



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

中 外 物 理 学 精 品 书 系

前 沿 系 列 · 3 0

核物质

王正行 著



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

前 沿 系 列 · 3 0

核物质

王正行 著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

核物质/王正行著. —北京:北京大学出版社, 2014. 7

(中外物理学精品书系)

ISBN 978-7-301-24395-4

I. ①核… II. ①王… III. ①核物理学 IV. ①O571

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 133427 号

书 名: 核物质

著作责任者: 王正行 著

责任编辑: 顾卫宇

标准书号: ISBN 978-7-301-24395-4/O · 0974

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.cn

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62765014

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 15 印张 280 千字

2014 年 7 月第 1 版 2014 年 7 月第 1 次印刷

定 价: 40.00 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

中 外 物 理 学 精 品 书 系

本书出版得到“国家出版基金”资助

“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

献给我的父母

王志符先生和姚蕙芳女士

内 容 提 要

核物质是当前基础物理研究的一个重要前沿,涉及原子核特别是高不对称度奇特核、中重核巨共振、相对论性重离子碰撞、中子星和超新星爆发等多个领域,实验观测和理论探索都正在进行.本书是对这一研究前沿的简要介绍,着重从物理上进行讨论,在概述之后,先介绍有关的基本概念和简单模型,然后依次讨论如何从基态核、巨共振核、核碰撞的实验和中子星的观测来获取核物质的实际信息,具体讨论了核半径、核质量和结合能、核单极巨共振能和相对论性重离子碰撞相关实验数据的模型分析,以及中子星质量、半径、脉冲频率等观测数据的理论分析.讨论围绕核物质的物态方程进行,涉及核物质的饱和点、对称能、抗压性、相平衡、液气相变、相变临界点等性质,分别介绍了上述各个方面的研究现状,采用的理论、模型和方法,以及得到的具体结果和存在的问题.书中重点介绍了一些重要和有代表性的工作,也提到和适当介绍了作者和我国学者的相关工作.本书适合相关领域的研究生和对核物质问题有兴趣的研究人员及一般读者.

自序

面对核物质这一活跃且涉及面很广的领域，有着多个不同的进入渠道，进行探索研究可供选择的视角和着眼点就更多。整个领域各个方面的相关研究，还在紧锣密鼓地进行。现在就想作出系统深入和统一的理论概括与阐述，既不容易，恐怕也还不是时候。从物理和理论上讲，核物质问题的物理基础，是核子间的强相互作用，这已经纠缠了核物理七八十年，而原子核这种小系统的统计力学，则还是一个正在研究尚未成熟的论题。从实验和观测上看，现有的核数据基本上还在稳定核附近，大量脉冲星的发现也只是最近一二十年的事。在未来一二十年间，可以期望会获得大量新的实验与观测数据，引起更大的兴趣与关注，吸引更多的年轻人进入这个领域。本书的目的，主要就是尝试为他们准备一个适当的研究基础，和为想对此领域有所了解的读者提供一份比较具体和深入的介绍。

为进入一个领域所需要的基础和背景知识，通常可在有关的评述和专著中获得。关于核物质各个相关领域的评述已有很多，并且随着研究的进展，不断会有跟进的长篇专文发表，这是学界历来已经形成的优良传统。而关于核物质的有关专著，迄今看到的还不多。专著与评述对读者的设定不同，写法与风格自然也就不同。评述又叫综述或述评，英文 review article，虽然可以写得很长，但本质上还是由刊物发表的 article，拥有大致固定的读者群。所以评述的写作，假设读者对相关领域的工作已有基本的了解，只是进行扼要但全面的概括与陈述，重点落在评论，要能给出闪光和富于启发的看点 (highlights)。而专著意指针对某一专题的著作，是著作，即由出版社出版的书籍，读者面较宽，包括对论题有兴趣但并无基本了解的读者。所以专著的写作，在内容选择上可以不必面面俱到，但对所选问题要讲述清楚。这种著作，通常设定读者已经修过研究生课程，在此基础上一步一步具体展开，要使读者阅后能够基本把握。这就是本书写作的原则宗旨和希望达到的目标。至于能否如愿，则取决于作者的学识水准与眼界，那就要请读者进行评判了。

作者进入核物质这个领域，缘于一个很偶然的机会，但却影响和改变了作者随后的工作甚至人生。这也可以算是人竞天择吧。看来人的一生，在冥冥之中还

真的有一个主宰. 记得在“文革”末期, 作者跟随胡济民先生做核参数时, 曾在一次会间与杨泽森聊起, 说到这核参数够我们做一辈子了. 没有想到“文革”嘎然中止, 随之国门渐开, 开始与外界交往. 胡先生赴美开会, 返程途经旧金山, 受 Bill (William D. Myers) 之邀到 LBL (Lawrence Berkeley National Laboratory, 简称 LBNL, 当时称 LBL) 顺访. 接着 Bill 来华回访, 胡先生让我做接待, 但特别叮嘱我勿与 Bill 提出国的事, 因为他这是回访. 那时作者刚刚结束本科电磁学和研究生量子场论这两门课的讲授, 正在做用 Fokker-Planck 方程算重核裂变质量分布的问题. 在我陪同 Bill 期间, 他给了我一份 reprint, 即本书第 2 章的文献 [6]. 他返美后, 我放下手头裂变理论的研究, 转而参考这篇文章做了些核物质两相平衡的计算. 这些计算最后形成的论文, 就是本书第 2 章给出的文献 [21], 并在本书第 5 章 5.1 节有较详细的介绍. 当时我把初步的结果寄给 Bill, 他看后有了兴趣, 立刻来信 (那时还没有手机和互联网), 问我愿不愿去跟他做. 故事就这么开始.

LBL 在 UC Berkeley 校园背后的山上, 那是禁区, 入口有警卫把守. 记得我到 LBL 后 Bill 领着我做的第一件事, 就是去山谷那边的人事处建档, 接着回过头去拍照办出入证. 那时中美正在度蜜月, LBL 开始对中国人开放, 但还不让苏联人进去. 在 LBL 的核科学部核理论组, 我从 1982 年待到 1984 年, 其间还赶上在山顶的 Lawrence Hall of Science 欢迎中国总理的到访. 在那个期间, 陈佳洱在 LBL 的 88' 回旋加速器, 丁石孙在山下校园里陈省身的研究所, 杨国桢在物理系沈元壤的实验室, 都先后待过一段时间.

在 Bevalac 加速器那个巨大圆形建筑的对面, 隔过一条马路和停车场就是 70 楼. 上山进 70A 楼到四层, 经过李远哲的实验室, 就到了位于 70 楼的核理论组. 那是一个倒 L 型的走廊, 进去左边就是 Bill 的办公室. 紧挨着是 Norman (N.K. Glendenning) 的. 右转弯过去, 左手依次是 Miklos (M. Gyulassy), Jørgen (J. Randrup), Thomas (T. Dössing), Wladek (Wladyslaw J. Świątecki), 和 Pawel (P. Danielewicz). 右手与 Bill 办公室对着的是会议室, 弯过来是与其相通的餐具室, 接下来依次是松井哲男 (Tetsuo Matsui)、我、Redlich 的房间. 我一开始与 John (J. Boguta) 同室, 他博士后聘期结束走后, 断断续续先后来过与我同室的, 有 Rutgers 的 A.Z. Mekjian, 法国的 J. Treiner, 和巴西的钟启祥 (Kai Cheong Chung), 再后来就是 Stony Brook 的 Edward (E. Baron), 直到我离开. 其间到过核理论组的, 还有以前在过那里的 J.I. Kapusta 和永宫 (Shoji Nagamiya), Los Alamos 的 P. Möller 和 J.R. Nix, 以及西雅图华大的 L. Willets 等. 特别是诺奖得主 Ben R. Mottelson, 我做学生时就学过他与 A. Bohr 的著名模型. 他离开丹

麦玻尔研究所所长的位子，到那里整整待了一年，每天背个学生背包上山，中午和大家一起围坐在会议室的桌边午餐，饭后还经常收拾桌上的餐具送回餐厅 (cafeteria)。一次他拿起我身边的一个托盘问我还用不用，我说 *It's not mine*，引得大家哄堂大笑。

那是一个勤奋活跃而且朴实友善的集体，还记得 Pawel 准备回波兰参加一个会议时，大家聚精会神听他试讲，热心地给他出主意。那时波兰国内时局动荡，大家聚会送一位波兰朋友回国，一再叮嘱他当心，祝他好运。整个理论组以 Bill, Wladek, Norman, Miklos, Jørgen 为核心，分成几个松散的小组，共同围绕 Bevalac 的物理转。他们的工作在本书中多有介绍和提及。我跟 Bill 和 Wladek 做的，是超新星爆发中的相变和中子过剩核体系。钟启祥在那里待了三个月，回到巴西后，很快做到 CBPF (巴西物理研究中心) 和里约热内卢州立大学的系主任，我们之后有过长期的合作，这从本书可以看出。本书提到的 F. Weber，则是 Norman 后来的合作者，他应郭汉英之邀到中科院理论物理所访问时，我们还见过。Edward 也是做超新星爆发 (见本书第 6 章文献 [28] 和 [29])，他那时正在做博士论文，计算机玩得很熟。那时 PC 才刚刚出现，整个理论组只是 Bill 有一台在用。那是公家的财产，Bill 为建新加速器去华盛顿国会作证时，他办公室那台 PC 立刻就被拉走给别人去用。当时做计算都是通过终端 (terminal) 接到计算中心的大机器，打印结果要去 50B 楼地下的计算中心取。每个房间都有一台终端，Edward 把我们的那台调整得可以接到五十多公里外 Livermore (Lawrence Livermore National Laboratory, 简称 LLNL, 当时称 LLL) 更大的机器。他的计算量太大，LBL 的 CDC 7600 不够他用。这些故事说起来话长，而且离题太远，还是就此打住吧。

国内的原子核本来就是高手云集的圈子，先后做到核物质这一块的人很多，无论是北边的京津，和更北边的长春哈尔滨，或者南方的沪宁杭，还是西北的兰州，西南的成都，以及中南的武汉，都有很强的团队。作者虽然交游不广，接触了解不多，加之长时间不在国内，但还是尽己所知，在书中进行介绍和提及，这就不在此一一列举。当然，囿于作者的能力与水平，肯定有理解不确甚至不妥乃至错误，以及疏漏没有说到提到的，还要请各位海涵。

本书的部分内容，曾经作为系列演讲、seminar 或者学术报告，先后在巴西物理研究中心、巴西联邦里约热内卢大学、国外和国内的学术会议以及北大技术物理系的核理论专题课上讲过。本书内容的选择，受限于作者的研究经历和熟悉范围，带有相当的主观性，对此类书籍恐怕是不可避免，请读者阅读时心中有数。同样，在理论的选择和具体运用上，不同作者有各自的优势与偏爱，这

也是有关问题研究进展到某一阶段的自然状态,读者可从书中具体问题的讨论和处理看出和品味.

再就是名词术语,比如抗压系数,最初称 compressibility,也有人称 compression modulus,后来又称 incompressibility,各有各的理.又如核物质的饱和密度 saturation density of nuclear matter,又称基态核物质密度 ground state nuclear matter density 和标准核物质密度 standard nuclear matter density,等等.同样在中文里,每个作者的偏爱与选择自然也不会一样.对这种情形,本书在行文中就采取相容共用的方式,每个词都介绍,让读者知道实际上存在的差异.

还要说明的是,本书内容涉及面相当宽,同一个物理量,不同方面的作者习惯使用的符号往往不同,考虑到读者进一步阅读的方便,本书在尽量保持统一的情况下,有的还是采用了习惯的用法而放弃了全书的统一,但仍保持在一章内的统一.这种情况不多,是鱼与熊掌不可皆得的无奈之举.本书对文献采用章后注,文献写法参照 Nuclear Physics A 的格式,加上了字体的变化.英文和中文分别为:

Author(s), *Journal* vol. (year) page./Book, Publishing, year.

作者, 刊名 卷 (年) 页. / 书名, 出版社, 页, 年.

此外,由于每章独立编号,在引用另一章的文献时,在序号前加章号,用下圆点分开.

本书引用的图形,近期的大多是彩色,为了降低成本,这里改用黑白印出,有兴趣的读者,可以查阅原图.因为是引用而不是本书的原创,相当于照相拷贝,所以图中文字大都保持原样,只在正文中作必要的说明.而为了全书的风格统一,对引用图形的坐标和题名,在字体和位置上作了适当调整.同样,在转述一些原始文献时,也对数学符号和公式的表述作了适当的改变,以保持全书前后一致.这样做的结果,仍可基本保持原来的图像与公式,读者既可顺当地阅读本书,而去查阅原文时,只需注意和进行适当的转换就行.最后还要说明,作者在行文时偶尔会混用个别感到难以准确译出的英文字词,相信本书读者当能自己体会其语境和含义.

感谢国家出版基金和中外物理学精品书系编委会的支持,感谢赵恩广教授对书稿的细心审阅和宝贵意见,感谢北京大学出版社和编辑的大力帮助,特别是采纳作者选择的文献书写格式,和让作者用中文 L^AT_EX 自己排版.文字和排版上的问题,都属于作者的责任.作者学识和水平所限,不妥和错误之处,请读者不吝指正.

目 录

1 引 言	1
参考文献	6
2 简单的模型和概念	7
2.1 概述	7
2.2 费米气体模型: 零温	12
2.3 费米气体模型: 强简并情形	15
2.4 核 Thomas-Fermi 模型	20
2.5 含温 Thomas-Fermi 模型	24
2.6 Walecka 平均场模型	29
参考文献	39
3 基态核中的核物质	41
3.1 核物质的饱和密度	41
3.2 核中心密度给出的信息	44
3.3 用小液滴模型提取物态方程的信息	50
3.4 拟合核质量的宏观模型	54
3.5 Myers-Świątecki 模型	63
3.6 Hartree-Fock 近似的微观模型	68
3.7 几个模型的分析 and 比较	77
参考文献	83
4 巨共振核的核物质	86
4.1 核单极巨共振	86

4.2 单极巨共振与原子核的压缩性	92
4.3 标度假设与模型	98
4.4 单极巨共振的微观计算	107
4.5 相对论性平均场模型: 核物质	118
4.6 相对论性无规相近似: 巨共振	126
参考文献	136
5 核碰撞中的核物质	140
5.1 热力学的讨论	140
5.2 高能核碰撞的图像和概念	149
5.3 碰撞核物质的压缩性	156
5.4 碰撞核物质的不对称性	165
5.5 核物质的液气相变	174
参考文献	185
6 中子星中的核物质	190
参考文献	201
7 结 语	203
附 录	206
附录 A 自然单位	206
附录 B Fermi 积分	208
附录 C 含 $\sqrt{1+x^2}$ 的积分	211
附录 D 快度	212
附录 E Tolman-Oppenheimer-Volkoff 方程	214
参考文献	217
名词索引	219
人名索引	223

1 引言

a. 核物质的概念

关于核物质的概念, 可以追溯到中子星 (neutron star) 的提出. 1932 年 Chadwick 发现中子后, Landau 立即提出中子星的设想^[1]. 接着, Baade 和 Zwicky 就进行了中子星的早期研究^[2]. 由于没有库仑排斥, 大量中子在核力作用下可以凝聚成宏观体系. 这种作为中子星主要成分的中子物质, 就是一种特殊的核物质.

与核物质概念有关的早期研究, 还可举出几个工作. 一是 von Weizsäcker^[3] 和 Bethe 等^[4] 把原子核看作核物质液滴的原子核液滴模型 (liquid drop model). 另一是 Bohr 和 Wheeler 关于重核裂变的宏观模型理论^[5], 它在 Meitner 与 Frisch 液滴图像^[6] 的基础上, 着重考虑原子核变形的效应. 图 1.1 是 Bohr 和 Wheeler 用液滴模型图像描绘的重核裂变过程 ($c \rightarrow b \rightarrow a$)^[5].

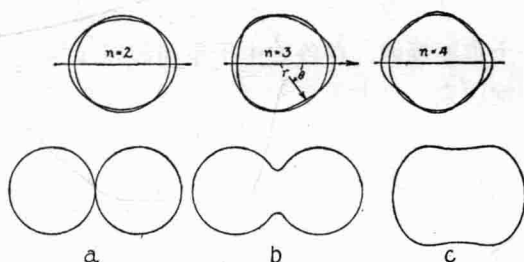


图 1.1 Bohr-Wheeler 裂变理论的液滴模型图像^[5]

这两个工作的物理图像, 都是把原子核看作一小滴核物质. 与纯中子物质不同, 除中子外, 原子核中还有质子. 由于质子间存在库仑排斥, 原子核增大到一定程度就因静电斥力而碎裂, 其大小被限制在微观的范围, 不可能像中子物质那样广延到宏观的尺度.

再就是 Weisskopf 关于受激核发射中子的蒸发模型^[7]. 与前两个工作不同的是, 这个工作考虑液态核物质的热激发, 涉及液态与气态之间的平衡与转变, 引进了统计和热力学的描述.

由于核子间的核力比质子间的库仑力强得多, 早期对核体系的理论研究, 为了简化思考和计算, 常常略去库仑作用, 而把注意集中于核子间的强相互作用. 这就形成了一个流行的概念: 一般地, 由大量核子组成的均匀系, 若只考虑核子间的强作用而略去库仑作用, 就称为核物质 (nuclear matter) [8]. 这样定义的核物质, 虽然只是一个理想的概念和模型, 但与物理学中其他理想概念和模型一样, 对有关问题的理论分析和计算却十分有用. 而对作为无限核体系的理想核物质, 也不可能考虑库仑作用, 因为它在原则上是无限大.

需要指出, 随着研究的深入和发展, 核物质这个名称已经不能确切反映所研究对象的实际内容, 或者说实际研究的对象已经大大超出了核物质的范畴. 这源于两个方面的进展, 它们分别开辟和逐渐形成了两大崭新的研究领域.

b. 与核物质相关的两个研究领域

原子核的核心区域大体上是均匀的, 可以近似当作一小滴核物质. 于是, 通过对原子核的系统研究, 就可从中提取核物质的实际信息, 用来改进和加深对核力的了解和认识. 可以说, 早期对核物质的理论分析和计算, 主要还是为了检验和探索核力的性质 [9]. 只是从上世纪七十年代开始, 核物质本身才逐渐成为物理学研究和探索的对象, 成为研究的前沿和热点.

一方面, 是 1967 年 Hewish 观测和发现了脉冲星. 这使得中子星不再仅仅是一个猜测的对象, 而是变成了可以观测和探索的实体, 对中子星的探索成为天体物理研究的一个重要领域. 在各种中子星和超新星爆发的模型中, 核物质的性质都是一个关键因素. 对中子星和超新星爆发的观测, 能为核物质的研究提供有关信息. 反之, 对核物质的了解, 则能帮助和改进对中子星的猜测. 迄今的看法, 由于引力引起的极大压缩, 在中子星内核的高密度区域会存在各种强子自由度的激发, 出现 π 凝聚和 K 凝聚, 甚至会存在夸克自由度的激发, 形成色超导奇异夸克物质. 除了主要由中子物质构成的中子星, 也可能有主要是由夸克物质构成的夸克星体. 对核物质的研究, 需要发展扩充到对这种包含更多实际自由度的致密物质 (dense matter) 甚至超密物质 (superdense matter) 的研究. 按照 Weber 的看法 [10], 现在中子星这个名称完全是个误读, 应代之以核子星, 超子星, 夸克混杂星, 或者奇异夸克星等. 图 1.2 是他给出的对中子星内部结构的描述. 对图中的细节有兴趣的读者, 可以进一步参阅他的专文.

另一方面, 1974 年美国劳伦斯伯克利实验室 (LBL, 现称劳伦斯伯克利国家实验室, 简称 LBNL) 的 BEVALAC 加速器建成, 开辟了相对论性重离子碰撞这一核物理研究的新领域, 因而那一时期的 LBL 被称为相对论性重离子物理的圣地 (mecca). 继 BEVALAC 之后, 密西根州立大学 (MSU) 的 NSCL (国家超导