

## 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 mnohočasticových 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 blokadí . . . . .	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	Transportné 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? Pomerančkova predpoveď a chladiaca metóda . . . . .	93
4.2.2	Kryštalizačný teploter . . . . .	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 fyzikálne 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 kavitace a kvantové vypařování</b>	<b>186</b>
7.1	Standardní teoretický popis kavitace . . . . .	186
7.2	Stavová rovnice a spinodální limit . . . . .	188
7.3	Experimentální studium kavitace 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 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 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 turbulencia v limite nulovej teploty . . . . .	275
10.8	Kvantová turbulencia v $^3\text{He-B}$ v prítomnosti normálnej složky . . . . .	279
10.9	Záver . . . . .	282
10.10	Literatúra . . . . .	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 mechanizmus vzniku defektů při fázovém přechodu druhého druhu . . . . .	285
11.3	Kibbleův-Zurkův mechanizmus v kondenzovaných látkách . . . . .	287
11.3.1	Kibbleův-Zurkův mechanizmus v supratekutém $^3\text{He-B}$ . . . . .	287
11.3.2	Kibbleův-Zurkův mechanizmus 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
<b>13</b>	<b>Základy supravodivosti</b>	<b>325</b>
13.1	Ideální vodivost . . . . .	327
13.2	Ideální diamagnetizmus . . . . .	328
13.3	Supravodiče I. a II. typu . . . . .	330
13.4	Demagnetizačný faktor . . . . .	332
13.5	Termodynamika supravodičov . . . . .	333
13.6	BCS teória . . . . .	335
13.6.1	Izotopický jav . . . . .	336
13.6.2	Dvojica elektrónov s príťažlivou interakciou . . . . .	336
13.6.3	Príťažlivá interakcia sprostredkovaná fonónmi . . . . .	339
13.6.4	BCS rovnica supravodivej energetickej medzery . . . . .	341
13.6.5	Kritická teplota $T_c$ a energetická medzera $\Delta$ . . . . .	343
13.6.6	Shrnutie . . . . .	344
13.7	Termodynamické veličiny . . . . .	345
13.8	Supravodivost so silnou väzbou . . . . .	348
13.9	Bezmedzerová supravodivost . . . . .	349
13.10	Tunelovanie . . . . .	350
13.10.1	Tunelovanie medzi dvomi systémami voľných elektrónov . . . . .	353
13.10.2	Tunelovanie medzi systémom voľných elektrónov a BCS supravodičom . . . . .	353

13.10.3 Tunelovanie medzi systémom voľných elektrónov a kvázi dvojrozmerným systémom . . . . .	355
13.10.4 Tunelovanie v prípade anizotropnej energetickej medzery	356
13.11 Teória Ginzburga a Landaua . . . . .	358
13.11.1 Kvantovanie magnetického toku . . . . .	360
13.11.2 Ginzburgove-Landauove rovnice . . . . .	361
13.12 Rovnica Londonovcov a hĺbka vniku $\lambda_L$ . . . . .	363
13.13 Koherenčná dĺžka . . . . .	365
13.14 Dva typy supravodičov . . . . .	368
13.15 Literatúra . . . . .	371
<b>14 Supravodivé materiály</b>	<b>373</b>
14.1 Supravodivé chemické prvky . . . . .	373
14.2 Binárne zliatiny a chemické zlúčeniny . . . . .	375
14.3 Chevrelve fázy . . . . .	377
14.4 Kovalentné supravodiče . . . . .	377
14.5 Exotické a nekonvenčné supravodiče . . . . .	379
14.6 Vysokoteplotní kupráty . . . . .	385
14.6.1 Krystalová a magnetická štruktúra . . . . .	387
14.6.2 Transport elektrónů . . . . .	389
14.7 Shrnutí . . . . .	394
14.8 Literatura . . . . .	396
<b>15 Elektrodynamické vlastnosti supravodičov</b>	<b>398</b>
15.1 Kvantované víry v "klasických" supravodičích druhého druhu . . . . .	398
15.1.1 Upínání virů a relaxace. . . . .	401
15.1.2 Model kritického stavu. . . . .	401
15.1.3 Tepelně excitovaná relaxace. . . . .	404
15.1.4 Tečení supravodivých virů . . . . .	406
15.2 Specifika vysokoteplotních supravodičov . . . . .	406
15.2.1 Supravodivý stav VTS . . . . .	408
15.3 Supravodivé víry ve vysokoteplotních supravodičích . . . . .	409
15.4 Magnetizační procesy . . . . .	412
15.4.1 Vliv anizotropie . . . . .	412
15.5 Pohyb virů ve vysokoteplotním supravodiči . . . . .	414
15.5.1 Teplotní excitace – čára ireverzibility . . . . .	414
15.5.2 Křivka tání mřížky virů . . . . .	415
15.6 Upínání virů . . . . .	421
15.6.1 Bodové poruchy . . . . .	422
15.6.2 Velké defekty . . . . .	426
15.6.3 Korelované defekty . . . . .	428
15.7 Relaxace . . . . .	429
15.8 Granulární supravodiče . . . . .	432
15.9 Literatura . . . . .	434

<b>16 Josephsonovy jevy a jejich aplikace</b>	<b>436</b>
16.1 Josephsonovy jevy	439
16.1.1 Feynmanovo odvození Josephsonových jevů	439
16.1.2 Odvození Josephsonových jevů pomocí Hamiltonových rovnic pro Cooperovy páry	441
16.2 Josephsonovy jevy v supratekutém heliu	442
16.3 Fyzikální vlastnosti Josephsonových přechodů	443
16.3.1 Kalibrační invariance (lokální vnitřní symetrie)	443
16.3.2 Vliv statického magnetického pole na přechod	445
16.3.3 Závislost kritického proudu přechodu na teplotě	446
16.3.4 Elektrodynamika rozdílu fází v Josephsonově přechodu	446
16.3.5 RCSJ model Josephsonova přechodu	448
16.3.6 Volt-ampérové charakteristiky přechodu	449
16.3.7 Josephsonův přechod ozářený mikrovlnami - Shapirovy schody	452
16.4 Makroskopická kvantová interference	454
16.5 Supravodivá smyčka s jedním přechodem	456
16.6 Vybrané fyzikální vlastnosti malých kontaktů supravodičů a normálních kovů	457
16.6.1 Proud rozhraním normálního kovu a supravodiče (Andreevův odraz)	457
16.7 Tepelný šum	458
16.8 Malé přechody a coulombická blokáda	459
16.9 Vybrané aplikace Josephsonových jevů	460
16.9.1 Technologie přípravy Josephsonových přechodů	460
16.9.2 Josephsonův standard napětí	462
16.9.3 Přijímače submilimetrového záření	463
16.9.4 Generátory mikrovlnného záření	465
16.9.5 Supravodivé digitální obvody a převodníky	467
16.10 Skvidy – supravodivé kvantové interferenční detektory	467
16.10.1 Stejnoseměrný skvid	468
16.10.2 Střídavý skvid	469
16.10.3 Skvidový zesilovač	471
16.10.4 Technologie výroby skvidů	472
16.10.5 Skanovací skvidový mikroskop	473
16.10.6 Skvidové magnetometry pro biomagnetická měření	473
16.10.7 Skvidové magnetometry pro materiálový výzkum	474
16.11 Literatura	475
<b>17 Makroskopické kvantové jevy v supravodivých strukturách</b>	<b>478</b>
17.1 Úvod	478
17.2 Kvantová mechanika a submikrónové Josephsonovy struktury	479
17.3 Josephsonov spoj jako analog atómu	484
17.4 Ovládání qubitu a kvantová tomografie	491
17.4.1 Měření relaxačních a čistých defázovacích časů	500

17.5 Rf Squid v kvantovom režime - Schrödingerove mačiatko? . . . . .	503
17.6 Supravodivý jednopárový tranzistor - nábojový qubit . . . . .	507
17.7 Kvantová elektrodynamika supravodivého qubitu a rezonátora . . . . .	509
17.8 Kvantové logické hradlá . . . . .	518
17.9 Deutschov kvantový algoritmus . . . . .	521
17.10 Záver . . . . .	524
17.11 Literatúra . . . . .	524
<b>18 Vlastnosti tuhých látok pri nízkych teplotách</b>	<b>526</b>
18.1 Tepelná kapacita tuhých látok . . . . .	526
18.1.1 Mriežkové teplo . . . . .	527
18.1.2 Elektrónové teplo . . . . .	530
18.1.3 Magnetické teplo . . . . .	532
18.1.4 Príspevok od Schottkyho javu . . . . .	533
18.1.5 Merné teplo rôznych materiálov . . . . .	533
18.1.6 Meranie tepelnej kapacity . . . . .	537
18.2 Elektrická vodivosť . . . . .	539
18.2.1 Matthiessenove pravidlo . . . . .	541
18.2.2 Rozptyl elektrónov na fonónoch . . . . .	541
18.2.3 Rozptyl elektrónov na elektrónoch . . . . .	542
18.2.4 Rozptyl elektrónov na magnetickej štruktúre . . . . .	543
18.2.5 Kondov jav . . . . .	544
18.2.6 Vplyv magnetického poľa na transport náboja . . . . .	546
18.2.7 Klasické rozmerové javy . . . . .	547
18.2.8 Elektrická vodivosť polovodičov . . . . .	548
18.3 Tepelná vodivosť . . . . .	549
18.3.1 Elektrónová zložka . . . . .	549
18.3.2 Fonónová zložka . . . . .	551
18.3.3 Transport tepla magnetickým podsystemom . . . . .	552
18.3.4 Separácia a analýza jednotlivých zložiek tepelnej vodivosti . . . . .	553
18.3.5 Meranie tepelnej vodivosti . . . . .	556
18.4 Kapičův odpor . . . . .	557
18.4.1 Impedanční nepřizpůsobení . . . . .	558
18.4.2 Anomální (magnetický) Kapičův odpor . . . . .	561
18.5 Literatúra . . . . .	563
<b>19 Jaderný magnetizmus</b>	<b>565</b>
19.1 Fyzikální základy jaderného magnetizmu . . . . .	565
19.1.1 Základní parametry atomových jader . . . . .	565
19.1.2 Interakce izolovaného jádra s časově neproměnným magnetic- kým polem . . . . .	568
19.1.3 Interakce jádra s časově neproměnným elektrickým polem . . . . .	571
19.1.4 Interakce jádra s magnetickým a elektrickým polem . . . . .	572
19.2 Jaderný paramagnetizmus . . . . .	572



19.3	Hyperjemné interakce . . . . .	575
19.3.1	Magnetické interakce jádra s elektrony vlastního atomu . . . . .	575
19.3.2	Elektrická kvadrupólová interakce jádra s jeho okolím . . . . .	578
19.3.3	Velikost hyperjemných interakcí . . . . .	579
19.3.4	Interakce mezi jadernými momenty . . . . .	581
19.4	Uspořádání jaderných magnetických momentů v kovech . . . . .	582
19.5	Záporné teploty . . . . .	585
19.6	Jaderný magnetismus lanthanoidů . . . . .	587
19.6.1	Základní vlastnosti $4f$ iontů . . . . .	587
19.6.2	Krystalové pole a jeho singletní základní stav . . . . .	588
19.6.3	Hyperjemně zesílený jaderný magnetismus . . . . .	591
19.6.4	Magnetické uspořádání v $\text{PrNi}_5$ . . . . .	593
19.7	Základní vlastnosti NMR v pevných látkách . . . . .	596
19.7.1	Relaxace jaderné magnetizace . . . . .	596
19.7.2	Fenomenologický popis NMR . . . . .	598
19.7.3	Experimentální technika NMR . . . . .	599
19.7.4	Mikrofyzikální popis NMR . . . . .	605
19.7.5	Spin-mřížková relaxace v kovech . . . . .	609
19.8	Využití NMR ve fyzice nízkých a velmi nízkých teplot . . . . .	610
19.8.1	Fyzika $^3\text{He}$ . . . . .	611
19.8.2	Supravodiče . . . . .	613
19.8.3	Nízkoteplotní termometrie . . . . .	617
19.9	Literatura . . . . .	620
<b>20</b>	<b>Elektronový transport v kvantových systémech</b> . . . . .	<b>622</b>
20.1	Nízkorozměrné elektronové systémy . . . . .	624
20.2	Transport jako srážkový problém . . . . .	627
20.3	Balistický kanál a kvantování konduktance . . . . .	630
20.4	Konduktance a elektrický odpor . . . . .	633
20.5	Jev lokalizace v kvazijednorozměrných vodičích . . . . .	635
20.6	Lokalizace v kvazidvojrzměrných vodičích a vliv slabého magnetického pole . . . . .	637
20.7	Aharonovův — Bohmův jev . . . . .	642
20.8	Kvantový Hallův jev — celočíselný . . . . .	645
20.9	Zlomkový kvantový Hallův jev . . . . .	653
20.10	Rezonanční tunelování . . . . .	658
20.11	Coulombická blokáda . . . . .	661
20.12	Jednoelektronový tranzistor a turniket . . . . .	664
20.13	Literatura . . . . .	665