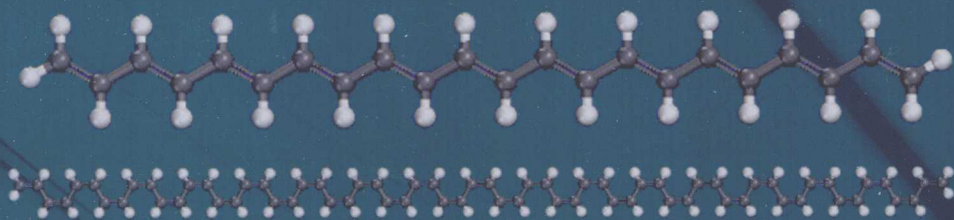


解士杰 高 琨

# 低维量子物理

LOW-DIMENSIONAL  
QUANTUM PHYSICS



山东科学技术出版社  
[www.lkj.com.cn](http://www.lkj.com.cn)

# 低维量子物理

---

## LOW-DIMENSIONAL QUANTUM PHYSICS

解士杰 高 琨

## 图书在版编目(CIP)数据

低维量子物理/解士杰,高琨. —济南:山东科学技术出版社,2009

ISBN 978-7-5331-5132-4

I. 低 II. ①解... ②高... III. 量子论—高等学校—教学参考资料 IV. 0413

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 157954 号

# 低维量子物理

解士杰 高 琨

---

**出版者:山东科学技术出版社**

地址:济南市玉函路16号

邮编:250002 电话:(0531)82098088

网址:www.lkj.com.cn

电子邮件:sdkj@sdpress.com.cn

**发行者:山东科学技术出版社**

地址:济南市玉函路16号

邮编:250002 电话:(0531)82098071

**印刷者:山东信诚印务有限责任公司**

地址:济南市华山工业园

邮编:250108 电话:(0531)88260455

---

开本:720mm×1020mm 1/16

印张:15.5

版次:2009年6月第1版第1次印刷

---

ISBN 978-7-5331-5132-4

定价:31.00 元

# 前

# 言

## Preface

近三十年中,凝聚态物理发展的一个重要趋势是向低维发展,从 $C_{60}$ 到纳米碳管,从量子点到量子阱,从导电高分子到高温超导体,系统无一不呈现出低维结构特征。在这些系统内发现了许多诱人的新现象,如电子 Wigner 晶格、量子霍尔效应、高温超导现象、有机导电特性等。这些新现象主要来源于系统的低维量子特征,这也是低维量子物理得以发展的重要原因。低维系统是指微观自由粒子如电子、声子、光子等在三维空间中的运动受到限制的系统。室温下,大部分固体材料的电子平均自由程在纳米级范围。因此,低维系统与材料学上所说的纳米系统有密切联系。随着新的低维材料及其新现象的不断出现,设计新的高科技电子器件具有潜在性和可行性,所以低维量子体系已引起了人们巨大的兴趣,并已成为凝聚态物理的一个重要分支。低维系统的研究也具有基础物理的意义:一些高维难解的问题在低维情况下可以给出解析解,这对发展物理理论和方法具有重要意义。1985年,孙鑫教授曾在《物理学进展》上发表了《低维凝聚态物理进展》系列文章,使我们深受启发,最近20年的发展更体现出低维凝聚态物理的重要性。从2000年开始,我们分别对高年级本科生和凝聚态物理专业及材料学专业的研究生开设了《低维量子物理》课程。结合多年的教学经验,我们撰写了这本《低维量子物理》,它也可作为我们上一部书《凝聚态物理》的补充和延续。本书是沿维度性的思路,更多地介绍理论方法,试图用最简单的理论手段解释低维系统中复杂的物理现象。低维凝聚态物理是内容极为丰富的一个领域,新现象和新方法不断涌现。编写过程中,我们查阅了大量相关文献,尽可能将一些精华内容吸收到本书之中。

编写过程中,山东大学梅良模教授给予了自始至终的关注和指导,刘德胜教授、郑雨军教授、王春雷教授、仝殿民教授和赵显教授等提供了很多有益的建议。另外,尹笋博士以及姜虹、康大伟、孙震和刘晓辉、侯栋、张龙龙、房常峰、吕学鹏、徐国富、杨阳和高丽等也参与了本书的编写工作,在此一并表示感谢。

本书出版,还得到了国家理科基地教材基金、国家重大研究计划(973课题2009CB929200)、国家自然科学基金(10874100,10804062)、山东大学“985工程”学科建设经费和山东大学研究生教材出版基金等的资助。

鉴于我们水平有限,只能挂一漏万,书中也难免有错误和不妥之处,恳请大家批评指正。

作者

# 目 录

## Contents

引 言 .....	1
第一章 低维系统中的量子现象 .....	6
第 1 节 低维系统的构成 .....	7
第 2 节 低维量子系统的物理性质 .....	8
1. 表面态/体电子态比 .....	8
2. 态密度 .....	9
3. 一维铁磁系统 .....	10
4. 介观物理 .....	12
5. 费米液态理论及其他 .....	14
6. 可积系统 .....	14
第 3 节 二维量子系统 .....	15
1. 异质结 .....	15
2. 量子阱与超晶格 .....	15
第 4 节 二维量子现象 .....	17
1. 电子固体 .....	17
2. 金属-绝缘体转变 .....	17
3. 量子霍尔效应 .....	18
4. 合成费米子 .....	19
5. 高温超导体 .....	19
6. 二维磁性 .....	20
第 5 节 一维量子系统 .....	20
1. 量子线 .....	20
2. 导电高分子 .....	21
3. 纳米碳管 .....	22
4. Luttinger 液态 .....	22
5. 量子霍尔流体的边界态 .....	22
6. 自旋链 .....	23
7. 磁性半导体 .....	23

第 6 节 零维量子系统 .....	24
1. 量子点 .....	24
2. 库仑阻塞和单电子管 .....	24
3. 量子计算机 .....	25
4. 精确对角化 .....	25
第 7 节 受限输运 .....	26
<b>第二章 低维系统的量子方程 .....</b>	<b>31</b>
第 1 节 量子力学基本理论 .....	31
第 2 节 方势阱模型 .....	32
1. 一维无限深方势阱 .....	32
2. 平面内运动 .....	33
3. 态密度 .....	33
4. 有限深量子阱 .....	34
第 3 节 变质量问题 .....	36
1. 厄米性和动能算符 .....	36
2. 无限高势垒和质量极限 .....	37
第 4 节 多量子阱中的传递矩阵方法 .....	39
第 5 节 非对称量子阱 .....	41
第 6 节 电场下的量子阱方程 .....	42
<b>第三章 低维系统的量子解 .....</b>	<b>44</b>
第 1 节 玻恩—奥本海默近似与单电子近似 .....	44
1. 玻恩—奥本海默近似 .....	44
2. 单电子近似 .....	45
第 2 节 投射法 .....	46
第 3 节 投射法应用举例 .....	47
1. 单量子阱解 .....	47
2. 不确定性原理 .....	48
第 4 节 各种势结构下的投射法 .....	48
1. 异质结势 .....	49
2. 抛物线势阱 .....	49
3. Pöschl-Teller 势 .....	50
4. 收敛测试 .....	51
第 5 节 变质量下的投射法 .....	51
第 6 节 多量子阱 .....	52
1. 双量子阱 .....	52
2. 多量子阱和有限超晶格 .....	53
第 7 节 量子禁闭 Stark 效应 .....	54
1. 量子禁闭 Stark 效应 .....	54

2. 量子反交叉 .....	55
3. 对称性和选择定则 .....	56
第 8 节 泊松方程 .....	56
1. 能带非 $k^2$ 形式 .....	56
2. 泊松方程 .....	57
3. 调制掺杂 .....	59
第 9 节 量子阱束缚能 .....	59
1. 施主和受主掺杂 .....	60
2. 量子阱中的束缚能 .....	60
第 10 节 掺杂及扩散效应 .....	61
1. 掺杂量子阱 .....	62
2. 扩散理论 .....	62
3. 边界条件 .....	63
4. 收敛性测试 .....	63
5. 常数扩散系数 .....	64
6. 非常数扩散系数 .....	64
<b>第四章 低维系统的量子性质</b> .....	<b>66</b>
第 1 节 维度效应 .....	66
1. 布里渊区和费米面 .....	66
2. 状态密度 .....	66
第 2 节 量子阱和超晶格 .....	68
1. 组分超晶格 .....	70
2. 多元型超晶格 .....	71
3. 多维超晶格 .....	71
4. 应变超晶格 .....	72
5. 掺杂超晶格 .....	72
6. 非晶态超晶格 .....	72
7. 磁性超晶格 .....	72
8. 微米超晶格 .....	73
第 3 节 超晶格电子态 .....	74
第 4 节 耦合量子阱 .....	78
1. 量子阱与准二维系统中的电子态 .....	79
2. 耦合量子阱与超晶格 .....	79
3. 掺杂异质结系统与自洽解 .....	82
第 5 节 磁场中的量子阱 .....	83
1. 量子线电子态 .....	83
2. 磁场中的二维电子气 .....	83
3. 磁场中的一维波导态 .....	85

第 6 节 激子和激子束缚能 .....	88
1. 激子 .....	88
2. 激子束缚能 .....	89
3. 激子 1s 态 .....	91
4. 激子的 2s 态 .....	94
第 7 节 量子阱中的激子 .....	95
1. 单量子阱中的激子 .....	95
2. 多量子阱中的激子 .....	95
3. Stark 阶梯 .....	96
4. 对称性破缺 .....	96
<b>第五章 势垒隧穿 .....</b>	<b>97</b>
第 1 节 势垒隧穿的量子方程 .....	99
1. 单垒 .....	99
2. 双垒 .....	101
第 2 节 对称势垒隧穿 .....	102
第 3 节 非对称势垒隧穿 .....	105
第 4 节 双势垒隧穿 .....	107
第 5 节 隧穿电流 .....	109
第 6 节 朗道公式 .....	112
第 7 节 绝热输运 .....	114
<b>第六章 量子点 .....</b>	<b>116</b>
第 1 节 量子点概述 .....	116
1. 实验进展概述 .....	116
2. 理论进展概述 .....	117
3. 数值计算 .....	118
4. 解析模型 .....	118
5. 量子点能谱 .....	118
第 2 节 量子点中的电子态 .....	119
第 3 节 单电子隧穿和库仑阻塞 .....	121
1. 经典图像 .....	121
2. 量子理论 .....	123
第 4 节 不同维度下的量子点 .....	125
1. 一维量子点 .....	125
2. 二维量子点 .....	126
3. 三维量子点 .....	128
第 5 节 耦合量子点 .....	128
1. 静电耦合量子点 .....	128
2. 隧道耦合量子点 .....	129



<b>第七章 一维量子系统</b> .....	131
第 1 节 纳米线概述 .....	131
1. 纳米线 .....	131
2. 纳米线的导电性 .....	133
3. 时间依赖性 .....	135
第 2 节 一维体系的能带和布里渊区 .....	136
第 3 节 一维体系的平均场理论 .....	138
1. 孤子图像 .....	140
2. 孤子的平均场理论 .....	140
第 4 节 一维体系的 Peierls 相变 .....	141
1. 实坐标空间模型 .....	142
2. 紧束缚模型 (SSH 模型) .....	144
3. 连续介质模型 .....	148
4. 声子化模型 .....	150
第 5 节 一维体系的元激发 .....	151
1. 电荷密度波与自旋密度波 .....	151
2. Peierls 相变的判据 .....	153
3. 孤子、极化子和双极化子 .....	154
4. 激子与反向极化 .....	155
第 6 节 高分子输运 .....	156
1. 电荷注入聚合物 .....	157
2. 聚合物链内的电荷运动 .....	160
第 7 节 纳米碳管 .....	161
1. 碳管合成 .....	161
2. 碳管的原子和电子结构 .....	162
第 8 节 碳管输运 .....	168
第 9 节 碳管器件 .....	170
<b>第八章 二维量子系统</b> .....	174
第 1 节 电子体系 .....	174
第 2 节 二维电子系统 .....	176
1. Wigner 晶化 .....	177
2. 液氦表面的层凹 .....	179
第 3 节 霍耳效应 .....	180
1. 经典霍耳效应 .....	180
2. 整数量子霍耳效应 (IQHE) .....	182
3. 分数量子霍耳效应 (FQHE) .....	185
第 4 节 石墨 .....	188

第九章 低维系统输运现象 .....	191
第1节 半经典输运 .....	191
第2节 量子限制系统中的磁输运 .....	192
第3节 纳米结构中的光辅助输运 .....	194
1. Tien-Gordon 模型 .....	195
2. Floquet 理论 .....	195
第4节 散射方法 .....	198
1. 传递矩阵方法 .....	198
2. 输运中的非平衡格林函数方法 .....	200
3. 双势垒中的隧穿 .....	201
第5节 纳米尺度下的量子输运 .....	202
第6节 变程跃迁 .....	203
第十章 自旋电子学 .....	205
第1节 自旋电子学的兴起和发展 .....	205
第2节 磁电阻效应和赝效应 .....	207
1. 隧道磁电阻(TMR) .....	207
2. 巨磁电阻(GMR) .....	208
3. 赝磁阻效应 .....	210
第3节 自旋输运 .....	211
1. 自旋相互作用 .....	211
2. 自旋注入过程中的电导不匹配 .....	212
3. 自旋输运理论模型 .....	213
4. 自旋弛豫和自旋退相干 .....	216
5. 自旋轨道耦合 .....	216
第4节 有机自旋电子学 .....	217
1. 有机半导体 .....	217
2. 有机自旋电子学 .....	217
第5节 有机铁磁器件中的自旋极化输运 .....	224
第6节 有机器件中的自旋整流 .....	228
1. 自旋整流 .....	228
2. 有机自旋整流 .....	229
参考文献 .....	235

# 引言

我们首先编译一段 Kleppner 和 Jackiw 发表在世界著名科学刊物“Science”上的纪念普朗克提出量子概念 100 周年的一篇评论文《量子物理百年回顾》，作为本书的引言。

量子力学和相对论无疑是 20 世纪物理学最有影响的进展，它迫使我们重新认识和审视物质世界最深层次的本性，迫使我们修正位置和速度的概念以及原因和结果的定义。尽管量子力学是为描述抽象的原子世界而创立的，但它对我们日常生活的影响无比巨大。没有量子力学作为工具，就不可能有化学、生物、医学以及其他每一个关键学科的真正进展。没有量子力学就没有现代全球经济可言，因为作为量子力学产物的电子学将我们带入了计算机时代。同时，光子学的革命也将我们带入信息时代。

量子力学起源不是一步到位的，无数天才科学家共同创造了它。“量子”是一个令人困惑的概念，马克斯·普朗克(Max Planck)在他关于热辐射的经典论文中，假定振动系统的总能量不能连续改变，以不连续的能量子形式从一个值跳到另一个值。能量子的概念太激进了，普朗克后来将它搁置下来。随后，爱因斯坦在 1905 年认识到光量子化的潜在意义，揭示了光电效应。不过，量子的观念太离奇了，后来几乎没有根本性的进展。现代量子理论的创立则是崭新的一代物理学家 20 多年研究的结晶。

在量子理论诞生以前的 10 年间(1890~1900 年)，物理期刊中的论文基本上是关于原子光谱和物质其他一些基本的可以测量属性的文章，如黏性、弹性、电导率、热导率、膨胀系数、折射系数以及热弹性系数等。面对成千上万页光谱数据罗列的大量元素波长精确值，谁都不知光谱线为何会出现，更不知道它们所传递的信息。对热导率和电导率的模型解释仅符合大约半数的事实。虽然有不计其数的经验定律，但都很难令人满意。比如，Dulong-Petit 定律建立了比热容与物质的原子质量的简单关系，但是它有时好使，有时不好使。元素周期表尽管为化学的繁荣提供了关键的组织规则，但也无任何理论基础。

量子力学提供了一种量化的物质理论。现在，我们原则上可以理解原子结构的每一个细节；周期表也能简单自然地加以解释；众多的光谱排列也纳入了一个优雅的理论框架。量子力学为定量理解分子、流体和固体、导体和半导体提供了便利。它能解释诸如超流体和超导体等怪异的现象，能解释诸如中子星和玻色-爱因斯坦凝聚等奇异的物质聚集形式。量子力学为所有的科学分支和每一项高新技术提供了关键的工具。

量子物理实际上包含两个方面：一个是原子层次的物质理论——量子力学，用它我们才能理解和操纵物质世界；另一个是量子场论，它在科学中起到一个完全不同的作用。

**旧量子论** 量子革命的起源不是对物质的研究，而是辐射问题。具体的挑战是理解黑体辐射的光谱。结合热力学和电磁学的概念，似乎可以对光谱的形状作出解释，不过所有的尝试均以失败告终。然而，普朗克假定振动电子辐射的光的能量是量子化的，从而得到一个表达式，与实验符合得相当完美。但是他也认识到，理论本身是很荒唐的，就像他后来所说的那样：“量子化只不过是一个走投无路的做法。”但是爱因斯坦却把这一概念发扬光大，1905年，他毫不犹豫地断定：如果振子的能量是量子化的，那么产生光的电磁场的能量也应该是量子化的。尽管麦克斯韦理论以及一个多世纪的权威性实验都表明光具有波动性，爱因斯坦的理论还是蕴含了光的粒子性行为。随后十多年的光电效应实验显示仅当光的能量到达一些离散的量值时才能被吸收，这些能量就像是被一个个粒子携带着一样。光的波粒二象性取决于你观察问题的着眼点，这是始终贯穿于量子物理且令人头痛的实例之一，它成为接下来的20年中理论上的难题。

辐射难题促成了通往量子理论的第一步，物质悖论则促成了第二步。众所周知，原子包含带有正、负两种电荷的粒子，异号电荷相互吸引。根据电磁理论，正、负电荷彼此将螺旋式地靠近，辐射出光谱范围宽广的光，直到原子坍塌为止。但实际并非如此。1913年，玻尔提出了一个激进的假设：原子中的电子只能处于包含基态在内的定态上，电子在两个定态之间跃迁而改变它的能量，同时辐射出一定波长的光，光的波长取决于定态之间的能量差。结合已知的定律和这一假设，玻尔扫清了原子稳定性的问题。玻尔的理论充满了矛盾，但是为氢原子光谱提供了定量描述。当认识到此模型的成功和缺陷之处后，玻尔凭借惊人的预见力，聚集了一批物理学家，创立了新的物理学，花了12年时间，终于实现了他的梦想。

**量子力学史** 1923年，德布罗意在他的博士论文中提出光的粒子行为与粒子的波动行为应该是对应存在的。他将粒子的波长和动量联系起来：动量越大，波长越短。这是一个引人入胜的想法，但没有人知道粒子的波动性意味着什么，也不知道它与原子结构有何联系。然而，德布罗意的假设是一个重要的前奏，很多事情由此引发。

1924年夏天，玻色提出了一种全新的方法来解释普朗克辐射定律。他把光视为一种无质量的粒子（现称为光子）组成的气体，这种气体不遵循经典的玻耳兹曼统计规律，而遵循一种建立在粒子不可区分的性质（即全同性）上的一种新的统计理论。爱因斯坦立即将玻色的推理应用于实际的有质量的气体，从而得到一种描述气体中粒子数关于能量的分布规律，即著名的玻色—爱因斯坦分布。由于在通常情况下新老理论预测到原子气体相同的行为，爱因斯坦在这方面再无兴趣，这些结果被搁置了十多年。然而，它的关键思想——粒子的全同性，是极其重要的。

从1925年到1928年的短短三年间，泡利提出了不相容原理，为元素周期表奠定了理论基础；海森堡、玻恩和约当提出了量子力学的第一个版本——矩阵力学；

薛定谔提出了量子力学的第二种形式——波动力学。在波动力学中,体系的状态用薛定谔方程的解——波函数来描述。矩阵力学和波动力学貌似矛盾,实质上是等价的。

同时期一些重要的工作还有:

- 电子被证明遵循一种新的统计规律,后来称之为费米-狄拉克统计。人们进一步认识到所有的粒子要么遵循费米-狄拉克统计,要么遵循玻色-爱因斯坦统计,这两类粒子的基本属性很不相同。

- 海森堡阐明不确定性原理。

- 狄拉克提出相对论性的波动方程,用来描述电子,解释了电子的自旋并且预测了反物质存在。

- 狄拉克提出电磁场的量子描述,建立了量子场论的基础。

- 玻尔提出互补原理,试图解释量子理论中一些明显的矛盾,特别是波粒二象性。

量子力学的创建触发了科学的“淘金热”。早期的成果有:海森堡得到了氢原子薛定谔方程的近似解,建立了原子结构理论的基础;Slater, Hartree 和 Fock 随后又提出了原子结构的一般计算技巧;London 和 Heitler 解决了氢分子的结构,在此基础上 Pauling 建立了理论化学;Sommerfeld 和泡利建立了金属电子理论的基础, Bloch 创立了固体能带结构理论;海森堡解释了铁磁性的起因;Gamow 揭示了  $\alpha$  放射性衰变的随机本性之谜。随后几年中, Bethe 建立了核物理的基础并解释了恒星的能量来源。随着这些进展,原子物理、分子物理、固体物理和核物理进入了现代物理的时代。

**量子力学** 伴随着这些进展,围绕量子力学的阐释和正确性发生了许多争论。玻尔和海森堡是倡导者的重要成员,他们信奉新理论,爱因斯坦和薛定谔则对新理论不满意。要理解产生这些混乱的原因,必须掌握量子理论的关键特征。

(1) 基本描述:波函数。系统的行为用薛定谔方程描述,方程的解称为波函数。系统的完整信息用它的波函数描述,通过波函数可以计算任意可观察量的可能值。在空间给定体积内找到一个电子的概率正比于波函数幅值的平方,因此粒子的位置分布在波函数所在的体积内。粒子的动量依赖于波函数的斜率,波函数越陡,动量越大。斜率是变化的,因此动量概率也是分布的。这样,有必要放弃位移和速度能确定到任意精度的经典图像,而采纳一种模糊的概率图像,这也是量子力学的核心。

对于同样一些系统进行同样精心的测量不一定产生同一结果,相反,结果分散在波函数描述的范围内。因此,电子特定的位置和动量没有意义。这可由不确定性原理表述如下:要使粒子位置测得精确,波函数必须是尖峰型的,然而尖峰必有很陡的斜率,因此动量就分布在很大的范围内;相反,若动量有很小的分布,波函数的斜率必很小,因而波函数分布于大范围内,这样粒子的位置就更加不确定了。

(2) 波的干涉。波相加还是相减取决于它们的相位。当波沿着几条路径从波源到达接收器,一般会产生干涉图样,比如光的双缝干涉。粒子遵循波动方程,必

有类似的行为,如电子衍射。至此,类推似乎是合理的,除非要考察波的本性。波通常认为是介质中的一种扰动,然而量子力学中没有介质,从某中意义上说根本就没有波,波函数本质上只是我们对系统信息的一种陈述。

(3) 对称性和全同性。氦原子由两个电子围绕一个核运动而构成。氦原子的波函数描述了每一个电子的位置,然而没有办法将这两个电子加以区分,因此电子交换后看不出体系有何变化,也就是说在给定位置找到电子的概率不变。概率依赖于波函数的幅值的平方,因而粒子交换后体系的波函数与原始波函数的关系只可能是下面的一种:要么与原波函数相同,要么改变符号(即乘以 $-1$ )。量子力学令人惊诧的一个发现是电子的波函数对于电子交换变号,其结果是戏剧性的:两个电子处于相同的量子态,其波函数相反,因此总波函数为零,也就是说两个电子处于同一状态的概率为 $0$ ,此即泡利不相容原理。所有半整数自旋的粒子(如电子)都遵循这一原理,称为费米子。自旋为整数的粒子(如光子)的波函数对于交换不变号,称为玻色子。电子是费米子,因而在原子中分层排列;光由玻色子组成,所以激光光线呈现超强度的光束(本质上是一个量子态)。因此,气体原子可被冷却到量子状态而形成玻色-爱因斯坦凝聚,这时体系可发射超强物质束,形成原子激光。

**争议与混乱** 量子力学意味着什么?波函数到底是什么?测量是什么意思?这些问题在早期都激烈争论过。直到1930年,玻尔和他的同事或多或少地提出了量子力学的标准阐释——哥本哈根阐释。其关键要点是通过玻尔的互补原理对物质和事件进行概率描述,调和物质波粒二象性的矛盾。爱因斯坦不接受量子理论,他一直就量子力学的基本原理同玻尔争论,直至1955年去世。

关于量子力学争论的焦点是:究竟是波函数包含了体系的所有信息,还是有隐含的因素(隐变量)决定了特定测量的结果。20世纪60年代中期,贝尔(J. S. Bell)证明,如果存在隐变量,那么实验观察到的概率应该在一个特定的界限之下,此即贝尔不等式。多数小组的实验结果与贝尔不等式相悖,他们的数据否定了隐变量存在的可能性。这样,大多数科学家对量子力学的正确性不再怀疑了。

然而,由于量子理论神奇的魔力,它的本质仍然吸引着人们的注意力。量子体系的古怪性质起因于所谓的纠缠态。简单说来,量子体系不仅能处于一系列的定态,也可以处于它们的叠加态。一般说来,测量处于叠加态原子的某种性质(如能量),有时得到这一个值,有时得到另一个值,至此还没有出现任何古怪。但是可以构造处于纠缠态的双原子体系,使得两个原子共有相同的性质。当这两个原子分开后,一个原子的信息被另一个共享(或者说是纠缠)。这一行为只有量子力学的语言才能解释。这个效应太不可思议,以至只有少数活跃的理论 and 实验机构在集中精力研究它,论题并不限于原理的研究,而是纠缠态的用途。纠缠态已经应用于量子信息系统,也成为量子计算机的基础。

量子力学直接导致了现代固体物理学这门重要学科的诞生,该学科在过去的30年中得到进一步发展,形成了一门内容更丰富、体系更完备的学科,即凝聚态物理学。冯端院士的巨著《凝聚态物理学》对该学科的内涵与外延给予了极为详细的

描述。凝聚态物理的研究是从系统的凝聚开始的,对于通常的三维系统,存在所谓的序参量。当温度从高温向低温变化时,序参量出现,液态转变为周期性结构的固态,磁矩呈现铁磁或反铁磁的有规律排列,即使具有排斥相互作用的电子也呈现库珀对或 Wigner 晶格。绝对零度下,最低能态决定系统的构型;有限温度下,自由能最小决定系统的序参量。

固体物理向凝聚态物理的扩展是科学技术发展的必然趋势。固体物理对固体结构或性质认识的简单观点是:原子核在三维空间呈周期性排列的晶格结构,巡游电子在晶格势场下运动。固体的热现象主要由晶格振动来描述,而电现象主要由电子的运动来描述。因此,晶格动力学和能带论构成了固体物理的核心内容。随着人造结构材料和加工技术的发展,固体物理在如下两个方面遇到了挑战:一是固体向小的领域发展,周期性晶格结构被破坏,布洛赫(Bloch)定理失效,小体系的原子或电子数可数,涨落效应明显,统计物理失效,需要发展新的理论,因此导致了纳米科学的诞生;二是固体向复杂结构体系发展,如强关联体系,出现了一些重要物理现象和性质,如高温超导、巨磁电阻(GMR)或庞磁电阻(CMR)等,在这类体系中,不仅要考虑电子-晶格相互作用,更重要的是要考虑电子-电子、电子-声子、电子-轨道、自旋-轨道相互作用等。特别地,轨道结构的作用在复杂化合物中会明显起来,如 CMR 中轨道劈裂导致材料的半金属特征。为迎接这些挑战,人们需要发展现有的实验手段和理论方法,不断设计新的实验仪器、建立新的理论图像。

# 第一章

## 低维系统中的量子现象

低维系统是指微观自由粒子(如电子、声子、光子等)在三维空间中运动受到限制的系统。室温下,大部分固体材料的电子平均自由程在纳米级范围内,因此低维系统与材料学上所说的纳米系统有密切联系。随着新的低维材料及其新现象的不断出现,设计新的高科技电子器件具有潜在性和可行性,低维量子体系已引起了人们巨大的兴趣,并已成为凝聚态物理的一个重要分支。

低维量子系统的一个范例是纳米级的半导体体系或半导体纳米结构,它由在原子量级上被设计改变成分的半导体合金组成。固体物理中并不包含由少数原子、分子组成的团簇实体,但是现今在低维凝聚态领域最令人兴奋的发展中,几乎都包含分子的应用,甚至是生命科学中的许多大分子体系,亦呈现出丰富的电、磁、光功能性质,这种扩展显然模糊了学科之间的界限。另外,对于其他物理系统,如高温超导体,减少其维度的效应也非常必要,因此也被视为低维系统。低维物理所覆盖的许多领域,都是目前最热门的纳米科学和纳米技术的内容。

低维系统之所以引起人们的极大兴趣,是因为量子效应在低维系统中导致了一系列新现象,如著名的量子霍尔效应、高温超导现象等。当然,低维系统的研究也具有基础物理的意义,一些高维难解的问题在低维情况下可以给出解析解,这对发展物理理论和方法具有重要意义。

由于边界的存在,即使在三维系统中,粒子的运动仍然会受到限制。例如:在一根电线中的电子,电线中带正电的离子产生一个电场,阻止电子逃逸。实际上,我们可以认为电子处于电线表面的硬壁电势中,如果仔细研究电子的状态,则需要求解硬壁势场中的薛定谔方程,会发现电子的本征态是一个沿电线的平面波函数与垂直传播方向的定域波函数的乘积。一系列低能量本征态,具有相同的传播本征波函数,仅仅是平面波因子改变了。这表明,在这些传播方向的运动是冻结的,只剩下沿电线的运动。

碳的家族能够充分体现不同维度的凝聚态系统,如图 1.1 所示。碳原子外层有 4 个电子,正好是满壳层(8 个电子)所需电子数的一半,这决定了碳(及其同一族元素)拥有更加丰富的物理或化学性质。碳原子可以有 4 个近邻,从而达到稳定的饱和键结构,这就是金刚石;碳原子也可以有 3 个近邻,形成一种平面六角结构,剩余的一个电子态垂直于该平面,可游离,这就是石墨;石墨的平面结构不很稳定,它会像一张薄纸那样卷曲,形成管状结构,即所谓的碳管;碳管的两端可以封闭起



来,由此得到著名的  $C_{60}$  等球状结构。从物理角度来看,它们分别具有三维、二维、一维和零维特征。

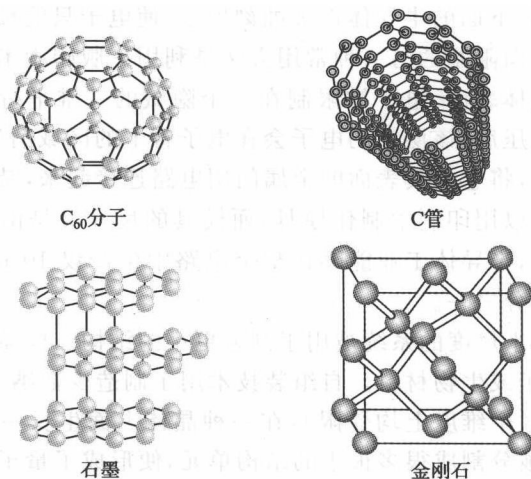


图 1.1 由碳原子构成的具有不同维度的凝聚态系统

## 第 1 节 低维系统的构成

低维系统可以分为两大类:一类是自然存在或人工合成的低维物质,主要是大分子,如  $C_{60}$  可视为零维,碳管视为一维,石墨则具有二维特征,导电高分子(如聚乙炔、聚噻吩、聚苯胺等)具有准一维结构;第二类是人造低维结构,如 GaAs/GaAlAs 的界面聚集了一层电子气,电子在垂直界面方向是受限的,但在沿界面的二维方向可自由运动,因此该层电子气可视为二维系统。构造低维结构最常用的方法有两种:一是物理上的从上到下切割方法,即采用光刻等手段将系统的尺寸逐步缩小;二是化学上的从下到上生长方法,即借助原子力显微镜等手段将原子堆积在一起从而人工合成原子或分子团簇。由于半导体材料独特的物理性质和应用上的重要性,当前,借助半导体异质结或量子阱形成的低维系统是一个重要的研究领域。在高真空的分子束外延仪器上,可生长组分半导体合金。例如:均质合金  $Ga_{1-x}Al_xAs$  由砷、铝和镓原子组成,当  $x=0$  和  $x=1$  时,分别为晶体半导体 GaAs 和 AlAs,各有明确的键结构。由  $Ga_{1-x}Al_xAs$  合金产生的微小电势,虽然不具有严格的周期性,但可被认为是介于 GaAs 和 AlAs 之间的键结构。当浓度  $x$  改变时,价带和导带之间的带隙也随之改变。 $Ga_{1-x}Al_xAs$  的电子结构可通过在晶体生长过程中改变铝的参数  $x$  形成,这将产生组分合金,具有  $Ga_{1-x(r)}Al_{x(r)}As$  的形式,浓度  $x(r)$  随空间变化,从而生成一个空间变化的导带底。因此,通过掺杂、光激发或电子注入等加入导带中的电子,会遇到一个位置相关的势场。通过适度改变  $x$ ,我们可以设计限制势,使电子在低于三维的空间中运动。

尽管如此,实际只能在一个方向上改变  $x$ ,最好的结果是产生一个二维系统。完成一个半导体低维结构的构造,经常需要采用平版印刷术,在预先准备的表面上