

## Obsah

<b>1</b>	<b>Ideální a slabě interagující Boseovy a Fermiho plyny</b>	<b>6</b>
1.1	Úvod . . . . .	6
1.2	Kvantově mechanický popis mnohočásticových systémů . . . . .	7
1.3	Nejdůležitější vztahy fenomenologické termodynamiky . . . . .	12
1.4	Ideální Boseův plyn . . . . .	13
1.4.1	Boseova-Einsteinova kondenzace . . . . .	14
1.4.2	Termodynamická limita . . . . .	17
1.4.3	Goldstoneův teorém . . . . .	20
1.5	Slabě interagující Boseův plyn . . . . .	21
1.6	Boseův plyn – shrnutí . . . . .	28
1.7	Boseova-Einsteinova kondenzace a supratekutost . . . . .	28
1.8	Ideální Fermiho plyn . . . . .	31
1.8.1	Ideální Fermiho plyn - shrnutí . . . . .	34
1.9	Poznámky k slabě neideálnímu Fermiho plynu . . . . .	34
1.10	Závěr . . . . .	36
1.11	Literatura . . . . .	36
<b>2</b>	<b>Dosahování a měření nízkých teplot</b>	<b>38</b>
2.1	Teplotní stupnice . . . . .	38
2.2	Plynový teploměr . . . . .	40
2.3	Primární teploměry . . . . .	41
2.3.1	Šumový teploměr . . . . .	42
2.3.2	Jaderný orientační teploměr . . . . .	44
2.3.3	Teploměry s coulombickou blokáci . . . . .	45
2.4	Sekundární teploměry . . . . .	46
2.4.1	Kovové rezistivní teploměry . . . . .	47
2.4.2	Polovodičové teploměry . . . . .	48
2.4.3	Kapacitní teploměry . . . . .	51
2.4.4	Termočlánky . . . . .	52
2.5	Z historie dosahování kryogenních teplot . . . . .	52
2.6	Dosahování dusíkových a heliových teplot . . . . .	55
2.7	Směsi $^3\text{He} - ^4\text{He}$ . . . . .	59
2.8	Rozpouštěcí refrigerátory . . . . .	61
2.9	Adiabatická demagnetizace . . . . .	64
2.9.1	Adiabatická demagnetizace paramagnetických solí . . . . .	65
2.9.2	Jaderná adiabatická demagnetizace . . . . .	65
2.9.3	Adiabatické tavení pevného $^4\text{He}$ v kapalném $^3\text{He}$ . . . . .	69
2.10	Dosahování nízkých teplot bez použití kryokapalin . . . . .	71
2.10.1	Kryogenerátory . . . . .	71
2.10.2	Pulzní trubice . . . . .	73
2.10.3	Pevnolátkové chladiče . . . . .	74
2.11	Literatura . . . . .	74

<b>3</b>	<b>Vlastnosti normálneho kvapalného <math>^3\text{He}</math></b>	<b>76</b>
3.1	Kvapalné $^3\text{He}$ ako ideálny degenerovaný Fermiho plyn? . . . . .	78
3.2	Pauliho paramagnetizmus kvapalného $^3\text{He}$ . . . . .	81
3.3	Transpportné vlastnosti kvapalného $^3\text{He}$ . . . . .	83
3.4	Landauova teória kvapalného $^3\text{He}$ . . . . .	84
3.5	Literatúra . . . . .	90
<b>4</b>	<b>Tuhé hélium</b>	<b>91</b>
4.1	Kvantový kryštál . . . . .	91
4.2	Tuhé $^3\text{He}$ . . . . .	93
4.2.1	Môže mať kryštál vyššiu entropiu než kvapalina? Pomerančková predpoveď a chladiaca metóda . . . . .	93
4.2.2	Kryštalizačný teplomer . . . . .	95
4.2.3	Jadrový magnetizmus $^3\text{He}$ . . . . .	99
4.3	Tunelovanie atómov v kryštáloch hélia . . . . .	101
4.3.1	Kvantová difúzia. . . . .	102
4.3.2	Nulové vakancie . . . . .	105
4.3.3	Supersolid . . . . .	106
4.3.4	Torzny oscilátor a supratekutosť . . . . .	110
4.4	Literatúra . . . . .	111
<b>5</b>	<b>Supratekuté <math>^4\text{He}</math></b>	<b>113</b>
5.1	Rovnovážny fázový diagram . . . . .	113
5.2	Vybrané fyzikální vlastnosti supratekutého $^4\text{He}$ . . . . .	115
5.3	Supratekutý film kapalného hélia . . . . .	117
5.4	Základní teoretické představy o supratekutosti $^4\text{He}$ . . . . .	118
5.5	Úvod do Landauovy teorie supratekutosti $^4\text{He}$ . . . . .	119
5.6	Landauovo kritérium supratekutosti . . . . .	120
5.7	Termodynamika He II . . . . .	122
5.8	Hydrodynamika He II . . . . .	124
5.9	Vlnové procesy v He II . . . . .	125
5.9.1	První zvuk . . . . .	127
5.9.2	Druhý zvuk . . . . .	128
5.9.3	Třetí zvuk . . . . .	128
5.9.4	Čtvrtý zvuk . . . . .	129
5.10	Kvantově mechanický popis He II . . . . .	129
5.11	Kvantování cirkulace v He II . . . . .	131
5.11.1	Kvantovaný vír v He II . . . . .	132
5.11.2	Experimentální důkaz kvantování cirkulace v He II . . . . .	133
5.12	Rotující He II . . . . .	134
5.13	Vnitřní tření . . . . .	135
5.14	Nukleace a interakce kvantovaných vírů v He II . . . . .	136
5.14.1	Nukleace kvantovaných vírů . . . . .	136

5.14.2	Interakce mezi víry . . . . .	137
5.15	Vizualizace kvantovaných vírů v He II . . . . .	139
5.16	Literatura . . . . .	140
<b>6</b>	<b>Supratekuté fáze <math>^3\text{He}</math></b>	<b>142</b>
6.1	Základné vlastnosti supratekutých fáz $^3\text{He}$ . . . . .	142
6.2	Spektrum excitácií v supratekutých fázach $^3\text{He}$ . . . . .	148
6.3	Dynamika excitácií a andrejevovská reflexia v supratekutom $^3\text{He-B}$	150
6.4	Spinová dynamika v supratekutom $^3\text{He-B}$ . . . . .	156
6.5	Pozdĺžna jadrová magnetická rezonancia . . . . .	157
6.6	Frekvenčný posuv a priečna JMR v supratekutých fázach $^3\text{He}$ .	158
6.7	Magnetická supratekutosť a stavy s koherentnou precesiou spinov	160
6.8	Procesy magnetickej relaxácie v supratekutom $^3\text{He-B}$ . . . . .	162
6.9	Spinovo precesujúce vlny . . . . .	164
6.10	Perzistentne precesujúca doména v $^3\text{He-B}$ . . . . .	166
6.11	Boseova-Einsteinova kondenzácia magnónov v supratekutom $^3\text{He}$	167
6.12	Rozhranie medzi A a B fázami supratekutého $^3\text{He}$ . . . . .	169
6.12.1	Nukleačný problém . . . . .	170
6.13	Rotujúci supratekuté $^3\text{He}$ . . . . .	170
6.13.1	Hladina rotujúciho vzorku . . . . .	170
6.13.2	Kvantované víry alebo vírové listy? . . . . .	172
6.13.3	Vírové štruktúry v rotujúcim $^3\text{He-A}$ . . . . .	174
6.13.4	Kvantované víry v rotujúcim $^3\text{He-B}$ . . . . .	178
6.13.5	Supratekutá Kelvinova-Helmholtzova nestabilita . . . . .	181
6.14	Literatúra . . . . .	183
<b>7</b>	<b>Kvantová kavítace a kvantové vypařování</b>	<b>186</b>
7.1	Standardní teoretický popis kavítace . . . . .	186
7.2	Stavová rovnice a spinodální limit . . . . .	188
7.3	Experimentální studium kavítace v kapalném heliu . . . . .	189
7.4	Kvantové vypařování . . . . .	192
7.5	Literatura . . . . .	194
<b>8</b>	<b>Ionty v supratekutém heliu</b>	<b>195</b>
8.1	Struktura iontů . . . . .	195
8.2	Lokalizace nabitých částic u hladiny He . . . . .	196
8.3	Pohyblivost iontů . . . . .	199
8.4	Dvojměrná krystalizace . . . . .	200
8.5	Detekce a nukleace kvantovaných vírů . . . . .	203
8.6	Landauova kritická rychlost . . . . .	205
8.7	Ionty v supratekutém $^3\text{He}$ . . . . .	206
8.8	Literatura . . . . .	207

<b>9</b>	<b>Chladné atomové plyny</b>	<b>208</b>
9.1	Úvod . . . . .	209
9.2	Přehled experimentálních technik . . . . .	210
9.2.1	Uvěznění atomů v pasti . . . . .	211
9.2.2	Laserové chlazení . . . . .	213
9.2.3	Detekce . . . . .	216
9.3	Neinteragující bosony v pasti . . . . .	217
9.3.1	Hustota stavů . . . . .	217
9.3.2	Základní termodynamické vlastnosti . . . . .	219
9.3.3	Rozdělení hustoty a rychlosti . . . . .	221
9.4	Interagující bosony v pasti . . . . .	222
9.4.1	Grossova–Pitajevského rovnice . . . . .	222
9.4.2	Viriální teorém a energetické škály . . . . .	224
9.4.3	Thomasova–Fermiho aproximace . . . . .	226
9.4.4	Kolektivní excitace . . . . .	228
9.5	Rotující kondenzáty a víry . . . . .	231
9.5.1	Víry v homogenním Boseově plynu . . . . .	232
9.5.2	Víry v uvězněném plynu . . . . .	234
9.5.3	Stabilita víru . . . . .	235
9.6	Feshbachova rezonance . . . . .	237
9.6.1	Dvoukanálový model . . . . .	238
9.7	Neinteragující fermiony v pasti . . . . .	240
9.7.1	Rozdělení hustoty a rychlosti . . . . .	242
9.8	Homogenní Fermiho plyn s přitažlivou interakcí . . . . .	243
9.8.1	BCS teorie . . . . .	243
9.8.2	Renormalizace vazbové konstanty . . . . .	245
9.8.3	Přechod BCS–BEC . . . . .	246
9.8.4	Výsledky v aproximaci středního pole . . . . .	247
9.9	Aproximace lokální hustoty . . . . .	250
9.9.1	Příklady použití . . . . .	251
9.10	Optické mřížky . . . . .	252
9.10.1	Blochovy oscilace . . . . .	253
9.10.2	Bosony v optické mřížce . . . . .	254
9.10.3	Fázový přechod supratekutina–izolant . . . . .	257
9.10.4	Fermiony v optické mřížce . . . . .	258
9.11	Literatura . . . . .	259
<b>10</b>	<b>Kryogenní dynamika tekutin a kvantová turbulence</b>	<b>260</b>
10.1	Úvod do proudění a turbulence klasických tekutin . . . . .	260
10.2	Možnosti využití kryogenního helia pro studium klasické turbulence . . . . .	263
10.3	Supratekutá hydrodynamika, kvantované víry a jejich dynamika . . . . .	266
10.4	Kvantová turbulence v protiproudu normální a supratekuté složky . . . . .	269
10.5	Kvantová turbulence vyvolaná prouděním supratekuté složky . . . . .	271
10.6	Turbulence v He II generovaná mechanicky, mřížková turbulence . . . . .	273

---

10.7	Kvantová turbulence v limitě nulové teploty . . . . .	275
10.8	Kvantová turbulence v ${}^3\text{He-B}$ v přítomnosti normální složky . . .	279
10.9	Závěr . . . . .	282
10.10	Literatura . . . . .	282
<b>11</b>	<b>Supratekuté hélium ako kozmologické laboratórium ?</b>	<b>284</b>
11.1	Supratekuté hélium - modelový systém pre kozmológiu . . . . .	284
11.2	Kibbleův-Zurkův mechanismus vzniku defektů při fázovém přechodu druhého druhu . . . . .	285
11.3	Kibbleův-Zurkův mechanismus v kondenzovaných látkách . . . . .	287
11.3.1	Kibbleův-Zurkův mechanismus v supratekutém ${}^3\text{He-B}$ . . . . .	287
11.3.2	Kibbleův-Zurkův mechanismus v supratekutém He II . . . . .	291
11.4	Supratekuté ${}^3\text{He-B}$ a analóg Unruhovho javu . . . . .	291
11.4.1	Spinová supratekutost v ${}^3\text{He-B}$ a simulácia horizontu udalostí . . . . .	294
11.5	Literatúra . . . . .	297
<b>12</b>	<b>Supratekutost barevných kvarků</b>	<b>298</b>
12.1	Základní pojmy . . . . .	298
12.2	Fázový diagram QCD . . . . .	304
12.2.1	Jaderná hmota . . . . .	305
12.2.2	Silně interagující mnohokvarkový systém (nonCFL) . . . . .	306
12.2.3	Slabě interagující mnohokvarkový systém (CFL) . . . . .	308
12.3	Experimentální projevy supratekutosti barevných kvarků . . . . .	311