



国家出版基金项目  
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

中外物理学精品书系

引进系列 · 52

# 统计物理学中的 量子场论方法

(第3版)

[俄] 阿布里科索夫

[俄] 戈尔可夫 著

[俄] 加洛辛斯基

郝柏林 译



北京大学出版社  
PEKING UNIVERSITY PRESS



国家出版基金项目  
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

中外物理学精品书系

引进系列 · 52

# 统计物理学中的 量子场论方法

(第3版)

[俄] 阿布里科索夫  
[俄] 戈尔可夫      著  
[俄] 加洛辛斯基  
郝柏林              译

04142  
24



北京大学出版社  
PEKING UNIVERSITY PRESS

著作权合同登记号 图字：01-2012-5526

图书在版编目(CIP)数据

统计物理学中的量子场论方法：第3版/(俄罗斯)阿布里科索夫, (俄罗斯)戈尔可夫, (俄罗斯)加洛辛斯基著; 郝柏林译. —北京: 北京大学出版社, 2014.12

(中外物理学精品书系)

ISBN 978-7-301-25056-3

I. ①统… II. ①阿… ②戈… ③加… ④郝… III. ①量子场论-研究  
IV. ①O413.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 249674 号

© Абрикосов А.А., Горьков Л.П., Дзялошинский И.Е., 1998

本作品中文版权通过中华版权代理中心取得, 由北京大学出版社独家出版。

书 名: 统计物理学中的量子场论方法(第3版)

著作责任者: [俄]阿布里科索夫 戈尔可夫 加洛辛斯基 著, 郝柏林 译

责任编辑: 王树通

标准书号: ISBN 978-7-301-25056-3/O · 1018

出版发行: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn>

新浪微博: @北京大学出版社

电子信箱: [zpup@pup.pku.edu.cn](mailto:zpup@pup.pku.edu.cn)

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62752038

出版部 62754962

印 刷 者: 北京中科印刷有限公司

经 销 者: 新华书店

730 毫米×980 毫米 16 开本 21 印张 395 千字

2014 年 12 月第 1 版 2014 年 12 月第 1 次印刷

定 价: 65.00 元

---

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-62752024 电子信箱: [fd@pup.pku.edu.cn](mailto:fd@pup.pku.edu.cn)

# “中外物理学精品书系”

## 编委会

主任：王恩哥

副主任：夏建白

编委：（按姓氏笔画排序，标\*号者为执行编委）

王力军	王孝群	王牧	王鼎盛	石兢
田光善	冯世平	邢定钰	朱邦芬	朱星
向涛	刘川*	许宁生	许京军	张酣*
张富春	陈志坚*	林海青	欧阳钟灿	周月梅*
郑春开*	赵光达	聂玉昕	徐仁新*	郭卫*
资剑	龚旗煌	崔田	阎守胜	谢心澄
解士杰	解思深	潘建伟		

秘书：陈小红

## 序 言

物理学是研究物质、能量以及它们之间相互作用的科学。她不仅是化学、生命、材料、信息、能源和环境等相关学科的基础，同时还是许多新兴学科和交叉学科的前沿。在科技发展日新月异和国际竞争日趋激烈的今天，物理学不仅囿于基础科学和技术应用研究的范畴，而且在社会发展与人类进步的历史进程中发挥着越来越关键的作用。

我们欣喜地看到，改革开放三十多年来，随着中国政治、经济、教育、文化等领域各项事业的持续稳定发展，我国物理学取得了跨越式的进步，做出了很多为世界瞩目的研究成果。今日的中国物理正在经历一个历史上少有的黄金时代。

在我国物理学科快速发展的背景下，近年来物理学相关书籍也呈现百花齐放的良好态势，在知识传承、学术交流、人才培养等方面发挥着无可替代的作用。从另一方面看，尽管国内各出版社相继推出了一些质量很高的物理教材和图书，但系统总结物理学各门类知识和发展，深入浅出地介绍其与现代科学技术之间的渊源，并针对不同层次的读者提供有价值的教材和研究参考，仍是我国科学传播与出版界面临的一个极富挑战性的课题。

为有力推动我国物理学研究、加快相关学科的建设与发展，特别是展现近年来中国物理学者的研究水平和成果，北京大学出版社在国家出版基金的支持下推出了“中外物理学精品书系”，试图对以上难题进行大胆的尝试和探索。该书系编委会集结了数十位来自内地和香港顶尖高校及科研院所的知名专家学者。他们都是目前该领域十分活跃的专家，确保了整套丛书的权威性和前瞻性。

这套书系内容丰富，涵盖面广，可读性强，其中既有对我国传统物理学发展的梳理和总结，也有对正在蓬勃发展的物理学前沿的全面展示；既引进和介绍了世界物理学研究的发展动态，也面向国际主流领域传播中国物理的优秀专著。可以说，“中外物理学精品书系”力图完整呈现近现代世界和中国物理

科学发展的全貌，是一部目前国内为数不多的兼具学术价值和阅读乐趣的经典物理丛书。

“中外物理学精品书系”另一个突出特点是，在把西方物理的精华要义“请进来”的同时，也将我国近现代物理的优秀成果“送出去”。物理学科在世界范围内的重要性不言而喻，引进和翻译世界物理的经典著作和前沿动态，可以满足当前国内物理教学和科研工作的迫切需求。另一方面，改革开放几十年来，我国的物理学研究取得了长足发展，一大批具有较高学术价值的著作相继问世。这套丛书首次将一些中国物理学者的优秀论著以英文版的形式直接推向国际相关研究的主流领域，使世界对中国物理学的过去和现状有更多的深入了解，不仅充分展示出中国物理学研究和积累的“硬实力”，也向世界主动传播我国科技文化领域不断创新的“软实力”，对全面提升中国科学、教育和文化领域的国际形象起到重要的促进作用。

值得一提的是，“中外物理学精品书系”还对中国近现代物理学科的经典著作进行了全面收录。20世纪以来，中国物理界诞生了很多经典作品，但当时大都分散出版，如今很多代表性的作品已经淹没在浩瀚的图书海洋中，读者们对这些论著也都是“只闻其声，未见其真”。该书系的编者们在这方面下了很大工夫，对中国物理学科不同时期、不同分支的经典著作进行了系统的整理和收录。这项工作具有非常重要的学术意义和社会价值，不仅可以很好地保护和传承我国物理学的经典文献，充分发挥其应有的传世育人的作用，更能使广大物理学人和青年学子切身体会我国物理学研究的发展脉络和优良传统，真正领悟到老一辈科学家严谨求实、追求卓越、博大精深的治学之美。

温家宝总理在2006年中国科学技术大会上指出，“加强基础研究是提升国家创新能力、积累智力资本的重要途径，是我国跻身世界科技强国的必要条件”。中国的发展在于创新，而基础研究正是一切创新的根本和源泉。我相信，这套“中外物理学精品书系”的出版，不仅可以使所有热爱和研究物理学的人们从中获取思维的启迪、智力的挑战和阅读的乐趣，也将进一步推动其他相关基础科学更好更快地发展，为我国今后的科技创新和社会进步做出应有的贡献。

“中外物理学精品书系”编委会 主任  
中国科学院院士，北京大学教授  
王恩哥

2010年5月于燕园

## 中文本第 3 版译者序

阿布里科索夫、戈尔可夫和加洛辛斯基合著的《统计物理学中的量子场论方法》一书，在 20 世纪 60 年代初问世不久即被翻译成英文和中文；阿布里科索夫在 2003 年获得诺贝尔物理学奖，固然是 2006 年在莫斯科印行俄文第 3 版的原因之一，同时也说明本书作为一部经典著作的价值与需求。作为 1963 年科学出版社印行的中文本的译者，我也很高兴受北京大学出版社委托，在半个多世纪之后重新翻译此书。事实上，第 3 版只做了少量删减和订正，例如，删去了俄文第 2 版里新增的 §19.6；参考文献也基本保持了历史原貌。俄文第 2 版引用朗道和栗弗席兹《理论物理学教程》（俄文老版）处，我们加了少量中文新译本的信息。此外，我们还尽量对一些俄文文献给出了英文出处。

译者还想借此机会指出几点：

第一，统计物理学既是物理学、又是方法论。这本书主要讲述量子场论方法，同时用场论方法刻画了深刻而有趣的物理。所涉及的现象，有许多是朗道和同事们先猜到物理本质，发展了唯象理论，后来才被更为微观的理论、包括场论方法所证明。这里包括液氦的超流图像、费米液体的性质、超导理论中的金兹堡 - 朗道方程，还有较少为人知晓的宏观物体间的范德瓦尔斯力等。钻研这本书，有助于深入掌握相关的物理学知识。

第二，这本书反映了朗道学派的算功。20 世纪 50 年代后期，正是大规模计算机模拟蓬勃欲出的前夕，也是理论物理高手们靠解析推导解决问题的登峰造极的时代。钻研这本书，可以补足如今在物理学人中似嫌缺乏的算功锻炼。只有“解析”和“数值”两手都硬，才不致沦为跛足而行的理论物理工作者。

第三，本书第 3 章讲述温度大于零的场论方法，主要介绍了松原武生的温度格林函数。应当说，它并不是最方便的理论形式。J. Schwinger 在 1961 年建议的闭路格林函数框架，后来 L. V. Keldysh, R. Mills 等人曾加以发展。在周光召倡导下，我们把它发展成为一套完整且实用的、可以统一处理平衡和非平衡问题的方法；特别是引入顶角函数及其方程之后，闭路格林函数方法与量子场论有了高度并行性。我们发表在国际英文综述刊物《物理学报告》上的长篇文章<sup>①</sup>是对本书第 3 章的必要而适当的补充。

---

<sup>①</sup> Kuang-Chao Chou, Zhao-Bin Su, Bai-Lin Hao, Lu Yu. Equilibrium and nonequilibrium formalisms made unified (周光召, 苏肇冰, 郝柏林, 于淦. 处理平衡和非平衡问题的统一方法). *Physics Reports*, 118(1/2), 1 - 131, 1985.

本书第一作者阿布里科索夫再次同意出版中文译本。中国科学院理论物理研究所孙莉大夫帮助从莫斯科获取 2006 年俄文第 2 版; 北京大学出版社陈小红编辑、王树通编辑和理论物理研究所刘寄星研究员对于第 3 版中文本出版, 给予了诸多帮助; 英文《理论物理通讯》编辑部程希有编辑对中文 L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 排版技术给予指导。译者对他们表示衷心感谢。

郝柏林

2014 年 3 月



## 俄文本第 1 版作者序言

最近由于广泛使用了量子场论中的方法, 统计物理学有相当大的进展. 这些方法的优越性, 在于微扰论的新表述法, 首先是所谓费曼图的广泛应用. 图解法的基本优点是它的直观性. 运用单粒子问题的概念, 这个方法可以确定任意级近似的结构, 并借助对应规则写出所需的表达式. 新方法解决了大量旧理论无法考虑的问题, 还得出许多新的一般关系. 它是目前量子统计中最有力最有成效的方法.

现在, 关于量子统计中场论方法的表述及其对具体问题的应用, 杂志文献已浩如烟海. 但同时统计物理工作者中, 新方法却还没有为人所共知. 因此我们认为, 已经有必要系统和尽可能全面地叙述这些问题, 以飨广大读者.

关于本书取材, 我们首先力图显示新方法的实用性. 因此书中除了详细叙述数学工具外, 还讨论了量子统计的各种问题. 当然, 我们涉及的问题, 还远不是近几年来这个领域里新结果的总汇. 材料的取舍, 决定于它们的物理意义和借以演示一般方法的可能性.

我们只限于量子统计的场论表述的一种方案 (例如, 书中未提及所谓三维微扰论等). 照我们看来, 本书采用的格林函数方法是最简便的.

我们假定, 读者知道统计物理学和量子力学的基础. 书中叙述了二次量子化方法和推导场论方法所必需的一切知识. 在推导场论方法之前, 第一章里简述了关于能谱性质的某些现代概念, 并举了一些简单例子.

书中采用  $\hbar = 1$  的单位制. 温度以能量单位表示 ( $k = 1$ ).

朗道院士和皮达也夫斯基 (L. P. Pitaevski) 对本书涉及的问题做过许多宝贵的讨论, 作者向他们表示感谢.

阿布里科索夫  
戈尔可夫  
加洛辛斯基  
1961 年

## 英文本作者前言

我们非常高兴看到本书英文版问世,使其读者面扩大.自从我们写完本书俄文版以来,量子统计物理学中又得到一系列新结果,这主要涉及超导理论和费米液体动力学.但是由于这些结果的大多数具有特殊的性质,而且包含极为繁杂的计算,我们决定在这一版里不予叙述.

§22 和 §23 两节经过完全改写,因而在本版中的叙述更为现代,这主要涉及有限温度下的图解技术.其他各节里有为数不多的增补或更正.我们感谢西伟曼 (R. A. Silverman) 博士在如此短的出版期限要求下得以在新版中实现这些修正,并且关注了整个新版过程.

阿布里科索夫

戈尔可夫

加洛辛斯基

1963 年

## 俄文本第 2 版编辑部说明

本版反映了作者们为英文版所做改动和补充,同时也纠正了俄文第 1 版和英文版中所发现的不确切之处与印刷错误.

## 中文本第 1 版译者说明

本书根据 1962 年俄文版译出. 原作者为即将出版的英文译本作了若干补充与修正. 这些修正主要涉及 §16、§17、§19、§21、§22 和 §39; §21 和 §22.3 是完全改写了的, §19.6 是新增的. 原作者友好地提供了以上诸节的订正稿, 因而这个中译本中得以作了相应订正, 特此致谢.

译稿承以下同志校阅: 霍崇儒 (第一章), 章思俊 (第二、三章), 霍裕平 (第四章), 陈式刚 (第五章), 陈春先 (第六章), 于淦 (第七章), 谨致谢意.

郝柏林

1963 年 8 月, 北京

# 目 录

第 1 章 多粒子系统在低温下的一般性质	1
§1 元激发. 液体 $\text{He}^4$ 在低温下的能谱和性质	1
§1.1 引言. 准粒子	1
§1.2 玻色液体的能谱	4
§1.3 超流	8
§2 费米液体	12
§2.1 费米液体中的激发	12
§2.2 准粒子能量	14
§2.3 声波	18
§3 二次量子化	22
§4 稀薄玻色气体	25
§5 稀薄费米气体	31
第 2 章 温度等于零时的量子场论方法	37
§6 相互作用表象	37
§7 格林函数	44
§7.1 定义. 自由粒子的格林函数	44
§7.2 解析性质	48
§7.3 极点的物理意义	52
§7.4 系统在外场中的格林函数	56
§8 图解法的基本原则	57
§8.1 从变量 $N$ 到变量 $\mu$ 的变换	57
§8.2 维克定理	58
§8.3 费曼图	60
§9 各种类型相互作用的构图规则	64
§9.1 坐标空间中的图解法. 举例	64
§9.2 动量空间中的图解法. 举例	72
§10 戴逊方程. 顶角部分. 多粒子格林函数	77
§10.1 图形求和. 戴逊方程	77
§10.2 顶角部分. 多粒子格林函数	81
§10.3 基态能量	87

<b>第 3 章 温度大于零时的图解法</b> .....	89
§11 温度格林函数 .....	89
§11.1 一般性质 .....	89
§11.2 自由粒子温度格林函数 .....	93
§12 微扰论 .....	95
§12.1 相互作用表象 .....	95
§12.2 维克定理 .....	98
§13 坐标空间中的图解法 .....	102
§14 动量空间中的图解法. 举例 .....	111
§14.1 动量表象 .....	111
§14.2 举例 .....	114
§15 热力学势 $\Omega$ 的微扰论级数 .....	121
§16 戴逊方程. 多粒子格林函数 .....	126
§16.1 戴逊方程 .....	126
§16.2 格林函数和热力学势 $\Omega$ 的关系 .....	130
§17 温度大于零时的时间格林函数. 格林函数的解析性质 .....	134
<b>第 4 章 费米液体理论</b> .....	144
§18 动量传递很小时顶角部分的性质. 零声 .....	144
§19 有效质量. 边界动量和粒子数的关系. 能谱的玻色支. 比热 .....	149
§19.1 几个辅助关系式 .....	149
§19.2 费米液体理论基本关系的证明 .....	152
§19.3 能谱的玻色支 .....	154
§19.4 费米动量 $p_0$ 和粒子数关系的另一推导法 .....	155
§19.5 比热 .....	157
§20 相碰粒子总动量很小时顶角部分的奇异性 .....	161
§21 温度等于零时电子和声子的相互作用 .....	164
§21.1 顶角部分 .....	165
§21.2 声子格林函数 .....	166
§21.3 电子格林函数 .....	170
§21.4 电子比热线性项的修正 .....	175
§22 简并等离子体的某些性质 .....	177
§22.1 问题提法 .....	177
§22.2 动量传递小的顶角部分 .....	178
§22.3 电子能谱 .....	182
§22.4 热力学函数 .....	187

<b>第 5 章 相互作用玻色粒子系统</b> .....	190
§23 绝对温度零度时应用场论方法于玻色粒子系统 .....	190
§24 格林函数 .....	197
§24.1 方程式的结构 .....	197
§24.2 格林函数的解析性质 .....	200
§24.3 动量很小时格林函数的性质 .....	204
§25 稀薄非理想玻色气体 .....	205
§25.1 图解法 .....	205
§25.2 化学势和单粒子格林函数自能部分的关系 .....	207
§25.3 低密度近似 .....	210
§25.4 有效相互作用势 .....	213
§25.5 低密度近似下玻色气体的格林函数. 能谱 .....	216
§26 单粒子激发谱在其终点附近的性质 .....	217
§26.1 问题提法 .....	217
§26.2 方程组 .....	218
§26.3 产生声子的阈点附近谱的性质 .....	220
§26.4 裂变成两个动量平行且不为零的元激发时阈点附近谱的性质 .....	223
§26.5 两个激发以一定角度飞出的裂变 .....	225
§27 温度大于零时场论方法应用于有相互作用的玻色粒子系统 .....	227
<b>第 6 章 吸收介质中的电磁辐射</b> .....	231
§28 吸收介质中电磁辐射的格林函数 .....	231
§29 介电常数的计算 .....	237
§30 不均匀电介质中的范德瓦耳斯力 .....	240
§31 固体间的分子作用力 .....	245
§31.1 固体间的相互作用力 .....	245
§31.2 溶液中原子间的相互作用力 .....	251
§31.3 固体表面上的薄膜 .....	254
<b>第 7 章 超导理论</b> .....	256
§32 概论. 模型的选择 .....	256
§32.1 超导现象 .....	256
§32.2 模型. 相互作用哈密顿量 .....	257
§33 库伯现象 .....	259
§33.1 顶角部分的方程 .....	259
§33.2 顶角部分的性质 .....	262
§33.3 转变温度的确定 .....	263

---

§34	超导体的基本方程组	265
§34.1	绝对温度零度的超导体	265
§34.2	有外电磁场存在时的方程. 规范不变性	270
§34.3	温度高于零的超导体	271
§35	声子模型中超导理论方程组的推导	273
§36	超导体的热力学	276
§36.1	能隙和温度的关系	276
§36.2	超导体的热力学	278
§37	在弱电磁场中的超导体	280
§37.1	弱恒定磁场	280
§37.2	交变场中的超导体	287
§38	任意磁场中的超导体在转变温度附近的性质	291
§39	超导合金理论	296
§39.1	问题提法	296
§39.2	正常金属的剩余电阻	297
§39.3	超导合金的电磁性质	304
参考文献		312



# 第 1 章 多粒子系统在低温下的一般性质

## §1 元激发. 液体 $\text{He}^4$ 在低温下的能谱和性质

### §1.1 引言. 准粒子

统计物理研究由大量粒子组成的系统的行为. 液体、气体和固体的宏观性质最终是由组成这些系统的粒子间的微观相互作用决定的. 显然, 要解决包括决定每个粒子的行为在内的完整问题, 是无法设想的. 但系统的总的宏观特征只由某些平均量决定.

为了确定起见, 让我们讨论热力学性质. 系统的宏观状态可以用三个独立的热力学变量决定, 例如, 可以由给定压力  $P$ 、温度  $T$  和系统内的平均粒子数  $N$  来决定. 从量子力学观点看,  $N$  个粒子组成的封闭系统由其能级  $E_n$  描述. 试从系统中分出某个部分, 但要使新的子系还能当做是宏观的. 由于这样一个子系中的粒子数还很多, 而粒子间的作用力只在原子距离上有效, 因此忽略边界效应后, 就可以认为子系是封闭的, 可用子系中粒子数一定时的能级来描述. 事实上, 因为这个子系和原来封闭系统内的其他粒子互相作用着, 因而它的能量和粒子数都不是严格确定的, 它处于任何一个能级上的概率都是大于零的.

由统计物理学知道 (参看 [1])<sup>①</sup>, 热力学公式的微观推导基于所谓吉布斯分布, 它给出子系处于能量为  $E_{nN}$ , 粒子数为  $N$  的状态的概率:

$$w_{nN} = Z^{-1} e^{-\frac{E_{nN} - \mu N}{T}}, \quad (1.1)$$

式中,  $T$  是绝对温度,  $\mu$  是化学势, 而  $Z$  是由以下条件决定的归一因子:

$$\sum_{n, N} w_{nN} = 1. \quad (1.2)$$

由 (1.1) 式得

$$Z = \sum_{n, N} e^{-\frac{E_{nN} - \mu N}{T}}. \quad (1.3)$$

$Z$  称为总统计和. 如果能级  $E_{nN}$  已知, 则统计和可以求出. 由此可立即得到热力学函数, 因为  $Z$  和热力学势  $\Omega$  (以  $V, T, \mu$  为独立变量的势) 的关系是

$$\Omega = -T \ln Z. \quad (1.4)$$

<sup>①</sup> 参阅 [82], 第 69 页. — 译者注