

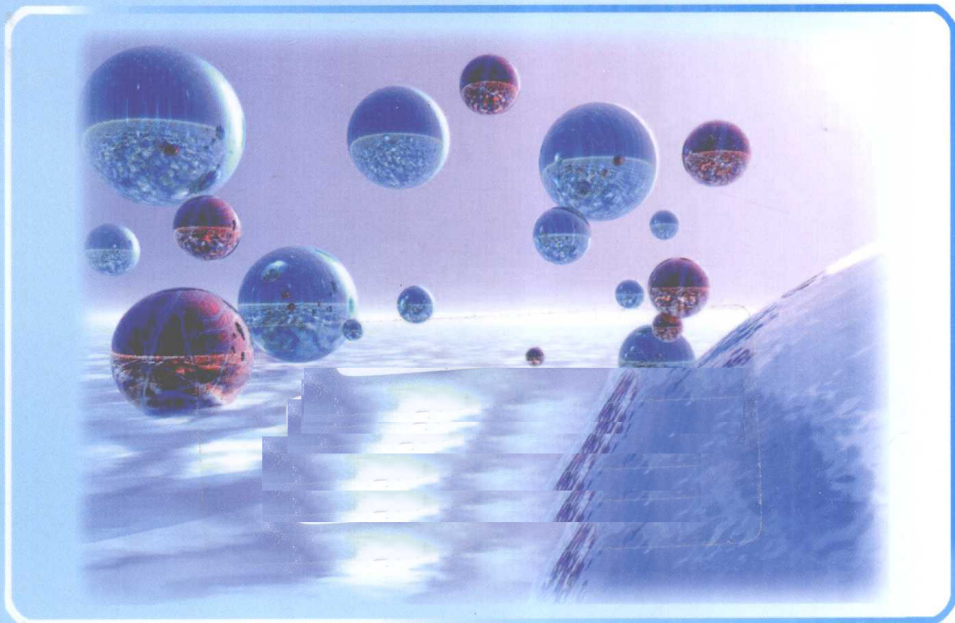


普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 材料物理基础

孔祥华 杨穆 王帅 编

**CAILIAO WULI JICHU**



冶金工业出版社  
Metallurgical Industry Press

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 材料物理基础

孔祥华 杨穆 王帅 编

北京  
冶金工业出版社  
2010

## 内 容 简 介

本教材从相关知识的发展历程出发,揭示了材料物理重要思想的产生以及主要的基础知识。全书共包括6篇17章,内容涉及物理学基础、材料的光电性能、磁学性能、电学性能、自旋电子学、热学性能、晶体结构与力性、分子结构与高分子物理等。本书将趣味性与知识性相结合,语言生动,为了便于学习使用,每章后附有思考练习题。

本书可以作为工科学校的材料科学与工程、材料物理、材料化学、冶金工程等专业师生的材料物理基础课程教材,也可供有关科技人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

材料物理基础/孔祥华,杨穆,王帅编. —北京:冶金工业出版社,2010.8

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-5024-5293-3

I. ①材… II. ①孔… ②杨… ③王… III. ①工程材料—物理性能—高等学校—教材 IV. ①TB303

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第130706号

出版人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷39号,邮编100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjchs@cnmip.com.cn

责任编辑 王楠 张卫 美术编辑 李新 版式设计 葛新霞

责任校对 王永欣 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-5293-3

北京兴华印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2010年8月第1版,2010年8月第1次印刷

787 mm×1092 mm 1/16;19印张;506千字;288页

42.00元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街46号(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

## 前 言

科学技术的飞速发展,使人类越来越重视新材料的研究和开发,与此同时,面对大量的科研成果,如何在材料科学与工程的相关专业开展系统的专业技能教育是我们必须考虑的问题。材料的优异性能是材料研究的动力,因此,许多高等学校把材料物理基础作为材料学、材料化学等专业的重要课程。我们在教学过程中发现,与材料物理相关的课程包括固体物理、材料科学基础、结构化学等,这方面的教材很多,但这些教材的内容多是针对某些特殊的专业背景编写的,无法满足今天“大材料”教育模式的需要。所以,我们尝试编写一本使本科生能够系统掌握材料物理基础知识的教材。

综合目前材料科学研究的现状,我们从电子、原子、分子三个层次展开,涉及物理学基础、材料的光电性能、磁学性能、电学性能、自旋电子学、热学性能、晶体结构与力学性能、分子结构与高分子物理等内容,强调相关知识的发展过程与基础,使学生能够从本质上把握问题,为进一步开展科学研究打下坚实的基础。

本书的第一章借鉴了曹天元的著作《上帝掷骰子吗:量子物理史话》,该书幽默诙谐的语言给本教材的编写以很大的启发,形成了本教材的编写风格。第二章主要参考了向义和编写的《物理学基本概念和基本定律溯源》,该书在物理学的教学中引入历史,使物理学变得更加生动鲜活。固体的能带理论和材料的热学性能参考了黄昆的《固体物理学》,关于物理性能的几章内容参考了田蔚编写的《材料物理性能》。材料中的缺陷与力学性能一章参考了余宗森编写的《金属物理》。书中的部分内容来源于网络、期刊,部分内容因为编写时间较长而遗漏,对此编者在此向各位表示深深的歉意。本书编写的目的是在大量相关专业知识的基础上,完成一本比较通俗的适合材料学本科生的教材。就目前结果看,在上述一系列著作的基础上,初步形成了教材的编写思想,但由于时间和编者水平的限制,存在的问题还很多,我们一定在今后继续努力,不断完善教材内容,精

炼教材语言。希望本教材为材料物理学教学提供一个抛砖引玉的作用,激发学生相关专业知识的兴趣,更加鼓励学生进一步阅读相关的原著,在知识的海洋中快乐前行。

本书的第一篇、第二篇、第三篇、第四篇由孔祥华编写,第五篇由王帅编写,第六篇由杨穆编写。由于编者水平有限,书中偏颇之处在所难免,欢迎各位专家批评指正。由于时间紧,文献引用纰漏之处请相关作者谅解。

编 者  
2010年4月

# 目 录

## 第一篇 物理学基础

<b>1 量子物理基础</b> .....	1
1.1 经典物理学的困难 .....	2
1.2 黑体辐射规律与普朗克能量子假设 .....	3
1.2.1 黑体辐射规律 .....	3
1.2.2 紫外灾难 .....	5
1.2.3 普朗克的量子理论 .....	6
1.3 光电效应 .....	9
1.4 康普顿散射 .....	10
1.5 物质粒子的波动性 .....	12
1.5.1 德布罗意假设 .....	12
1.5.2 物质粒子波动性的实验证据 .....	12
1.6 波函数与波动方程 .....	14
1.6.1 波-粒二象性 .....	14
1.6.2 波函数的玻恩几率诠释 .....	14
1.6.3 波函数的性质与态叠加原理 .....	14
1.7 含时间的薛定谔方程 .....	16
1.8 不含时间的薛定谔方程——定态问题 .....	18
1.9 一维势垒与隧道效应 .....	20
1.9.1 薛定谔方程在一维势垒上的应用 .....	20
1.9.2 扫描隧道显微镜 .....	22
1.10 不确定性原理 .....	23
思考练习题 .....	25
<b>2 统计力学基础</b> .....	26
2.1 统计力学发展史 .....	26
2.2 分子运动理论 .....	27
2.2.1 克劳修斯的气体压强公式与气体分子平均自由程 .....	27
2.2.2 概率概念的引进以及麦克斯韦分布的建立 .....	30
2.3 玻耳兹曼关系与热寂 .....	31
2.3.1 玻耳兹曼统计法 .....	31

2.3.2 玻耳兹曼关系与熵增 .....	33
2.3.3 “热寂说”与“麦克斯韦妖” .....	35
2.4 吉布斯统计法与系综 .....	36
2.5 量子统计法 .....	38
思考练习题 .....	40
<b>3 倒易空间 .....</b>	<b>41</b>
3.1 傅里叶变换与倒易空间 .....	41
3.2 晶体衍射 .....	42
3.3 倒易球 .....	43
思考练习题 .....	44
<b>本篇参考文献 .....</b>	<b>45</b>

## 第二篇 固体能带理论与物理性能

<b>4 固体的能带理论 .....</b>	<b>47</b>
4.1 能带理论的发展 .....	47
4.2 能带的产生——周期场中的传导电子 .....	49
4.3 布里渊区与倒易空间 .....	52
4.4 准自由电子近似电子能级密度 .....	54
4.5 导体、绝缘体、半导体的能带结构 .....	55
4.6 空穴的概念 .....	57
思考练习题 .....	58
<b>5 电学性能 .....</b>	<b>59</b>
5.1 材料导电性能概述 .....	59
5.2 电子类载流子导电 .....	60
5.2.1 金属导电与电阻的产生 .....	60
5.2.2 冷加工和缺陷对电阻率的影响 .....	61
5.2.3 固溶体的电阻率 .....	61
5.3 离子类载流子导电 .....	62
5.3.1 离子导电与扩散 .....	62
5.3.2 快离子导体 .....	62
5.4 锂离子电池 .....	66
5.4.1 锂离子电池的导电机理 .....	66
5.4.2 锂离子电池的正极材料 .....	67
5.4.3 锂离子电池的负极材料 .....	69
5.5 超导现象和超导材料 .....	69

5.5.1	超导现象及其基本概念 .....	69
5.5.2	超导基本理论 .....	71
5.5.3	两类超导体 .....	73
5.5.4	高温超导材料 .....	73
5.5.5	超导材料的应用 .....	75
5.6	半导体材料 .....	75
5.6.1	半导体材料的分类与能带 .....	76
5.6.2	本征半导体的吸收光谱和能带结构 .....	78
5.6.3	实际半导体的杂质电子态 .....	79
5.6.4	载流子输运与霍尔效应 .....	80
5.6.5	半导体表面和界面 .....	81
	思考练习题 .....	82
<b>6</b>	<b>自旋电子学</b> .....	<b>84</b>
6.1	自旋电子学的发展过程 .....	84
6.2	电子的自旋与磁性 .....	86
6.3	巨磁电阻的发现与发展 .....	87
6.4	巨磁电阻多层膜的结构与作用机理 .....	89
6.5	隧道磁电阻 .....	91
6.6	自旋阀 .....	92
	思考练习题 .....	93
<b>7</b>	<b>介电物理</b> .....	<b>94</b>
7.1	介电现象和极化效应 .....	94
7.1.1	电极化现象 .....	94
7.1.2	极化效应和电极化率 .....	95
7.2	压电晶体材料 .....	95
7.3	热释电晶体材料 .....	97
7.3.1	热释电效应 .....	97
7.3.2	热释电效应的应用 .....	97
7.4	铁电效应和铁电晶体 .....	97
7.4.1	铁电效应 .....	97
7.4.2	铁电材料自发极化产生机理 .....	98
7.4.3	铁电畴的运动 .....	99
	思考练习题 .....	101
<b>8</b>	<b>磁学性能</b> .....	<b>102</b>
8.1	磁的基本性质 .....	102
8.2	磁畴的形成 .....	105



8.3	磁畴壁的性质 .....	106
8.4	技术磁化 .....	107
8.4.1	起始磁化曲线 .....	108
8.4.2	畴壁位移过程 .....	108
8.4.3	畴壁位移的理论 .....	110
8.5	磁性材料的分类 .....	111
8.6	板材织构与电工钢的导磁性 .....	112
8.7	纳米磁性材料 .....	113
8.7.1	纳米颗粒型 .....	114
8.7.2	纳米微晶型 .....	115
8.7.3	磁微电子结构材料 .....	116
	思考练习题 .....	116
<b>9</b>	<b>固体的光性质和光功能材料</b> .....	<b>117</b>
9.1	固体对光的吸收与光电转换材料 .....	117
9.1.1	纯净固体对光的吸收 .....	117
9.1.2	缺陷存在时晶体的光吸收 .....	118
9.1.3	无机离子固体的光吸收 .....	119
9.2	半导体的光吸收和光导电现象 .....	119
9.2.1	本征半导体的光吸收 .....	119
9.2.2	非本征半导体的光吸收 .....	120
9.2.3	光导电现象 .....	120
9.3	固体的发光和发光材料 .....	121
9.3.1	发光概论 .....	121
9.3.2	光致发光材料的基本组成 .....	124
9.3.3	光致发光原理 .....	124
9.3.4	反斯托克磷光体 .....	126
9.3.5	日光灯用磷光材料 .....	126
9.3.6	显示用荧光材料 .....	127
9.3.7	激光材料 .....	128
	思考练习题 .....	129
	<b>本篇参考文献</b> .....	<b>131</b>

### 第三篇 材料的热学性能

<b>10</b>	<b>材料的热学性能</b> .....	<b>133</b>
10.1	经典热容理论 .....	133
10.2	爱因斯坦量子热容理论 .....	134
10.2.1	晶格振动振子的平均能量 .....	134

10.2.2 爱因斯坦热容模型 .....	135
10.2.3 德拜热容模型 .....	136
10.2.4 热容的实际应用——热分析法 .....	137
10.3 材料的热传导 .....	138
10.3.1 热传导的宏观现象 .....	138
10.3.2 热传导的机理 .....	139
10.3.3 实际材料的导热 .....	140
思考练习题 .....	141
<b>本篇参考文献</b> .....	<b>142</b>

## 第四篇 材料中的缺陷与力学性能

<b>11 材料中的缺陷与力学性能</b> .....	<b>143</b>
11.1 位错 .....	144
11.1.1 位错概念的产生 .....	144
11.1.2 位错的结构 .....	145
11.1.3 位错的运动 .....	148
11.2 晶体的范性形变和屈服 .....	154
11.2.1 金属的滑移及滑移系 .....	156
11.2.2 临界分切应力 .....	158
11.2.3 金属单晶体的滑移形变 .....	159
11.2.4 多晶体的范性形变 .....	161
11.3 超级钢的强化机理 .....	164
11.3.1 晶粒细化的基本理论 .....	165
11.3.2 细化晶粒理论在实际工业中的应用 .....	165
11.3.3 超级钢的工艺方法和强韧化特点 .....	166
11.3.4 超级钢的工业应用 .....	166
11.3.5 超级钢的发展前景 .....	167
11.4 钢材生产的控轧控冷技术 .....	167
11.4.1 控制轧制 .....	168
11.4.2 控制冷却 .....	169
思考练习题 .....	169
<b>本篇参考文献</b> .....	<b>170</b>

## 第五篇 表面结构与性能

<b>12 表面结构与性能</b> .....	<b>171</b>
12.1 研究表面的意义 .....	171

12.2 固体的表面及表面力场 .....	172
12.2.1 理想表面 .....	172
12.2.2 清洁表面 .....	172
12.2.3 覆盖表面 .....	173
12.3 实际固体的表面结构 .....	174
12.3.1 表面力 .....	174
12.3.2 晶体表面结构 .....	174
12.3.3 粉体表面结构 .....	175
12.3.4 固体表面的几何结构 .....	175
12.4 表面缺陷与表面扩散 .....	176
12.4.1 表面缺陷 .....	176
12.4.2 表面扩散 .....	177
12.5 表面技术的应用——金属表面化学处理 .....	178
12.5.1 氧化处理 .....	178
12.5.2 铝及铝合金的阳极氧化 .....	179
思考练习题 .....	181
本篇参考文献 .....	182

## 第六篇 高分子物理

13 高聚物分子链结构 .....	183
13.1 概论 .....	183
13.1.1 高分子科学的诞生与发展 .....	183
13.1.2 高分子材料的市场经济地位 .....	184
13.1.3 高分子材料结构和性能特点 .....	185
13.1.4 高分子物理的研究内容 .....	185
13.2 高分子链的近程结构 .....	185
13.2.1 结构单元的化学组成 .....	185
13.2.2 构型 .....	187
13.2.3 高分子共聚物(copolymer) .....	189
13.2.4 分子构造(architecture) .....	190
13.3 高分子链的远程结构 .....	191
13.3.1 高分子的相对分子质量及其分布 .....	191
13.3.2 相对分子质量对聚合物性能的影响 .....	194
13.3.3 高分子链的构象 .....	194
13.3.4 高分子链的柔顺性 .....	195
13.3.5 高分子链的构象统计 .....	196
思考练习题 .....	197

<b>14 高聚物的聚集态结构</b> .....	199
14.1 高聚物分子间作用力 .....	199
14.1.1 范德华力与氢键 .....	199
14.1.2 内聚能密度 .....	199
14.2 高聚物的晶态结构 .....	200
14.2.1 高聚物晶胞结构 .....	200
14.2.2 高聚物结晶的形态学 .....	200
14.2.3 结晶聚合物的结构模型 .....	204
14.2.4 高聚物的结晶过程 .....	205
14.2.5 结晶热力学 .....	207
14.2.6 结晶对高聚物物理力学性能的影响 .....	209
14.3 高聚物的非晶态结构 .....	210
14.3.1 无规线团模型 .....	210
14.3.2 两相球粒模型 .....	210
14.4 高聚物的取向态结构 .....	210
14.4.1 高聚物的取向现象 .....	210
14.4.2 高聚物的取向机理 .....	211
14.4.3 取向度 .....	211
14.4.4 取向的应用 .....	211
14.5 高聚物的液晶态结构 .....	212
14.5.1 液晶 .....	212
14.5.2 高分子液晶的结构 .....	212
14.5.3 高分子液晶的性能和应用 .....	215
14.6 共混高聚物的织态结构 .....	216
14.6.1 高分子混合物的概念 .....	216
14.6.2 高分子的相容性 .....	216
思考练习题 .....	219
<b>15 高聚物的分子运动和转变</b> .....	220
15.1 高聚物的分子运动特点 .....	220
15.1.1 运动单元的多重性 .....	220
15.1.2 运动的时间依赖性 .....	220
15.1.3 运动的温度依赖性 .....	220
15.2 高聚物的温度-形变曲线 .....	221
15.2.1 线形非晶态聚合物的温度-形变曲线 .....	221
15.2.2 晶态聚合物的温度-形变曲线 .....	222
15.2.3 交联聚合物的温度-形变曲线 .....	222
15.3 高聚物的玻璃化转变 .....	222

15.3.1	玻璃化转变测量方法 .....	223
15.3.2	玻璃化转变理论 .....	223
15.3.3	影响玻璃化温度 $T_g$ 的因素 .....	224
15.3.4	高聚物的次级转变及其分子机理 .....	227
15.4	高聚物的黏性流动 .....	227
15.4.1	聚合物黏性流动的特点 .....	227
15.4.2	牛顿流体和非牛顿流体 .....	228
15.4.3	实际高聚物的流动性 .....	229
15.4.4	影响熔融黏度的因数 .....	229
15.4.5	聚合物的黏流温度 $T_f$ .....	231
	思考练习题 .....	231
<b>16</b>	<b>高聚物的力学性质 .....</b>	<b>233</b>
16.1	形变类型和描述力学性质的基本物理量 .....	233
16.2	高聚物的高弹态 .....	234
16.2.1	高弹态分子运动的特点 .....	234
16.2.2	高弹性的热力学分析 .....	235
16.2.3	橡胶弹性的统计理论 .....	236
16.2.4	橡胶的种类和使用温度范围 .....	239
16.3	高聚物的力学松弛——黏弹性 .....	240
16.3.1	高聚物的力学松弛现象 .....	240
16.3.2	黏弹性的力学模型 .....	243
16.3.3	Boltzmann 叠加原理 .....	245
16.3.4	时温等效原理 (time-temperature equivalence principle) .....	246
16.4	高聚物的屈服和断裂 .....	247
16.4.1	高聚物的应力-应变行为 .....	247
16.4.2	高聚物的屈服 .....	251
16.4.3	高聚物的断裂和强度 .....	255
16.4.4	影响高聚物实际强度的因素 .....	260
16.4.5	高聚物增强和增韧 .....	260
	思考练习题 .....	263
<b>17</b>	<b>高聚物的电学、光学和热学性质 .....</b>	<b>265</b>
17.1	高聚物的极化和介电性能 .....	265
17.1.1	电解质在外电场中的介电极化现象 .....	265
17.1.2	高聚物的介电性能 .....	267
17.1.3	高聚物的介电松弛谱 .....	270
17.1.4	高聚物的介电击穿 .....	271
17.1.5	高聚物的静电现象 .....	271

17.2 高聚物的导电性 .....	273
17.2.1 材料导电性的表征 .....	273
17.2.2 高聚物绝缘体 .....	274
17.2.3 导电高分子材料 .....	274
17.3 高聚物的光学性质 .....	276
17.3.1 吸收和透射 .....	276
17.3.2 折射和反射 .....	277
17.3.3 非线性光学 .....	278
17.4 高聚物的热学性能 .....	279
17.4.1 聚合物的耐热性 .....	279
17.4.2 聚合物的热稳定性 .....	279
17.4.3 聚合物的导热性 .....	282
17.4.4 聚合物的热膨胀 .....	283
思考练习题 .....	283
<b>本篇参考文献</b> .....	<b>284</b>
<b>术语索引</b> .....	<b>285</b>

# 第一篇 物理学基础

本篇重点介绍现代材料的基础物理学知识,包括量子力学、统计物理和倒易空间等内容。强调量子力学和统计物理中的物理学思想和基本概念,为进一步学习奠定物理学基础。

## 1 量子物理基础

### 本章要点:

本章重点通过量子力学的发展过程介绍量子力学的重要概念,掌握波粒二象性、薛定谔方程、一维势垒模型与隧道效应以及测不准原理,理解扫描隧道显微镜的工作原理。

量子力学(quantum mechanics)是研究微观粒子运动规律的物理学分支学科,它主要研究原子、分子、凝聚态物质,以及原子核和基本粒子的结构、性质的基础理论,它与相对论一起构成了现代物理学的理论基础。量子力学不仅是近代物理学的基础理论之一,而且在化学等有关学科和许多近代技术中也得到了广泛的应用。

作为物理学界的大明星,量子论其实已经一百多岁了,比相对论的年纪还大。爱因斯坦的相对论刚出生,便受到世人的瞩目。而量子论呢?虽然已经超过100岁,但它或许尚未进入自己的“青春期”。大部分物理学家认为,就人类技术和日常生活来看,量子力学的影响可能要超过相对论。相对论可能改变了人们的时空观,但量子论直接导致了晶体管的出现,我们想象如果没有量子论,或许今天我们身边也根本不会出现收音机、电视机和计算机。它对新技术的促进,直接体现在量子信息学和量子工程学上。20世纪40年代信息论被提出,但直到20世纪90年代前,处理的都是经典世界里的信息。此后,随着微电子工艺技术的迅速发展,人类对微观世界的操纵能力越来越深入,这时量子力学的研究才对信息论产生了巨大的影响,并直接导致通信和计算机科学发生了革命性的变化,全球也进入信息时代。

量子理论看起来依然还是一个让物理学家头疼的神秘理论,但其推动人类科技文明的潜力依然无穷,或许真的如有人评价的那样,18世纪和19世纪是机械世纪,20世纪是信息世纪,而21世纪则是量子世纪。这个被国际上公认为科学史上目前为止最成功的理论在过去的一个世纪内让科技爆发出巨大的能量,人类文明被彻底重写。量子论的诞生充满了英雄气概,它改变了人类的一切,也像烛光一样,还会继续引导着人类走向更深、更广阔的真理世界。任何材料都是由原子、分子组成的。材料的性质正是由组成材料的结构粒子的运动特性决定的。对材料物理专业的学生来说,量子力学已成为一门必不可少的专业基础课。

## 1.1 经典物理学的困难

19世纪末经典物理学以经典力学、电磁场理论、热力学和经典统计学为主要支柱,达到了完整、系统和成熟的阶段,致使不少物理学家认为,物理学的大厦已经基本建成。

当时著名物理学家,德国慕尼黑大学的祖利(Philipp. V. Jolly)曾试图劝阻年轻的马克斯·普朗克进入纯理论的领域。1924年普朗克在慕尼黑作的一次公开讲演中曾回忆说:“当我开始研究物理学和我可敬的老师 Philipp. V. Jolly 对我讲述我学习的条件和前景时,他向我描绘了物理学是一门高度发展的、几乎是尽善尽美的科学。现在,在能量守恒定律的发现给物理学戴上桂冠之后,这门科学很接近于最终稳定的形式。也许,在某个角落还有一粒尘屑或一个小气泡,对它们可以去进行研究分类。但是,作为一个完整的体系,那是建立得足够牢固的;而理论物理学正在明显地接近于如几何学在数百年中所具有的那样完善的程度。”

正当人们为物理学的辉煌成就欢欣鼓舞之际,在物理学的许多领域出现了一系列新的发现,表现出与经典物理理论的尖锐矛盾,使经典物理学面临“危机”。

1900年4月27日,在巴黎举办世博会的时候,在阿尔伯马尔街皇家研究所(Royal Institution, Albemarle Street)举行了一场报告会,欧洲有名的科学家都赶来这里,聆听那位德高望重,然而却以顽固出名的老头子——开尔文男爵(Lord Kelvin)的发言。开尔文的这篇演讲名为《在热和光动力理论上空的19世纪乌云》。当时已经76岁,白发苍苍的开尔文用那特有的爱尔兰口音开始了发言,他的第一段话是这么说的:

“动力学理论断言,热和光都是运动的方式。但现在这一理论的优美性和明晰性却被两朵乌云遮蔽,显得黯然失色了……”(The beauty and clearness of the dynamical theory, which asserts heat and light to be modes of motion, is at present obscured by two clouds.)

这就是后来物理学史反复引用“乌云”这一比喻的由来。联系到当时人们对物理学大一统的乐观情绪,许多时候这个表述又变成了“在物理学阳光灿烂的天空中漂浮着两朵小乌云”。这两朵著名的乌云,分别指的是经典物理在以太和麦克斯韦-玻耳兹曼能量均分学说上遇到的难题。再具体一些,指的就是人们在迈克尔逊-莫雷实验和黑体辐射研究中的困境。

迈克尔逊-莫雷实验的用意在于探测以太对于地球的漂移速度。在人们当时的观念里,以太代表了一个绝对静止的参考系,而地球穿过以太在空间中运动,就相当于一艘船在高速行驶,迎面会吹来强烈的“以太风”。迈克尔逊在1881年进行了一个实验,想测出这个相对速度,但结果并不十分令人满意。于是他和另外一位物理学家莫雷合作,在1886年安排了第二次实验。这可能是当时物理史上进行过的最精密的实验了,他们动用了最新的干涉仪,为了提高系统的灵敏度和稳定性,他们甚至多方筹措弄来了一块大石板,把它放在一个水银槽上,这样就把干扰的因素降到了最低。

然而实验结果却让他们震惊和失望无比,两束光线根本就没有表现出任何的时间差。以太似乎对穿越于其中的光线毫无影响。迈克尔逊和莫雷不甘心地一连观测了四天,本来甚至想连续观测一年以确定地球绕太阳运行四季对以太风造成的差别,但因为这个否定的结果是如此清晰而不容置疑,这个计划也被无奈地取消了。

迈克尔逊-莫雷实验是物理史上最著名的“失败的实验”。它当时在物理界引起了轰动,因为以太这个概念作为绝对运动的代表,是经典物理学和经典时空观的基础。而这根支撑着经典物理学大厦的梁柱竟然被一个实验的结果无情地否定,那就意味着整个物理世界的轰然崩塌。不过,那时候再悲观的人也不认为,刚刚取得了伟大胜利,到达光辉顶峰的经典物理学会莫名其



妙地就这样倒台,所以人们还是提出了许多折中的办法,爱尔兰物理学家费兹杰拉尔德(George FitzGerald)和荷兰物理学家洛伦兹(Hendrik Antoon Lorentz)分别独立地提出了一种假说,认为物体在运动的方向上会发生长度的收缩,从而使得以太的相对运动速度无法被测量到。这些假说虽然使得以太的概念得以继续保留,但已经对它的意义提出了强烈的质疑,因为很难想象,一个只具有理论意义的“假设物理量”究竟有多少存在的必要。开尔文所说的“第一朵乌云”就是在这个意义上提出来的,不过他认为长度收缩的假设无论如何已经使人们“摆脱了困境”,所要做的只是修改现有理论以更好地使以太和物质的相互作用得以自洽罢了。

至于“第二朵乌云”,指的是黑体辐射实验和理论的不一致。它在量子理论里起着十分重要的作用,所以我们会在后面的章节里仔细地探讨这个问题。在开尔文发表演讲的时候,这个问题仍然没有任何能够得到解决的迹象。不过开尔文对此的态度倒也是乐观的,因为他本人就并不相信玻耳兹曼的能量均分学说,他认为要驱散这朵乌云,最好的办法就是否定玻耳兹曼的学说,而玻耳兹曼的分子运动理论在当时的确还是有着巨大的争议,以至于这位罕见的天才苦闷不堪,精神出现了问题。玻耳兹曼第一次尝试自杀而未成,但他终于在6年后的一片小森林里亲手结束了自己的生命,留下了一个科学史上的大悲剧。

年迈的开尔文站在讲台上,台下的听众对于他的发言给予热烈的掌声。然而当时,他们中间却没有一个人(包括开尔文自己)会了解,这两朵小乌云对于物理学来说究竟意味着什么。他们绝对无法想象,正是这两朵不起眼的乌云马上就要给这个世界带来一场前所未有的狂风暴雨,电闪雷鸣,并引发可怕的大火和洪水,彻底摧毁现在的繁华美丽。他们也无法知道,这两朵乌云很快就要把他们从豪华舒适的理论宫殿中驱赶出来,放逐到布满了荆棘和陷阱的原野上去过上几十年颠沛流离的生活。他们更无法预见,正是这两朵乌云,终究会给物理学带来伟大的新生,在烈火和暴雨中实现涅槃,并重新建造起两幢更加壮观美丽的城堡来。

第一朵乌云,最终导致了相对论革命的爆发。

第二朵乌云,最终导致了量子论革命的爆发。

在19世纪末的其他重大新发现还有:

1887年,H. Hertz 发现光电效应;

1895年11月8日,Röntgen 在阴极射线实验中发现 X 射线,这个发现使其在1901年成为第一个诺贝尔物理奖获得者;

1896年3月,Becquerel 发现铀的天然放射性,Becquerel 因此在1903年与 Curie 夫妇一起获得诺贝尔物理奖;

1897年4月30日,英国剑桥大学 J. J. Thomson 发现了电子,电子是人类认识的第一个基本粒子,Thomson 在1906年获得诺贝尔物理奖。

以上发现都是经典物理学所不能解释的,它们成了打开现代物理学大门的一把把钥匙,其中在比热理论、光电效应、黑体辐射机理等微观领域中经典物理所遇到的严重困难导致了量子力学的诞生。

## 1.2 黑体辐射规律与普朗克能量子假设

### 1.2.1 黑体辐射规律

所有落到(或照射到)某物体上的辐射完全被吸收,则称该物体为黑体。19世纪末,人们开始对黑体模型的热辐射问题产生了兴趣。其实,很早的时候,人们就已经注意到对于不同的物