

# Obsah

Předmluva	11
<b>1 Historická motivace vzniku kvantové teorie</b>	<b>13</b>
1.1 Spektrum tepelného záření	13
1.2 Fotoefekt	17
1.3 Měrné teplo při nízkých teplotách	19
1.4 Čárová spektra, atomy	19
1.5 Stará kvantová mechanika	21
1.6 Maticová mechanika – W. Heisenberg	22
1.7 Vlnová mechanika – E. Schrödinger	23
Literatura	26
<b>2 Základní představy</b>	<b>27</b>
2.1 Kvantování	27
2.1.1 Kvantování energie kyvadla	27
2.1.2 Kvantování magnetického toku	28
2.2 Interference jednoho fotonu	29
2.2.1 Interference versus informace o dráze fotonu v interferometru	29
2.2.2 Experiment se zpožděnou volbou	32
2.2.3 Vlnově částicová dualita fotonu	33
2.3 Stav kvantového systému a kvantové měření	35
2.3.1 Popis stavu kvantového systému, princip superpozice	36
2.3.2 Kvantové měření – projekce stavu	37
2.3.3 Průchod fotonu interferometrem	39
2.4 Interferenční jevy v makrosvětě	41
Literatura	45
<b>3 Příprava stavu a kvantové testy</b>	<b>46</b>
3.1 Úvod	46
3.2 Kvantové testy	47
3.2.1 Měření na kvantovém systému	47
3.2.2 Opakovatelné testy	47
3.2.3 Maximální testy	47
3.2.4 Statistický determinismus	48
3.2.5 Náhodná směs	48
3.2.6 Následné testy	49
3.2.7 Reciprocita	50

3.3	Interference . . . . .	51
3.4	Zákon skládání amplitud . . . . .	52
	Literatura . . . . .	55
<b>4</b>	<b>Formalismus kvantové teorie</b> . . . . .	<b>56</b>
4.1	Hilbertův prostor . . . . .	56
4.1.1	Reprezentace stavu pomocí vektoru . . . . .	56
4.1.2	Diracova symbolika . . . . .	58
4.1.3	Fundamentální předpoklad – princip superpozice . . . . .	59
4.1.4	Projekční operátory . . . . .	60
4.2	Pozorovatelné . . . . .	61
4.2.1	Operátory fyzikálních veličin . . . . .	61
4.2.2	Kompatibilní pozorovatelné . . . . .	62
4.2.3	Nekompatibilní pozorovatelné . . . . .	63
4.2.4	Úplná množina pozorovatelných . . . . .	63
4.3	Nekonečně rozměrný prostor . . . . .	63
4.4	Matice hustoty . . . . .	64
4.4.1	Zavedení matice hustoty . . . . .	64
4.4.2	Časový vývoj matice hustoty . . . . .	68
4.5	POVM . . . . .	69
	Literatura . . . . .	73
<b>5</b>	<b>Znovu kvantové měření</b> . . . . .	<b>74</b>
5.1	Bezinterakční měření . . . . .	74
5.1.1	Princip . . . . .	74
5.1.2	„Stoprocentní bezinterakční“ měření . . . . .	76
5.2	Kvantový Zenónův jev . . . . .	77
5.2.1	Rozpadové procesy . . . . .	77
5.2.2	Optický kvantový Zenónův jev . . . . .	79
5.3	Co je kvantové měření? . . . . .	80
5.3.1	Co znamená kolaps vlnové funkce? . . . . .	80
5.3.2	Kvantové skoky . . . . .	82
5.3.3	Wheelerova hra . . . . .	84
	Literatura . . . . .	85
<b>6</b>	<b>Interpretace kvantové teorie</b> . . . . .	<b>86</b>
6.1	Kodaňská interpretace kvantové mechaniky . . . . .	87
6.2	Schrödingerova kočka & Wignerův přítel . . . . .	88
6.3	Mnohasvětová interpretace . . . . .	89
6.4	Spontánní kolaps . . . . .	91
6.5	Dekoherence . . . . .	93
6.5.1	Úvod . . . . .	93
6.5.2	Dekoherence a měření . . . . .	95
6.5.3	Interakce částice se skalárním polem . . . . .	96
6.5.4	Shrnutí . . . . .	99
6.6	Kvantové historie . . . . .	100
	Literatura . . . . .	104

<b>7</b>	<b>Nerozlišitelné částice</b>	<b>106</b>
7.1	Fermiony a bosony . . . . .	107
7.2	Několik poznámek . . . . .	107
7.2.1	Oddělitelnost skupin . . . . .	107
7.2.2	Změna fáze při aktivní transformaci . . . . .	108
7.2.3	Skrytá kvantová čísla . . . . .	109
7.2.4	Reprezentace grupy permutací, parastatistiky . . . . .	109
7.3	Fokův prostor . . . . .	110
7.3.1	Obsazovací čísla, kreační a anihilační operátory . . . . .	110
7.3.2	Entanglement . . . . .	112
7.3.3	Druhé kvantování . . . . .	113
7.3.4	Relativistická kvantová teorie . . . . .	113
7.4	Souvislost spinu se statistikou . . . . .	115
7.5	Je dvojice fermionů bosonem? . . . . .	116
7.6	Dva fermiony a dva bosony na děličí svazku . . . . .	118
	Literatura . . . . .	120
<b>8</b>	<b>EPR paradox</b>	<b>121</b>
8.1	Bohr versus Einstein . . . . .	121
8.2	EPR myšlenkový experiment . . . . .	122
8.2.1	Premisy EPR – lokální realismus . . . . .	124
8.2.2	EPR paradox . . . . .	124
8.2.3	Ponožky pana Bertlmanna . . . . .	125
8.2.4	Bohrův pohled na věc . . . . .	126
8.3	Popis podsystémů entanglovaného páru . . . . .	127
8.4	Korelovaný pár a dekoherence . . . . .	127
8.5	Původní formulace EPR myšlenkového experimentu . . . . .	128
8.6	Skryté parametry . . . . .	129
	Literatura . . . . .	131
<b>9</b>	<b>Bellovy nerovnosti</b>	<b>132</b>
9.1	Odvození Bellových nerovností . . . . .	132
9.2	Předpověď kvantové mechaniky . . . . .	134
9.3	Kritické poznámky . . . . .	135
9.4	Bellova analogie s porodností . . . . .	137
9.5	Bellovy nerovnosti pro polarizace fotonů . . . . .	138
9.6	Experimentální testy Bellových nerovností . . . . .	140
	Literatura . . . . .	145
<b>10</b>	<b>Kvantové korelace a nelokalita</b>	<b>146</b>
10.1	Entanglement . . . . .	146
10.1.1	Definice entanglovaného stavu . . . . .	146
10.1.2	Kritéria separability . . . . .	147
10.1.3	Míry entanglementu . . . . .	149
10.1.4	Poznámka k definici entropie kvantového stavu . . . . .	150
10.2	Nemožnost okamžitého přenosu informace . . . . .	151
10.3	Tunelování a „nadsvětelné rychlosti“ . . . . .	152

10.4	Více než dvě korelované částice . . . . .	154
10.5	Nelokalita jedné částice . . . . .	156
10.6	Nelokalita bez entanglementu . . . . .	157
10.7	Skryté parametry – obecné poznámky . . . . .	158
10.8	Kontextualita . . . . .	160
	Literatura . . . . .	162
<b>11</b>	<b>Sestupná parametrická frekvenční konverze</b> . . . . .	<b>164</b>
11.1	Princip parametrické frekvenční konverze . . . . .	164
11.2	Typy korelací . . . . .	165
11.2.1	Korelace frekvencí (energií) fotonů . . . . .	165
11.2.2	Korelace směrů šíření (vektorů hybnosti) fotonů . . . . .	165
11.2.3	Korelace polarizací fotonů . . . . .	166
11.3	Zjednodušený popis parametrické frekvenční konverze . . . . .	167
11.3.1	Teoretický model . . . . .	167
11.3.2	Porušení klasické nerovnosti . . . . .	168
11.4	Mnohamodový popis . . . . .	169
11.4.1	Teoretický model . . . . .	169
11.4.2	Četnost detekcí . . . . .	171
11.4.3	Četnost koincidencí . . . . .	172
11.5	Vlastnosti korelovaných fotonů . . . . .	172
11.5.1	Korelace okamžiků detekce . . . . .	172
11.5.2	„Nelokální“ interference ve frekvenční oblasti . . . . .	175
11.6	„Nelokální“ interference čtvrtého řádu . . . . .	176
11.7	Interferenční experiment se dvěma nelineárními krystaly . . . . .	177
11.8	Korelování nezávislých částic . . . . .	180
11.8.1	Výměna entanglementu . . . . .	180
11.8.2	Korelace tří částic . . . . .	182
11.9	„Quantum eraser“ . . . . .	184
	Literatura . . . . .	187
<b>12</b>	<b>Kvantová teleportace a husté kvantové kódování</b> . . . . .	<b>188</b>
12.1	Kvantová teleportace . . . . .	188
12.1.1	Princip, Bellovy stavy . . . . .	188
12.1.2	Praktická realizace . . . . .	190
12.1.3	Experimenty . . . . .	191
12.2	Husté kvantové kódování . . . . .	194
12.2.1	Princip . . . . .	194
12.2.2	Souvislost s kvantovou teleportací . . . . .	195
	Literatura . . . . .	196
<b>13</b>	<b>Kvantová kryptografie</b> . . . . .	<b>197</b>
13.1	Šifrování . . . . .	197
13.1.1	Úvod . . . . .	197
13.1.2	Algoritmus RSA . . . . .	198
13.1.3	Vernamova šifra . . . . .	199
13.2	Kvantový přenos kryptografického klíče . . . . .	200



13.2.1	Princip kvantové kryptografie . . . . .	200
13.2.2	Protokol BB84 . . . . .	203
13.2.3	Kvantový stav nelze klonovat . . . . .	204
13.3	Polarizační kódování . . . . .	205
13.4	Jednofotonová interferenční metoda . . . . .	206
13.5	Přehled používaných komponent a technologická omezení . . . . .	207
13.6	Dvoufotonová interferenční metoda – využití entanglementu . . . . .	209
	Literatura . . . . .	211
<b>14</b>	<b>Kvantové počítače</b>	<b>213</b>
14.1	Úvod . . . . .	213
14.1.1	Složitost výpočtu . . . . .	213
14.1.2	Pravděpodobnostní algoritmy . . . . .	215
14.2	Základní pojmy . . . . .	215
14.2.1	Qubit . . . . .	215
14.2.2	Kvantový registr . . . . .	216
14.2.3	Kvantová hradla . . . . .	216
14.2.4	Výpočet funkce . . . . .	218
14.3	Shorův kvantový algoritmus pro faktorizaci . . . . .	218
14.3.1	Problém rozkladu na prvočinitele . . . . .	219
14.3.2	Výpočet funkce $f_{a,N}$ . . . . .	219
14.3.3	Kvantové měření a perioda funkce . . . . .	220
14.3.4	Kvantová diskretní Fourierova transformace . . . . .	221
14.3.5	Příčiny náhodnosti . . . . .	222
14.3.6	Shrnutí . . . . .	223
14.3.7	Příklady dalších efektivních kvantových algoritmů . . . . .	223
14.4	Kvantový obvod pro Fourierovu transformaci . . . . .	223
14.5	Dekoherence a vznik chyb . . . . .	224
14.5.1	Vliv chyb na kvantový výpočet . . . . .	224
14.5.2	Kvantová korekce chyb . . . . .	225
14.6	Možné způsoby realizace kvantových počítačů . . . . .	228
14.6.1	Chladné ionty v pasti . . . . .	228
14.6.2	NMR (nukleární magnetická rezonance) . . . . .	228
	Literatura . . . . .	230