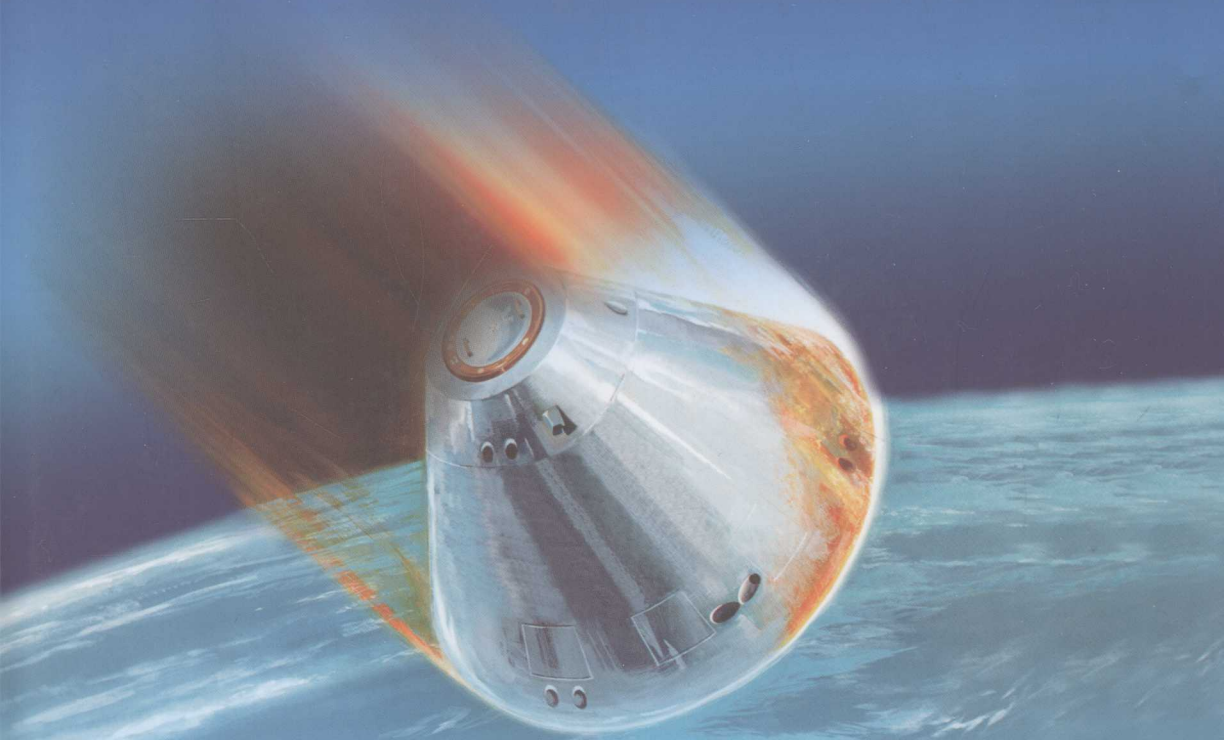


# 高超声速气动热力学

王保国 黄伟光 著



科学出版社

# 高超声速气动热力学

王保国 黄伟光 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书是关于高超声速气动热力学的一部专著,共分3篇12章:第一篇张量分析与物理力学基础,包括四大力学;第二篇高超声速气动热力学的基本理论与基本方程,包括高温高速条件下多组元反应气体的输运特性、辐射输运方程、高温气体与固壁的相互作用、广义 Navier-Stokes 方程以及广义 Boltzmann 方程等;第三篇高超声速高温流场的数值方法及其典型算例,包括高精度有限差分法、小波探测技术、RKDG 有限元法、DSMC 算法、RANS 与 LES 组合分析法等。典型算例选用了进入地球、火星、土卫六大气层的242个工况。全书以高超声速再入飞行问题为对象,紧扣微观物理与宏观力学的结合,针对18种著名飞行器,讨论了 Navier-Stokes 方程与 DSMC 两类数值方法的求解过程。书中对再入问题的物理描述清晰、逻辑推理严谨、注重揭示出流动特性与物理机理。

本书可供从事流体力学、航空航天飞行器设计、飞行器热防护研究、高温气体辐射等专业的研究生、博士生和相关科技人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

高超声速气动热力学/王保国,黄伟光著. —北京:科学出版社,2014.1  
ISBN 978-7-03-038901-5

I. ①高… II. ①王… ②黄… III. ①气动传热-热力学 IV. ①TK124

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 245929 号

责任编辑:刘宝莉 / 责任校对:郑金红 张凤琴

责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2014年1月第一版 开本:B5(720×1000)

2014年1月第一次印刷 印张:39

字数:786 000

定价:158.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 前 言

这是探索微观物理与宏观力学相结合,求解高超声速再入飞行时遇到的气动热力学问题的一部专著。其中提出从一个力学基本方程出发、构建一个基本的求解框架、突出一个统计系综、立足一种普遍形态的基本思想方法,并借助于这一方法分析与求解了火星大气层、土卫六大气层以及地球大气层中 18 种国际上著名航天器与探测器的高超声速绕流问题,其中包括 242 个再入飞行典型工况的气动力、气动热以及飞行器热防护问题的分析,且有 231 个工况已在相关国际会议、学术杂志以及全国学术会议上发表。从这种意义上讲,本书是卞荫贵先生《气动热力学》一书的继续与发展,是对恩师长达 27 年,即 1978~2005 年培养与指导的感谢与追思。

高超声速气动热力学问题通常会涉及四个流区(即自由分子流区、过渡区、滑流区和连续介质区),适用于这四个流区的力学方程是 Liouville 方程。直接数值求解 Liouville 方程难度很大,然而由这个方程出发,引入适当的近似可以推出 Boltzmann 方程;再借助于 Chapman-Enskog 逐级逼近展开可得到 Euler 方程、Navier-Stokes 方程以及 Burnett 方程等。因此,在某些近似假设下,不同流区所服从的 Boltzmann 方程或者 Navier-Stokes 方程在理论上是自洽的、协调的、统一的。这正如 Balescu 院士认为的那样,统计力学起着从微观层次向宏观层次间传递信息的作用,这种微观力学与宏观力学之间的相互沟通便是件很自然的事情。因此,在 Bogoliubov 院士提出的三个时间标度的思想框架下去认识非平衡统计中存在的三种不同层次(即微观力学层次、动理学层次、流体动力学层次)的描述,便显得格外清晰。

在高超声速气动热力学中,尤其是在研究进入火星大气层、土卫六大气层以及再入地球大气层问题时,往往会遇到 10 000K 以上的高温。在如此高温之下所产生的气体分子内能激发、离解甚至电离、组元间的化学反应、电子能级激发跃迁等气体内部的物理、化学过程,其中包含量子效应,都必然会影响到气体的热力学特性、输运特性以及输运系数的准确计算,会涉及量子力学与量子统计力学的基本理论,会涉及量子形式下分子配分函数的表达以及 Gibbs 统计系综的分布函数。理论上可以证明在 Gibbs 统计系综下可以实现从量子统计到经典统计的极限过渡。因此本书第一篇分别以经典力学、电动力学、量子力学和统计力学这四大力学中的最基础且又是本书要用到的重要概念与相关公式进行简要回顾是必要的。

非平衡是物质运动的一种普遍形态,平衡仅是它的特例,这是本书第二篇各章突出体现的主题思想。因此,热力学非平衡、化学反应非平衡、电离非平衡以及高

超声速流动中所发生的各种非平衡现象便成为该篇各章研究的重点。以 Apollo AS202 返回舱再入地球大气层为例,当再入高度从 200km 降至 54.6km,再入速度从 8.29km/s 降至 5.07km/s,  $Kn$  从 44.74 降至  $4.35 \times 10^{-5}$  的过程中, Apollo 返回舱穿越了自由分子流区、过渡区、滑流区和连续介质区。随着飞行器再入高度、再入速度的变化,流动所处的热力学状态(包括平动、转动、振动、电子温度等热力参数)以及化学反应(包括离解、复合和电离等)过程在不断地变化,高温气体中的组分数在变化,电子数密度在变化,非平衡的过程也不断地变化着,书中给出衡量这些非平衡程度的多个无量纲特征参数。

辐射加热是高超声速飞行器常会出现的又一重要物理现象,以 Galileo 探测器以 14km/s 的速度进入木星(Jupiter)大气层为例,这时辐射热占总加热率的 95% 以上,由此可见光量子的能量输运问题对航天器的辐射作用是绝对不能忽视的,所以辐射的气体动力学问题理应作为第二篇相应章节的研究内容。

2005 年 5 月中旬,卞荫贵先生最后一次审定本书的大纲和详细目录时指出,航天器姿控发动机的工作环境多处 在 40~90km 高空,那里的气动问题应属于稀薄气体动力学的研究范畴;另外,进入宇宙其他星球时所发展的新型气动制动变轨技术(例如 Ballute 减速技术)需要准确知道在稀薄大气空间进行高超声速飞行时作用在飞行器上的气动力与气动热,因此卞先生建议在第二篇与第三篇中应增加稀薄气体动力学计算以及这方面的典型算例。我们采纳了先生的建议,增加了“高超声速高温稀薄流的 Boltzmann 方程”作为第 10 章放到第二篇,增加了“求解高超声速稀薄流的 DSMC 方法及其应用”作为第 12 章放到第三篇。第 10 章详细讨论 Boltzmann 方程的数学性质和适用范围,细致地讨论了多组元、单原子分子的 Boltzmann 方程,单组元、多原子分子、考虑量子数的 Boltzmann 方程,多组元、多原子分子、考虑量子数与简并度的 Boltzmann 方程等方面的内容,这些重要的方程和内容体现出我们最新的研究成果,本书中的许多内容在国内外的相关书籍中很难看到。另外,这里还必须指出的是:对于 DSMC 方法与 Boltzmann 方程间的关系,在这方面已有理论上的严格推导与证明,如 1989 年 Babovsky 证明了 Nanbu 的 DSMC 方法收敛于 Boltzmann 方程;1992 年和 1994 年 Wagner 证明了 Bird 的 DSMC 方法也收敛于 Boltzmann 方程。因此,在目前直接快速求解广义 Boltzmann 方程(generalized Boltzmann equation, GBE)有一定困难的情况下,我们优先发展 DSMC 方法是非常可取的。

本书的第三篇主要研究高超声速高温流场的数值方法及其典型算例,它集中展示在卞荫贵教授与吴仲华教授的直接指导下,我们在长达 35 年气动热力学外流与内流数值方法研究中所感受到的学无止境、自强不息做学问的亲身经历。以外流高速气动热力学研究为例,在卞荫贵先生长达 27 年的精心培育与直接指导下,

我们渐渐认识与懂得了 Aerothermodynamics 一词的含义。在经历了 20 多年的知识储备之后,一丝不苟、矢志耕耘,真可谓钢梁磨绣针、厚积薄发,近 10 年来我们 AMME Lab(Aerothermodynamics and Man Machine Environment Laboratory,高速气动热与人机工程中心)成功完成了对 18 种国际著名航天器与探测器、进入 3 种大气层(即火星大气层、土卫六大气层以及地球大气层)、242 个典型飞行工况的数值计算与流场分析,这就为第三篇内容奠定了大量的、丰富的素材。对 Navier-Stokes 方程,在数值算法的选取上立足于高精度、高分辨率、高效率、低耗散和低色散算法,因此 ENO 格式、加权 ENO 格式、强紧致三点格式等高精度、高分辨率格式、优化(optimized)WENO 格式以及进行时间积分的多步 Runge-Kutta 法、双时间步长迭代格式等都作为本篇讨论数值方法时的研究内容。这里需要强调指出的是:在第 11 章中还着重讨论在流场中开展小波奇异分析新技术、间断 Galerkin 有限元技术、非结构网格快速生成技术等章节,并给出大量的算例,显然这些内容十分新颖,它反映出我们最新的科研工作。第 12 章集中讨论稀薄流的 DSMC 算法,详细讨论非结构网格下模拟分子的追踪方法、6 种热力学碰撞传能的处理、8 种化学反应类型的计算以及描述热力学与化学非平衡的 3 种典型无量纲特征数等章节,给出我们计算的 Apollo、Orion、Mars Pathfinder 以及 Mars Microprobe 四种航天器 42 个工况的三维稀薄流场(其中包括在地球大气层中,飞行高度从 250km 变到 90km,飞行攻角从  $45^\circ$  变到  $-45^\circ$ , Knudsen 数从 111.0 变到 0.0057,飞行速度从 9.6km/s 降到 7.6km/s;在火星大气层中,飞行高度从 141.8km 变到 80.28km,飞行攻角从  $45^\circ$  变到  $0^\circ$ , Knudsen 数从 100.0 变到 0.0546,飞行速度从 7.47km/s 变到 6.908km/s)的详细计算过程,这些结果对于指导航天飞行器的热防护和进行合理的气动设计十分有益。另外,在这一章中还计算了进入火星轨道探测器与环形气球组成的 Ballute 气动变轨减速装置,并与 NASA Langley 研究中心 Moss 先生于 2007 年的计算进行了详细比较。在第 12 章中还有一个非常重要的内容是我们提出再入飞行过程中“小 Knudsen 数特征区域(即  $[Kn_1, Kn_2]$ )”的概念,正是由于小 Knudsen 数特征区的存在,因此整个再入过程的所有飞行工况可以通过适当选用 DSMC 与 Navier-Stokes 两种计算模型来完成。显然,这个结论对再入飞行过程中的数值计算来讲是非常重要的,书中给出大量算例,充分显示上述方法的可行性与有效性。

全书分 3 篇共 12 章,十分注重理论论述和基本概念的准确性与严谨性、十分注重全书框架的整体性与统一性,整个研究针对航天器高超声速进入其他星球大气层或再入地球大气层的气动热力学问题展开讨论,全书的核心思想和内容可用下面的 5 点概括:

- (1) Liouville 方程是全书最重要的力学基本方程,它支配着四个流区的流动。

(2) 在四个流区的具体处理上,构建了一个基本框架(即从严格的力学方程 Liouville 方程出发,通过引入适当的近似假设导出 Boltzmann 方程;而后再由 Chapman-Enskog 逐级逼近展开去获取相应流区的控制方程);在具体的数值求解中采用了 DSMC 与 Navier-Stokes 两种计算模型。

(3) 在建立微观量与宏观量的联系上,突出一个统计系综(即 Gibbs 统计系综理论)。

(4) 在认识高超声速气动热力学的基本问题上,立足于一个基本思想,即非平衡是物质运动的一种普遍形态的思想。

(5) 以 18 种国际著名航天器、探测器以及载人飞船从飞行轨道返回地球表面过程的实际飞行参数为例,其飞行经历了高空稀薄流区(例如,飞行高度从 130km 变到 90km,飞行 Mach 数从 30 变到 26,飞行 Reynolds 数小于  $10^4$ )、高空低 Reynolds 数区(例如,飞行高度从 90km 变到 50km,飞行 Mach 数从 26 变到 10,飞行 Reynolds 数的变化范围为  $10^4 \sim 10^6$ )以及低空高 Reynolds 数区(例如,飞行高度  $H < 50\text{km}$ ,飞行 Mach 数小于 10,飞行 Reynolds 数大于  $10^6$ )。值得注意的是,低密度效应对飞行器的阻力、升阻比、操纵效率、压力中心、俯仰力矩特性有很大影响;当飞行器再入高度降至 83km 以后就会进入黏性干扰区,当飞行高度降至 50km 时便进入低空激波与边界层严重干扰区。在这两个区域飞行时会对航天器的气动特性产生严重的影响(例如,激波与边界层之间的强烈干扰效应,在分离再附区与激波撞击区处会产生高热,此处的热流要比无干扰时的热流高出 10~20 倍)。目前地面试验还很难模拟高空低 Reynolds 数区的黏性干扰以及真实气体效应。另外,在地面上进行低空高 Reynolds 数区的 Mach 数模拟目前也远低于实际飞行的 Mach 数范围,因此 CFD 技术是急需发展的。本书在数值求解算法上,对于高空稀薄流,则采用 DSMC 方法,并注意高超声速流动时热力学非平衡、化学反应非平衡以及热辐射与非弹性碰撞项的处理;对于弱电离的高温稀薄气体,由于混合气体流动中包含离子和电子,采用 DSMC 方法时还必须考虑远程力的作用;对连续流区,则采用 Navier-Stokes 方程,在数值求解上强调一类算法(即高精度、高分辨率、高效率、低耗散和低色散的算法);另外,对于多尺度物理流动问题,强调了数值耗散的自适应控制技术,强调了在流场中开展小波奇异分析技术,并注意了 WENO 格式以及间断 Galerkin 有限元技术。此外,对于高超声速再入飞行、处于低空连续流区高 Reynolds 数流动工况,面对飞行器周围出现的十分复杂的大分离流动特征,还必须注意将 RANS(Reynolds averaged Navier-Stokes)方程与 LES(large eddy simulation,大涡模拟)相结合,去发展能够被工程所接受的快速、准确计算方法。书中给出高速可压缩流的湍流模型以及针对高速流的转捩模型;给出发展高效率、高精度、高分辨率 RANS/LES 组合杂交算法以及发展 RANS 全场计

算与 DES(detached eddy simulation, 分离涡模拟)局部分析相结合的工程算法的相关细节。最后,书中还十分简明扼要地给出我们与美国 Washington 大学 Agarwal 教授合作,在广义 Boltzmann 方程(GBE)二维或三维、同时考虑振动与转动非平衡时,多组元、多原子分子、考虑量子数与简并度情况下的数值求解与源程序的编写工作以及在这方面我们所取得的突破性进展。因此,高超声速再入飞行过程的所有飞行工况便可以通过适当选用 GBE 与 Navier-Stokes 两种计算模型来完成。这种解决问题的思想方法体现了微观与宏观的结合、体现了还原论与整体论的优势互补与辩证统一,它有着坚实的哲学基础。

生正逢时、博采众长、自强不息,两位作者认为:全书整体框架的力学基础是四大力学(即经典力学、电动力学、量子力学和统计力学),是依靠前人积累下来的理论物理这个坚实的理论体系。这里不妨十分扼要地回顾一下这个理论体系的近代发展与验证:对于现代物理学,从研究的领域看,它涉及宇观天体、宏观物体和凝聚态物质、介观体系(即它所研究的对象包含  $10^8 \sim 10^{11}$  个原子,在固体材料的观测中有 Aharonov-Bohm 效应),以及微观基本粒子以下的亚微观层次;从研究的物质质量来看,重到  $10^{70}$  g 的总星系,轻到  $10^{-27}$  g 的夸克(quark);从研究的广度来看,大到  $10^{26}$  cm,小到  $10^{-16}$  cm 的尺度量级;更为可喜的是,1970 年国际量子生物学会成立,将量子力学与分子生物学相结合,这有助于对生物大分子以及具有生物学活性的分子本身结构的研究,标志着当代生命科学从分子水平向更深的下一层次即电子或量子水平迈进,它促使了生物物理学的发展,有助于对生命现象本质的认识;从研究相互作用的关系来看,既要研究作用半径大到无穷时的引力相互作用,又要研究小到  $10^{-13}$  cm 以下的强相互作用,以及介于它们之间的电磁相互作用和弱相互作用,还要研究这几种相互作用的统一问题,即统一场论。Albert Einstein(1879~1955),这位当时年仅 32 岁(1911 年时)就被德国最著名的理论物理学家 Planck(1858~1947)推荐为大学教授的相对论创始人,于 1905 年与 1916 年分别创立狭义和广义相对论,提出了质能等价原理(即所有质量都有能量,所有能量都有质量,质能关系公式为  $E=mc^2$ ,简单且玄妙;它暗示物质-反物质湮没过程的存在,同时也为 1967 年 Sakharov 提出宇宙大爆炸创生出普通物质与反物质相关的理论奠定了基础),尤其是 1912~1913 年在大数学家 Grossmann 的鼎力相助下,利用 Riemann 空间的张量运算建立了广义协变的引力理论;1914 年提出了广义协变性原理,1915 年在几经失败之后才获得了 Einstein 引力场方程的正确形式。通常 Einstein 引力场方程可表示为

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \Delta g_{\mu\nu} = -8\pi GT_{\mu\nu} \quad (\mu, \nu = 1, 2, 3, 4)$$

式中: $g_{\mu\nu}$  为二阶度规张量的协变分量; $R_{\mu\nu}$  为 Ricci 张量的协变分量,并由  $g_{\mu\nu}$  及其导数构成,它描述了时空的几何性质; $R$  为曲率标量(即  $R \equiv g^{\mu\nu}R_{\mu\nu} \equiv g_{\mu\nu}R^{\mu\nu}$ ); $T_{\mu\nu}$  为



宇宙介质的能量动量张量的协变分量,它描述了宇宙介质的物理性质; $G$ 为引力常量; $\Lambda$ 为宇宙常数。在理论物理学界,是否保留 $\Lambda$ 有过多次的争议,现在人们普遍认为:根据目前人们对亚原子尺度世界的理解,宇宙常数应该是存在的;另外,宇宙常数还将为我们理解宇宙及其运行法则提供更多的信息。仔细分析 Einstein 引力场方程可以发现,这里引力场的物理效果是通过 Riemann 空间的度规张量来体现的,而这个弯曲的 Riemann 空间是由四维物理时空构成的。Einstein 引力场方程是关于度规张量  $g_{\mu\nu}$  的二阶非线性偏微分方程组,在已知的物质分布情况下,这个方程组具有 10 个未知函数  $g_{\mu\nu}$ ,尽管这个方程组含有 10 个方程,但仅有 6 个独立,因此加上四个坐标条件(如周培源先生的谐和坐标条件)便可以使方程组封闭。这个方程组体现了物质与引力场之间的相互作用,正如 Einstein 所指出的那样,物质告诉时空如何弯曲,时空告诉物质如何运动。还有一点必须说明的是,引力场本身也具有能量,此能量也就有质量,此质量反过来又要影响时空性质,这正是引力理论的复杂性所在。不过,引力场的质量并没有反映在引力场方程右端的  $T_{\mu\nu}$  中,而是包含在方程等号左边的时空量中。 $T_{\mu\nu}$  包括一切粒子及粒子相互作用的能量总和,只是不包含引力场自身的能量。综上所述,Einstein 广义相对论的伟大功绩就在于找到了物质的存在和运动如何影响时空结构的方程,即著名的 Einstein 引力场方程。另外,Einstein 还建议了 6 个著名的实验验证(例如,谱线的引力红移、引力的时间延长等),而 Eddington 爵士(他预言了引力辐射,1969 年 Weber 探测到了引力波)在广义相对论方面的观测验证为相对论的成立做出了重大贡献。随着近些年来人们对超新星(supernova)爆炸的关注,由此产生了对相对论激波传播问题的研究,事实上这时引发的激波传播速度很高,可与光速比拟。另外,自 1963 年人们发现类星体(quasar)的射电发射源以来,如此巨大的能源来源及机制一直是个谜,而解开这个谜需要相对论磁流体力学方面科学家的参与和研究;更为有趣的是 Schwarzschild 黑洞(black hole),能从其周围的星际空间中吸入气体或尘埃,使其下落到接近表面。当质点下落到接近表面时,物质流的速度接近光速。总之,这些新开辟的天体物理的领域迫切需要相对论流体力学家的加盟。毫无疑问,1915 年是 Einstein 的丰收年,随着他那一年 6 篇论文的发表,Einstein 开辟了当时物理学的两个新分支即量子力学和相对论,并在统计力学中也做出了杰出的贡献;早在 1918 年,Einstein 就已经把宇宙作为广义相对论的应用对象进行研究了,今天由 Hubble-Friedmann-Gamow 开创的宇宙理论以及 Hartle 与 Hawking 创造的量子宇宙学理论也都与广义相对论密不可分。Einstein 用了他宝贵的后半生致力于统一场论,尤其是引力理论与电磁理论统一的研究,他的思想指导着整个物理学、指导与影响着整个现代物理与重大的技术革命。这里我们不妨以人们由于研究的不同领域去感受广义相对论和狭义相对论的适用范围为实际例子去说明一个大的、

普遍的理论框架的重要性以及构建这样一个框架的艰辛:尽管在通常宏观物理学中,广义相对论或狭义相对论的影响作用人们都认为可以忽略不计,但在微观高能物理学的研究中人们普遍公认任何正确的基本粒子理论都必须满足 Lorentz 协变性要求,这就体现了狭义相对论在认识微观高能物理现象时确实是必不可少的重要基础理论;另外,引力相互作用比强相互作用、电磁相互作用和弱相互作用分别小  $10^{38}$  倍到  $10^{25}$  倍,这使得人们在通常微观领域中认为广义相对论或引力作用可以忽略不计,但在后来的研究中人们发现即使在微观领域如果宇宙曲率很大(例如,接近 Planck 曲率)时,广义相对论或引力仍会起着最重要的作用。现在人们普遍感到:研究宇观领域内的物质过程,广义相对论的作用越来越大,尤其是 1967 年英国剑桥射电天文学家 Hewish 教授发现了脉冲星(pulsar),为此他于 1974 年获得诺贝尔物理学奖。脉冲星的发现也为 Einstein 于 1916~1918 年在广义相对论所预言的引力辐射提供了坚实的依据。另外,美国的 Hulse 与 Taylor 发现了脉冲双星引力辐射(为此,两人同时荣获 1993 年诺贝尔物理学奖)进而为引力研究提供了新的机会。如果 Einstein 还活着的话,上述这些发现也会大大推动他的统一场论研究工作的进程。现在人们才逐渐认识到:一方面天体物理中所观测到的一系列现象已经成为校验现代理论物理的试金石;另一方面近代天体物理中的一些新的发现也成为整个物理知识体系变革的源泉。人们终于看清楚了广义相对论在恒星晚期演化(如白矮星、中子星等)问题和黑洞问题以及宇宙演化问题上发挥着十分重要的作用。由此,便不难使我们去理解伟大的物理学家 Einstein 在提出了相对论、构建了现代物理的基本框架之后为什么还要用后半生的宝贵时光去做统一场论的理论研究工作。这里要着重指出的是,随着物理学的发展与逐渐完善,人们渐渐认识到应该将现有的最大和最小两个尺度下的物理问题结合起来研究,并通过对内部与外部空间的共同探索解决问题。量子物理学的出现使物理学拥有了分解原子与原子核的能力,并得以研究由夸克、中微子和电子构成的亚原子世界。同时,广义相对论又在最大的尺度上描绘了一个全新的宇宙。在那里,空间与时间、物质与能量将被紧紧地联系在一起。当人们在宇宙深处探索过去 137 亿年间物质与能量在宇宙中留下的痕迹时,这时将需要得到粒子物理学的理论指导;与此同时,人们对宇宙的观测又会加深对微观世界的理解,即可以帮助人们揭示亚原子世界的隐藏区域,并对新粒子与新维度的提出和检验提供支持。因此,近年来人们抓住了太空与地面两大方面的研究与验证:

(1) 借助于发射各种现代航天探测器、充分利用太空望远镜以及现代各种分析仪器,开展太空观测与太空分析、大力推行对广义相对论、引力波、宇宙星系、宇宙年龄(著名物理学家和宇宙学家 Stephen Hawking 指出:宇宙已有 137 亿年的历史,它至少还存在 280 亿年)、引力红移(又称 Doppler 效应)、引力坍缩天体(黑

洞)、暗能量以及暗物质等方面的研究与验证工作,其中著名的探测器、太空望远镜以及大型实验计划,如 Gravity Probe B(2004年4月搭乘 Delta II 火箭升空,用于验证 Einstein 广义相对论)、LISA Pathfinder(2010年升空,用于万有引力波的验证)、Wilkinson 微波背景辐射各向异性探测器(即 WMAP,2001年6月30日升空,观测服役期6年,得到了大量非常有价值的观测结果。发表的观测结果证实:暗能量占宇宙能量密度的73%、暗物质占23%、普通常规物质仅占4%)、Planck 探测器(2008年7月搭乘 Ariane 5号火箭升空,用于高精度探测与分析大爆炸后留下的宇宙微波背景辐射)、激光干涉引力波探测器(laser interferometer gravitational wave observatory, LIGO,用于对引力波的直接探测)、Hubble 太空望远镜(它于1990年4月搭乘 Discovery 号航天飞机升空,一直到2009年最近一次修护时这台长13.3m、直径4.3m、质量11.6t、最远已观测到135亿光年以外的星系、耗资21亿美元的太空望远镜还在正常工作,在19年的运行时间里它拍摄了大约24000个天体,更为重要的是它拍摄到距离望远镜6亿光年远处两个螺旋星系相撞的照片以及2003年8月8日首次拍下大星系吞食小星系的照片;这台 Hubble 望远镜2010年左右退役,预计2013年 James E. Webb 太空望远镜升空成为 Hubble 的继任者)、Herschel 太空望远镜(2008年7月搭乘 Ariane 5型火箭升空,用于搜索宇宙中最远和最冷的物体产生的长波辐射)、Kepler 太空望远镜(2009年2月搭乘 Delta II 型火箭升空,用于搜索爆炸行星)、Spitzer 太空红外望远镜(2003年8月升空)以及高等暗能量物理望远镜(advanced dark energy physics telescope)、Chandra X 射线太空天文台(即 CXO,1999年7月升空)、Compton 伽马射线太空观测台(CGRO)等;另外,由 NASA 与美国 DOE(Department of Energy)共同支持的 JDEM(Joint Dark Energy Mission)项目中的子项目:超新星加速探测器(Supernova Acceleration Probe)不久也将发射升空。此外,与搜索引擎业 Google 合作的 LSST(Large Synoptic Survey Telescope,大型巡天望远镜)项目还将把人类的视野带入一个全新的层次。LSST 每个月都将对半球天空进行多次扫描,并在每晚记录约30000G的数据。Google 加入 LSST 项目后便可以帮助科学家们更有效地处理、储存和分析实验给出的大量天文数据,以便形成宇宙数据库。Google 还将开发一个面向公众的接入与搜索界面,为世界的广大学生和研究人员提供宇宙数据库的信息。这里不妨以观测星系团为例说明一下使用不同观测仪器所看到的十分有趣的现象:从一台光学望远镜(如 Hubble 太空望远镜)望去,星系团是一大堆星系的集合,其中最亮的星系经常处于集合的中心位置;从一台 X 射线望远镜望去,星系团看起来像一大团热气;从引力透镜(gravitational lens)望去,星系团则是时空中的一个凹痕。值得注意的是,引力透镜是帮助我们全面理解物质与能量的重要工具,它最引人注目的效应之一是产生 Einstein Ring,在 Hubble 太空

望远镜和 SDSS(sloan digital sky survey)项目的帮助下,2006 年人们从 SDSS 项目所收集的数百万个星系、类星体和恒星中,通过精确的数据图像分析,确定了透镜的候选者,而后再利用 Hubble 太空望远镜进行观测,得到 8 个新的 Einstein Ring。引力透镜已成为寻找银河系中的暗物质、捕捉宇宙中暗能量的最新式搜索工具之一。当 Einstein 在 1936 年完成他关于透镜效应的论文时,曾提出这样一个验证实验,即通过监视 100 万颗恒星去看到某一颗恒星发生了透镜效应,这个实验对当时的任何一位天文学家来说都是不切实际的幻想。然而在 50 年后即 1986 年,当 Princeton 大学的 Paczynski 构想出一个可能实现的实验计划时,上述想法就不再是幻想了:以 20 世纪 90 年代初开展观测工作的 MACHO(massive compact halo object)小组为例,截止到 1999 年差不多 6 年的时间里,他们监测了 1200 万颗恒星,最终发现了 13 次透镜事件。EROS(英文常译为 dark object research experiment)小组在 6 年半的时间里监视了 3300 万颗恒星,也获得了丰硕的观测结果。这里还有一个重要的观测结果应该说明:2006 年 11 月 Riess 作为高红移超新星计划(high- $z$  supernova search Team,这里字母  $z$  代表红移率)的领导人,公布了他们团队对距离我们 70 亿光年以外 23 颗超新星的观测结果。这些数据显示,在宇宙演化的早些时候,的确存在一个由物质占主要组分的时期。在最初的大爆炸之后,由于物质之间的万有引力和辐射能量的阻滞作用,宇宙的膨胀速度逐渐变慢。直到大约 50 亿年之前的某个时候,暗能量才占据了主导地位,使得宇宙开始加速膨胀。超新星的观测结果为宇宙加速膨胀理论提供了强有力的证据,并且显示了某种暗能量的存在。这里要指出的是,仅仅这些数据并不能确认暗能量的数量。幸运的是,宇宙微波背景辐射的结果为超新星数据提供了很好的补充。正如人们所知道的,Hubble 定律与微波背景辐射的发现,是宇宙学中两个重大进展。现在人们已明白了这样一个事实:微波背景辐射的温度在宇宙中几乎是均匀的,其平均值为 2.725K(即 $-270.425^{\circ}\text{C}$ )。但宇宙空间各处的温度并不是完全相同的,其变化范围在 0.0002K 上下。1992 年 George Smoot 通过 COBE(即 cosmic background explorer)首次探测到这一微小的温度变化,并因此荣获 2006 年诺贝尔物理学奖。暗能量的发现被 *Science* 杂志评为 1998 年头条最大新闻,尤其是 2001 年 6 月 30 日发射 WMAP(威尔金森微波背景各向异性探测器),在做了一年太空观测之后于 2003 年初发表了重要探测结果,它证实了宇宙中物质成分的组成:普通重子物质只占 4%,而 23%是非重子的暗物质,73%是暗能量;暗能量是近年来宇宙学研究中发现的一个里程碑式的重大成果。暗能量与暗物质的出现引发了人们对引力模型修改的念头,人们想对引力模型进行修正,其基本目的是弱化引力在宇宙过去的 50 亿年间以及大尺度空间上的效果。对 Einstein 方程的修正就等同于在方程中增加了一种新的力,并因此改变光偏转的方向,从而偏离时空曲率所标定

的几何路径。然而近些年人们对太阳系的大量观测结果都显示这样一个偏离被限制在一个很小的范围内,换句话说,Einstein 引力场方程在现阶段仍然是相当可靠的,这里仅列举 2002 年由地球向 Cassini 土星轨道行星飞行器发射光信号的验证实例:1997 年 10 月 15 日 Cassini 搭乘 Titan IVB 运载火箭升空,在历经 7 年飞行之后于 2004 年到达土星轨道。2002 年当 Cassini 飞到太阳背面(即地球、太阳和 Cassini 近似呈一条直线)时,由地球向 Cassini 发射了一个光信号,并在信号返回时进行接收。太阳质量会引起周围时空的扭曲,因此光信号在来回路上从太阳身边擦过时会发生偏转。实验表明,这一旅程所耗费的实际时间符合 Einstein 广义相对论的预言(误差仅为 $\pm 0.002\%$ )。

(2) 借助于建造各种粒子加速器,在地面实验室里开展对微观粒子的研究。例如,早在 1954 年欧洲 12 国就创建了 CERN(瑞士日内瓦的欧洲粒子物理研究中心,又称欧洲核子研究中心),其中包括 LEP(大型正负电子对撞机)与 SPS(超级质子同步加速器)。此外,德国汉堡 DESY(德国粒子物理研究中心电子同步加速器)HERA 储存环、瑞士日内瓦的大型强子对撞机(LHC,其主要目标是寻找超对称理论所预言的粒子;如果幸运的话,甚至可能直接找到暗物质粒子)、美国斯坦福大学的 SLAC(斯坦福直线加速器中心)、美国 Lawrence(1901~1958)的回旋加速器(他于 1930 年设计并完成一台回旋加速器,1937 年在这台机器上产生出人造放射元素钨,1939 年获诺贝尔物理学奖)、美国费米国家加速器实验室的 Cosmotron 同步加速器、英国 Cockcroft-Walton 静电加速器(他们的静电加速器于 1931 年投入运行、1932 年在 Rutherford 指导下,在剑桥大学 Cavendish 实验室首次用人工加速粒子使原子核蜕变,1951 年两位科学家因此同获诺贝尔物理学奖)以及英格兰卡勒姆的 JET(欧洲联合核聚变)实验室等;另外,Georges Charpak(法籍波兰人)发明与发展了粒子探测器,使探测物质内部的技术取得了突破性的进展,1976 年与 1984 年的诺贝尔物理学奖获得者均使用他发明的成果发现了粲夸克和中间玻色子。为此,Georges Charpak 荣获 1992 年诺贝尔物理学奖。显然,这些加速器的建立以及这些实验室的创建为人们开展粒子物理的研究搭建了国际平台。粒子基础物理的研究深化了人们对物质及其相互作用本源的认识,并且为考验一些新理论搭建了实验平台。于是从 20 世纪 70 年代起人们便对弱、电(指弱力与电磁力)统一理论进行了多方面关键性的实验,所以在 1979 年 Glashow, Weinberg 和 Salam 这三位弱、电统一理论的创始人便获得了诺贝尔物理学奖;在弱、电统一理论的鼓舞下,人们将强作用力与弱、电力进行了统一,甚至还试图将引力也统一在内。如果这种努力成功了,那意味着自然界的基本相互作用在本质上只有一种。值得注意的是,宏观物理规律是唯象性的,而不是本源性的,人们对本源性的探索从未停止过。1967 年和 1968 年 Weinberg 和 Salam 利用规范场和对称性自发破

缺的 Higgs 机制提出了完整的  $SU(2) \times U(1)$  弱、电统一规范理论;这里应指出:对称性破缺的观念最早体现在 1956 年李政道和杨振宁提出的宇称不守恒规律中;此外,1954 年杨振宁和 Mills 发展了非 Abel 规范变换不变性原理,这个原理在后来 Glashow 等建立弱、电统一理论中起了关键作用。20 世纪 70 年代初人们又提出了强相互作用的量子色动力学,特别是 Gross 等三人发现了强相互作用的渐近自由现象,这对认识强相互作用的本质极为重要;另外,也奠定了量子色动力学的基础,他们也因此于 2004 年共同荣获诺贝尔物理学奖。1964 年英国爱丁堡大学 Higgs 教授和比利时布鲁塞尔自由大学 Brout 教授与 Englert 教授对 Higgs Bose 子的存在作出了预言并提出了 Higgs 机制。2012 年 7 月 4 日 CERN(欧洲核子研究中心)宣布了 Higgs Bose 子存在的坚实实验证据,从而粒子物理学标准模型所预言的 62 种基本粒子全部被实验证实。Higgs Bose 子被确认,这是 100 年来人类最伟大的发现之一,因此 2013 年 10 月 8 日,84 岁的 Higgs 教授和 81 岁的 Englert 教授荣获 2013 年诺贝尔物理学奖。Brout-Englert-Higgs Bose 子简称 Higgs 粒子,又称“上帝粒子”,它对解释为什么基本物质具有质量起着关键作用;另外,Higgs 机制也被认为是粒子物理学标准模型的重要理论基础。Higgs 粒子的确认是对粒子物理学标准模型理论的重大支持,粒子标准模型是关于强作用、弱作用和电磁力三种基本作用力以及组成所有物质的基本粒子领域的理论。在过去的 50 年间,这个理论在认识显物质世界方面发挥了重大作用,但它并不完整,它不包括引力作用,也无法解释引力与其他三种基本力相比为何如此微弱的原因。另外,也不能恰当的解释 1998 年科学家们发现的中微子的“振荡”现象。此外,这 62 种基本粒子到底与暗物质、暗能量之间是否存在着联系,目前人们还不清楚。所有这些不足,便促使人类进一步开展深入的科学研究。自 20 世纪 60 年代以来,人们已认识到四种基本作用(即引力作用、弱作用、电磁作用、强作用)可能有共同的本质、可能都是规范作用,它们可能与同一个物理原则相联系。Einstein 曾用很长时间致力于在经典物理的范围内去建立引力作用与电磁作用的统一理论,但始终没有成功;然而,在规范场理论建立后,弱作用与电磁作用的统一理论成功了,这是粒子物理学中近年来的重大成果。弱、电统一理论之所以成功是由于引进了夸克,再加上带有真空破缺机制的规范场论。Weinberg-Salam 模型的成功以及强作用理论中  $SU(3)$  色规范理论的发展很自然地又会促使人们去考虑强、电、弱三种相互作用的大统一规范理论的框架,甚至也试图发展包括引力作用在内的大统一理论。另外,人们相信建立正确的量子引力理论将对黑洞物理学的研究提供坚实的基础。这里还应当指出的是,正是基于弱、电统一理论和量子色动力学理论以及量子规范理论,才极为成功地构建了粒子物理标准模型;这个标准模型描述了夸克和轻子层次的电磁相互作用、弱相互作用和强相互作用的基本理论,并且成功地经历了三四十

年实验的验证。应该看到,人们对统一理论的这种研究与执著精神,其动力是深深地植根于人类心中对真理的非功利的追求,为了阐述这一观点这里仅列举 7 个典型事例:①Rutherford(1871~1937,英籍新西兰人),是这位创立原子核物理学的世界著名物理学家,亲手培育出 11 位诺贝尔奖获得者。1925 年他当选为英国皇家学会主席,直到 1937 年逝世,他是一位杰出的研究集体的组织者。②世界著名理论物理学家 Dirac(1902~1984,英国人;他与我国著名理论物理学家王竹溪(1911~1983)为同门弟子;Dirac 于 1928 年预言正电子,并提出正负电子碰撞后湮灭变成光子)就曾考虑拒绝接受 1933 年授予他的诺贝尔物理学奖,其理由是他觉得获奖会带上引人注目的光环,将会耗费他从事物理研究的时间。③弱、电统一理论创始人之一的 Salam(生于巴基斯坦)将 1979 年所获诺贝尔奖金中属于他自己的那一份捐赠给在意大利的研究所,以便赞助来自发展中国家的科学家。④Hans Albrecht Bethe(1906~2005)是一位极具天才的杰出理论物理学家,1939 年他发现了恒星能源的热核反应循环,在核反应理论方面做出了重大贡献,因此于 1967 年荣获诺贝尔物理学奖。Bethe 是第二次世界大战期间美国 Manhattan Project(曼哈顿计划)的主要科学家成员,这一计划最终使美国研制出了氢弹,但 Bethe 主张人类应该以和平为目的进行核能的开发,他与 Einstein 等科学家一起坚决反对核武器。在 Bethe 的 60 年学术生涯中,他每 10 年才发表一篇重要论文,可见一篇重要的文章是需要大量艰辛的劳动与长期研究的积累。厚积薄发、一丝不苟、潜心专研、为学之谨的精神深深地体现在 Bethe 的学术作风中。⑤Albert Einstein,伟大的现代物理学家,对于他还有这样一件事:1952 年 11 月以色列第 1 任总统 Weizman 逝世后,以色列政府邀请 Einstein 先生担任以色列第 2 任总统,但是他拒绝了(Einstein 曾说过:“……方程却是一种永恒的东西”。是的,广义相对论的 Einstein 方程是他最好的墓志铭和纪念物,它们将与宇宙同在;Einstein 曾说过:“人只有献身于社会,才能够找到那实际上是短暂而有风险的生命的意义”)。⑥Lise Meitner(1878~1968),奥地利犹太人,从 1907 年起就和 Hahn 一起在柏林做铀的核研究工作,她提出了核裂变的重要概念与过程,为物理学的发展献出了自己的毕生。人们为了纪念这位伟大的核物理学家,将第 109 号元素以她的名字命名。⑦Stephen Hawking(1942 年生),1972 年起他一直担任英国剑桥大学 Lucasian 数学教授(这一教席曾由科学巨人 Newton 教授担任),Hawking 是患有肌萎缩性(脊椎)侧索硬化症被禁锢在轮椅上长达 40 多年之久的科学巨人。患病后,他不能写字,看书必须依赖一种翻书页的机器,读文献时必须让人将每一页摊平在一张大办公桌上,然后他驱动轮椅如蚕吃桑叶般地逐页阅读。正是在这种行动极端困难的情况下,他却对黑洞量子辐射(1973 年)、量子引力论(1974 年)、宇宙起源(1980 年)进行了深入细致的研究,对天体物理学和宇宙学做出了巨大贡献;他开

创了引力热力学和量子宇宙学,是当代最重要的广义相对论家和宇宙学家;他著写的 *A Brief History of Time* (1988年)和 *The Universe in a Nutshell* (2001年)为世界畅销的两部巨著。寻求宇宙起源的答案是 Hawking 一生的动力。Hawking 说:“也许正因为他的残疾,才使他拥有比其他科学家更多的用来思考的时间。”见贤思齐、科学家们所具有的那种崇高胸怀、那种淡泊名利的思想与举动才是后人应该学习与发扬的敬业执著精神!翻开历史,尤其是欧洲文艺复兴之后,彪炳物理史册的人物大都出自英、美、德、法、苏 5 国;打开诺贝尔物理学奖 1901~2011 年的获得者一览表也是如此,可见学术氛围、人的科学素质和强烈的责任心与使命感是极为重要的。历史的发展将越来越有力地证明,正是这种非功利的追求给人类带来了最大的收益。按照今天人们的认识:夸克和轻子代表着一种深层次的组元粒子;强相互作用与弱相互作用是短程力,其作用距离分别小于  $10^{-15}\text{m}$  与小于  $10^{-17}\text{m}$ ;电磁力与引力是长程力,其作用距离均为无穷大;弱力的传递者是  $W^{\pm}$  与  $Z^0$  粒子;光子是电磁力的传递者;强力的传递者是胶子;这里胶子是不能单独出现的粒子,无法直接观测到它,而光子、 $W^{\pm}$  与  $Z^0$  为可以观测到的规范粒子。理论上应把引力的传递者叫引力子,但它的存在目前尚无实测证据。对于上述这四种基本力,在通常情况下,两个微观粒子之间的引力与其他三种基本力相比要弱得多。然而,实验与理论都指出一个明显的趋势:各种基本力之间的差别随着能量的增高而减小。如果能量更进一步提高,达到 Planck 能量,那么即使是通常情况下呈现很微弱的微观粒子之间的引力,这时也会变得与别的基本力一样强。换句话说,所有的基本力的强度在 Planck 尺度(它是 Planck 长度、Planck 时间以及 Planck 能量的总称)下大致相等。这也就是说,这些力是一个单一的基础力的不同侧面,显然这种统一在 Planck 尺度下变得格外清晰。然而,当今世界上高能加速器产生的微观事件的能量还远低于 Planck 能量,因此要观察两个微观粒子之间的引力现象,目前在实验室的高能加速器上进行引力子方面的研究是有困难的。但我们完全可以相信:在微观粒子的动力学理论以及粒子物理学规范场论的框架下,借助于太空观测、太空分析与地面实验室中的粒子分析相结合,人类探讨物理学中两个重要分支即宇宙学和粒子物理学间的关联、追求几种不同相互作用在对称理论基础上的统一、探索物质及其相互作用本源的努力总会成功的;我们坚信:物理学的美、宇宙学的美,恰恰在于简单,在于对自然的领悟能够用最浅显的语言描绘出它的一切逻辑和法则。本书的工作仅仅是将微观物理与宏观力学密切结合起来并用于高超声速气动热力学的领域;如果用 von Bertalanffy (1901~1972) 与钱学森 (1911~2009) 先生倡导的系统工程的观点来看,我们的工作应属人、机与环境系统工程的一部分,属于典型的机与环境问题里高超声速飞行器再入飞行时气动力与气动热的计算以及热防护小专题,从这个意义上讲这又是一项很有价值的创新性研究。因此,前面



归纳概括的本书五个特点应该集中体现本书的重要特色以及我们 AMME Lab 团队所完成的工作;从哲学的角度来看,这种解决问题的思想方法体现了微观与宏观的结合,体现了还原论与整体论的优势互补与辩证统一,体现了宇宙间一切事物变化的和谐性与规律性,体现了物理学的美、宇宙学的美、高超声速气动热力学的美,恰恰在于简单、在于它的一切逻辑与法则可以用最朴素浅显的语言来描述。

本书第一作者王保国,北京市教学名师,曾在中国科学院工作 16 年并两次获中国科学院科技进步奖以及国家劳动人事部首届全国优秀博士后奖,后在清华大学力学系和北京理工大学宇航学院任教授、博士生导师、流体力学学科带头人并两次获清华大学教学优秀奖,发表学术论文 200 余篇,以第一作者出版学术专著与全国教材 12 部。另外,1998 年获英国剑桥 Gold Star Award;2000 年获美国 Barons Who's Who 颁发的 New Century Global 500 Award;2007 年获“北京市教学名师”荣誉称号。第二作者黄伟光,国家重点基础研究发展(973 计划)项目首席科学家,曾任中国科学院工程热物理研究所所长,先后于 2002 年获国家自然科学二等奖、2001 年与 2009 年两次获国家科技进步二等奖,北京理工大学特聘教授(兼职)、博士生导师,曾在日本留学 10 年并获博士学位。现任中国科学院上海高等研究院副院长、研究员、全国政协委员。两位作者衷心地向流体力学界和工程热物理界的老前辈,尤其是向卞荫贵教授和吴仲华教授致以诚挚的感谢!向书中参考文献里所列出的作者们与同仁们表示谢意!另外,本书的第一作者还要特别感谢季羨林先生,每次到先生家时,先生总是伏案耕耘,先生的亲身表率使作者懂得了“读书需要勤奋”的最朴素道理。在季先生的引荐下使作者有幸与王竹溪先生相识与请教并受益良多;这里还要向将作者领进统计物理大门的王竹溪先生以及亲授“统计力学”(1979 年夏季)课程的李政道先生表示深深的感谢!能得到理论物理界两位老前辈的亲身教诲,是作者的莫大荣幸,作者十分珍惜与难以忘怀那些宝贵的时光。

本书在出版期间得到科学出版社,尤其是该社刘宝莉编辑的大力支持,正是她一丝不苟的敬业精神才使本书得以如期出版,在此表示衷心的感谢。

最后,本书的第一作者还要特别祝福他的小孙女 Alice(小名筠溪)健康快乐。小筠溪的父母和姑姑 3 位都是北京大学优秀本科毕业生,他(她)们是在本科毕业后才去国外深造的。爷爷盼望 Alice 健康快乐地成长,长大后为人类航天航空科学的发展以及人类社会的和平与进步多做贡献。

虽然本书写作长达 10 年,为准备这部专著而进行的各方面知识储备 20 余年,但由于本书涉及面广、两位作者水平有限,书中仍可能会有疏漏与不妥,敬请广大读者及专家批评指教。E-mail: whaera@163.com。

作者

2013 年 10 月 18 日