

研究生系列教材



FRONTIER  
TOPICS IN PHYSICS

# 物理学 前沿问题

● 王顺金 著



四川大学出版社

四川大学研究生教材建设基金重点资助项目



FRONTIER  
TOPICS IN PHYSICS

物理学  
前沿问题

04  
211



● 王顺金 著



四川大学出版社

S8083/01

责任编辑:王 锋  
责任校对:李爱蓉  
封面设计:米茄设计工作室  
责任印制:杨丽贤

### 图书在版编目(CIP)数据

物理学前沿问题 / 王顺金著. —成都: 四川大学出版社, 2004.12  
(研究生系列教材)  
ISBN 7-5614-3009-4

I. 物... II. 王... III. 物理学-研究生-教材  
IV. O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 138125 号

### 书名 物理学前沿问题

---

作者 王顺金  
出版 四川大学出版社  
地址 成都市一环路南一段 24 号 (610065)  
发行 四川大学出版社  
印刷 郫县犀浦印刷厂  
开本 787mm×960mm 1/16  
印张 10.375  
字数 178 千字  
版次 2005 年 1 月第 1 版  
印次 2005 年 1 月第 1 次印刷  
定价 25.00 元

---

版权所有◆侵权必究

- ◆读者邮购本书, 请与本社发行科联系。电话: 85408408/85401670/85408023 邮政编码: 610065
- ◆本社图书如有印装质量问题, 请寄回出版社调换。
- ◆网址: [www.scupress.com.cn](http://www.scupress.com.cn)

## 内容简介

本书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、天体物理学与宇宙论，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、量子通讯与量子计算，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，以及中国物理学的发展前景。本书对所讨论的问题提供了实用的数据与资料，其中包含了作者本人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。

作者著述本书的目的是：①开阔本科高年级学生和研究生物理学视野，使他们对物理学的各个前沿问题有一些初步的了解，以便于今后选择适合的研究或工作领域；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工作，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，也可供相邻学科的学生和研究人员参考。

## 序

“年年岁岁花相似,岁岁年年人不同。”在世纪之交,经过高教体制改革,又一次强强合并后的新四川大学已成为我国西部地区规模最大、学科门类最齐全的新型综合性研究型大学。校训“海纳百川,有容乃大;严谨勤奋,求是创新”已成为川大人求知治学的座右铭。

作为新世纪的献礼,我校研究生教材建设基金资助的又一批研究生优秀教材相继正式出版了,在此我表示热烈的祝贺。

众所周知,21世纪是知识经济的世纪,国际竞争空前激烈。竞争的焦点是科学技术,竞争的核心是创新型人才,竞争的关键是国民教育。对于四川大学这样的国家重点大学而言,必须注意大力发展研究生教育,扩大规模,注重质量,强调创新。

校长、教师、教材是办学的三大要素,而教材是教学改革与师生智慧的重要结晶。正是基于这种思考,我校建设以学科建设为龙头,作为一项重要的措施就是加强研究生的教材建设。我们通过各种渠道,筹集了专项基金,用以资助研究生优秀教材的编写和出版。我们在1999年首次资助的是有博士学位授权点的学科专业中涉及面大、使用面宽的研究生学位平台课程的优秀教材。而今,我们扩大了教材基金资助的范围,无论文、理、工、管、医,只要是经过专家评审后认定的优秀教材,都可被列为资助对象。特别是社会需求量大的应用学科、新兴学科、交叉学科及保护学科的优秀教材,更是优先资助出版。

我们推出的研究生教材的基本特点是:符合该学科教学大纲的基本要求,有较强的理论性和系统性。这些教材既反映了该学科发展的新知识、新动向、新成就,也反映了我校教师在该门学科教学与科研中的新成果与新经验。

前人说得好,古今之成大事业、大学问者,都必须经过三种境界:“昨夜西风凋碧树。独上高楼,望尽天涯路。”此第一境界也。“衣带渐宽终不悔,为伊消得人憔悴。”此第二境界也。“众里寻他千百度。蓦然回首,那人却在,灯火阑珊处。”此第三境界也。研究生优秀教材的建设应该算作一种“大事业”。优秀教材的作者们对于研究生教育改革的执著追求,令人钦佩;他们的无私奉献精神,值

得赞扬;他们所取得的教学科研成果应该积极推广,使其产生应有的社会效益,为百年名校增添光彩。我殷切希望在陆续出版的研究生教材中能出现“传诸后世”的佳作,更希望我校有更多教授、名家动手撰写研究生教材,分门别类,出版系列的研究生教材丛书,为建设国内一流、国际知名的新四川大学做出更大的贡献。

中国科学院院士  
四川大学副校长                      刘应明 教授  
四川大学研究生院院长

## 前 言

物理学研究自然界最深奥的规律，揭示自然界最深层的美。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，又和各部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之美和她对人类的无私奉献，获得了人类的尊重，吸引了众多学子为之献身，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。

本书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、天体物理学与宇宙论，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、量子通讯与量子计算，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实用的数据与资料，其中包含了作者本人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。

作者著述本书的目的是：①开阔大学本科高年级学生和研究生物理学视野，使他们对物理学的各个前沿问题有一些初步的了解，以便于今后选择适合的研究或工作领域；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工作，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，也可供相邻学科的学生和研究人员参考。

本书凝聚了我的亲人、同事和学生的心血与劳动。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，帮助我打印了许多章节；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；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的关心、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的感谢。

由于作者水平有限，书中的错误与不妥在所难免，望读者不吝指出。

王顺金

2004年8月于四川大学望江校区



## 王顺金

男，四川大学教授，博士生导师，中国高能物理学会理事，《高能物理与核物理》、《原子核物理评论》编委。曾任美国加州大学伯克利分校顾问，橡树岭国家实验室、德国重离子研究所、马克斯-普朗克核物理研究所等机构客座教授。专著三部，论文200余篇（SCI 100余篇）。创立了原子核多体关联动力学、物理系统的代数动力学和代数动力学算法。获全国科学大会重大成果奖两次、国家自然科学基金三等奖两次、国家教委普通高校优秀教材一等奖一次、教育部科技进步一等奖一次、二等奖三次、国防科委战略武器与尖端科技成果奖一次。被评为“国家有突出贡献的中青年专家”，“四川省学术带头人”。

## 目 录

第 1 章 物理学与高科技 .....	1
1.1 21 世纪的高科技与知识经济 .....	1
1.1.1 知识经济时代 .....	1
1.1.2 支撑知识经济的高科技 .....	2
1.1.3 21 世纪的高科技需要教育去培育 .....	2
1.2 21 世纪的高科技与物理学 .....	3
1.2.1 20 世纪的高科技与物理学 .....	3
1.2.2 21 世纪的高科技与物理学 .....	3
1.2.3 21 世纪物理学家的责任 .....	4
1.3 21 世纪物理学的前景与可能面临的变革 .....	5
1.3.1 20 世纪物理学的现状与发展趋势 .....	5
1.3.2 21 世纪物理学的前景与可能面临的变革 .....	5
1.3.3 21 世纪的物理学家将要面临的挑战与机遇 .....	7
1.4 大学本科物理学和数学的知识结构 .....	7
第 2 章 凝聚态物理学与介观物理学 .....	10
2.1 凝聚态物理学的现状 .....	10
2.1.1 凝聚态 .....	10
2.1.2 凝聚态物理学 .....	10
2.1.3 凝聚态理论 .....	10
2.1.4 凝聚态物理学的基本概念 .....	11
2.2 新有序相 .....	14
2.2.1 金属氢 .....	14
2.2.2 重电子金属 (重费米子系统) .....	15
2.2.3 氧化物高温超导体 .....	16
2.2.4 $C_{60}$ ( $C_{70}$ ) .....	18
2.2.5 Wigner 晶体 .....	19
2.2.6 金属多层膜 (超晶格) .....	19

2.3	低维系统与小系统：介观物理、团簇物理与纳米科技	19
2.3.1	量子 Hall 效应	20
2.3.2	准一维系统与有机链状分子	21
2.3.3	零维体系与介观系统	21
2.3.4	纳米颗粒与纳米科技	27
2.4	等离子体物理学与核聚变	29
2.4.1	等离子体物理的基本问题	29
2.4.2	等离子体物理新的研究领域	30
2.4.3	聚变等离子体物理	30
2.4.4	空间和天体等离子体物理	30
2.4.5	低温等离子体物理与技术	30
2.5	人造系统：超晶格、准晶格与人造原子	31
2.5.1	超晶格	31
2.5.2	准晶格	31
2.5.3	人造原子	31
2.5.4	固体或液体环境中的原子和分子	31
2.6	极端条件下的凝聚态物理学	32
2.6.1	高温高压下的凝聚态	32
2.6.2	超强电磁场中的凝聚态	32
2.7	复杂性与自组织	32
2.7.1	复杂性	32
2.7.2	自组织与耗散结构	34
2.7.3	生物凝聚态	35
2.7.4	非平衡态物理	36
2.7.5	软凝聚态物理	36
第3章	原子、分子物理学与光学	37
3.1	引言	37
3.2	原子结构与原子动力学	37
3.2.1	原子结构	38
3.2.2	原子动力学	39
3.2.3	近期发展	39
3.3	高精度测量与基本定律的检验	40

---

3.3.1	高精度测量	40
3.3.2	对基本定律(如弱电统一理论)的检验	40
3.4	分子结构与分子动力学	40
3.4.1	分子结构	40
3.4.2	分子碰撞和反应动力学	41
3.5	介质环境中的原子和分子	43
3.5.1	固体中的杂质原子	43
3.5.2	液体(水)中的杂质分子	43
3.6	原子的控制与操纵——分子剪切与原子组装	43
3.6.1	控制和操纵的手段	43
3.6.2	控制和操纵原子的类型	43
3.6.3	实例	44
3.7	光 学	47
3.7.1	现代光学	47
3.7.2	光学的主要分支学科	47
3.7.3	电磁场引起的透明(EIT)	49
附录	德国 Max - Planck 核物理研究所(Heidelberg)原子 - 分子 物理研究现状(2000—2001)	50
第 4 章	原子核物理学	54
4.1	引 言	54
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	56
4.3	放射性核与超重核	57
4.3.1	核物理在广度和深度两方面面临着巨大变革	57
4.3.2	放射性束流核物理开创的新天地	58
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	核内夸克与 QGP	61
4.4.3	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合成：终止于氦 .....	64
4.5.2	太阳等恒星的核反应燃烧与平稳的核合成 .....	64
4.5.3	超新星爆发与爆发式核合成 .....	65
4.5.4	化学元素的形成、演化与丰度 .....	65
<b>第 5 章</b>	<b>基本粒子物理学与量子场论 .....</b>	<b>66</b>
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 .....	69
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 .....	72
5.2.1	对称性自发破缺的本质与机制 .....	72
5.2.2	基本粒子质量的起源与本质 .....	72
5.2.3	赫格斯粒子存在的问题 .....	72
5.2.4	夸克禁闭的本质与机制 .....	73
5.2.5	夸克和轻子的三代及其对称性的本质 .....	73
5.2.6	基本粒子的种类和理论参数的数目 .....	73
5.2.7	大统一理论问题 .....	73
5.2.8	引力量子化 .....	73
5.2.9	发散问题 .....	74
5.2.10	规范对称性的本质 .....	74
5.2.11	真空的本质 .....	74
5.2.12	时空的本性 .....	74
5.3	引力的统一与超弦 .....	74
5.3.1	弦理论的历史 .....	75
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	超弦理论面临的问题 .....	76
5.4	粒子物理学与核物理学的交叉 .....	77
5.5	粒子物理学与天体物理学和宇宙学的关联 .....	77

---

<b>第 6 章 广义相对论、天体物理学与宇宙学</b> .....	79
6.1 宇宙的层次结构 .....	79
6.1.1 天体的层次结构 .....	79
6.1.2 太阳与恒星 .....	80
6.1.3 致密天体 .....	83
6.1.4 星际物质 .....	83
6.1.5 银河系与河外星系 .....	84
6.1.6 宇宙 .....	89
6.2 黑洞与类星体 .....	89
6.2.1 黑洞 .....	89
6.2.2 类星体 .....	90
6.3 广义相对论与(经典)宇宙学模型 .....	92
6.3.1 现代宇宙学的四大基石 .....	92
6.3.2 宇宙数据 .....	94
6.3.3 宇宙学原理 .....	94
6.3.4 广义相对论与标准宇宙模型 .....	94
6.4 大爆炸(量子)宇宙学 .....	96
6.5 宇宙的加速膨胀与暗物质、暗能量 .....	97
6.5.1 暗物质 .....	98
6.5.2 宇宙加速膨胀与暗能量 .....	99
6.6 宇宙学问题与粒子物理学问题的关联 .....	100
<b>第 7 章 量子信息、量子通讯与量子计算</b> .....	102
7.1 量子力学简介 .....	102
7.1.1 量子力学基本原理 .....	102
7.1.2 量子力学的特点 .....	104
7.1.3 纯态与混合态 .....	105
7.2 量子力学与信息论 .....	108
7.2.1 自然界和人类社会的三大要素 .....	108
7.2.2 信息论 .....	109
7.2.3 信息论与物理学 .....	109
7.2.4 经典信息论与量子信息论 .....	109
7.2.5 量子计算与量子通讯 .....	109

---

7.2.6	量子计算与量子通讯的优点和必要性 .....	109
7.2.7	量子信息学与量子计算已取得的成绩 .....	110
7.3	量子信息 .....	110
7.3.1	量子纠缠 .....	110
7.3.2	量子编码 .....	112
7.3.3	量子信息 .....	112
7.3.4	量子信息的特征 .....	113
7.4	量子通讯 .....	114
7.4.1	量子位 .....	114
7.4.2	量子逻辑门 .....	115
7.4.3	量子通讯 .....	117
7.5	量子噪音与量子运算(操作) .....	118
7.5.1	密度矩阵量子态 $\rho$ 的变化 .....	118
7.5.2	量子态变化的一般描述 .....	118
7.6	量子计算 .....	121
7.6.1	量子计算与经典计算 .....	121
7.6.2	几种量子算法 .....	123
7.6.3	量子纠错 .....	123
7.7	量子计算的物理实现——量子计算机 .....	124
7.7.1	量子计算机模型 .....	124
7.7.2	量子计算机的物理实现 .....	127
7.7.3	量子计算机的实现 .....	127
7.7.4	对量子通讯和量子计算机的展望 .....	128
第8章	生物物理学 .....	129
8.1	生物物理学的产生与发展 .....	129
8.1.1	生物物理学 .....	129
8.1.2	生物物理学的产生与发展 .....	129
8.1.3	生物物理学的主要研究内容 .....	130
8.1.4	生物物理学发展的主要特征 .....	130
8.1.5	必要知识 .....	130
8.2	生物物理学的主要研究内容 .....	132
8.2.1	分子生物物理学 .....	132

---

8.2.2 膜与细胞生物物理学 .....	133
8.2.3 感官与神经生物物理学 .....	135
8.2.4 生物控制论与生物信息论 .....	136
8.2.5 理论生物物理学 .....	136
8.2.6 光生物物理学 .....	138
8.2.7 自由基与环境辐射的生物物理学 .....	139
8.2.8 生物力学与生物流变学 .....	141
8.2.9 生物物理学技术 .....	141
8.3 生物系统与生态系统: 生物系统的层次性与复杂性 .....	143
8.3.1 生命是非平衡系统的一个过程, 而非一种物质状态 .....	143
8.3.2 生命是一个复杂的瞬态过程 .....	143
8.3.3 生命有复杂的层次结构 .....	143
8.4 生物信息学 .....	144
8.5 讨论与展望 .....	144
<b>第 9 章 21 世纪的物理学 .....</b>	<b>146</b>
9.1 21 世纪物理学面临的变革 .....	146
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 .....	146
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 .....	146
9.1.3 交叉学科的兴起与新发现 .....	147
9.1.4 物理学对高科技的巨大促进 .....	147
9.2 物理学研究方法 .....	147
9.3 21 世纪的中国物理学 .....	148
9.3.1 21 世纪中国物理学 (中期) 前景的预期 (部分) .....	148
9.3.2 中国发展物理学的策略 .....	149
9.3.3 21 世纪中国物理学家的责任 .....	149
<b>第 10 章 物理学前沿问题讨论 .....</b>	<b>150</b>
<b>参考书目 .....</b>	<b>152</b>



# 第 1 章 物理学与高科技

本书的写作目的,是给大学物理学本科高年级学生和研究生介绍 20 世纪物理学发展的概貌,21 世纪物理学发展的趋势和某些前沿研究领域;唤起他们对物理学的兴趣和爱好,使他们认识到物理学家的社会责任与科学使命,以及当代物理学家所面临的挑战与机遇;鼓励物理学本科学生和研究生热爱物理学,学好物理学,献身物理学,将来为物理学与高科技的发展做出贡献.

## 1.1 21 世纪的高科技与知识经济

科学技术与社会经济密切相关,物理学更是如此.对物理学发展的前沿问题的讨论,应当放在社会经济发展的背景下来考察.

### 1.1.1 知识经济时代

人类社会大体上经历了三个经济时代,它们是:

(1) 漫长低级的农业经济时代.这一时代的持续时间大体上是公元前 5000 年至公元 16 世纪.其特点是:社会经济主要依赖于自然界的养殖业与农业;生产力水平低下,经济的区域性较强;社会生产对自然环境的破坏小,人与自然和谐发展.这一经济时代的成就是造就了古代文明.

(2) 高速增长的工业经济时代.这一时代的持续时间是 17 世纪至 20 世纪.其特点是:社会经济以蒸汽机、内燃机、电力为动力,以机械工业为骨干,以自然资源为原料;生产力高度发展,生产社会化与全球化的程度很高;社会生产对环境的破坏很大.这一经济时代的成就是造就了现代文明.

(3) 科学合理的知识经济时代.这一时代可以认为从 21 世纪正式开始.其特点是:整个社会的生活和生产均以知识为基础,科技知识和人文知识及其相应的信息支撑着社会经济生活中的生产、流通、管理、分配、消费等各个环节;劳动者熟练地运用高科技知识,知识本身成为产品、商品;自然资源得到合理的利用,生产和经济保持可持续发展;生产和经济真正实现全球化;在社会生产和生活中,强调对地球环境的保护,实现社会、人与自然的和谐发展.