



中外物理学精品书系

前沿系列 · 74

# 奇异物质与奇异星

夏铨君 高 勇 徐仁新 编著

 北京大学出版社  
PEKING UNIVERSITY PRESS

## 图书在版编目 (CIP) 数据

奇异物质与奇异星 / 夏铨君, 高勇, 徐仁新编著.  
北京: 北京大学出版社, 2024. 10. -- (中外物理学精品书系). -- ISBN 978-7-301-35626-5  
I. O572.33; P1456  
中国国家版本馆 CIP 数据核字第 2024KM4454 号

书 名 奇异物质与奇异星  
QIYI WUZHI YU QIYIXING  
著作责任者 夏铨君 高勇 徐仁新 编著  
责任编辑 顾卫宇  
标准书号 ISBN 978-7-301-35626-5  
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  
电子邮箱 [zpup@pup.cn](mailto:zpup@pup.cn)  
电 话 邮购部 010-62752015 发行部 010-62750672 编辑部 010-62765014  
印 刷 者  
经 销 者 新华书店  
730 毫米 × 980 毫米 16 开本 12 印张 263 千字  
2024 年 10 月第 1 版 2024 年 10 月第 1 次印刷  
定 价 69.00 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 电子邮箱: [fd@pup.cn](mailto:fd@pup.cn)

图书如有印装质量问题, 请与出版部联系, 电话: 010-62756370

# “中外物理学精品书系”

(三期)

## 编 委 会

主 任：王恩哥

副主任：常 凯

编 委：(按姓氏笔画排序,标\*号者为执行编委)

|      |      |      |      |     |
|------|------|------|------|-----|
| 丁 洪  | 马余强  | 王 牧  | 王力军  | 王孝群 |
| 王恩科  | 王雪华  | 牛 谦  | 石 兢  | 田光善 |
| 冯世平  | 邢定钰  | 朱 星  | 朱邦芬  | 向 涛 |
| 刘 川* | 刘魁勇  | 汤 超  | 许宁生  | 许京军 |
| 李茂枝  | 李建新  | 李新征* | 李儒新  | 吴 飙 |
| 汪卫华  | 张 酣* | 张立新  | 张振宇  | 张富春 |
| 陈志坚* | 武向平  | 林海青  | 欧阳钟灿 | 罗民兴 |
| 钟建新  | 段文晖  | 徐仁新* | 徐红星  | 高原宁 |
| 郭 卫  | 资 剑  | 龚新高  | 龚旗煌  | 崔 田 |
| 谢心澄  | 解士杰  | 樊铁栓* | 潘 鼎  | 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,同时还与许多新兴学科和交叉学科的前沿紧密相关。在科技发展日新月异和国际竞争日趋激烈的今天,物理学不再囿于基础科学和技术应用研究的范畴,而是在国家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,随着中国政治、经济、科技、教育等各项事业的蓬勃发展,我国物理学取得了跨越式的进步,成长出一批具有国际影响力的学者,做出了很多为世界所瞩目的研究成果。今日的中国物理,正在经历一个历史上少有的黄金时代。

为积极推动我国物理学研究、加快相关学科的建设与发展,特别是集中展现近年来中国物理学家的研究水平和成果,在知识传承、学术交流、人才培养等方面发挥积极作用,北京大学出版社在国家出版基金的支持下于2009年推出了“中外物理学精品书系”项目。书系编委会集结了数十位来自全国顶尖高校及科研院所的知名学者。他们都是目前各领域十分活跃的知名专家,从而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,其中既有对我国物理学发展的梳理和总结,也有对国际物理学前沿的全面展示。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,是一套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”的另一个突出特点是,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”。这套丛书首次成规模地将中国物理学家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、更深入的了解,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发展的“软实力”,对全面提升中国科学教育领域的国际形象起到一定的促进作用。

习近平总书记2020年在科学家座谈会上的讲话强调:“希望广大科学家和科技工作者肩负起历史责任,坚持面向世界科技前沿、面向经济主战场、面向国家重大需求、面向人民生命健康,不断向科学技术广度和深度进军。”中国未来的发展在于创新,而基础研究正是一切创新的根本和源泉。我相信“中外物理学精品书系”会持续努力,不仅可以使所有热爱和研究物理学的人们从书中获取思想的启迪、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

2022年7月于燕园

## 内 容 提 要

本书从粒子物理标准模型出发,旨在简要介绍各种奇异物质提出的基本背景,在此基础之上探讨奇异星等致密天体的结构和性质,最终讨论如何利用各种天文观测来寻找奇异星存在的证据。

本书相关内容属于粒子天体物理范畴,主要面向高年级本科生、研究生及相关的研究人员,以期提供必要的入门简介。



## 前 言

十九世纪一位雕刻家, 同时也是一位浪漫主义诗人和梦想家, 曾经文字描述过这样一个现象<sup>①</sup>: “What is now proved was once only imagined” (如今习以为常的东西曾经只是个设想). 相信历史上众多具有独立精神的思想者都抱有同感. 本书所关注的奇异数 (strangeness) 即生动地演绎了这类哲理: 它于诞生之初被投射异样的眼神, 而在成功地建立了粒子物理标准模型的今天就再正常不过了.

奇异夸克 (s) 因其质量较轻<sup>②</sup>, 在组成原子核的核子内大量存在, 只是那里的 s 和反奇异夸克 ( $\bar{s}$ ) 数目相等罢了. 而当我们转而考虑大质量恒星在演化晚期, 不得不引力坍缩而形成密度跟原子核相当的“巨核”, 此时, 近乎等量的上夸克、下夸克、奇异夸克 (u, d, s) 组成的系统也能呈现电子数目相对较低的状态; 这一定程度上符合 1932 年朗道对于存在中子星的逻辑思辨. 我们将这种轻味夸克对称的物质称为奇异物质: 可能为奇异夸克物质 (基本单元为夸克), 也可能是奇子物质 (基本单元为奇子, 一种类似核子但奇异数非零的束缚态). 奇异物质为主组成的星体, 即为奇异星. 观测发现的脉冲星类致密天体到底是传统的中子星还是奇异星? 这是当今学术界关注的焦点之一, 也构成本书的主体内容.

众所周知, 极端条件下强相互作用物质的性质是现代物理学研究的重要课题之一. 特别地, 低温高密物质的属性涉及早期宇宙强子化、致密星结构及相关暴发事件 (如  $\gamma$  射线暴和快速射电暴) 甚至极高能宇宙线等丰富的天体物理现象. 在极端密度下, 强相互作用物质可能会发生多种相变过程, 生成各种新型物质 (包括重子物质、夸克物质、奇子物质等). 寻找这些物质并研究其奇特的性质, 引起了人们广泛的兴趣, 是值得广大科研人员努力深耕的一个方向.

由于无法直接基于量子色动力学 (QCD) 明确地得到关于这类新型物质的计算结果, 目前人们通常需采用各种有效模型进行理论研究. 这导致较大的不确定性. 为摆脱这一窘境, 当前行之有效的方案是结合各种地面实验及天文观测数据来约束

---

<sup>①</sup>威廉·布莱克 (William Blake, 1757—1827); 见其著作 “*The Marriage of Heaven and Hell*”.

<sup>②</sup>有趣的是, 基本强相互作用低能情形涉及的特征能标正好高于包括 s 在内的轻味夸克的质量, 但显著地低于重味夸克 (c, t, b) 的质量. 这一基本事实在刻画强作用主导的凝聚态物质的属性方面意义深远.

模型假设及参数范围,并在此基础之上探索致密物质的本质和致密星的结构.一方面,如 HIAF, NICA, FAIR 和 J-PARC 等地面实验项目将通过重离子碰撞直接生成致密物质.另一方面,作为大质量恒星引力坍缩的产物,致密星内部物质被压缩至极高的密度,成为致密物质的天然实验室.随着国内外大批科学装置投入到致密星的研究,如引力波天文台 (LIGO, Virgo, KAGRA 等)、500 米口径球面射电望远镜 (FAST)、平方公里阵列射电望远镜 (SKA)、中子星内部成分探测器 (NICER)、“慧眼”硬 X 射线调制望远镜 (HXMT)、引力波暴高能电磁对应体全天监测器卫星 (GECAM)、高海拔宇宙线观测站 (LHAASO) 以及中微子探测器 (JUNO, Super-K, KamLAND, Borexino, ICARUS, LVD, SNO) 等,我们正迎来了致密星研究的黄金时期,将不断积累大量致密星结构及演化的观测数据.有效整合这些数据,提取致密物质性质的关键信息,理解致密星内部结构及演化过程,无疑是多信使天文学时代核心使命之一.

本书从粒子物理标准模型出发,旨在简要介绍各种奇异物质提出的基本背景,在此基础之上探讨奇异星等致密天体的结构和性质,最终讨论如何利用各种天文观测来寻找奇异星存在的证据.本书相关内容属于粒子天体物理范畴,主要面向高年级本科生、研究生及相关的研究人员,以期提供必要的入门简介.由于时间仓促,撰写过程中难免有遗漏、疏忽和不当之处,还望读者指正并及时反馈.书中内容体现了作者的偏好,难免挂一漏万;相信读者会独立思考,汲取能丰富自身的营养,从而领略探究奇异物质之旅的一道道风景.

# 目 录

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 第一章 绪论 .....                 | 1  |
| 1.1 微观与量子: 从原子到原子核 .....     | 2  |
| 1.2 宇观与引力: 从白矮星到中子星 .....    | 5  |
| 1.3 夸克与轻子: 奇异星? .....        | 7  |
| 1.4 多信使天文学时代的期待 .....        | 9  |
| 第二章 粒子物理标准模型简介 .....         | 11 |
| 2.1 粒子的分类 .....              | 11 |
| 2.1.1 轻子 .....               | 11 |
| 2.1.2 强子 .....               | 13 |
| 2.2 规范变换及相互作用 .....          | 16 |
| 2.2.1 电磁学中的规范变换及电磁相互作用 ..... | 16 |
| 2.2.2 弱相互作用及电弱统一理论 .....     | 19 |
| 2.2.3 强相互作用 .....            | 22 |
| 2.4 超出标准模型 .....             | 25 |
| 第三章 致密星的形成与表现 .....          | 27 |
| 3.1 致密星的形成 .....             | 27 |
| 3.1.1 铁核坍缩 .....             | 27 |
| 3.1.2 中微子过程 .....            | 28 |
| 3.1.3 超新星遗迹 .....            | 32 |
| 3.2 致密星的观测表现 .....           | 34 |
| 3.2.1 脉冲星类致密天体 .....         | 34 |
| 3.2.2 转动供能脉冲星 .....          | 39 |
| 3.2.3 吸积供能脉冲星 .....          | 44 |
| 3.2.4 磁场供能脉冲星 .....          | 47 |
| 3.2.5 热辐射主导脉冲星 .....         | 51 |

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 第四章 奇异物质               | 59  |
| 4.1 强相互作用和 QCD 相图      | 59  |
| 4.1.1 解禁闭相变            | 61  |
| 4.1.2 手征相变             | 64  |
| 4.2 重子及多重子态            | 68  |
| 4.3 重子物质               | 74  |
| 4.3.1 核物质              | 74  |
| 4.3.2 超子物质             | 77  |
| 4.3.3 相对论平均场模型         | 78  |
| 4.4 夸克物质               | 85  |
| 4.4.1 奇异夸克物质及 ud 夸克物质  | 85  |
| 4.4.2 色超导              | 91  |
| 4.4.3 夸克团块             | 95  |
| 4.5 奇子物质               | 100 |
| 4.5.1 H 双重子物质          | 101 |
| 4.5.2 奇异多重子物质          | 105 |
| 4.5.3 奇子团块             | 107 |
| 第五章 作为相对论天体的奇异星        | 109 |
| 5.1 相对论与流体动力学          | 110 |
| 5.1.1 爱因斯坦场方程          | 110 |
| 5.1.2 爱因斯坦方程的基本性质      | 111 |
| 5.1.3 热力学与物态方程         | 113 |
| 5.1.4 奇异星物态            | 114 |
| 5.1.5 流体动力学方程          | 116 |
| 5.2 静态球对称奇异星结构         | 117 |
| 5.2.1 质量-半径关系          | 119 |
| 5.2.2 稳定性              | 121 |
| 5.3 转动奇异星结构            | 123 |
| 5.3.1 度规与时空对称性         | 123 |
| 5.3.2 平衡位形的性质          | 125 |
| 5.3.3 慢转近似             | 127 |
| 5.3.4 快转奇异星结构          | 133 |
| 5.4 双奇异星并合与数值相对论       | 135 |
| 5.4.1 潮汐形变的奇异星         | 136 |
| 5.4.2 利用 GW170817 限制物态 | 139 |
| 5.4.3 利用数值相对论模拟双奇异星并合  | 141 |

---

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 第六章 奇异星的观测证认与展望           | 149 |
| 6.1 动力学检验: 质量与潮汐形变量       | 149 |
| 6.2 数值相对论效应与 $\gamma$ 射线暴 | 152 |
| 6.2.1 并合后的引力波特征           | 152 |
| 6.2.2 物质抛射与千新星            | 153 |
| 6.2.3 无延迟坍缩临界质量           | 154 |
| 6.2.4 短 $\gamma$ 射线暴      | 154 |
| 6.3 脉冲星磁层与射电相干辐射          | 156 |
| 6.3.1 表面热辐射               | 156 |
| 6.3.2 子脉冲行为               | 158 |
| 6.3.3 奇子星整体刚性与星震          | 159 |
| 6.4 快速射电暴                 | 161 |
| 6.5 双星吸积与暴发过程             | 161 |
| 6.6 展望观测检验                | 162 |
| 参考文献                      | 165 |



# 第一章 绪 论

宋朝第四位皇帝宋仁宗赵祯性情宽厚;他治下国家的经济、科技和文化得到了长足发展,并涌现出诸如毕昇、柳永、范仲淹、包拯、欧阳修、司马光、王安石、沈括、苏轼等历史名人。赵祯在位期间,至和元年(西元 1054 年)上半年,司天监在金牛座(天关)处发现一颗“天关客星”<sup>①</sup>。该客星本质上是一颗大质量恒星演化至晚期的“回光返照”,表现为超新星(编号 SN 1054),同时诞生了一个新的致密天体——蟹状星云脉冲星(Crab pulsar)。爆炸遗迹膨胀至今表现为螃蟹状(图 1.1)。中国人那次

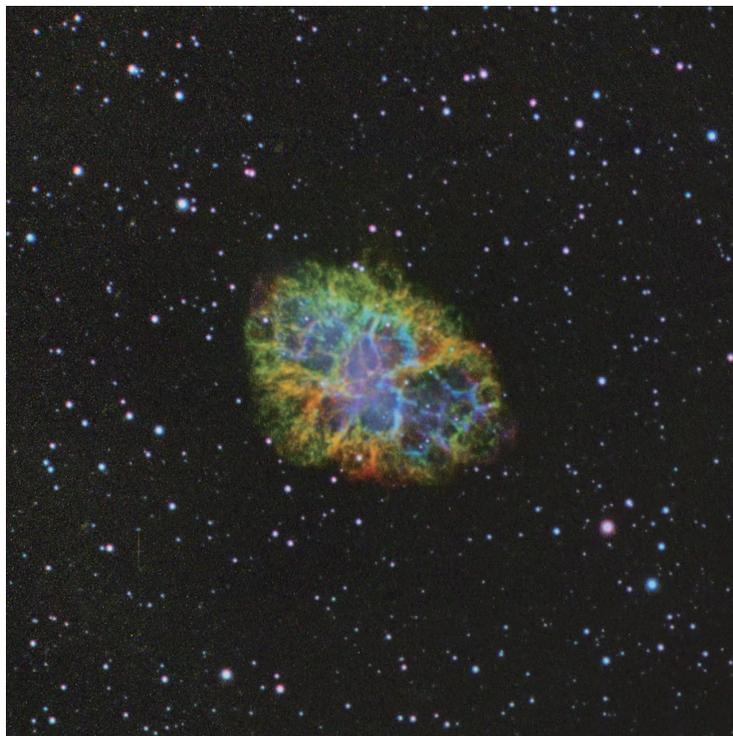


图 1.1 蟹状星云。2022 年 11 月利用中国科学院大学雁栖湖校区 70cm 口径望远镜拍摄(毛益明提供)

<sup>①</sup>《宋会要》记载:“嘉祐元年三月司天监言:客星没,客去之兆也。初,至和元年五月,晨出东方,守天关;昼见如太白,芒角四出,色赤白。凡见二十三日。”宋仁宗在位(1022—1063)的九个年号中,以“至和”和“嘉祐”为末。前者仅三年,即至和元年(1054)、二年(1055)、三年(1056);后者始于 1056 年。

一丝不苟的记录明确了这颗脉冲星诞生的年龄。

自那以来的近千年里,虽然地球这颗蓝色行星上曾经发生过无数次自然灾害、人为战乱,但是文明和科学的脚步却始终戮力前行。经过上千年、特别是进入量子论和相对论时代后百余年来探索,我们确实对自然的理解深刻了不少,却尚未最终澄清那个致密残骸——脉冲星——的本质:它到底是中子星还是奇异星?若是奇异星,又是什么样的奇异星?这一系列问题,正是本书的主题。

## 1.1 微观与量子:从原子到原子核

让我们从丰富的物质世界谈起。

若言“青树翠蔓,蒙络摇缀,参差披拂”<sup>①</sup>这些幽美的景物,包括记“小石潭”者柳宗元本人,都只不过是若干原子堆积起来的不同形式罢了,你会顿失诗情画意,但这确实言简意赅地表述了一个物理实在:构成日常生活中物质的基本单元为原子或分子。地球之外的物体也类似。虽说物质中相当一部分原子电离后的状态被列为固、液、气之外的“第四态”,但成分上并无本质差异。

“原子论”是人类理解宇宙的一把金钥匙。费曼曾言<sup>[1]</sup>:“假如由于某种大灾难,所有的科学知识都丢失了,只有一句话传给下一代,那么怎样才能用最少的词汇来表达最多的信息呢?我相信这句话是原子的假设(或者说原子的事实,无论你怎样称呼都行):所有物体都是用原子构成的——这些原子是一些小小的粒子,它们一直不停地运动着。当彼此略微离开时互相吸引,当彼此过于挤紧时又相互排斥。只要稍微想一下,你就会发现,在这一句话中包含了大量的有关世界的信息。”比方说,日常所见凝聚态物质就是若干原子通过电磁力粘合起来的产物。不过,虽然区别于一般动物的人类自二百万年前便学会利用打制石器这类凝聚态物质来分割食物,对原子的深刻理解却仅始于百余年前。

关于构成正常物质的基本单元的推测具有悠久的历史。在东方,庄子(约公元前369—前286)在《庄子·天下篇》有言“一尺之捶,日取其半,万世不竭”。在中国古代还认为宇宙万物本质上由“金、木、水、火、土”等五种元素所构成。而在西方,古希腊哲学家德谟克利特(Demokritos,约公元前460—前370)则想象世间存在不可分割的“原子”,认为万物本原即为“原子”和“虚空”:不同种类和数量的原子排列造就性质相异的物体。苏格拉底(Socrates,约公元前470—前399)的门徒柏拉图(Plato,公元前427—前347)相信数学上具有很好对称性的正多面体(后称“柏拉图立体”,共五种)是宇宙的基本元素(如图1.2),而球体是最对称和完美的,刻画整个宇宙。

<sup>①</sup>[唐]柳宗元,《小石潭记》。

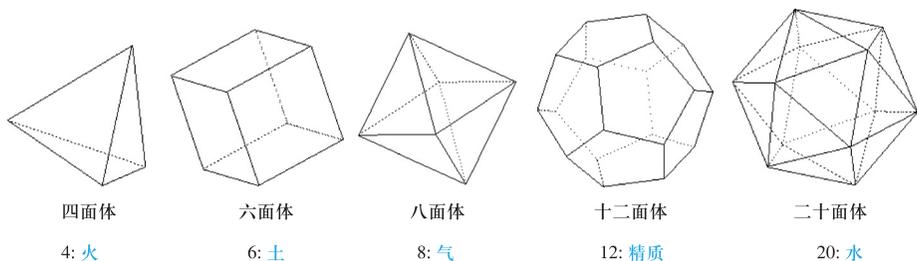


图 1.2 柏拉图的“万物理论”: 五种正多面体, 分别对应于火、土、气、精质(以太)、水。

在西方, 作为一种文化基因, 这些古代的臆测在以蒸汽机为标志的第一次工业革命时期(始于 18 世纪 60 年代)或多或少地开始跟实践联系起来。提升热机效率的工业和社会需求促进了对热现象的深入研究。逐渐发展起来的热力学和统计物理分别从宏观和微观角度关注热的本质, 殊途同归。值得一提的是, 统计物理假设构成热气体的基本单元为分子或原子, 进而研究大量粒子整体上的统计行为。这方面, 许多先贤在理解物质单元的征程上贡献智慧, 尤其是玻尔兹曼 (Boltzmann, 1844—1906), 被认为“在两位最伟大的理论物理学家之间承上启下: 19 世纪的麦克斯韦 (Maxwell, 1831—1879) 和 20 世纪的爱因斯坦 (Einstein, 1879—1955)”<sup>[2]</sup>。这是探索自然基本粒子的一大步, 将我们带入一个从原子到亚原子的科学世界。

若要深刻地理解原子, 则离不开“量子论”(见表 1.1)。人们建立原子的正确图像起始于卢瑟福依据  $\alpha$  粒子大角度散射实验事实而建立的“有核模型”, 但是这样的原子在经典的麦克斯韦电磁学理论框架内是不稳定的, 它将不得不因辐射电磁波而“坍缩”。玻尔提出“定态”假设实则一种无奈之举, 只有在量子力学建立

表 1.1 量子论发展早期的里程碑

| 年份         | 进展             | 代表性人物      | 备注  |               |
|------------|----------------|------------|---|---------------|
| 1897       | 测定电子的荷质比       | J. J. 汤姆孙  |   |               |
| 1911       | 原子的有核模型        | 卢瑟福        |   |               |
| 1913       | 氢原子唯象模型        | 玻尔         |   |               |
| 1900-1905- | 光的波粒二象性        | 普朗克, 爱因斯坦, | } 标志着量子论的建立, 未来再结合狭义相对论后发展成量子场论<br>满足全同性, 但粒子数不受限 |               |
| 1923       |                |            |   | 康普顿           |
| 1924       | 波粒二象性(特别是电子)   | 德布罗意       |   |               |
| 1925       | 量子力学的矩阵形式      | 海森伯        |   |               |
| 1926       | 量子力学的波动形式      | 薛定谔        |   |               |
| 1924       | 玻色-爱因斯坦(BE) 统计 | 玻色, 爱因斯坦   |   |               |
| 1925       | 泡利不相容原理        | 泡利         |   |               |
| 1926       | 费米-狄拉克 (FD) 统计 | 费米, 狄拉克    |   | 满足全同性, 但粒子数受限 |

之后才能通过定量计算而得到所谓的“定态”。当然，这一过程中还以光和电子的“波粒二象性”认识作为铺垫。

统计物理基于微观单元的属性得到大量粒子构成宏观物体时的概率统计行为特征，从而建立起尺度差异巨大的不同层次物理规律之间的联系。经典物理认为这些微观单元是可分辨的、“小球”似的粒子，这样建立起来的麦克斯韦-玻尔兹曼 (MB) 统计成功地解释了热力学第零、第一、第二、第三定律，特别是第二定律。然而黑体腔中光波的重叠使得光子是不可区分的、全同的。如此看来，玻色考虑全同性但类似 MB 统计的计算 (即粒子倾向于能量低态，某一状态的粒子数目不受限) 算是给众多普朗克公式的推导画上完美的句号。但是，满足泡利不相容原理的电子却拥有不一样的统计行为，即费米-狄拉克 (FD) 统计<sup>①</sup>。这一新统计促进了人类对凝聚态物质本质的认识 (见 1.2 节)。

值得一提的是，原子核并非点电荷，它是由核子 (即质子、中子) 组成、被基本强相互作用所束缚的凝聚体。认识到这一点的关键是实验发现中子。在 1911 年建立卢瑟福原子模型之后至 1932 年发现中子之前，人们普遍认为质量数  $A$ 、原子序数  $Z$  的原子核含有  $A$  个质子和  $(A - Z)$  个电子。这些存在于原子核内、紧密地跟质子粘合在一起的电子不同于核外作类似“行星运动”的电子<sup>[4]</sup>。1920 年卢瑟福在题为“原子核组成”的讲座中强调实验上发现一些原子核的电荷数只有约其质量数的一半，并指出“……电子可能与氢核很紧密地结合而形成一类新的中性双子 (doublet)”<sup>②</sup>。他还推测双子会在物质中自由运动，难被探测，或许不能被限制于密封容器中。人们一般认为，1921 年 Harkins 在讨论同位素分类时，开始明确地用“中子”(neutron) 这个词代替卢瑟福的“双子”<sup>[7]</sup>。

中子的发现也曾经经历一番周折。1930 年 Bothe 和 Becker<sup>[8]</sup> 报道用 Po 的  $\alpha$  射线轰击 Be 时产生的一种中性“ $\gamma$  射线”，但它比一般  $\gamma$  射线的穿透能力强很多。1932 年居里夫妇<sup>[9]</sup> 用这种“ $\gamma$  射线”轰击石蜡中的质子，并且根据出射质子的能量推算出“ $\gamma$  射线”的能量 (约为 50MeV)。为何 Be 原子核被  $\alpha$  射线轰击后能够产生如此高能的  $\gamma$  射线？当年，深受卢瑟福“双子”概念影响的查德威克注意到居里夫妇的实验，并怀疑这种射线本质上不是  $\gamma$  射线而是他一直实验寻找的中子 (“双子”)。为了搞清楚 Bothe 等发现的射线到底是  $\gamma$  射线还是中子，查德威克以这种射线轰击 He, Li, N 等其他原子核，也测得了这些核不同的反冲动能。如果认为那种射线是静质量为零的  $\gamma$  射线，则根据反冲动能推算的  $\gamma$  射线能量与实验的差别很大；但

---

<sup>①</sup>有历史文献显示，Pascual Jordan(1902—1980) 于 1925 年即首次提出了这一新统计<sup>[3]</sup>，然而没能及时获得关注，这是源于杂志主编 Max Born 的疏忽。Jordan 一直将这种统计称为“泡利统计”。

<sup>②</sup>见 [5]。核内电子亦称为“核电子”(nuclei electrons)，如 [6]。实际上，依据海森伯不确定关系易于给出核内电子动能超过 100MeV，根本不可能通过电磁力将电子束缚于原子核之中。