

现代物理基础丛书

56

物理学前沿 ——问题与基础

王顺金 著



科学出版社

现代物理基础丛书 56

物理学前沿——问题与基础

王顺金 著

科学出版社

内 容 简 介

本书第一篇“物理学前沿问题”，针对物理学常规研究前沿，简要介绍物理学各个主要分支的研究现状、前沿问题和发展趋势，包括物理学与高科技，凝聚态物理学与介观物理学，原子、分子物理学与光学，原子核物理学，基本粒子物理学与量子场论，广义相对论、天体物理学与宇宙学。对凝聚态物理学和原子、分子物理学与光学，强调了其新发现和新进展与 21 世纪高科技的密切联系；对原子核物理学、基本粒子物理学、广义相对论、天体物理学与宇宙学，则探讨了 21 世纪物理学基本理论可能面临的重大变革。此外，还简要地介绍了物理学与信息论，计算机科学，物理学与生物学的交叉，包括量子信息、量子通信与量子计算，生物物理学。最后，介绍了物理学研究方法，物理学、数学与哲学的相互关系，以及 21 世纪物理学发展前景展望。本书对所讨论的问题提供了有用的数据与资料，包含了作者对物理学基本问题的观点和研究心得，以及对物理学发展前景的看法。

本书第二篇“物理学基础探讨”，属于物理学非常规研究与探索，包含了作者对物理学基础问题的研究心得与初步成果。作者在这一部分中表述的观点和研究的成果，希望能起到抛砖引玉的作用。作者深信，当代物理学的基础正处于深刻变革的前夜，这一部分的内容反映了作者在新物理学黎明前的探索历程、艰辛与迷茫。这一部分专门针对对物理学基础问题特别有兴趣的专家学者和怀有科学使命感的年轻物理学家，其目的是吸引他们投身到潜心研究这些问题的伟大、艰巨而瑰丽的事业中来，为物理基础的变革和新物理学的建立做出贡献。

本书适合物理学各专业的研究生、本科高年级学生和研究人员阅读，对相邻学科的学生和研究人员也有参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

物理学前沿：问题与基础/王顺金著. —北京：科学出版社，2013.6

(现代物理基础丛书；56)

ISBN 978-7-03-037668-8

I. ①物… II. ①王… III. ①物理学 IV. ①O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013) 第 117031 号

责任编辑：钱俊 鲁永芳 / 责任校对：韩杨

责任印制：钱玉芬 / 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>

骏杰印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 6 月第 一 版 开本：B5(720×1000)

2013 年 6 月第一次印刷 印张：13 1/2

字数：247 000

定价：58.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换)

国家自然科学基金委员会国家基础
学科人才培养基金项目

《现代物理基础丛书》编委会

主 编 杨国桢

副主编 阎守胜 聂玉昕

编 委 (按姓氏笔画排序)

王 牧 王鼎盛 朱邦芬 刘寄星

邹振隆 宋菲君 张元仲 张守著

张海澜 张焕乔 张维岩 侯建国

侯晓远 夏建白 黄 涛 解思深

前 言

四川大学出版社于 2005 年出版了《物理学前沿问题》一书，当年两次印刷达 4500 多册，2007 年又应读者要求加印 2000 册。作者使用该书在四川大学、兰州大学、中国科学院近代物理研究所、西南交通大学等校所的研究生和年轻研究人员中讲授，收到良好的效果。全国 5500 多位物理学方面高校学生和相关科技人员购买并阅读了该书。八年来，该书在物理学教学和科研中发挥了作用。

鉴于上述情况，四川大学物理科学与技术学院龚敏院长和科学出版社钱俊编辑商议，建议作者修订该书，在科学出版社出版。作者响应了钱俊编辑的热情建议，并得到龚敏院长的大力支持，对该书进行了长达半年的修改扩充，写成目前的初稿。由于内容增补了若干篇作者关于物理学基础的研究论文，结构变化很大，该书更名为《物理学前沿——问题与基础》。

本书第一篇“物理学前沿问题”，针对物理学常规研究前沿，简要介绍物理学各个主要分支的研究现状、前沿问题和发展趋势，包括物理学与高科技，凝聚态物理学与介观物理学，原子、分子物理学与光学，原子核物理学，基本粒子物理学与量子场论，广义相对论、天体物理学与宇宙学。对凝聚态物理学和原子、分子物理学与光学，强调了其新发现和新进展与 21 世纪高科技的密切联系；对原子核物理学、基本粒子物理学、广义相对论、天体物理学与宇宙学，则探讨了 21 世纪物理学基本理论可能面临的重大变革。此外，还简要地介绍了物理学与信息论，计算机科学，物理学与生物学的交叉，包括量子信息、量子通信与量子计算，生物物理学。最后，介绍了物理学的研究方法，物理学、数学与哲学的相互关系，以及 21 世纪物理学发展前景展望。本书对所讨论的问题提供了有用的数据与资料，包含了作者对物理学基本问题的观点和研究心得，以及对物理学发展前景的看法。

这一部分对物理学常规研究前沿问题介绍的目的是：①开阔研究生和大学本科高年级学生的物理学视野，使他们对物理学的各个前沿有一个初步的了解，以便于选择今后的研究或工作领域；②给学生今后的学习与研究提供一个向导；③激发学生对物理学，特别是对基础物理学和理论物理学的热情，鼓励他们从事物理学教学与研究，为发展中国和世界的物理学做出贡献。

本书第二篇“物理学基础探讨”，属于物理学非常规研究与探索，包含了作者对物理学基础问题的研究心得与初步成果。其主要宗旨是促进对物理学基本问题感兴趣的年轻读者对物理学基础的研究。研究的问题包括关于相对论和引力的思考，狭义相对论的客观物理与美学修饰，物理真空介质的超流性，守恒定律约束的

真空量子涨落与量子纠缠和量子同步。作者在这一部分中表述的观点和研究的成果，希望能起到抛砖引玉的作用。作者深信，当代物理学的基础正处于深刻变革的前夜，这一部分的内容反映了作者在新物理学黎明前的艰辛探索历程：执著与坚持，兴奋与激动，迷茫与希望。这一部分专门针对对物理学基础问题特别有兴趣的专家学者和怀有科学使命感的年轻物理学家，其目的是吸引他们投身到潜心研究这些问题的瑰丽、伟大而艰巨的事业中来，为物理基础的变革和新物理学的建立做出贡献。

本书得以顺利出版，四川大学物理科学与技术学院龚敏院长是热情的支持者和有力的推手，而科学出版社钱俊编辑则是整个出版工作的策划者和组织者，作者对他们表示深深的感谢。作者还感谢国家自然科学基金委员会国家基础学科人才培养基金项目、四川大学物理科学与技术学院出版基金的支持。本书包含作者的研究成果，是在国家自然科学基金和教育部博士点基金的长期资助下取得的，在此表示感谢。

王顺金

2012年10月于四川大学望江校区

《物理学前沿问题》前言

物理学研究自然界最深奥的规律，揭示出自然界最深层次的美。凡是喜欢对大自然寻根问底的人大都喜欢物理学。

物理学和数学一起奠定了自然科学的基础，又和各门自然科学一起成为现代技术的基础。20 世纪被人们誉为物理学的世纪。物理学很可能与信息科学和生物学一起分享 21 世纪。

物理学以她展示出的深奥的自然界之美和她对人类的无私奉献，获得人类的尊重，吸引了众多学子为她献身，出现了像牛顿和爱因斯坦这样的千秋科学伟人，铸造了小至基本粒子大至宇宙的精确的、震撼人心的科学知识。

在商品经济大潮冲击的今天，选择物理学专业，从事物理学教学或研究，常常需要勇气和毅力：能忍受淡泊清苦的生活和坚守单调辛劳的职业。所幸的是，热爱物理学的学子虽然少了，但却仍有人在坚持。这本书想告诉这些年青学子，物理学仍然是神圣美丽的殿堂，仍然值得你为她献身。

本书简要介绍了物理学各个主要分支的研究现状、前沿问题和发展趋势，包括物理学与高科技，凝聚态物理学与介观物理学，原子、分子物理学与光学，原子核物理学，基本粒子物理学与量子场论，广义相对论、天体物理学与宇宙学。对凝聚态物理学和原子、分子物理学与光学，强调了其新发现和新进展与 21 世纪高科技的密切联系；对原子核物理学、基本粒子物理学、广义相对论、天体物理学与宇宙学，则探讨了 21 世纪物理学基本理论可能面临的重大变革。此外，还简要地介绍了物理学与信息论和计算机科学，物理学与生物学的交叉，包括量子信息、量子通信与量子计算，生物物理学。最后，介绍了物理学的研究方法，物理学、数学与哲学的相互关系，以及 21 世纪物理学的发展前景。本书对所讨论的问题提供了有用的数据与资料，包含了作者对物理学基本问题的观点和研究心得，以及对物理学发展前景的看法。

本书的目的是：①开阔研究生和大学本科高年级学生的物理学视野，使他们对物理学的各个前沿有一个初步的了解，以便于选择今后的研究或工作领域；②给他们今后的学习与研究提供一个向导；③激发学生对物理学，特别是对基础物理学和理论物理学的热情，鼓励他们从事物理学教学与研究，为发展中国和世界的物理学做出贡献。

本书适合物理学各专业的研究生、本科高年级学生和研究人员阅读，对相邻学科的学生和研究人员也有参考价值。

本书凝聚了作者的亲人、同事和学生的心血和劳动。我的妻子郭开惠始终热情、耐心地支持我的教学、科研工作，她在繁忙的教学工作之余，帮助我录入了许多章节；学生们对各章节提出了许多好的改进意见，并帮助绘制图表，校对全书；四川大学研究生院、物理科学与技术学院和物理系的领导对本书的出版给予了热情地关心、帮助和支持；四川大学出版社则热情、细致地组织了出版工作。我在此对他们表示深切地感谢。

由于作者水平有限，本书的不妥之处在所难免，望读者不吝指出。

王顺金

2004年8月于四川大学望江校区

目 录

前言

《物理学前沿问题》前言

第一篇 物理学前沿问题

第 1 章 物理学与高科技	3
1.1 21 世纪的高科技与知识经济	3
1.1.1 知识经济时代	3
1.1.2 支撑知识经济的高科技	3
1.1.3 21 世纪的高科技需要教育去培育	4
1.2 21 世纪的高科技与物理学	4
1.2.1 20 世纪的高科技与物理学	4
1.2.2 21 世纪的高科技与物理学	5
1.2.3 21 世纪的物理学家的责任	6
1.3 21 世纪的物理学的前景与可能面临的变革	6
1.3.1 20 世纪的物理学的现状与发展趋势	6
1.3.2 21 世纪的物理学的前景与可能面临的变革	7
1.3.3 21 世纪的物理学家将要面临的挑战与机遇	8
1.4 大学本科的物理学和数学的知识结构	8
参考文献	10
第 2 章 凝聚态物理学与介观物理学	11
2.1 凝聚态物理学的现状	11
2.1.1 凝聚态	11
2.1.2 凝聚态物理学	11
2.1.3 凝聚态理论	11
2.1.4 凝聚态物理学的基本概念	12
2.2 新有序相	15
2.2.1 金属氢	15
2.2.2 重电子金属	15
2.2.3 氧化物高温超导体	16

2.2.4	$C_{60}(C_{70})$ ·····	20
2.2.5	维格纳晶体·····	21
2.2.6	金属多层膜(超晶格)·····	21
2.2.7	拓扑相·····	21
2.2.8	拓扑绝缘体·····	21
2.2.9	石墨烯·····	22
2.3	低维系统与小系统:介观物理与表面物理、团簇物理与纳米科技·····	24
2.3.1	量子霍尔效应·····	24
2.3.2	表面物理学·····	25
2.3.3	准一维系统与有机链状分子·····	27
2.3.4	零维体系与介观系统·····	28
2.3.5	纳米颗粒与纳米科技·····	33
2.3.6	自旋电子学·····	35
2.4	等离子体物理学与核聚变·····	35
2.4.1	等离子体物理的基本问题·····	35
2.4.2	等离子体物理新的研究领域·····	35
2.4.3	聚变等离子体物理·····	35
2.4.4	空间和天体等离子体物理·····	35
2.4.5	低温等离子体物理与技术·····	36
2.5	人造系统:超晶格、准晶格与人造原子·····	36
2.5.1	超晶格·····	36
2.5.2	准晶格·····	36
2.5.3	人造原子·····	37
2.5.4	固体或液体环境中的原子、分子·····	37
2.6	极端条件下的凝聚态物理学·····	37
2.6.1	高温高压下的凝聚态·····	37
2.6.2	超强电磁场中的凝聚态·····	37
2.7	复杂性与自组织·····	37
2.7.1	复杂性与复杂性科学·····	37
2.7.2	自组织与耗散结构·····	39
2.7.3	生物凝聚态·····	40
2.7.4	非平衡态物理学·····	40
2.7.5	软凝聚态物理·····	40
	参考文献·····	41

第 3 章 原子、分子物理学与光学	42
3.1 引言	42
3.2 原子结构与原子动力学	42
3.2.1 原子结构	43
3.2.2 原子动力学	43
3.2.3 近期发展	44
3.3 高精度测量与基本定律的检验	44
3.3.1 高精度测量	44
3.3.2 对基本定律 (如弱电统一理论) 的检验	45
3.4 分子结构与分子动力学	45
3.4.1 分子结构	45
3.4.2 分子碰撞和反应动力学	46
3.5 介质环境中的原子和分子	47
3.5.1 固体中的杂质原子	47
3.5.2 液体 (水) 中的杂质分子	47
3.6 原子的控制与操纵 —— 分子剪切与原子组装	47
3.6.1 控制和操纵的手段	47
3.6.2 控制和操纵原子的类型	48
3.6.3 实例 (图 3-2~ 图 3-11)	48
3.7 光学	51
3.7.1 现代光学	51
3.7.2 光学的主要分支学科	52
3.7.3 电磁场引起的透明	53
参考文献	54
第 4 章 原子核物理学	55
4.1 引言	55
4.2 低能原子核物理学: 结构与反应、裂变与衰变问题	56
4.2.1 作为质子、中子组成的强作用系统的原子核	56
4.2.2 低能核物理学有结构、反应与衰变三方面的问题	57
4.3 放射性核与超重核	58
4.3.1 核物理在广度和深度两方面面临着巨大变革	58
4.3.2 在广度方面的挑战与机遇: 放射性束流核物理开创的新天地	59
4.4 中高能原子核物理学	61
4.4.1 核内介子、超子自由度	61
4.4.2 核内夸克自由度和夸克-胶子等离子体	62

4.4.3	在深度上的变革: 基于 QCD 的核物理深入到夸克层次	62
4.4.4	发展基于 QCD 的核物理的有利条件	63
4.5	天体核物理学 —— 宇宙元素的合成及其丰度	64
4.5.1	从大爆炸到宇宙原初核的产生与合成: 终止于氦	64
4.5.2	太阳等恒星的核燃烧与平稳的核合成	65
4.5.3	超新星爆发与爆发式核合成	65
4.5.4	宇宙化学元素的形成、演化与丰度	65
	参考文献	65
第 5 章	基本粒子物理学与量子场论	66
5.1	基本粒子物理学的现状与成就	66
5.1.1	基本粒子物理学的重大发现	66
5.1.2	组成物质的基本粒子	67
5.1.3	基本粒子的相互作用	68
5.1.4	基本粒子物理学和量子场论的内容	70
5.1.5	基本粒子标准模型的成就	71
5.2	基本粒子标准模型的基本问题	71
5.3	引力的统一与超弦	74
5.3.1	弦理论的历史	74
5.3.2	超弦理论的需要	75
5.3.3	超弦	75
5.3.4	M 理论	76
5.3.5	对万有理论的理解	76
5.4	粒子物理学与核物理学的交叉	76
5.5	粒子物理学与天体物理学和宇宙学的关联	77
	参考文献	77
第 6 章	广义相对论、天体物理学与宇宙学	78
6.1	宇宙的层次结构	78
6.1.1	天体的层次结构	78
6.1.2	太阳和恒星	78
6.1.3	致密天体: 白矮星、脉冲星和中子星	81
6.1.4	星际物质	82
6.1.5	星系: 银河系与河外星系	83
6.1.6	宇宙	86
6.2	黑洞与类星体	87
6.2.1	黑洞	87

6.2.2	类星体	88
6.3	广义相对论与(经典)宇宙学模型	90
6.3.1	现代宇宙学的四大基石	90
6.3.2	宇宙的重要数据	92
6.3.3	宇宙学原理	93
6.3.4	广义相对论与标准宇宙模型	93
6.4	大爆炸(量子)宇宙学	95
6.5	宇宙的加速膨胀与暗物质、暗能量	96
6.5.1	暗物质	96
6.5.2	宇宙加速膨胀与暗能量	97
6.6	天体物理学问题:宇宙学问题与粒子物理学问题的关联	99
	参考文献	99
第 7 章	量子信息、量子通信与量子计算	100
7.1	量子力学简介	100
7.1.1	量子力学基本原理	100
7.1.2	量子力学的特点	102
7.1.3	纯态与混合态	103
7.2	量子力学与信息论	106
7.2.1	自然界和社会的三大要素	106
7.2.2	信息论	106
7.2.3	信息论与物理学	106
7.2.4	经典信息论与量子信息论	107
7.2.5	量子计算与量子通信	107
7.2.6	量子计算与量子通信的优点和必要性	107
7.2.7	量子信息学与量子计算已取得的成绩	107
7.3	量子信息	108
7.3.1	量子纠缠	108
7.3.2	量子编码	110
7.3.3	量子信息	110
7.3.4	量子信息的特征	110
7.4	量子通信	111
7.4.1	量子位	111
7.4.2	量子逻辑门	112
7.4.3	量子通信	114
7.5	量子噪声与量子运算(操作)	115

7.5.1	密度矩阵量子态 ρ 的变化	115
7.5.2	量子态变化的一般描述	116
7.6	量子计算	119
7.6.1	量子计算与经典计算	119
7.6.2	几种量子算法	121
7.6.3	量子纠错	121
7.7	量子计算的物理实现——量子计算机	121
7.7.1	量子计算机模型	121
7.7.2	量子计算机的物理实现	124
7.7.3	量子计算机的困难	124
7.7.4	对量子通信和量子计算机的展望	125
7.8	量子信息和量子通信提出的量子论的基本问题	125
	参考文献	125
第 8 章	生物物理学	127
8.1	生物物理学的产生与发展	127
8.1.1	生物物理学	127
8.1.2	生物物理学的产生与发展	127
8.1.3	生物物理学的主要研究内容	128
8.1.4	生物物理学发展的主要特征	128
8.1.5	必要的知识	128
8.2	生物物理学的主要研究内容	130
8.2.1	分子生物物理学	130
8.2.2	膜与细胞生物物理学	131
8.2.3	感官与神经生物物理学	132
8.2.4	生物控制论与生物信息论	133
8.2.5	理论生物物理学	133
8.2.6	光生物物理学	135
8.2.7	自由基与环境辐射的生物物理学	136
8.2.8	生物力学与生物流变学	138
8.2.9	生物物理学技术	138
8.3	生物系统与生态系统: 生物系统的层次性与复杂性	139
8.3.1	生命是非平衡系统的一个过程, 而非一种物质状态	139
8.3.2	生命是一个复杂的瞬态过程	140
8.3.3	生命有复杂的层次结构 —— 从生物分子到生物系统和生态系统	140
8.4	生物信息学	140

8.5 讨论与展望	141
参考文献	141
第 9 章 结语——21 世纪的物理学	142
9.1 21 世纪物理学面临的变革	142
9.1.1 物理学基本理论——粒子物理学和宇宙论在纵深方面的深刻变革	142
9.1.2 多粒子系统物理学和复杂系统物理学在横向方面的重大进展	142
9.1.3 交叉学科的兴起与新发现	143
9.1.4 对高科技的巨大促进	143
9.2 物理学研究方法	143
9.3 21 世纪中国的物理学	144
9.3.1 21 世纪中国物理学 (中期) 前景的预期 (部分)	144
9.3.2 中国发展物理学的策略	144
9.3.3 21 世纪中国物理学家的责任	145
参考文献	145
第 10 章 物理前沿问题讨论	146

第二篇 物理学基础探讨

第 11 章 关于相对论和引力的思考	151
参考文献	163
第 12 章 狭义相对论的客观物理与美学修饰	164
12.1 引言	164
12.2 时空几何的物理基础	165
12.3 光速不变性的物理基础	166
12.4 洛伦兹时空几何的客观物理成分与美学修饰成分	168
12.5 运动学和动力学的相对性原理的物理基础与物理内涵	172
12.6 结论	175
参考文献	176
第 13 章 物理真空介质的超流性	177
13.1 摘要	177
13.2 正文	177
参考文献	181
第 14 章 守恒定律约束的真空量子涨落与量子纠缠和量子同步	182
14.1 量子纠缠	182
14.2 对宏观量子纠缠形成机理的设想	183

14.3	次微观时空中量子涨落的描述: 两个示例.....	184
14.4	次微观量子涨落动力学.....	187
14.5	守恒定律与量子涨落关联和量子纠缠的关系的深入分析.....	191
14.6	可引出的物理结论.....	193
14.7	量子涨落的整体性和对宏观量子纠缠的质疑.....	193
14.8	结语.....	195
	参考文献.....	196