

理工科用

Quantum Mechanics and Statistical Mechanics

量子力学与统计力学

卢文发◎编著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

理工科用

量子力学与统计力学

卢文发 编著

上海交通大学出版社

内 容 提 要

本书以理工科《高等数学》和《大学物理》课程内容为基础,讲述量子力学和统计力学的基本理论。量子力学部分包括:基本原理、简单体系、自旋和基本近似方法。统计力学部分包括:统计物理学基本原理、平衡态系综理论和近独立粒子体系的三种统计分布及其应用。此外,本书也在适当章节扼要介绍了分析力学、电动力学和数学物理方法中的相关内容。本书内容深度与物理专业相关本科课程的相同内容的深度基本一致。

本书按照知识的逻辑联系顺序讲述,环环紧扣;以从特殊到一般的方式系统地引出量子力学的基本假设,便于理解和接受;并将分析力学、量子力学和统计力学结合成一个逻辑连贯的整体,体现了物理学基础理论的优美结构。另外,本书讲解清楚,交代明确,推导仔细,便于自学。

本书可作为高等学校非物理类各理工科专业相关课程和物理类各专业理论物理概论课程的教材,也可作为具有理工科《高等数学》和《大学物理》课程知识的人员的自学用书,可供物理类各专业学生初学量子力学和统计力学及其他相关课程时参考,也可供物理类各专业教师讲授量子力学和统计力学时参考。

图书在版编目(CIP)数据

量子力学与统计力学/卢文发编著. —上海:上海交通大学出版社,2013

ISBN 978-7-313-09729-3

I. 量... II. 卢... III. ①量子力学—高等学校—教材 ②统计力学—高等学校—教材 IV. ①O413.1 ②O414.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 104011 号

量子力学与统计力学

卢文发 编著

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 951 号 邮政编码 200030)

电话:64071208 出版人:韩建民

上海万卷印刷厂印刷 全国新华书店经销

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:30 字数:742 千字

2013 年 9 月第 1 版 2013 年 9 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-313-09729-3/O 定价:68.00 元

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话:021-56928211

前言

本书为理工科非物理专业而作,是在笔者为上海交通大学材料科学与工程学院二年级本科生讲授《量子力学与统计物理》课程内容的基础上扩充而成。

1996年进入上海交通大学物理系(现为物理与天文系)执教后,笔者一直在大学物理教研室为非物理专业理工科大学生讲授《大学物理》课程。2002年末转入物理系理论物理研究所,当时的所长给笔者分派了《量子力学与统计物理》课程教学任务,并吩咐留好教案,以后可出版相当于理论物理概论的教材。材料科学与物理学联系十分紧密,特别是在现代科学技术迅猛发展的今天,一个材料科学家(还有许多其他自然科学、应用科学和技术科学甚至某些社会科学领域里的专家学者)没有扎实的物理基础是不可想象的。因此,这样一门课程无疑是很有意义的。接受教学任务后,注意到近年一直没有与该课程直接对口的教材,所以,从曾谨言教授所著《量子力学导论》和汪志诚教授的《热力学与统计物理》两本教材中,笔者分别摘选出属于量子力学原理及若干严格可解体系和近独立粒子系统的分布及其应用的内容,于2003年上学期进行了讲授。这一学期的讲授使笔者深深体会到了这门课程的教学难度。一方面,学生不具有学习量子力学和统计物理的知识基础。学生仅学过高等数学和大学物理课程,没学过数学物理方法、分析力学和电动力学等量子力学和统计物理的先修课程。另一方面,课时十分有限,仅讲授量子力学和统计力学的基本原理,72学时也是不够的。还有,存在一些不利于理论性很强的本门课程教学的因素,如长期以来的应试教育使得学生习惯于通过做大量习题来理解和掌握所学知识以及所学高等数学知识实际上在偏重于现象、概念、公式和结论的大学物理课程中没能得到很好的运用等。鉴于此,笔者从学生的长远发展考虑,为本门课程确立了奠定基础和培养自学能力的宗旨。从2004年开始,笔者在讲课中补充了分析力学和电动力学及相关数学知识等必需的基础内容,并着手设计编写电子教案。两年后,电子教案基本完成,但笔者深感有一本专门教材的必要性。与此同时,笔者对量子力学基本原理和统计力学的讲授和对其所涉及的物理学基础理论本身均有了一点自己的体会和认识。另外,笔者注意到,除了材料科学专业外,不少与物理相关的其他专业的本科生,如电子信息类,工程热物理,空间科学类、通讯类、化学类、生物物理等以及这些专业的部分硕士和博士研究生,同样需要量子力学和(或)统计物理,但他们大多都只是具有与材料科学专业的本科二年级学生相同的物理和(或)数学基础。另外,近十年的《大学物理》课程教学使笔者深深感受到了这些非物理专业理工科的许许多多优秀大学生对物理学的浓厚兴趣和深入钻研精神,也使笔者觉得他们朝气蓬勃,抱负远大,如果掌握量子力学和统计物理的基本概念、原理和方法,无疑对他们具备出色的思维素质和在各自专业上有较深的理论造诣都将是十分有益的。因此,笔者决意写一本以现行《大学物理》和《高等数学》(包括线性代数和概率论)本科课程为起点的量子力学与统计力学方面的教学和自学用书。笔者希望,此书能为一切有志学子进一步学习其他相关课程和应今后之需自学现代物理理论奠定必要的理论物理基础。适逢学校课程与教材建设委员会开始教材立项的评审工作之时,笔者向学校相关部门提出了教材立项申请。2006年7月得到学校教材立项。从2006年7月初开始,笔者着手撰写本书,到2009年12月定稿,本书整整撰写了三年

半。三年多来,笔者除了认认真真做好教学工作外就是撰写本书,此前正在研究的物理问题也暂时停了下来,并尽量减少日常工作和生活中的一些活动。本书原计划两年完成,后因两年其间笔者接受了一个小班大学物理课程的教学任务,故推迟了一年半才得以完成。

量子力学与统计物理有着丰富的内容。按照奠定基础和培养自学能力的宗旨,本书讲解量子力学和统计力学的基本概念和基本原理,介绍其处理问题的基本计算方法和技巧。本书把所授内容深度锁定在物理本科专业的水平上。笔者认为,不管什么专业,只要在其他课程的学习中或以后的研究中真正需要应用量子力学和统计物理(尽管那种应用可能实际上只是量子力学和统计物理的公式、结论和结果的应用),那么这个水准就是一个起码要求。

在本书内容的叙述方式方面,笔者做了如下一些特别考虑。

物理理论的学习困难之一在于数学的运用。笔者认为解决这个困难的关键在于打通新学物理与读者已有的数学和物理知识的通道。因此,本书在叙述讲解中十分注意与高等数学和大学物理课程内容的衔接,以使读者感到脚踏实地,同时也体会到高等数学和大学物理的重要性。在公式或结论的推导中尽可能给出详尽的数学细节和必要的交代。这样做,一方面便于读者自学,有利于教师在课时有限的情况下讲授较多的内容;另一方面也便于读者对物理内容的理解和对物理结论的接受,也有益于读者数学推演能力的训练和提高。在冗长的数学推导之后,读者看到简洁公式或结论,再回头看一下所解决的物理问题和分析所得结果的物理意义,可能就会有豁然开朗之感和满心的愉悦。

除了所及数学深度和广度之外,量子力学的学习困难还在于许多理论结果的怪诞无法想象和基本假设的生硬引入难于接受两个基本困难。量子力学的所有基本假设组成量子力学的基本原理。本书在涉及力学量的量子力学基本假设的讲述方面按照笔者自己的理解做了一点尝试。在学习和讲授曾谨言教授的教材若干遍之后,受其中关于动量测值分布概率的引入方式和引入 Schrödinger 方程的启发,笔者将之推广,以物质波假设(包括动量确定的自由粒子)及其验证实验、波函数假设和 Fourier 变换为基础,通过从特殊到一般的推广方式较为自然地引入量子力学的其他基本假设(除了粒子全同性假设外)。希望这样做能揭示这些基本假设的合理性和逻辑性,从而能有助于读者理解和接受量子力学的基本原理,同时增强对量子力学理论结果的信心。还有,不从《大学物理》课程中已用相当篇幅介绍了的旧量子论出发,本书直接以由实验证实的微观粒子具有波粒二象性为出发点,围绕关于微观粒子理论的严密逻辑思考来叙述量子力学的基本原理。这样做是为了展现量子力学理论与经典物理学理论相同的逻辑结构,以免读者对量子力学产生抽象高深之感。

长期以来,在物理专业的课程安排中,统计物理先于量子力学开设。不过,统计物理紧密地依赖于分析力学和量子力学,而量子力学需要分析力学中的 Lagrange 量和 Hamilton 量以及将位置和动量看作是彼此独立的变量等不同于 Newton 力学中的观念,因此,本书按分析力学、量子力学和统计力学这样的先后顺序进行讲解。这样,本书得以完全用量子力学的语言讲述量子统计力学,避免了《热力学和统计物理》这门现行物理本科课程对量子力学欲罢不能欲讲受限的尴尬(《原子物理学》课程也有同样的尴尬)。同时,本教材也得以将分析力学、量子力学和统计物理的内容前后呼应地有机结合。于是,本教材将分析力学、量子力学和统计力学组成一个有机整体:力学(经典和量子)是统计力学的基础,而反过来,统计力学可被看作是力学的应用(当然,统计力学阐述的是大量粒子构成的体系的独特规律)。

应该提到,本书基本上是以叙述量子力学和统计力学理论为主,并未结合非物理专业来考

虑它们的应用。笔者觉得,一方面,真正掌握了量子力学和统计力学的基本理论和方法,应用是水到渠成之事。如果既讲理论又介绍其应用,那么在有限的篇幅内可能两者的任务均难以完成,而本书可能就是不伦不类了。另一方面,作为非物理专业的理工科大学生,如果他(她)的未来期望不同寻常的话,他(她)应该以扎扎实实地打好物理基础为目标而不应是急功近利的做法,更不应只是记公式和用公式。由于量子力学和统计物理在现代物理理论和现代科学技术中的基础性,扎实地学好它无疑是怀有远大抱负的非物理理工科大学生为将来有所发明和发现所做的不可或缺的准备。

现就本书内容安排及相关问题大致说明如下。

分析力学安排在第1章,以满足量子力学和统计力学的需要为目的来确定其内容,主要讲广义坐标、广义动量及相空间等一些基本概念、Lagrange 方程和 Hamilton 正则方程,并以电磁场中电荷粒子的 Lagrange 量和 Hamilton 量为中心介绍必要的矢量分析和电动力学知识。本章是为后面讲解量子力学和统计力学服务的,因此,虽然分析力学提供了处理多自由度约束系统问题的有力工具,本章并不要求读者能运用它。考虑到 Einstein 求和约定用起来比较方便,也很有效,本章的矢量分析知识是采用 Einstein 求和约定来介绍的,一些量子力学算符的对易性质也是利用它来证明的。然而,它并不是必须的,教师和读者完全可不用 Einstein 求和约定进行类似的论证。

量子力学将按其正统解释来讲授,内容安排在第2章至第7章。第2章到第4章将引入量子力学的基本假设,从而建立量子力学的基本理论框架。这3章构成前后逻辑联系紧密的整体,是量子力学的基本思想和理论核心。

第5章求解了几个典型体系的能量本征值问题。这些问题是量子力学中严格可解系统的基本例子,它们的解有助于理解前面3章所讲述的量子力学的基本原理,同时也是用量子力学处理其他复杂体系和发展近似技术(第7章)的基础。因此,本章应该也是量子力学的基本内容。

第6章介绍电子的自旋及其初步应用。自旋的出现动摇了位置坐标和动量作为量子力学理论中的基本变量的地位,使得量子力学理论成为完全脱胎于经典力学的极具包容性的普遍性理论。虽然自旋是一个相对论性的物理量,但它对于运用非相对论量子力学认识原子和各种物质体系的统计性质具有重要的意义。自旋和全同性原理为运用量子力学理解元素周期表和原子结构以及建立量子统计力学和量子信息论奠定了基础。另外,本章也为第3章扼要介绍的矩阵力学提供了一个最为简单的例子。

严格可解的系统毕竟是很有限的,量子力学的实际运用中处理的往往是无法严格求解的问题,因而近似技术是必要和重要的,应被看作是量子力学的组成部分。第7章介绍基本近似方法及变分微扰论。虽然它们在有些专业的后继课程学习和以后的工作及研究中实际上会很有用,但由于篇幅和课时的限制,本章要求理解基本近似方法并会简单应用即可。笔者认为,只要理解了,以后在实际应用中应该不会有问题。

在讲述量子力学的适当地方,本书也插入介绍了 Fourier 变换、Dirac δ 函数、偏微分方程的分离变量解法和二阶常微分方程及其级数解法这些在物理本科专业的《数学物理方法》课程中讲述的内容。

统计力学安排在第8,9,10章,在介绍基本概念和统计物理的基本原理后,仅讲授平衡态统计理论,即仅讲授统计力学。第8章主要讲解统计物理的基本原理,第9章主要讲解平衡态统计系综理论和近独立粒子系统的3种统计分布,第10章着重介绍近独立粒子系统统计分布

的应用。经典统计物理和量子统计物理的理论体系和方法基本相同,本书将经典统计力学作为量子统计力学的特例即经典极限稍作介绍。本书要求理解统计物理基本原理,平衡态系综理论,理解并会运用近独立粒子系统的3种统计分布。

关于如何学习本书,笔者建议如下。

量子力学理论是根据有限的实验事实和结果通过严密的逻辑思考和推理、合理的推广及大胆的假设而建立起来的。第2,3和4章在讲解或构造量子力学的基本假设和理论框架时,也正是通过回答对微观客体的认真思考而提出的逻辑联系紧密的若干问题来进行的。由于人类对微观客体不可能有直观经验,因而人类不可能从先验地存在于人脑中的经典观念来思考理解量子力学所描述的微观客体的行为。因此,读者在学习量子力学时,应该把它当作逻辑思考的结果从严密逻辑思考的角度去理解它,而不要总是试图从经典图像的角度来理解它。量子力学理论是否正确,应通过将之应用于实际问题,看结果是否与实验一致或其预言是否被实验所证实来决定,千万不要因为微观客体行为的怪异或难以想象而被其困扰甚至拒绝接受它。对于量子力学中的一些结果和结论,只要数学推导没错,逻辑推理合理,无论觉得它怎样荒唐,建议都接受它。一个结果或结论不是因为人觉得它不荒唐才正确,而是通过实验证实了它正确才是正确的。笔者在这里采用的是实证主义观点。当然,在入门以后,弄清楚了量子力学的理论本身及其正统解释以后,如果情况和精力许可,读者完全可以发挥自己的聪明才智去深入思考和研究所想到的量子力学问题。

另外,量子力学和统计物理学的理论性很强,数学推导多,读者可能不太习惯,甚至觉得抽象难懂。不过,Galileo曾说,数学是大自然的语言。我们只有懂得数学,才能了解大自然。一个学科或一个问题,如果能用数学清晰准确地表述出来,对于这个学科或者这个问题我们就明白和掌握了。笔者觉得,有些读者难懂物理的重要原因之一就是难懂数学。所以,如前已述,本书尽可能地给出详尽的数学细节。对本书的大部分内容,只要读者能静下心来细细研读,应该是不难读懂的。建议读者不要只是看看想想,可采取边看边想边在算纸或笔记本上跟着本书一点一滴思考,一步一走推导,最好能重复出本书中的所有推导、数值计算和曲线。每看懂一个推导,停下来,再回头看看,思考思考,并多想想所解决的物理问题及所得结果的物理意义。三十年前笔者在原荆州师专(现为长江大学)学习《数学物理方法》课程时,谭乃教授曾把学习比作吃菜,只有反复咀嚼才能知道菜的味道,否则将会不知道吃的何物,更不用说知其味道。笔者的大部分理论物理知识都是自学的,这个反复思考捉摸的方法是笔者在自学中在困惑不解处能自己拨开迷雾的重要法宝之一。笔者在《大学物理》和《量子力学与统计物理》的教学中,每教一遍也都会有新的启示或认识。读者也已经至少是十多年寒窗了,可能对反复思考的方法也有体会。

还有,笔者反对通过解答习题来弄懂基本内容。在笔者看来,应把主要精力放在反复钻研基本原理上,在学过基本内容之后,要能够独立地将其讲述出来,有些习题不会解答也不要紧。沉溺于解答人脑设计出来的问题中实在是对聪明才智的浪费,已经进入大学门槛的大学生们实在没有必要继续中学时代的这种无奈之举,不应该只是把眼睛盯在考试成绩、各类比赛上,应该看得更高更远一些。在如何治学的问题上,倪光炯先生有一篇发人深省之作,读者不妨觅来一阅^①(见文献①中第332页)。

本书分析力学部分(第1章)约需12学时,量子力学部分约需52学时,统计力学部分约需36学时,共约需100学时。选作教材时,教师可根据课时和需要酌情删减。笔者所开的72学时课程的安排是:第1章约占12学时,不推导梯度算子及Laplace算子在常用曲线坐标系中

的表达式;量子力学约占 40 学时,不讲自由转子的天顶角方程和氢原子内部运动的径向方程本征值问题的级数求解过程及轨道角动量与自旋角动量耦合的共同本征函数的推导;统计力学(即第 8,9,10 章)约占 18 学时,相当于简介,不讲 3 个常用系综分布和近独立粒子系统的最可几分布(9.6 节)的推导、能均分定理、理想 Boltzmann 气体及固体热容量的 Debye 理论。这个安排的考虑是,讲清了量子力学和统计物理的基本原理,读者不难自学统计力学部分。另外,本书前 7 章可供仅有高等数学和大学物理知识的学生的 54 学时量子力学课程选作教材。

曾谨言、周世勋、王竹溪、熊吟涛、梁昆森、郭敦仁、郭硕鸿和周衍柏等先生为物理专业所著、编的教材曾是笔者的自学所用资料,也自然成为笔者撰写本书的基础。另外,本书大部分习题主要选编自国内相关教材。困难能专门引用,故本书未能将之一一列出。

上海交通大学材料科学与工程学院从 2001 级到 2008 级的各年级本科生在笔者教学过程中的一些提问,以及该学院 2006 级、2007 级、2008 级本科生和在 2012 年初算起的 3 个学期里选修通识核心课程《量子力学(A)》的同学们在使用本书出版前的部分电子文稿或胶印版时对于文稿中一些叙述的建议和对一些输入错误的指正,均有益于笔者撰写本书。上海交通大学物理系原副系主任袁笃平教授和教务员窦小慧老师在本书的撰写期间对笔者给予了不少支持。笔者在此对他们一一表示诚挚的谢意。另外,笔者感谢本教材立项申请书的那些评审专家的评审支持。

若分别单独讲授量子力学和统计物理,笔者不可能有本书所反映出的认识。因此,笔者特别想对上海交通大学物理系理论物理研究所创建者马红孺老师表示由衷的感谢。没有他当初安排《量子力学与统计物理》课程这样一个教学任务,笔者不可能完成本书。如果那样,尽管自 1976 年就开始做教学工作,可能笔者一生也不会写一本教材了。

另外,复旦大学物理系教授施郁博士的关心直接导致笔者愿意出版本书。本书的出版,得到了上海交通大学物理系本科生教学指导委员会主任李晟博士和物理系副主任徐海光博士的大力支持,也得到了物理系学科带头人孙扬博士的关心。上海交通大学出版社杨迎春博士在本书的编辑、出版方面做了不少辛苦细致的工作,以致笔者体会到一本书也是责任编辑心血的凝结。另外,上海交通大学物理系教授李铜忠博士曾校阅本书绪论和关心本书的出版。在此,笔者对上述各位博士特致谢忱。笔者也非常感谢上海交通大学出版社其他有关人士的辛苦工作。

最后,笔者要对武汉大学的一位副教授表示由衷的敬意和谢意。在笔者所接受的学校教育的课程表中,只有《高等量子力学》,没有《量子力学》这门课程。1980 年暑期,武汉大学那位副教授在原荆州师专物理科(现为长江大学物理科学与技术学院)量子力学教师讲习班讲授量子力学,作为原荆州师专 1977 级学生的笔者“偷着”去旁听了全部讲授。因此,那位老师实际上是笔者的量子力学启蒙老师。虽然当时笔者并未怎么听懂,但那位老师的讲课无疑让笔者对量子力学留下了美好的印象。无疑,他那次短期讲课对笔者的影响是深远的。

笔者深深体会到科学的博大精深和基础理论的宽广厚重,加之笔者学识有限和教学经验不足,书中难免疏漏、错误和不妥之处,恳望各方能不吝赐教和直言指正。

卢文发

2009 年冬

2013 年夏修订

目 录

绪论	1
----	---

第 1 篇 分析力学及电磁场理论基础

第 1 章 实物的颗粒性和场的波动性	13
1.1 实物粒子的颗粒性	13
1.2 广义坐标	15
1.3 Lagrange 方程	23
1.4 Hamilton 正则方程	31
1.5 相空间	38
1.6 电磁场	43
1.7 电磁场中带电子的 Lagrange 量和 Hamilton 量	56
1.8 场的波动性	58
习题 1	60
复习总结要求 1	63

第 2 篇 量子力学

第 2 章 物质的波粒二象性	67
2.1 实物粒子的波粒二象性及物质波实验	67
2.2 描述波粒二象性的波函数	73
2.3 自由粒子	79
2.4 统计诠释决定波函数的解析性质	81
习题 2	85
复习总结要求 2	86
第 3 章 运动特性与状态	87
3.1 Fourier 变换和 δ 函数	87
3.2 粒子的动量测值概率	94
3.3 力学量算符	99
3.4 算符的运算和 Hermite 算符	104
3.5 角动量算符	113
3.6 可观测量量的可能测值及其测值概率	118
3.7 不确定度关系	133

3.8 量子态的表示方法	137
3.9 量子态叠加原理	148
习题 3	151
复习总结要求 3	154
第 4 章 状态变化	155
4.1 Schrödinger 方程	156
4.2 自由粒子	159
4.3 Hamilton 量不显含时间的体系	163
4.4 无限深方势阱	165
4.5 一维方势垒	174
4.6 量子态的时间演化及量子跃迁	179
4.7 力学量的时间演化	183
4.8 电磁场中荷电粒子的 Schrödinger 方程	190
4.9 多粒子体系和全同性原理	194
习题 4	202
复习总结要求 4	205
第 5 章 量子体系基础	206
5.1 简谐振子(级数解法)	207
5.2 自由转子	224
5.3 氢原子(球坐标系)	239
5.4 Landau 能级(柱坐标系)	269
习题 5	273
复习总结要求 5	275
第 6 章 自旋与原子	276
6.1 电子自旋	277
6.2 电子自旋态	282
6.3 电子自旋算符与 Pauli 矩阵	288
6.4 两电子体系的自旋耦合	293
6.5 碱金属原子	301
6.6 Pauli 不相容原理与元素周期表	313
习题 6	317
复习总结要求 6	318
第 7 章 基本近似方法	319
7.1 变分法	319
7.2 定态微扰论	326

7.3 变分微扰论	339
7.4 含时微扰论	346
习题 7	352
复习总结要求 7	353

第 3 篇 统计力学

第 8 章 统计物理学的基本原理	357
8.1 热力学系统	357
8.2 宏观状态	358
8.3 微观状态	365
8.4 统计物理的基本原理	375
习题 8	379
复习总结要求 8	379
第 9 章 平衡态理论	380
9.1 统计系综	380
9.2 微正则系综	384
9.3 正则系综	386
9.4 巨正则系综	395
9.5 近独立粒子系统的粒子数分布	402
9.6 近独立粒子系统粒子数的最可几分布	410
9.7 非简并性条件	417
习题 9	419
复习总结要求 9	420
第 10 章 若干系统的平衡态性质	421
10.1 能均分定理	421
10.2 理想 Boltzmann 气体	423
10.3 固体的热容量	440
10.4 理想 Fermi 气体: 金属中的自由电子	449
10.5 理想 Bose 气体: 黑体辐射	457
习题 10	464
复习总结要求 10	465
参考文献	466
结束语	468

绪 论

已掌握《大学物理》课程内容的读者,在拿着本书或接触到本书书名时,自然会在脑海里涌现出一连串与之相关的问题。例如,属于物理学的量子力学和统计物理研究的是什么?它们在物理学中处于怎样的位置?它们与物理学其他分支又有怎样的联系?它们对于人类认识自然和改造自然有何作用?它们与《大学物理》课程有什么关系?这些也是本书在具体讲述量子力学和统计力学之前不得不交代的问题。

为此,本书以“物理学及其基础理论”为题,在这里首先概述物质世界的层次化结构,简介物理学的相应分支及物理学的基础理论,通过读者熟悉的大学物理内容来说明物理学理论的逻辑结构,并简述量子力学和统计物理的建立与发展。

0.1 物质世界的层次化结构与物理学的分支结构及基础理论

物理学研究的是物质世界。所谓物质,就是存在于我们的周围、不依赖于意识而又能为人的意识所反映的客观实在。研究物质时,哲学注重的是宇宙间一切物质形态的共性,而物理学和其他自然科学注重的是各种物质形态的个性,即各个物质形态之间的差异。按照宇宙学标准模型理论,现今的宇宙起源于 137 亿年前一个奇异点的大爆炸。根据物理学的认识,经过一百多亿年演化的现代宇宙是一个复杂的系统,具有层次化的结构。

宇宙间物质世界复杂多样。从不同物质形态的空间尺度来看,物质世界具有多样化的层次。我们人类感官所能直接感知的我们周围的宏观物体,包括气态、液态和固态物质及山、湖等,就是一个物质层次。在这个层次上,一个个物质形态的空间尺度约在 10^{-4}m (应该说更小)到 10^3m 这个范围。从这个层次,往较大尺度和较小尺度两个方向分别各有一系列的层次。空间尺度比宏观物体小的层次就是分子原子层次,各种分子或原子是与同种宏观物质具有相同化学性质的最小单元。各种各样的物体由种类数目有限的分子或原子组成,而分子是由原子组成的。分子的尺度大约在 10^{-10}m 到 10^{-6}m 这个范围,而原子的尺度约为 10^{-10}m 这个数量级。空间尺度更小,按尺度大小排列出来,就是原子核和夸克(或叫由我们中国物理学家提出的“层子”),它们的空间尺度分别约为 10^{-15}m 和小于 10^{-17}m 。原子由原子核和电子组成,原子中电子的尺度小于 10^{-18}m ,一般被局限在原子的尺度范围内运动。原子核由质子和中子组成。质子和中子统称为核子,核子由夸克组成。夸克永远被禁锢在核子或其他重子、介子内部,迄今实验未能发现一个自由夸克。到目前为止,电子、其他轻子和夸克是不知其内部结构的粒子,它们和传递相互作用的 Bose 粒子,如光子、 $W_{\pm}$ 粒子、 Z_0 粒子和胶子等一起,被称为基本粒子。我们再来看看尺度比宏观物体大的各个物质层次。它们就是行星及其卫星,如地球,恒星系,如太阳系,星系,如银河系,河外星系,再就是星系团。这样,整个宇宙有着从基本粒子到星系团的层次结构,一般来讲,较小尺度层次上的物质客体组成一个相邻(也有跨层次)的较大尺度层次上的物质客体,以此类推。于是,宇宙间物质世界有着一个依次组成或依次细分的层次结构,空间尺度跨度约达 10^{46}m 。

顺便指出,大致与人类认识的物质世界的层次结构相对应,人类关于空间尺度也有一个由小到大的模糊划分概念。上面我们已经提到了宏观尺度,这里,我们再提及几个。一个就是比宏观尺度小的介观尺度,其尺度范围约在 10^{-7}m 到 10^{-9}m 之间。由于其有广阔和重要的应用前景,近年来这一范围内的物质客体已成为物理学及化学和材料科学的重要研究前沿并已取得可喜进展。另外一个更小的尺度就是微观尺度,其尺度范围为小于 10^{-9}m 。在这个尺度范围内的物质客体,如分子、原子、质子和电子等,通常叫做微观粒子。还有一个比宏观尺度大的就是宇观尺度,其尺度范围为大于 10^7m ,属于各类天体物质的尺度范围。微观和宏观是最开始划分空间尺度范围的概念,由于科学技术的不断进步和发展,人类关于空间尺度的概念现在才有了更细的划分。这种划分的变化反映了人类对物质世界认识的发展和提高。

宇宙中物质不仅具有层次化结构,而且无时无刻不在运动。运动是物质的根本属性和存在方式。研究物质也就是研究物质的运动及其形式。对于宇宙中物质多种多样的运动形式,人类怀着十分强烈的好奇心,以百折不挠的精神,进行了长期不懈的探索思考和深入研究,发展了标志人类智慧的自然科学和技术。其中,物理学研究宇宙中最基本最普遍的运动形式。“物理学研究宇宙间物质存在的各种主要的基本形式,它们的性质、运动和转化以及内部结构,从而认识这些结构的组元及其相互作用、运动和转化的基本规律”^②(见文献②中第1页)。经过近五百年的发展,物理学已生长得像一棵参天大树,既枝繁叶茂,又根深蒂固。对应于前述物质世界的每一个不同层次,差不多就有一个以它为研究对象的物理学的不同分支,物理学拥有从粒子物理学到凝聚态物理学乃至宇宙学的众多分支学科。图 0-1 反映了这一对应关系^③(见文献③中 § 0.1)。顺便指出,材料科学与凝聚态物理学的研究对象应该差不多重合。这些分支学科分别反映各对应层次上物质客体运动的最一般性质和规律,从这个意义上可以说,它们分别是关于各个具体层次上物质客体的物理学。因而,它们仅适用于各个相应层次上的物质客体。由于物理学研究的是宇宙中物质运动的基本形式,所以是其他自然科学部门和应用科学、技术科学的基石,也为其他科学如医学和生物学等,提供重要的研究手段。从迄今为止所发挥的作用看来,物理学既是技术发明的土壤,也是人类思维的砺石,已渗透到人类生活的各个领域,直接影响一个人的思维品质和一个科学家或技术专家的创新素质。

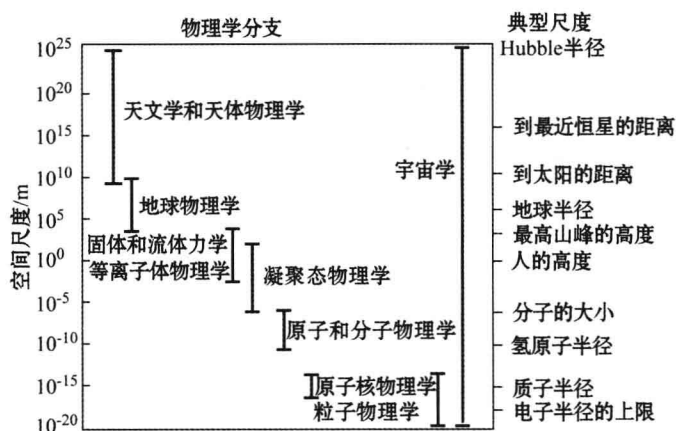


图 0-1 物理学的分支学科与其研究对象的空间尺度

(参照文献③第 3 页图 0.1.2 编制,这里略有不同)

宇宙中物质的最基本的运动形式是机械运动、热运动、电磁运动和量子运动。按此划分,物理学对应地划分为力学、热学、电磁学和量子力学,它们的基本内容差不多就是《大学物理》课程中所讲授的内容(对量子力学部分通常只是简介)。宇宙中各个层次的物质客体往往存在一种或多种最基本的运动形式,因而相应的物理学就是研究对应层次物质客体的力学、电磁学、热学和(或)量子力学等方面的特性和/或现象。这是一直以来从运动形式的角度出发的关于物理学理论的普遍看法,也是读者所熟悉的看法。

不过,鉴于整个宇宙均由种类数量有限的基本粒子组成这一图画,我们不妨从物质世界的层次化结构出发来看看物理学。这样,我们不禁要问,物理学理论大厦是否像她所描写的物质世界一样存在着构筑基石?也就是说,各个物理学分支是否有一个共同的基础理论或者基本原理?如果存在这样的基础理论,那么,我们就可以这样来看物理学理论大厦了,这个大厦的与各个物质层次相对应的物理学分支学科不过是将物理学基础理论应用于各个层次中物质客体的结果。如果是这样,那么,运用物理学基础理论就能解释或导出发生在各个物质层次中的一切现象和特性。

在宇宙的物质客体空间尺度递减的各个层次中,基本粒子位于最底层次,是依靠现代物理认识能力所揭示出的整个宇宙的构筑基石。基本粒子及其相互作用和运动构造了整个物质世界,并导演了物质世界里的斑驳陆离的万千现象。正是因为迄今为止的现代科学活动形成了人类这样的认识,在 20 世纪 80 年代中期,被认为有望统一宇宙中的各种基本粒子之间的所有基本相互作用的超弦理论经过第一次革命后不久,出现了 TOE 之说,即认为,统一 4 种(或说 3 种)基本相互作用的理论是宇宙间一切事物的理论(Theory of everything),由它可以推导和(或)解释宇宙中的一切现象和特性。这意味着,物理学的基础理论就是统一 4 种基本相互作用的理论或关于基本粒子的物理理论了,并且这个基础理论不仅是物理学的基础理论,而且是整个自然科学的基础理论。这种看法应该是合理的,因为基础理论要被应用于各个物质层次,而各个层次的物质客体归根结底又均由基本粒子组成。

然而,仅仅有描述基本粒子个体运动的最一般规律和特性的理论是难以担当前述物理学基础理论的大任的。这是因为,物质世界不仅有层次化结构,而且各个层次中的物质客体还有层展现象,即各个层次之间除了存在直接与其组成关系相联系的现象和特性外,也存在与其组成关系并无简单直接联系的现象和特性(即脱耦)。正是因为这种脱耦的存在,各层次上的特性和现象并不都能像质点系力学那样依照其组成关系通过将较低层次的特性和规律进行简单直接的求和而被解释和导出。正因为如此,物理学才有了前述多种多样、内容丰富、不可或缺的分支学科。由于存在各个层次物质的层展现象,如果像质点系力学那样通过对基本粒子个体运动的最一般规律和特性进行简单直接求和来给出各个层次物质的现象和特性那是不可能的。因此,物理学基础理论除了包括关于基本粒子的物理理论以外,还必须包括关于基本粒子的运动与各个层次物质的现象和特性之间联系的理论。统计物理学正是揭示宏观物体的微观组成及其运动与物体的整体特性之间联系的理论。所以,人类关于基本粒子的理论和统计物理学一起构成物理学的基础理论。

人类对于物质内部微观组成结构的认识是不断发展的,所以,充当宇宙中物质的构筑基石的基本粒子也是逐步被揭示出来的。在不同的阶段,基本粒子表示的物质客体是不同的。在漫长的认识过程中最先形成并被普遍接受的科学观点认为分子或原子是基本粒子。但到了 20 世纪初,这种观点就变化了,并最终变化到如前所述的观点,即人类目前所认识到的没有内

部结构的电子、其他轻子、夸克及各种传递基本相互作用的 Bose 粒子是基本粒子。同时,人类对于物质内部微观组元的运动本性的认识也是不断发展的。到目前为止,人类认识到,虽然分子和原子及空间线度更小的所有粒子分属不同的物质层次,但它们的运动本性都是相同的,其运动都遵从相同的基本规律。在这样的意义上,将分子或原子及空间线度更小的所有粒子统称为微观粒子。于是,物理学的基础理论由关于微观粒子运动规律的理论 and 统计物理学组成。随着人类对于微观粒子运动本性认识的发展,物理学的基础理论也得以发展和变化。

人类靠自己对周围宏观物体的长期的直观感觉认识到了宏观物体的颗粒运动图像,并在此认识的基础上总结建立了经典力学,并进而到 19 世纪末叶,建立了经典电磁理论(常称为经典电动力学)及热力学和经典统计物理学。常称它们为经典物理学。经典力学研究的是物体的机械运动,它的核心就是 Newton 运动定律和 Newton 万有引力定律。经典电动力学就是关于基本相互作用之一的电磁相互作用的经典理论,其核心就是 Maxwell 方程组。热力学与经典统计物理研究大量微观粒子组成的宏观物体的热现象,其核心是热力学四大定律、Gibbs 系综理论和统计物理方法。读者在《大学物理》课程中所学习的就是这些物理学基础理论中的基本概念和基本规律(基本上不包括经典统计物理)。在 19 世纪末叶,人类科学地认识到宏观物体(包括人眼可见的微小颗粒物)均由微观粒子组成,因而理所当然地认为微观粒子或实物粒子具有颗粒性,从而遵从经典力学。这样,当时的物理学基础理论就是经典力学、经典电动力学和热力学与经典统计物理。事实上,在经典物理学中,经典力学提供了在一定环境下的单个和若干个物质客体所遵从的规律,经典电动力学和万有引力定律提供了关于物质世界中的基本相互作用的理论或规律,因而由它们可认识同一层次中各个物质客体之间及其与环境之间的各种各样的相互作用,而经典统计物理则提供了由大量较低层次的物质客体(微观粒子)的规律和特性推知由它们组成的较高层次的物质客体的特性和规律的方法和规则(并不是简单的累加),正是统计物理统一了热力学与经典力学。这样,经典物理学被运用于物质世界的各个层次而给出各个层次的物理学。

然而,就在经典物理大厦建成的 19 世纪末叶,X 射线(1895 年, W. C. Röntgen)、放射性(1896 年, H. Becquerel)和电子(1897 年, J. J. Thomson)的三大实验发现打开了实验研究宏观物质客体的微观结构的大门,而黑体辐射能谱、光电效应,原子稳定性及其光谱、物体的比热、Compton 散射(1923 年)等的实验观测结果揭示了微观客体与经典物理学的矛盾,表明经典物理理论不适于比宏观物质客体尺度小的微观客体(微观粒子)。那么,微观粒子究竟遵从怎样的规律呢? 1924 年到 1926 年建立起来的量子力学就是描述非相对论微观粒子运动的理论。这样,经典统计物理就随之又发展成量子统计物理。又经过四十余年的努力,建立了相对论微观客体的量子理论,即量子场论。量子场论是量子力学的狭义相对论推广,在基本粒子及其相互作用中的应用导致了弱相互作用和电磁相互作用的统一以及统一弱、电、强相互作用的标准模型的建立。量子力学向广义相对论的推广目前仍在探索之中。量子场论提供了关于自然界中的基本相互作用的新理论。这样,一个以经典物理学为其极限情形的新的物理学基础理论形成了,这就是量子理论(包括量子力学和量子场论)和量子统计物理。它们与经典物理理论的内部结构相同,只不过是量子理论代替了经典理论而已。关于物质世界各个层次的现代物理学分支学科(如图 0-1 所示)基本上可看作就是将上述量子理论和量子统计物理应用于各物质层次的结果。例如,将量子理论用于基本粒子,就得到基本粒子物理学,量子力学通过统计物理应用于凝聚态物质就给出凝聚态物理学,而量子理论和统计物理用于宇观天体得到

天体物理学。因此,可以说,量子理论和统计物理是“可上九天揽月,可下五洋捉鳖”。

综上所述,物质世界具有从基本粒子到星系团的空间尺度由小到大递增的层次结构。经过数百年的认识、研究和发展,物理学已建立了自己的基础理论,它就是由量子理论(包括量子力学和量子场论)和统计物理所组成。将物理学基础理论应用于物质世界的各个层次,就给出了现代物理学繁多的分支学科。

本教材讲述的正是物理学基础理论中的核心和基本内容——量子力学与统计力学。

0.2 从大学物理看物理学理论的逻辑结构

上一部分我们介绍和说明的是物理学理论的骨架结构,并从中看到了量子力学和统计力学在物理学中的地位和作用。这一部分,我们将简要说明物理学理论的逻辑结构。量子力学十分难懂。标志人类智慧的伟大科学家 Einstein 晚年曾坦然承认,“整整 50 年有意识的思考还没有使我更接近‘光量子是什么’这个问题的答案”。被称为“物理学家的物理学家”Feynman 也曾断言“没有人理解量子理论”。这是指如前言中提及的量子理论结果的怪诞令我们无法想象。然而,量子力学理论本身的逻辑结构是严密的,并不是不可理解的。在笔者看来,物理学理论的各个部分都有相同的逻辑结构。大学物理学各个部分,本书将要讲授的量子力学和统计力学等,它们各自的基本原理和内容都是由关于其研究对象所思考的基本问题的解决和回答所组成,而它们关于其研究对象所思考和回答的基本问题恰恰都是相同的。既然读者已掌握大学物理,我们就来简单说明一下大学物理学各个部分的逻辑结构,从而推知物理学理论及量子力学和统计力学的逻辑结构。笔者希望这样做能有助于读者对量子力学的理解。

1997 年初,D. Gross(2004 年 Nobel 物理学奖获得者)和 E. Witten 在 *Wall Street Journal* 上撰文展望物理学的未来发展时曾指出,对一种物理现象的研究分为 3 个阶段:第一阶段就是弄清这种现象是什么,第二阶段就是探明这种现象是怎样运作的,第三阶段就是探究为什么会这样^①。受此启示,纵览大学物理学各分支学科的内容,读者不难明白,它们不过也是分别回答了 3 个关于各自研究对象的问题:是什么、怎么样和为什么。第一个问题涉及研究对象的本质。当解决了这个问题后,作为理论,就要描述其本质,即建立基本描述量。既然基本描述量描述所研究对象的本质,那么,从这个基本描述量可给出所研究对象的一切信息。第二个问题涉及研究对象的状态和性质。回答这个问题将导致建立描述和刻画所研究对象的各种状态和各方面性质的方法和方式,也就是建立各种相应的物理量并给出其与基本描述量的关系,从而可根据基本描述量来得到和计算出各个物理量。第三个问题则涉及状态变化的基本规律及其原因。对这个问题的探索一般将导致找到相应的基本描述量所满足的微分方程,从而根据研究对象的具体情况通过求解微分方程来确定基本描述量。回答和解决了这样 3 个问题,关于所研究对象的物理学理论也就形成了,它是一个严密的环环紧扣的逻辑整体。《大学物理》课程中力学、电磁学和热学等各部分分别正是这样的理论。

我们先看看力学。力学研究物体的机械运动,也就是人们在长期的各种生活和生产实际活动中逐渐产生、形成的所谓的运动。人类所感知的这种运动十分普遍,沙飞石滚,山滑水流,禽飞兽走,风吹雨打,云迷雾浮,斗转星移等均是机械运动。那么,如此令人眼花缭乱的机械运动的本质是什么呢?经典力学首先回答了这个问题,即物体的机械运动是物体间和物体内各

部分相对位置的变化。根据机械运动的这个本质,力学引入了位移来描述机械运动,并引入了相对于坐标系原点的位矢这个基本描述量以确定物体的位置(位形)。这样,选定参考系、建立坐标系和引入位矢和位移就解决了如何描述机械运动的问题。不用多说,力学中定义的速度、动量、角动量和能量等物理量描述了物体做机械运动的运动学状态和动力学状态,或说从各个不同方面刻画了物体做机械运动的运动特征和性质。如果知道了一个物体的这些物理量,也就知道了这个物体在做怎样的机械运动了。这样,定义这些物理量就解决了物体怎样做机械运动的问题。最后,Newton 运动定律及由之导出的动能定理、动量定理,角动量定理等就回答了物体状态如何变化和为什么会变化的问题,而 Newton 第二运动定律正是质点位矢所满足的微分方程。这样,我们看到,读者在大学物理课程中所知道的力学基本理论正是围绕回答关于机械运动的是什么、怎么样和为什么这样三个逻辑联系紧密的问题而建立起来的。

我们再来看看电磁学。在电磁学中,大家认识到的在电荷和电流周围存在着电磁场这一结论实际上回答了通常所见电磁现象的本质是什么的问题。根据电磁场对位于其中的电荷和电流总会施力的这一特性,电磁学引入了电场强度和磁感应强度,它们就是描述电磁场的基本物理量,由它们可得到空间中电磁场的一切信息。电磁学中电势及部分读者知道的磁矢势等物理量不过是以另一方式描写电磁场的物理量。因为电磁场连续展布于空间,所以,电磁场怎样运动的情况应该由电磁场在空间中的分布情况和特点反映出来。电磁学中引入的电力线、磁力线、电通量及环量、磁通量及环量等以及部分读者知道的电磁场强的散度和旋度等恰恰正是从各方面来描述电磁场在空间中的分布情况和特点,而电磁场能量、Poyting 矢量以及部分读者知道的电磁场动量等正是表征了电磁场作为物质形态的特性。不言而喻,电磁学中的 Coulomb 定律, Ampere 定律, Bio-Savart 定律, Faraday 电磁感应定律, Gauss 定理, Ampere 环路定理和 Maxwell 方程组等及部分读者知道的电磁场动量、能量守恒定律则是回答了各种各样情况下的电磁场如何变化和为什么变化的问题。这样,我们看到,与经典力学一样,电磁学的基本理论也不过就是回答了是什么、怎么样和为什么的问题,所不同的只是这些问题是关于电磁学的研究对象电磁场的。

最后,我们再看看热学。热学研究的是热现象。热现象是组成物体的大量微观粒子无规则运动的集体表现,这就是热学对于热现象的本质是什么这个问题的回答。热学所引入的温度则是表征热运动状态的物理量。不过,温度只能反映出物体内部热运动的激烈程度,不能确定地给出物体热运动的各方面信息,须加上适当选定的若干个状态参量才能完全确定物体热运动的各方面性质。这样,热学没能定义出一个完全描述物体热运动的物理量,但还是考虑和解决了对所研究对象的完全描述问题。读者在大学物理中所熟悉的热力学平衡态和非平衡态,温度、压强、体积、内能、自由能和熵等概念和物理量以及平衡态下气体分子遵从的 Maxwell 分布律就是用来描述各种各样热力学系统的状态和性质的,而热力学第一、第二和第三定律则回答了各种热力学过程中系统的状态如何变化和为什么变化的问题。

上面已经说明,《大学物理》课程中的力学、电磁学和热学等各个部分虽然各自研究对象不同,但都是围绕回答关于各自研究对象的是什么、怎么样和为什么这样三个逻辑联系紧密的问题而建立。不仅大学物理是这样,物理学理论均是这样。读者在本书中将会看到,量子力学虽然抽象,其基本理论不过也就是回答了关于微观客体的是什么、怎么样和为什么的问题。