

物理学名家名作译丛

八木浩辅 初田哲男 三明康郎 著
王 群 马余刚 庄鹏飞 译

夸克胶子等离子体

从大爆炸到小爆炸

Quark-Gluon Plasma

From Big Bang to Little Bang

物理学名家名作译丛

八木浩辅 初田哲男 三明康郎 著
王 群 马余刚 庄鹏飞 译

夸克胶子等离子体

从大爆炸到小爆炸

Quark-Gluon Plasma

From Big Bang to Little Bang

中国科学技术大学出版社

安徽省版权局著作权合同登记号:第 121414031 号

Quark-Gluon Plasma: From Big Bang to Little Bang, first edition by K. Yagi, T. Hatsuda, Y. Miake
first published by Cambridge University Press 2005.

All rights reserved.

This simplified Chinese edition for the People's Republic of China is published by arrangement
with Cambridge University Press Inc., New York, United States.

© Cambridge University Press & University of Science and Technology of China Press 2016

This book is in copyright. No reproduction of any part may take place without the written permission
of Cambridge University Press and University of Science and Technology of China Press.

This edition is for sale in the People's Republic of China (excluding Hong Kong SAR, Macau
SAR and Taiwan Province) only.

此版本仅限在中华人民共和国境内(不包括香港、澳门特别行政区及台湾地区)销售。

图书在版编目(CIP)数据

夸克胶子等离子体:从大爆炸到小爆炸/(日)八木浩辅,(日)初田哲男,(日)三明
康郎著;王群,马余刚,庄鹏飞译. —合肥:中国科学技术大学出版社,2016.3

(当代科学技术基础理论与前沿问题研究丛书:物理学名家名作译丛)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

书名原文: Quark-Gluon Plasma: From Big Bang to Little Bang

ISBN 978-7-312-03718-4

I. 夸… II. ①八… ②初… ③三… ④王… ⑤马… ⑥庄… III. 夸克—胶子—
等离子体 IV. O572.33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 193047 号

出版 中国科学技术大学出版社

安徽省合肥市金寨路 96 号,230026

<http://press.ustc.edu.cn>

<http://shop109383220.taobao.com>

印刷 安徽国文彩印有限公司

发行 中国科学技术大学出版社

经销 全国新华书店

开本 710 mm × 1000 mm 1/16

印张 28.5

字数 591 千

版次 2016 年 3 月第 1 版

印次 2016 年 3 月第 1 次印刷

定价 88.00 元

编 委 会

主 编 叶铭汉 陆 埏 张焕乔 张肇西 赵政国

编 委 (按姓氏笔画排序)

马余刚(上海应用物理研究所) 叶沿林(北京大学)

叶铭汉(高能物理研究所) 任中洲(南京大学)

庄鹏飞(清华大学) 陆 埏(紫金山天文台)

李卫国(高能物理研究所) 邹冰松(理论物理研究所)

张焕乔(中国原子能科学研究院) 张新民(高能物理研究所)

张肇西(理论物理研究所) 郑志鹏(高能物理研究所)

赵政国(中国科学技术大学) 徐珊珊(近代物理研究所)

黄 涛(高能物理研究所) 谢去病(山东大学)

内 容 简 介

夸克胶子等离子体(QGP)是大爆炸模型中早期宇宙所处的状态,它的性质对于宇宙的演化过程有着重要影响。人们可以在实验室中让接近光速的相向运动的两束重离子对撞来产生夸克胶子等离子体,从而定量地研究它的产生机制和性质。经过多年的努力,物理学家已经建立了系统描述夸克胶子等离子体的物理理论,也建设了若干大型实验装置如相对论重离子对撞机(RHIC)和大型强子对撞机(LHC)等来产生夸克胶子等离子体和研究其物理性质。在该领域中耕耘了几十年的八木浩辅、初田哲男和三明康郎三位教授,系统地总结了近年来的理论和实验进展,汇聚成本书,这是一本高能核物理和相关领域研究者和学生的重要参考书,尤其有助于青年研究者在较短时间内对夸克胶子等离子体物理有全面和深入浅出的认识。

本书适合用作研究生和高年级本科生的教材。内容主要分为3个部分,分别讨论夸克胶子等离子体的基本概念、天体物理中的夸克胶子等离子体和相对论重离子碰撞中的夸克胶子等离子体。译者是在此领域工作多年的资深学者。

中文版序言

很高兴给我们的著作《夸克胶子等离子体：从大爆炸到小爆炸》(剑桥大学出版社, 2005年初版, 2008年再版)的中文版写序言。三位翻译者——中国科学技术大学的王群教授、中国科学院上海应用物理研究所的马余刚教授和清华大学的庄鹏飞教授在翻译英文版的过程中付出了艰辛的努力, 我们对他们表示诚挚的感谢。

近年来, 高能重离子碰撞中的夸克胶子等离子体和夸克物质、早期宇宙和致密星物理的研究领域有许多重要进展。我们的中国同行对这个领域的理论和实验发展做出了广泛的科学贡献。此领域是粒子物理、核物理和天体物理的交叉学科, 我们希望此中文版能给对此领域感兴趣的中国学生和研究人员提供有益的基础知识。

Kohsuke YAGI

八木浩辅



Tetsuo HATSUDA

初田哲男



Yasuo MIAKE

三明康郎



2014年1月24日

译者序言

1974 年,李政道等人首次提出通过把高能量密度或高核子密度的物质存储在一个较大的体积内,物理真空的破缺对称性可以得到瞬间的恢复,也许能产生出核子物质的一个新形态。随后有研究者提出高能高核子密度可以用高能重离子碰撞来实现。在如此高能高密的极端条件下,可以使不同核子里的夸克胶子溢出并在较大距离内共存,使核子的外壳不复存在,这就意味着核物质发生了退禁闭相变,产生的新物态后来被叫作夸克胶子等离子体或夸克物质。高温情形下的退禁闭相变在格点量子色动力学的计算中已得到证实。根据现代宇宙学,高温夸克物质也是大爆炸几个微秒后宇宙所处的状态,探索和研究高温夸克物质能加深我们对质量和禁闭的起源及早期宇宙的认识,具有重大的科学意义。产生和研究夸克物质这种新物态,是高能重离子碰撞实验的主要科学目标,比如正在运行的美国布鲁克海文国家实验室 (BNL) 的相对论重离子碰撞实验 (RHIC) 和欧洲核子研究中心 (CERN) 大型强子对撞机 (LHC) 上的重离子碰撞实验,以及未来将在德国重离子研究实验室 (GSI) 建造的 FAIR 装置上的 CBM 实验等。

近十年来,我国在夸克胶子等离子体和夸克物质研究领域有了长足的发展,涌现了一批活跃在前沿的优秀中青年学者,他们在理论和实验的各研究方向上取得了一系列瞩目的成果。不断有青年人进入此领域,研究队伍正在成长和扩大。我国的青年学生、学者在学习和研究中主要参考英文文献和书籍,中文文献和参考书非常缺乏,有些青年学者特别需要基础的中文参考书或教科书,以帮助他们尽快进入研究课题或在研

究中快速查阅相关基础知识。本书的英文版是理想的参考书之一, 内容全面, 讲解细致, 既适合作研究生教材, 也适合作为研究人员的参考书。借中国科学技术大学出版社的国际学术著作翻译计划实施之机, 我们将此书翻译成中文, 希望对我国青年学生、学者在学习本领域基础知识和进入研究课题上有所帮助, 也希望它成为本领域研究人员经常查阅的中文参考书。本书采用中文 Latex 排版, 公式美观大方, 改善了读者阅读科学书籍的感受, 符合世界科学书籍出版规范, 易于修改和维护。

我们感谢中国科学技术大学高能核物理理论组的博士后、研究生和本科生在编译本书过程中付出的辛勤劳动, 其中邓建、方仁洪、胡启鹏、刘娟、庞锦毅、庞龙刚、浦实、王金诚、徐浩浩参与了部分章节的初始翻译和校对, 夏晓亮和贾拓参与了部分章节的校对。我们感谢上海应用物理研究所的李薇和田健参与了部分章节的初始翻译。我们特别感谢中国科学技术大学的宋玉坤博士, 他负责本书的全面编辑校对和修改润色工作, 特别是他输入了全书的所有编号公式, 付出了大量时间和精力。我们感谢原作者提供了所有插图的源文件, 为我们处理插图节省了不少精力。我们还要感谢中国科学技术大学出版社对本书出版的支持。

在本书即将完成之际, 我们收到一个不幸的消息: 原书作者之一八木浩辅 (Kohsuke Yagi) 教授, 因病于 2014 年 5 月 18 日逝世, 终年 79 岁。八木浩辅教授曾任 1997 年 Quark Matter 大会主席。我们对八木教授的逝世表示沉痛的哀悼。八木教授生前非常希望看到本书中文版的面世, 本书的付梓与发行将告慰八木教授的在天之灵。

由于时间和精力所限, 本书出现一些错误在所难免, 恳请读者谅解。我们设立了一个勘误邮件地址 (erratum.qgp@gmail.com), 希望读者指正书中的错误并告知我们, 我们将在本书再版时更正, 并表示感谢。

王 群 马余刚 庄鹏飞

2015 年 6 月 8 日

前 言

现代物理学有两个基本观念：一个是建立在定域规范不变性原理基础上的基本粒子标准模型，另一个是基于广义相对论的大爆炸宇宙学标准模型。这两个观念为人们回答以下两个问题提供了线索：(1) 什么是物质的基本构成单元？(2) 物质在何时形成？本书的主要议题“夸克胶子等离子体”(QGP) 与这两个问题密切相关。事实上，夸克胶子等离子体就是物质的原初状态，在宇宙诞生后的几微秒内形成，是宇宙中各种元素的源头。

众所周知，强相互作用基本粒子(夸克和胶子)的动力学是由量子色动力学(QCD)描述的。根据QCD，由质子和中子构成的普通核物质在高温高压下发生相变，当温度高于 10^{12} K时，核物质转变为热夸克胶子等离子体，当密度大于 10^{12} kg/cm³时，核物质转变为冷夸克等离子体。这两种相变有可能在早期宇宙或致密星核心中发生。现在已经可以在实验室里利用重离子加速器实现高能核核碰撞以产生热密火球或小爆炸，我们期待核子在核核的剧烈碰撞中溶解出其组分，形成夸克胶子等离子体。

本书旨在介绍有关QGP这种原初物态的物理知识，读者仅需具备基本粒子物理、核物理、凝聚态物理和天体物理的一些有限的背景知识即可。本书特别针对物理学科的高年级本科生和低年级研究生，他们可以是上述领域的，也可以是加速器科学和计算机科学领域的。此外，作者希望本书也能成为已经在上述领域工作的研究人员的参考书。

第1章是引言，讲述了QGP的基本物理和寻找或发现夸克胶子等

离子体的纵览,着重阐述了研究早期宇宙结构(大爆炸)和 QGP 结构(小爆炸)的常用方法。

正文分为 3 个部分:

第 1 部分是关于 QGP 物理和 QCD 相变的背景理论知识。这部分可以独立于其他部分,介绍了现代规范场理论与应用(如 QCD 中的色禁闭、渐近自由和手征对称性破坏等)、热场理论和格点规范理论基础以及相变与临界现象。

第 2 部分讨论 QGP 对宇宙学和恒星结构的影响。这部分结合爱因斯坦的广义相对论讨论了热膨胀宇宙和致密星(中子星和夸克星)的物理。对于黎曼空间、爱因斯坦方程、史瓦西解等知识了解很少的读者可以参考附录 D 的内容。

第 3 部分概述了相对论性和超相对论性核核碰撞的物理知识。此类碰撞是实验室中产生和探测 QGP 和 QCD 相变的唯一途径,介绍了相对论流体力学和相对论动理学,它们是研究碰撞中产生的热密物质的主要理论工具。在讨论了 QGP 的各种实验信号之后,对固定靶核核碰撞实验做了总结;随后介绍了世界上第一个相对论性重离子对撞机(布鲁克海文国家实验室)上取得的引人瞩目的实验结果,着重点放在 QGP 的实验证据方面;此外,也讨论了高能重离子碰撞实验的探测器及其特殊功能。

本书涵盖的范围广泛,从基础知识到前沿进展,从理论到实验,从宇宙大爆炸和致密星到地球上的小爆炸实验等。作者假定读者已经熟悉中级水平的量子力学、量子场论的基本方法、统计热力学和狭义相对论,包括狄拉克方程。尽管如此,作者仍概括了这些领域足够和必要的基础知识,使本书尽可能成为独立参考书。为此,作者在 8 个附录里列出了本书中一些关键步骤的证明和推导,而且在大部分章节的结尾还设置了总共约 160 个练习题。

作者并不是要提供一本关于 QGP 的完整参考书:书中仅包含了对学生特别有用的内容。读者可以在最近几届“国际夸克物质大会”会议文集中找到这个领域更广泛和最新的进展:海德堡(1996)、筑波(1997)、都灵(1999)、布鲁克海文—石溪(2001)、南特(2002)和伯

克利 (2004)。

本书原始手稿的部分内容已经在筑波大学和东京大学给研究生开的系列讲座中使用。作者要感谢参加这些讲座的学生。作者还要感谢 Homer E. Conzett 仔细阅读了部分手稿并提出很多关于语法和写作风格的建议。作者还希望表达对剑桥大学出版社编辑的谢意, 他们是: Simon Capelin, Tamsin van Essen, Vince Higgs 和 Irene Pizzie, 作者同他们建立了愉快的工作关系。感谢我们的许多朋友和同事, 特别是: Masayuki Asakawa, Gordon Baym, Hirotsugu Fujii, Machiko Hatsuda, Tetsufumi Hirano, Kazunori Itakura, Teiji Kunihiro, Tetsuo Matsui, Berndt Muller, Shoji Nagamiya, Atsushi Nakamura, Yasushi Nara, Satoshi Ozaki, Shoichi Sasaki 和 Hideo Suganuma, 他们中有的给作者提供了数据, 有的参与了有益的讨论。

夸克胶子等离子体是 QCD 的主要研究领域之一, 发展迅速。尽管如此, 作者仍希望本书可以长期作为介绍此领域基本概念的入门书, 使读者没有太大困难就可以进入前沿研究。

虽然本书主要是关于 QGP 物理的教科书, 根据本科生/研究生课程的需要, 对教学内容或主题也推荐其他选择。(1) 对规范场论导论课程, 我们建议以下内容和次序: 第 2 章、第 4 章、第 5 章、第 6 章。(2) 对高等统计力学和相变课程, 我们建议: 第 3 章、第 4 章、第 5 章、第 6 章、第 7 章、第 12 章。(3) 对广义相对论在宇宙和致密星结构中应用的课程, 我们建议: 附录 D、第 8 章、第 9 章。(4) 对高等核物理或强子物理课程, 我们建议: 第 1 章、附录 E、第 9 章、第 10 章、第 11 章、第 13 章、第 14 章、第 15 章、第 16 章、第 17 章。

我们要感谢美国天文学会 (American Astronomical Society) 出版的《天体物理》杂志 (The Astrophysical Journal) 允许我们复制和使用图 8.2, 9.2 和 9.3; 感谢美国物理学会 (American Physical Society) 出版的《物理评论》(Physical Reviews)、《物理评论快报》(Physical Review Letters) 和《现代物理评论》(Reviews of Modern Physics) 允许我们复制和使用图 3.4, 3.5, 4.10, 5.8, 5.9, 7.6, 8.3, 8.4, 8.10, 13.6, 14.4(b), 15.2, 15.3, 15.12, 16.4, 16.6(a), 16.7, 16.8, 16.9, 16.12, 16.14,

16.15, 16.16, 16.18(a), 16.19, 16.20 和 17.4(b); 感谢斯普林格出版社 (Springer-Verlag) 出版的《欧洲物理》杂志 (The European Physical Journal) 允许我们复制和使用图 15.4, 15.5, 15.6 和 15.11(a); 感谢爱斯维尔科学出版社 (Elsevier Science Publishers B.V.) 出版的《核物理》(Nuclear Physics)、《物理快报》(Physics Letters)、《物理报告》(Physics Reports) 和《核物理仪器和方法》(Nuclear Instruments and Methods in Physics Research) 允许我们复制和使用图 3.3, 5.7, 7.3, 7.5, 10.1, 14.9, 15.7, 15.9, 15.10, 15.11(b), 16.3, 16.4, 16.5, 16.10, 16.11, 16.16(b), 16.17, 17.2, 17.4(a) 和 17.7; 感谢斯普林格出版社 (Springer-Verlag) 出版的《物理学和天文学讲义》(Lecture Notes in Physics and Astronomy and Astrophysics Library) 允许我们复制和使用图 3.6 和 9.6; 感谢英国物理学会 (Institute of Physics) 出版的《高能物理》杂志 (Journal of High Energy Physics) 和《物理》杂志 (Journal of Physics) 允许我们复制和使用图 13.2; 感谢世界科学出版社 (World Scientific) 出版的《高能物理进展高级丛书》(Advanced Series on Directions in High Energy Physics) 允许我们复制和使用图 15.8。在每个图的标题中我们给出了出处, 我们感谢图作者允许我们复制、使用或修改这些图。

虽然作者努力避免概念和打字错误, 仍担心书中有疏漏。打字错误和更正将在如下网页上列出: <http://utkhii.px.tsukuba.ac.jp/cupbook/>。读者可以向上述网页提出书中其他错误或发表评论, 作者向他们表示感谢。

作者很高兴本书能在世界物理年的 2005 年出版, 在 100 年前, 爱因斯坦发表了他的 3 篇伟大著作, 阐述了光的粒子性、布朗运动的分子理论和狭义相对论。

目 次

中文版序言	(i)
译者序言	(iii)
前言	(v)
第 1 章 夸克胶子等离子体是什么	(1)
1.1 QCD 渐近自由和退禁闭	(1)
1.2 QCD 手征对称性破缺	(4)
1.3 夸克胶子等离子体的产生	(4)
1.4 在哪里可以找到夸克胶子等离子体	(6)
1.5 相对论重离子碰撞产生 QGP 的信号	(9)
1.6 相对论重离子碰撞实验纵览	(11)
1.7 自然单位和粒子数据	(14)

第 1 部分 夸克胶子等离子体的基本概念

第 2 章 QCD 简介	(16)
2.1 QCD 经典作用量	(16)
2.2 QCD 量子化	(18)
2.3 QCD 重整化	(21)
2.3.1 跑动耦合常数	(22)
2.3.2 渐近自由的更多内容	(24)
2.4 QCD 的整体对称性	(26)
2.4.1 手征对称性	(26)
2.4.2 伸缩对称性	(27)

2.5	QCD 真空性质	(27)
2.6	非微扰 QCD 的研究方法	(29)
2.6.1	袋模型	(29)
2.6.2	势模型	(30)
2.6.3	NJL 模型	(31)
2.6.4	手征微扰理论	(32)
2.6.5	QCD 求和规则	(32)
2.6.6	格点 QCD	(33)
	习题	(34)
第 3 章	夸克强子相变的物理	(37)
3.1	热力学的基本知识	(38)
3.2	无相互作用系统	(41)
3.3	强子弦和解禁闭	(42)
3.4	强子的渗析	(43)
3.5	袋模型的状态方程	(44)
3.6	Hagedorn 极限温度	(47)
3.7	状态方程的参数化形式	(49)
3.8	格点状态方程	(50)
	习题	(53)
第 4 章	有限温度场论	(55)
4.1	Z 的路径积分表示	(56)
4.2	黑体辐射	(58)
4.3	有限 T 和 μ 的微扰理论	(60)
4.3.1	自由传播子	(61)
4.3.2	顶角	(62)
4.3.3	费曼规则	(63)
4.4	实时格林函数	(64)
4.5	高温零化学势的胶子传播子	(66)
4.6	高温零化学势的夸克传播子	(72)
4.7	HTL 重求和	(73)
4.8	压强的微扰计算——展开到 $O(g^5)$	(75)
4.9	$O(g^6)$ 贡献的红外问题	(77)
4.10	QED 等离子体中的德拜屏蔽	(79)

4.11 QED 等离子体的 Vlasov 方程.....	(81)
4.12 QCD 等离子体的 Vlasov 方程.....	(83)
习题.....	(84)
第5章 QCD 相变的格点规范理论	(88)
5.1 格点 QCD 基础.....	(88)
5.1.1 Wilson 线.....	(88)
5.1.2 格点上的胶子.....	(90)
5.1.3 格点上的费米子.....	(91)
5.1.4 格点配分函数.....	(94)
5.2 Wilson 圈.....	(95)
5.3 强耦合展开和禁闭效应.....	(97)
5.4 弱耦合展开和连续极限.....	(98)
5.5 蒙特卡罗模拟.....	(100)
5.5.1 重味夸克和反夸克之间的势.....	(102)
5.5.2 轻夸克的质量谱.....	(103)
5.6 有限温度的格点 QCD.....	(105)
5.7 $N_f = 0$ 的 QCD 禁闭-解禁闭转变.....	(107)
5.8 $N_f = 0$ 情况的相变级次.....	(110)
5.9 动力学夸克的影响.....	(111)
5.10 有限化学势的影响.....	(112)
习题.....	(113)
第6章 手征相变	(116)
6.1 热密物质中的 $\langle \bar{q}q \rangle$	(116)
6.1.1 高温展开.....	(117)
6.1.2 低温展开.....	(117)
6.2 NJL 模型.....	(118)
6.2.1 $T = 0$ 时的动力学对称性破缺.....	(120)
6.2.2 $T \neq 0$ 时的对称性恢复.....	(122)
6.3 平均场理论和朗道函数.....	(123)
6.3.1 相变级次.....	(123)
6.3.2 二级相变.....	(125)
6.3.3 三次方相互作用导致的一级相变.....	(127)
6.3.4 六次相互作用下的三相临界行为.....	(128)

6.4	空间非均匀性和关联	(131)
6.5	临界涨落和 Ginzburg 区域	(132)
6.6	重整化群和 ϵ 展开	(134)
6.6.1	4- ϵ 维度下的重整化	(135)
6.6.2	跑动耦合常数	(136)
6.6.3	顶角函数	(137)
6.6.4	顶角函数的重整化群方程	(138)
6.7	β_i 的微扰演化	(139)
6.8	重整化群方程和不动点	(140)
6.8.1	量纲分析和重整化群方程的解	(140)
6.8.2	重整化群的流	(141)
6.9	标度律和普适性	(144)
6.9.1	临界点的标度律	(144)
6.9.2	临界点附近的标度律	(145)
6.10	磁物态方程	(146)
6.11	不动点的稳定性	(148)
6.12	$O(N)$ 对称的 ϕ^4 模型的临界指数	(149)
6.13	有限温度下 QCD 的手征相变	(150)
6.13.1	QCD 的朗道泛函	(151)
6.13.2	没有轴矢反常的无质量 QCD	(152)
6.13.3	有轴矢反常的无质量 QCD	(153)
6.13.4	轻夸克质量的效应	(155)
6.13.5	有限化学势的效应	(156)
	习题	(158)
第 7 章	热环境中的强子态	(161)
7.1	热等离子体中的重夸克偶素	(161)
7.1.1	零温时的 $Q\bar{Q}$ 谱	(161)
7.1.2	$T \neq 0$ 时的 $Q\bar{Q}$	(163)
7.1.3	高温时粲夸克偶素的压低	(164)
7.1.4	格点 QCD 中 Polyakov 线的关联	(165)
7.2	热介质中的轻夸克偶素	(167)
7.2.1	零温时的 $q\bar{q}$ 谱	(167)
7.2.2	有限温度时的 Nambu-Goldstone 定理	(168)
7.2.3	维里展开和夸克凝聚	(169)

7.2.4 低温 π 介子	(170)
7.2.5 低温时的矢量介子	(172)
7.3 用格点 QCD 研究介质内的强子	(173)
7.4 来自热密物质的光子和双轻子	(175)
7.4.1 光子产生率	(176)
7.4.2 双轻子产生率	(177)
习题	(178)

第 2 部分 天体物理中的夸克胶子等离子体

第 8 章 早期宇宙中的 QGP	(182)
8.1 宇宙大爆炸的观测证据	(182)
8.2 均匀的各向同性的空间	(186)
8.2.1 Robertson-Walker 度规	(186)
8.2.2 哈勃定律和红移	(187)
8.2.3 视界距离	(188)
8.3 宇宙的膨胀定律	(189)
8.3.1 爱因斯坦方程	(189)
8.3.2 临界密度	(190)
8.3.3 弗里德曼方程的解	(191)
8.3.4 熵守恒	(193)
8.3.5 宇宙的年龄	(193)
8.4 宇宙的热历史: 从夸克胶子等离子体 (QGP) 到宇宙微波背景 辐射 (CMB)	(195)
8.5 原初核合成	(198)
8.6 再论早期宇宙 QCD 相变	(200)
8.6.1 $t < t_I$ ($T > T_c$)	(202)
8.6.2 $t_I < t < t_F$ ($T = T_c$)	(203)
8.6.3 $t > t_F$ ($T < T_c$)	(203)
习题	(204)
第 9 章 致密星	(206)
9.1 中子星的特性	(207)
9.2 牛顿致密星	(209)
9.2.1 白矮星	(210)