

# Obsah

Obsah	5
Předmluva k druhému vydání	11
Předmluva	13
Značení, konvence, jednotky a experimentální data	19
<b>1 Základy kvantové mechaniky</b>	<b>23</b>
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 $\delta$ -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
<b>2 Přibližné metody kvantové mechaniky</b>	<b>57</b>
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
<b>3</b>	<b>Atom vodíku a struktura jeho spektrálních čar</b>	<b>69</b>
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 $\alpha^4$ . . . . .	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
<b>4</b>	<b>Poklady ukryté v komutátorech</b>	<b>109</b>
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
<b>5</b>	<b>Atom helia</b> . . . . .	<b>145</b>
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
<b>6</b>	<b>Dynamika – nerelativistická teorie</b> . . . . .	<b>175</b>
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
<b>7</b>	<b>Dynamika – relativistická teorie</b>	<b>263</b>
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 $\beta$ -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**