3	Výpočet integrálů	148
5.3.4	Optimalizace parametrů	150
5.4	Variační metoda – konfigurační interakce	152
5.4.1	Přizpůsobení báze symetrii	153
5.4.2	Úhlová integrace – Wignerův-Eckartův teorém	155
5.4.3	Úhlová integrace – výpočet redukovaných maticových elementů	158
5.4.4	Výpočet jednoelektronových maticových elementů	159
5.4.5	Integrace přes radiální proměnné	159
5.4.6	Konvergence variační metody	163
5.4.7	Porovnání s experimentem	164
5.4.8	Poznámka o paritě	165
5.4.9	Poznámka o složitějších atomech	165
5.5	Poznámky na závěr	166
6	Dynamika – nerelativistická teorie	169
6.1	Kvantování elektromagnetického pole	170
6.1.1	Proč kvantovat?	170
6.1.2	Jak kvantovat?	170
6.1.3	Klasická elektrodynamika v obvyklém formalismu	170
6.1.4	Kalibrační invariance a počet stupňů volnosti	172
6.1.5	Coulombova kalibrace	172

6.1.6	Hamiltonián volného elektromagnetického pole	173
6.1.7	Klasická elektrodynamika v Hamiltonově formalismu	174
6.1.8	Polarizace	177
6.1.9	Kvantované elektromagnetické pole	177
6.1.10	Přechod ke komplexní bázi	178
6.1.11	Přechod ke spojitě bázi	180
6.1.12	Stavy pole	180
6.2	Spontánní emise	181
6.2.1	Úvodní poznámky	181
6.2.2	Interakční reprezentace	182
6.2.3	Časová poruchová metoda a Fermiho zlaté pravidlo	183
6.2.4	Integrace stupňů volnosti EM pole	184
6.2.5	Elektrické dipólové záření	185
6.2.6	Polarizace a úhlové rozdělení vylétávajících fotonů	187
6.2.7	Doba života stavů	188
6.2.8	Kruhové stavy a souvislost s klasickou teorií	190
6.2.9	Zakázané přechody	192
6.2.10	Záření spojené se změnou spinu	193
6.3	Fotoelektrický jev	194
6.3.1	Úvodní poznámky	194
6.3.2	Parabolické souřadnice	198
6.3.3	Vlnové funkce spojitého spektra	199
6.3.4	Přechod z diskrétní do spojitě části spektra	203
6.3.5	Úhlové a energetické rozdělení vylétávajících elektronů	206
6.3.6	Převod jednotek	207
6.3.7	Excitace a ionizace atomu elektronem	209
6.4	Rozptyl fotonu na atomu	213
6.4.1	Lippmannova-Schwingerova rovnice	213
6.4.2	Integrace stupňů volnosti EM pole	215
6.4.3	Rayleighův, Ramanův a rezonanční rozptyl	219
6.4.4	Sčítání a středování přes polarizace a úhly	223
6.4.5	Výpočet výrazů obsahujících funkci Hamiltonova operátoru	224
6.4.6	Vlnové funkce spojitého a diskrétního spektra ve sférických souřadnicích	225
6.4.7	Rozptyl fotonu na atomu vodíku	229
6.4.8	Thomsonův rozptyl	231
6.5	Virtuální procesy	232
6.5.1	Úvodní poznámky	232
6.5.2	Lambův-Retherfordův experiment	233
6.5.3	Vlastní energie – Betheho odhad	233
6.5.4	Vylepšený Betheho odhad	237
6.5.5	Výměna fotonu – okamžité působení	239
6.5.6	Výměna fotonu – vliv zpoždění	241
6.5.7	Výměna dvou fotonů – nízké energie	244
6.6	Formalismus druhého kvantování	247
6.6.1	Kvantování volných polí	247

6.6.2	Stavy volného elektronového pole	250
6.6.3	Elektronové pole působící samo na sebe	251
6.7	Poznámky na závěr	253
7	Dynamika – relativistická teorie	255
7.1	Relativistická rovnice pro elektron	256
7.1.1	Relativistické značení	256
7.1.2	Kleinova-Gordonova rovnice	258
7.1.3	Diracova rovnice	259
7.1.4	Vnější EM pole	261
7.1.5	Potíže s fyzikálním výkladem Diracovy rovnice a jejich rozuzlení	262
7.2	Hamiltonián kvantové elektrodynamiky	263
7.2.1	Kvantování elektron-pozitronového pole	263
7.2.2	Interakční hamiltonián	266
7.2.3	Poznámka o nábojové symetrii	268
7.2.4	Poznámka o kalibrační invarianci	270
7.3	Obyčejná poruchová metoda	271
7.3.1	Interakce vázaného elektronu s fluktuacemi polí	272
7.3.2	Pozitronium I	277
7.4	Feynmanův časoprostorový přístup	287
7.4.1	Elektron ve vnějším EM poli	287
7.4.2	Elektron interagující se svým vlastním EM polem	294
7.4.3	Propagátor fotonu a časově uspořádaný součin operátorů	295
7.4.4	Vlastní energie elektronu – vyjádření pomocí Greenových funkcí	297
7.4.5	Integrace přes k_0	298
7.4.6	Vlastní energie elektronu – vyrušení nekovariantních členů	300
7.4.7	Polarizace vakua – kovariantní vyjádření	302
7.4.8	Diskuse relativistické invariance	303
7.4.9	Jaký pohled na pozitrony je správný?	305
7.4.10	Poznámka o Feynmanových diagramech a Feynmanových pravidlech	306
7.5	Vlastní energie elektronu – výpočet	309
7.5.1	Regularizace	309
7.5.2	Integrace čtyř-hybnosti virtuálního fotonu	310
7.5.3	Renormalizace hmotnosti	315
7.5.4	Výpočet pozorovatelné části efektu	318
7.5.5	Nízkoenergetická část efektu	323
7.5.6	Vysokoenergetická část efektu	325
7.5.7	Anomální magnetický moment elektronu	326
7.5.8	Lambův posun	327
7.5.9	Započtení pohybu jádra	328
7.6	Polarizace vakua – výpočet	329
7.6.1	Rozvoj propagátoru	329
7.6.2	Kalibrační invariance a stupeň divergence	334
7.6.3	Poznámka o hmotném vektorovém poli	335
7.6.4	Renormalizace náboje	336

7.6.5	Výpočet pozorovatelné části efektu	338
7.6.6	Porovnání s experimentem	339
7.7	Výměna dvou fotonů – vysoké energie	341
7.7.1	Podélné fotony	342
7.7.2	Výměna dvou fotonů ve Feynmanově pohledu	343
7.7.3	Propagátor fotonu a časově uspořádaný součin operátorů . . .	343
7.7.4	Poznámka o kalibrační invarianci	347
7.7.5	Podélná část interakce	348
7.7.6	Zbývající část interakce	351
7.7.7	Porovnání s experimentem	352
7.8	Pozitronium II	353
7.8.1	Virtuální anihilace pozitronia ve Feynmanově pohledu	353
7.8.2	Korekce od polarizace vakua	354
7.8.3	Korekce od výměny fotonu mezi elektronem a pozitronem . . .	356
7.8.4	Korekce od dvoufotonové anihilace	366
7.8.5	Porovnání s experimentem	367
7.9	Poznámky na závěr	369

Seznam úkolů	371
---------------------	------------

Literatura	373
-------------------	------------

Rejstřík	377
-----------------	------------