

# 量子调控物理学

金石琦 © 著



科学出版社

# 量子调控物理学

金石琦 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书系统地论述量子调控物理的理论、实验及应用技术。全书共 11 章。第 1 章介绍量子理论的基础知识。第 2 章介绍电磁感应透明理论和实验的基础知识,奠定了量子调控物理的理论基础和技术手段。第 3 章研究对真实的原子、分子进行量子调控的条件和技术方案。第 4 章对微纳领域的量子点、量子阱、量子线和量子环实施量子调控。第 5 章介绍受限小量子体系的行为及调控。第 6 章介绍光子晶体带隙调控。第 7 章是关于压缩光的测量及应用。第 8 章研究量子调控物理应用到实践中的可控单光子源及测量技术和设备。第 9、10 章介绍量子调控在激光物理方面的应用——光学参量放大和飞秒激光技术及应用。第 11 章介绍新型量子调控器件应用及展望。

本书可供高等院校与量子调控物理相关专业的高年级本科生、研究生、教师阅读,也可供航天等领域的科学研究人员及工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

量子调控物理学/金岩琦著. —北京:科学出版社,2015  
ISBN 978-7-03-044778-4

I. ①量… II. ①金… III. ①量子论 IV. ①O413

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第123680号

责任编辑:任静 / 责任校对:杜子昂

责任印制:张倩 / 封面设计:迷底书装

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>

文林印务有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2015年6月第一版 开本:720×1000 1/16

2015年6月第一次印刷 印张:17 3/4

字数:344 000

定价:80.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 前 言

量子调控就是通过各种科学的方法去干预分子、原子等的运动规律，从而使人们更加深入、彻底地认识微观世界。人们掌握了量子调控的手段和方法就可以更好地按需设计原子和分子的性能。

微观世界的量子力学是在测不准原理和波粒二象性的基础上发展起来的，微观粒子不能直接用位置和动量（或速度）的方式来描述，量子体系的状态是用波函数来描述的。如果用宏观的方法测量量子体系的状态，会破坏其内在的平衡。微观世界有拒他性，非常排斥宏观世界的干预。

量子调控是当今世界的科学前沿，是信息产业、智能装备等未来战略产业发展的先导学科，具有重要的经济价值和社会价值。量子调控物理学用量子理论知识开发并设计新材料、构筑新的结构，用外场条件和技术手段对物态的量子现象进行调控，突破现代经典科学的极限，建立全新的量子调控技术和全新型的量子器件。

人类已经掌握了物质的构造，即物质的结构单元，产生了探测、操控或变革单独的电子、光子、原子的方法，如扫描隧道显微镜、磁共振技术等。科学家已经逐步掌握量子调控技术，验证了物理学的规律，这需要精密的实验做支撑。探索量子世界的重要手段是创造综合极端条件，改变温度、压强、磁场等基本的物理参数来进行研究，从而实现多种丰富的物理现象，解决当前科学技术当中的难题，合成新材料，发现新现象，开辟新领域。

华东理工大学龚尚庆教授、同济大学王占山教授、中国科学院上海应用物理研究所黎忠研究员给本书提出诸多宝贵意见，在此深表感谢。

由于作者水平有限，不妥之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

金石琦

2014年12月23日于上海

# 目 录

## 前言

第 1 章 量子论简介	1
1.1 量子论的基础	1
1.1.1 量子态	1
1.1.2 波动方程	2
1.1.3 双缝实验	3
1.1.4 光电效应	4
1.1.5 波粒二象性	4
1.1.6 波粒二象性的本质： 概率	6
1.2 测不准原理	6
1.2.1 位置和动量的测不准 关系	6
1.2.2 原子内部的分立能级 结构	7
1.2.3 能量和时间的测不准 关系	8
1.2.4 谐振子基态能量	9
1.2.5 真空态起伏	10
1.2.6 量子噪声	10
1.3 量子测量——可测的 波函数	11
1.3.1 力学量的测量	11
1.3.2 测量波函数实验	12
1.3.3 制备横向波函数	13
1.3.4 弱测量	14
1.3.5 零动量光子的筛选	14
1.3.6 量子态的直接测量	14
1.4 量子跃迁	15
1.4.1 电子跃迁	15

1.4.2 光子螺旋度	16
1.4.3 双光子及多光子吸收 跃迁	17
1.4.4 分子量子跃迁	17
1.4.5 跃迁概率	18
1.4.6 偶极跃迁	18
1.5 量子相干态	19
1.5.1 光场模	19
1.5.2 相位因子算符	19
1.5.3 量子相干和退相干	20
1.5.4 量子相干态叠加	21
1.5.5 量子相干态拉比振荡	21
1.6 量子信息	22
1.6.1 量子测量	22
1.6.2 量子态密度	23
1.6.3 量子纠缠态	23
1.6.4 量子态非克隆	24
1.6.5 量子态超空间转移	25
1.6.6 量子门	25
参考文献	25
第 2 章 电磁感应透明	27
2.1 非线性光学简介	27
2.1.1 极化矢量	27
2.1.2 非线性极化率	28
2.1.3 布里渊散射	31
2.1.4 受激拉曼散射	32
2.1.5 Kramers-Kronig 色散关系	34
2.2 电磁感应透明基本原理	35
2.2.1 电磁感应透明基本条件 假设	35

2.2.2	二能级原子系统与 缀饰态 .....	37	2.5.3	四波混频 .....	68
2.2.3	$\Lambda$ 型三能级系统的电磁 感应透明 .....	38	2.5.4	三个控制激光场的四波 混频 .....	69
2.2.4	V 型系统的电磁感应 透明 .....	41	2.5.5	输出相同模式光波 .....	70
2.2.5	密度矩阵 .....	44	2.6	电磁感应透明的应用 .....	72
2.2.6	群速度色散与自相位 调制 .....	46	2.6.1	电磁感应透明光速减慢 实验 .....	72
2.3	无粒子数反转激光放大 .....	47	2.6.2	X 射线腔内核共振 .....	74
2.3.1	三能级 $\Lambda$ 型无粒子数 反转光放大 .....	47	2.6.3	光学双稳态 .....	76
2.3.2	单色场驱动 $\Lambda$ 型三能级 原子系统无粒子数反转 激光放大 .....	49	2.6.4	快速开关 .....	77
2.3.3	双色场驱动 V 型三能级 原子系统无粒子数反转 激光放大 .....	51	2.6.5	高效非线性频率转换 .....	78
2.3.4	四能级原子系统无粒 子数反转激光放大 .....	52	参考文献 .....	81	
2.3.5	锂蒸气电磁感应透明 实验 .....	55	第 3 章	量子相干调控原子分子 .....	84
2.4	电磁感应透明无吸收的 折射率增强 .....	57	3.1	量子相干调控原子 .....	84
2.4.1	$\Lambda$ 型三能级原子系统 无吸收折射率增强 .....	57	3.1.1	内部电子运动状态 .....	84
2.4.2	双 $\Lambda$ 型三能级原子系统 无吸收相干控制折射率 .....	59	3.1.2	原子电子态的表征与 调控 .....	86
2.4.3	无吸收色散 .....	62	3.1.3	时间域和空间域的电子 运动状态 .....	87
2.4.4	真空感应相干无吸收 折射率增强 .....	63	3.1.4	量子态相干操控的原子 相干和干涉效应 .....	89
2.5	四能级系统及四波混频 .....	65	3.1.5	原子相干效应阻止 退相干 .....	90
2.5.1	四能级原子系统的 暗态 .....	65	3.2	关联电子态和新型光信息 载体 .....	91
2.5.2	双暗态共振增强克尔 非线性效应 .....	67	3.2.1	相干调控关联电子态 .....	91
			3.2.2	量子比特 .....	93
			3.2.3	量子门和相位量子 比特 .....	94
			3.2.4	Fano 量子相干竞争 效应 .....	97
			3.2.5	新型量子信息载体 .....	99
			3.3	量子相干调控分子 .....	99
			3.3.1	单分子能级、波函数的 调控 .....	99

3.3.2	单分子-电极体系中的量子输运特性	101	4.2.1	量子阱形态	129
3.3.3	分子体系与环境间相互作用	102	4.2.2	量子阱能级结构和跃迁光谱	130
3.3.4	调控分子尺度物质的结构	105	4.2.3	量子阱霍尔效应	132
3.4	光电转化过程中电子转移和能量传递	106	4.2.4	调控量子阱光学特性	133
3.4.1	分子耦合量子态的制备	106	4.2.5	量子阱非线性效应	133
3.4.2	分子量子态输运特性	108	4.3	量子线	134
3.4.3	电荷运输的多体量子特性	109	4.3.1	量子线原子结构	134
3.4.4	分子尺度上的量子表征	111	4.3.2	量子线自旋效应	136
3.4.5	分子尺度上高分辨检测与操纵技术	112	4.3.3	量子线光学特性	137
3.5	调控光谱机制	113	4.3.4	量子线极化效应	138
3.5.1	荧光	113	4.3.5	量子线阵列集合	140
3.5.2	线宽压窄和谱线压缩	114	4.4	量子环	141
3.5.3	边带影响	115	4.4.1	量子环电子能级结构	141
3.5.4	荧光淬灭	116	4.4.2	量子环自旋效应	143
3.5.5	荧光谱线增强	117	4.4.3	量子环能谱特性	145
	参考文献	118	4.4.4	量子环非线性 AB 效应	146
第 4 章	量子点、量子阱、量子线、量子环	120	4.4.5	量子环阵列集合	148
4.1	量子点	120	4.5	电子输运特性	148
4.1.1	量子点形态	120	4.5.1	量子点的电子输运特性	149
4.1.2	量子点能级结构和跃迁光谱	121	4.5.2	晶格应变对电子输运特性的影响	150
4.1.3	自旋效应	122	4.5.3	量子阱的电子输运特性	150
4.1.4	光学特性	123	4.5.4	量子线的电子输运特性	151
4.1.5	量子点非线性效应	126	4.5.5	量子环和量子盘	151
4.1.6	量子点的应用	128		输运特性	151
4.2	量子阱	129		参考文献	153
			第 5 章	受限小量子体系的行为及调控	156
			5.1	小量子体系特定构型和性能	156
			5.1.1	物理方法特定构型调控	156

5.1.2	磁场调控小量子体系	158	6.2.4	自旋弛豫	180
5.1.3	纳米尺度的自旋关联	158	6.2.5	自旋去相位	181
5.2	外场调控小量子体系	160	6.3	光子晶体带隙	182
5.2.1	小量子体系的量子输运特性	160	6.3.1	光子晶体带隙的特性	182
5.2.2	实时量子反馈和光子数稳定态	162	6.3.2	缺陷光子晶体的能带结构	184
5.2.3	光与物质交换动量的调控	163	6.3.3	光子晶体微谐振腔带隙	185
5.3	调控分子体系的自旋态和磁学性质	165	6.3.4	光子晶体光纤带隙	186
5.3.1	分子体系的自旋波	165	6.4	光子晶格带隙调控	187
5.3.2	强耦合与弱耦合	165	6.4.1	电场和磁场调控光子带隙	187
5.3.3	自旋极化磁学性质	166	6.4.2	机械调控光子带隙	188
5.3.4	耦合体系与环境间相互作用	168	6.4.3	光调控光子带隙	189
5.4	小量子体系的光谱特性	169	6.4.4	温度调控光子带隙	190
5.4.1	小量子体系的光谱特性	169	6.4.5	特定气体调控光子带隙	190
5.4.2	前驱波光谱特性	170		参考文献	190
5.4.3	调控振幅和相位的堆叠前驱波	171			
	参考文献	173			
第 6 章	光子晶体带隙调控	175	第 7 章	压缩光技术及应用	192
6.1	晶格特性	175	7.1	光场压缩态	192
6.1.1	晶格中自由运动的电子状态	175	7.1.1	压缩态的定义	192
6.1.2	二维蜂窝晶格	176	7.1.2	正交相位光场压缩态	193
6.1.3	三维柱形晶格	176	7.1.3	光子数压缩态	193
6.1.4	一维光晶格	177	7.1.4	光强度差压缩态	195
6.2	能带理论	178	7.2	压缩态光学测量	196
6.2.1	布洛赫 (Bloch) 本征态波函数	178	7.2.1	亚散粒噪声光学测量	196
6.2.2	包络外场调控	179	7.2.2	强度差压缩光微弱信号测量	197
6.2.3	电子-声子散射	179	7.2.3	双光子测量压缩态	198
			7.3	压缩光的应用	200
			7.3.1	量子成像	200
			7.3.2	自旋关联压缩降噪	201
			7.3.3	用压缩态光实施光通信	202
			7.3.4	用压缩态光测量运动目标	203



7.3.5 用压缩态光探测微芯片 固态量子系统 .....	205	9.2.2 共线相位匹配光学参量 放大 .....	230
参考文献 .....	208	9.2.3 非共线相位匹配光学 参量放大 .....	230
<b>第 8 章 可控单光子源及探测</b> .....	209	9.2.4 压缩相干态光学参量 放大 .....	231
8.1 可控单光子源 .....	209	9.3 光学参量啁啾脉冲放大 装置 .....	232
8.1.1 单光子源特性 .....	209	9.3.1 小型化光学参量啁啾 脉冲放大装置 .....	232
8.1.2 偏振调控高频单光 子源 .....	210	9.3.2 增强型谐振腔光学参量 啁啾脉冲放大装置 .....	233
8.1.3 芯片单光子源 .....	212	9.3.3 超宽带光学参量啁啾 脉冲放大 .....	234
8.2 单光子测量 .....	213	9.4 光学参量啁啾脉冲放大 装置的稳定性 .....	235
8.2.1 单光子探测 .....	213	9.4.1 抑制光学参量啁啾脉冲 放大装置抖动 .....	235
8.2.2 超精细测量 .....	214	9.4.2 主动同步信号脉冲与 泵浦脉冲 .....	236
8.3 可控单光子的应用 .....	215	9.4.3 长期稳定的高功率光学 参量啁啾脉冲放大器 .....	237
8.3.1 单光子水平控制光 开关 .....	215	参考文献 .....	239
8.3.2 量子点内操控单 量子态 .....	217	<b>第 10 章 飞秒激光技术及应用</b> .....	241
8.3.3 单光子调控微机械 共振 .....	217	10.1 飞秒激光器的关键技术 .....	241
8.4 单光子测量的应用 .....	218	10.1.1 克尔透镜锁模 .....	241
8.4.1 超精细分辨 .....	218	10.1.2 半导体可饱和吸收镜 锁模 .....	242
8.4.2 非线性效应调控 .....	219	10.1.3 飞秒激光谐振腔 .....	242
8.4.3 单光子控制的全光 路由测量 .....	220	10.1.4 色散补偿 .....	243
参考文献 .....	222	10.2 光纤飞秒激光器 .....	244
<b>第 9 章 光学参量放大</b> .....	224	10.2.1 光纤 .....	244
9.1 光学参量振荡 .....	224	10.2.2 光纤锁模启动 .....	246
9.1.1 光学参量振荡的基本 原理 .....	224	10.2.3 飞秒脉冲形成 .....	247
9.1.2 周期极化 .....	226	10.3 飞秒脉冲激光整形技术 .....	248
9.1.3 可调控光学参量 .....	227		
9.1.4 参量带宽 .....	227		
9.2 光学参量啁啾脉冲放大 .....	228		
9.2.1 光学参量啁啾放大的 基本原理 .....	228		

10.3.1	光谱的展宽和脉冲 压缩 .....	248	11.1.2	低维光电器件 .....	260
10.3.2	白光产生与飞秒脉冲 压缩 .....	249	11.1.3	探测器件 .....	261
10.3.3	频域调制 .....	250	11.2	微致动器 .....	262
10.4	飞秒脉冲激光测量技术及 应用 .....	251	11.2.1	可控光开关 .....	262
10.4.1	相位测量 .....	251	11.2.2	微致动器的分类 .....	264
10.4.2	相位相干的测量 .....	252	11.2.3	微致动器在微光机电 系统中的应用 .....	264
10.4.3	太赫兹波的探测及 应用 .....	254	11.3	传感器及应用 .....	265
10.4.4	双色飞秒激光脉冲产生 太赫兹波 .....	255	11.3.1	光纤传感器 .....	265
10.4.5	波导飞秒激光太赫兹 脉冲 .....	256	11.3.2	光电传感器 .....	266
参考文献	.....	257	11.3.3	激光传感器 .....	267
第 11 章	新型量子调控器件应用及 展望 .....	259	11.3.4	偏振光导航 .....	267
11.1	量子器件 .....	259	11.4	微腔型量子器件展望 .....	268
11.1.1	低维电子输运器件 .....	259	11.4.1	微型腔和腔量子电动 力学 .....	269
			11.4.2	二维腔型分子器件 .....	269
			11.4.3	自旋量子腔 .....	271
			11.4.4	多腔量子器件及应用 .....	272
			参考文献	.....	273

# 第 1 章 量子论简介

量子论又称量子理论，是现代物理学的两大基石之一。量子论提供了新的关于自然界的表述方法和思考方法。量子论揭示了微观物质世界的基本规律，为原子物理、量子光学、强场物理、固体物理、凝聚态物理学、核物理学和粒子物理学等奠定了理论基础。它能很好地解释原子结构、原子光谱的规律性、化学元素的性质、光的吸收与辐射、微观量子调控等。本书用量子论的观点阐述量子调控的理论和技术应用，本章简要介绍量子论的基本知识。

## 1.1 量子论的基础

量子论中的波实际上是一种概率，波函数  $\Psi(x,t)$  表示微观粒子在某时刻  $t$  某地点  $x$  出现的概率。微观领域测量存在不确定的关系，任何一个微观粒子的位置和动量不可能同时准确测量，要准确测量其中的一个，则另一个将是不确定的。这就是测不准原理。测不准原理和波函数概率奠定了量子论诠释的物理基础。

### 1.1.1 量子态

微观粒子运动的状态称为量子态，波函数  $\Psi(x,t)$  是描述量子态的数学方法。量子态由一组量子数表征，描述每个微观粒子的量子态的这组量子数的数目等于粒子的自由度。例如，定义一个电子在原子中的量子态  $\{n, l, m_l, m_s\}$ ， $n$  是主量子数， $l$  是轨道角动量的量子数， $m_l$  是轨道角动量的量子数投影， $m_s$  自旋量子数投影。

对微观粒子运动的系统测量某个物理量时，这个物理量的值是个定值，对应的状态就是本征态。本征态可作为基矢  $\Phi_{nlm}$ ，这些本征态基矢构成一个集合，任意量子态可向这个集合的基矢进行展开，其展开系数的平方就是系统处于该本征态上的概率。

氢原子本征态对应的波函数为

$$\Phi_{nlm}(r, \theta, \phi) = R_n(r) Y_{lm}(\theta, \phi) \quad (1.1)$$

式中， $R_n(r)$  是径向波函数； $Y_{lm}(\theta, \phi)$  是球谐函数； $n = 1, 2, 3, \dots, l = 0, 1, \dots, n-1$ ， $m = -l, \dots, l-1, l$ 。

氢原子系统中一般波函数  $\Psi(x,t)$  向氢原子的本征波函数基矢展开，即

$$\Psi(x,t) = \sum_{i=1}^n C_i \Phi_{nlm}(r, \theta, \phi) = \sum_{i=1, j=0, k=-m}^{nlm} C_{ijk} R_n(r) Y_{lm}(\theta, \phi) \quad (1.2)$$

式中,  $C_{ijk}$  是展开系数。  $|C_{ijk}|^2$  是波函数  $\Psi(x, t)$  处于本征态  $\Phi_{nlm}(r, \theta, \phi)$  的概率, 则

$$\sum_{i=1}^n C_i^2 = 1 \quad (1.3)$$

如  $|C_{100}|^2$  是波函数  $\Psi(x, t)$  处于本征态  $R_{10}(r)Y_{00}(\theta, \phi)$  的概率。波函数  $\Psi(x, t)$  (式 (1.2)) 中没有包括电子自旋态。

一维简谐振子的归一化本征波函数为

$$\Psi_n(x) = N_n \exp\left(-\frac{1}{2}\alpha^2 x^2\right) H_n(\alpha x) \quad (1.4)$$

式中, 归一化常数为

$$N_n = [\alpha / \sqrt{\pi} 2^n n!]^{\frac{1}{2}}$$

自由粒子运动是平面波, 对应的平面波函数为

$$\Psi(\mathbf{r}, t) = A \exp\left[\frac{i}{\hbar}(p \cdot \mathbf{r} - Et)\right] \quad (1.5)$$

式中,  $A$  是复振幅;  $\mathbf{r}$  是空间坐标;  $t$  是时间;  $p$  是自由粒子的动量, 其运动方向不变, 是常矢量;  $E$  是自由粒子的能量;  $\hbar$  是普朗克常量  $h$  除以  $2\pi$ 。与能量  $E$  相联系的是频率,  $\nu = E/h$ , 与动量相联系的是波长,  $\lambda = h/p$ 。自由粒子运动的平面波函数也可表示成

$$\psi(\mathbf{r}, t) = A \exp[i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)] \quad (1.6)$$

式中,  $k$  是波矢;  $\omega = 2\pi\nu$  是角频率。

### 1.1.2 波动方程

数学表达的波动方程为

$$\nabla^2 \Psi(x, t) - \frac{1}{\nu^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \Psi(x, t) = 0 \quad (1.7)$$

式中,  $\Psi(x, t)$  是描述波动的波函数;  $\nabla$  是拉普拉斯算符;  $\nu$  是波动传播的速度;  $\mathbf{x}$  是空间位置;  $t$  是时间。

平面波  $\psi(x, t)$  的形式为

$$\psi(x, t) = A \exp[i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{x} - \omega t)] \quad (1.8)$$

式中,  $i$  是虚数单位;  $\mathbf{k}$  是波矢;  $\omega$  是角频率;  $A$  是复值的振幅标量。取复函数的实部, 则可得到其物理意义, 即

$$\text{Re}\{\psi(x, t)\} = |A| \cos(\mathbf{k} \cdot \mathbf{x} - \omega t + \arg A) \quad (1.9)$$

横波的振幅矢量垂直于波矢, 如在各向均匀的介质中传播的电磁波。纵波的振幅矢量平行于波矢, 如在气体或液体中传播的声波。

介质内传输的波, 角频率与波矢之间的关系用函数  $\omega(\mathbf{k})$  表示, 称为介质的色散关系。对于介质, 波的相速度是

$$v_p = \frac{\omega}{|k|} \quad (1.10)$$

群速度是

$$v_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} \quad (1.11)$$

空间的一个局部区域运行的波，近似于平面波的波动。在一个均匀介质内，波的传播距离超过波长，在几何光学的极限内，对应于近似平面波三维空间里，平面波是一种波动。平面波的波前（相位为常数的平面）是相互平行的无限宽广的平面，其传播方向垂直于波前。

### 1.1.3 双缝实验

量子力学的双缝实验是一个测试量子物体如光或电子等微观粒子的波动性质的实验。双缝实验所需的基本仪器设置很简单。图 1.1 为光的双缝实验，在一块内部刻出两条狭缝的不透明挡板的后面摆设了照相底片或某种接收屏幕，记录通过狭缝的光波的数据。光波的波动性质使得通过两条狭缝的光波互相干涉，在接收屏幕上出现相间的明亮条纹和黑暗条纹，这就是双缝实验著名的干涉图案。

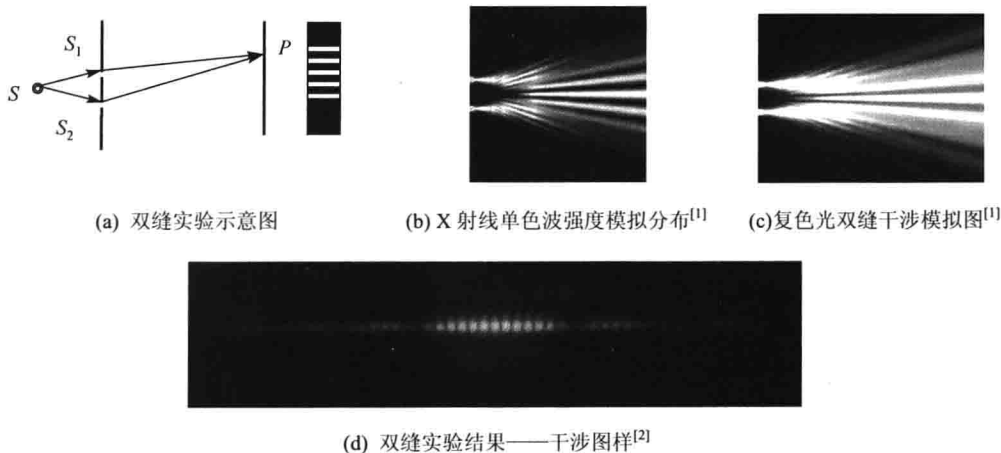


图 1.1 光的双缝实验

假如光波是以粒子的形式从光源移动至接收屏幕，那么根据经典理论，抵达接收屏幕某一位置的粒子数目应该等于在路途中通过上狭缝的粒子数量与通过下狭缝的粒子数量的总和。也就是说，在接收屏幕  $P$  的任意位置，其明亮度应该等于遮掩上狭缝后的明亮度与遮掩下狭缝后的明亮度的总和。但是，实验者发现，当两条狭缝都不被遮掩时，接收屏幕某些位置会比较明亮，某些位置会比较黑暗。这个图案只能用波动的相干增长和相干消减来解释，而不是粒子数量的简单加法。

微观粒子的双缝实验有力地说明了粒子具有波动性质。图 1.1 是微观粒子双缝实验

示意图。图(a)中,  $S$  是粒子源,  $S_1$  和  $S_2$  是两个狭缝,  $P$  是接收屏幕, 接收屏幕上显示干涉条纹。图(b)中, 狭缝宽  $2.5\mu\text{m}$ , 两狭缝间距  $10\mu\text{m}$ , 传播距离  $500\text{mm}$ , 能量  $E=5\text{keV}$ , X 射线单色波强度模拟分布<sup>[1]</sup>。图(c)中, 复色光能量  $E_1=5\text{keV}$ ,  $E_2=7.5\text{keV}$ ,  $E_3=10\text{keV}$ ,  $E_4=12.5\text{keV}$ ,  $E_5=15\text{keV}$ <sup>[1]</sup>。图(d)是双缝实验结果——干涉图样。

干涉现象是波动性最显著的特点。

### 1.1.4 光电效应

光电效应是指物质吸收光子激发出自由电子的行为。如图 1.2 所示, 当阴极金属表面在特定的光辐照作用下, 阴极金属会吸收光子并发射电子, 发射出来的电子称为光电子, 在外加电压作用下光电子会向阳极运动, 在电路中形成回路电流。

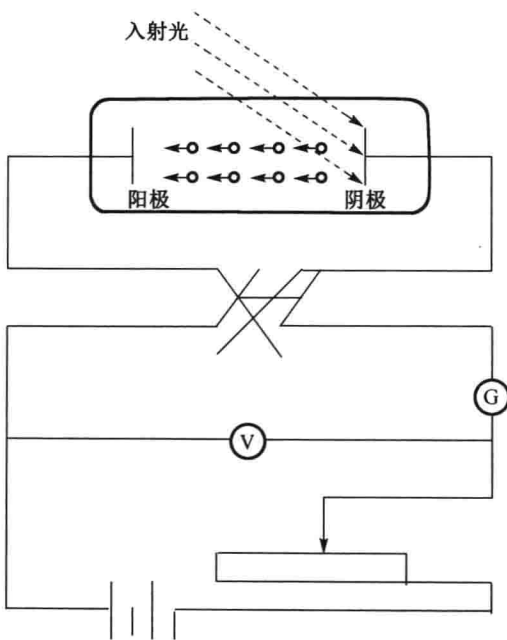


图 1.2 光电效应实验简图

$$\frac{1}{2}mv^2 = h\nu - A \quad (1.12)$$

式 (1.12) 是光电效应方程。式中,  $m$  是电子质量;  $v$  是电子速度;  $\nu$  是入射光频率;  $h$  是普朗克常量;  $A$  是电子离开阴极金属的脱出功。

入射光的波长需小于某一临界值 (相当于光的频率高于某一临界值) 时方能发射电子, 即要产生电流, 必须使式 (1.12) 中  $\frac{1}{2}mv^2 > 0$ , 即有  $h\nu - A > 0$ ,  $\nu \geq A/h$ , 此时的临界值即为截止频率  $\nu_0$  及对应的截止波长  $\lambda_0$ 。临界值取决于阴极的金属材料, 而发射电子的能量取决于光的波长 (或频率) 而非光的强度, 当脱出功  $A$  一定时,

改变入射光的频率  $\nu$  直至小于截止频率  $\nu_0$ , 即使增强入射光强度, 电路中仍没有电流, 即此时没有光电子从阴极金属中飞出, 或者说电子没有足够的动能从阴极金属中脱出。如果入射光的频率  $\nu$  大于截止频率  $\nu_0$ , 即使减弱入射光的强度, 仍有光电子从阴极金属表面射出。只要光的频率高于金属的极限频率, 光的亮度无论强弱, 电子的产生几乎都是瞬时的, 不超过  $10^{-9}\text{s}$ 。

### 1.1.5 波粒二象性

普朗克提出辐射场中的能量是量子化的。光是由大小为  $h\nu$  的能量子一份一份组成的,  $h$  是普朗克常量。每一个光量子的能量  $E$  与辐射场的频率  $\nu$  的关系是

$$E = h\nu \quad (1.13)$$

光以光速  $c$  在空间（确切地说是真空中）中传播，光子的动量  $P$  与能量  $E$  有如下关系

$$P = \frac{E}{c} \quad (1.14)$$

因此得到光子的动量  $P$  与辐射场  $E$  的波长  $\lambda$  关系是

$$P = \frac{h}{\lambda} \quad (1.15)$$

现在用光量子的概念解释 1.1.4 小节提到的光电效应实验。当光子  $h\nu$  射到阴极金属表面时（图 1.2），一个光子的能量  $h\nu$  立即被一个电子吸收，只有当入射光频率足够大时，即入射频率大于截止频率  $\nu_0$  时，电子才有可能克服脱出功  $A$  的能量而逃逸出金属表面；逃逸出表面后，电子的动能由式（1.12）表示。

用波动观点来解释光波的干涉。光波的波前同时从两个狭缝出来，当波前传播至接收屏幕的某一点时，两个光波的叠加决定了光波会在那一点被观测到的强度。在接收屏幕上观察到的明亮条纹，是由光波的相干增强所致，当一个波峰遇到另外一个波峰，会产生相干增强。黑暗条纹是由光波的干涉相消造成的，当一个波峰遇到另外一个波谷，会产生干涉相消。

用粒子观点来解释。光子的量子行为可以用概率波描述，当概率波的波前传播至接收屏幕的某一点时，两个概率波的叠加决定了光子会移动到那一点的概率。更详细地说，两个概率波的概率幅相加后，取绝对值平方，即为概率。经过累积许多光子后，可以在接收屏幕观测到一系列的条纹，单色光是明暗相间的条纹，复色光时则是彩色条纹。

德布罗意提出，与具有一定能量  $E$  及动量  $P$  的粒子相联系的物质波的频率  $\nu$  及波长  $\lambda$  分别是

$$\nu = \frac{E}{h} \quad (1.16)$$

$$\lambda = \frac{h}{P} \quad (1.17)$$

物质粒子的波动性与光有相似之处，普朗克常量  $h$  是个很小的量，实物粒子的波长实际上很短，在一般宏观条件下，波动不会很显著地表现出来，粒子特性突出。随着空间尺度的缩小，直到微观领域，物质粒子的波动性会明显地表现出来。如图 1.3 所示为电子衍射实验结果，一个电子通过透镜打到屏幕上的位置是随机的，很多电子打到屏幕上时出现了衍射环，这个结果就是电子波动性的显示。

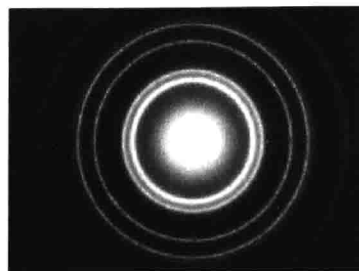


图 1.3 电子衍射实验结果

微观粒子具有波动性和粒子性的双重特点，即波粒二象性。

### 1.1.6 波粒二象性的本质：概率

波粒二象性指某物质同时具备波动的特点及粒子的特点。它是量子力学中的一个重要概念。在经典力学中，研究对象总是被明确区分为两类：波和粒子。前者的典型例子是光，后者则组成了物质。在 1.1.4 小节中，爱因斯坦提出光电效应的光量子解释，人们开始意识到光波同时具有波和粒子的双重性质。1.1.5 小节中，德布罗意提出物质波假说，他认为和光一样，一切物质都具有波粒二象性。根据这一假说，电子也具有干涉和衍射等波动现象，这被后来的电子衍射实验证实（图 1.3）。光子的随机性是按照一定的概率分布随机地落在屏幕上，这是一个概率事件。即使只有一个光子，它也会按照所有光子都在场时的情形运行，即光子本身就具有波动性，单个光子具有波动性，单个电子具有波动性，微观领域单个粒子都显示波动性。

我们对光束的观测是对诸多光子进行随机的统计性观测，是一种对全同粒子同时完成的事件的观测，即系综统计。而另一种对于光子的观测则是进行时间时序上的观测，统计方式是按时间先后顺序，长时间积累得到统计结果。两种观测的结果都是对随机事件的统计结果，即概率。1.1.3 小节中的双缝实验，一个光子从光源  $S$  出发通过  $S_1$  和  $S_2$  中某个狭缝到达屏幕上的某个位置是随机的，光子从光源  $S$  出发沿二者之间任何路径到达屏幕都是有可能存在的，我们在光源  $S$  和屏幕之间任何路径中都有可能探测到光子，这是概率表现中随机性的结果，即每一个光子的路径是随机的。但是，许多光子的不同路径综合起来就会出现概率论分布的光子路径。我们不可能确定光子的路径，但是可以确定光子路径的概率，最有可能的路径是直线传播。这正是经典理论中光的直线传播性，量子理论用光本性的意义对直线传播作概率的理解。

以氢原子为例，核外的电子绕核运动，电子离原子核的距离可以是任何可能的值，根本不可能确定电子的位置，但是可以确定地说，电子在离原子核为玻尔半径（以及其他定态轨道）处的概率最大。原子的结构是原子核和“电子云”，而不是原子和轨道运动的电子。

当用量子理论解释光和电子等微观客体时，概率是主体。

## 1.2 测不准原理

微观粒子具有波动和粒子两重性，体现在量子力学中，一个微粒的某些物理量，不可能同时具有确定的数值，其中一个量越确定，另一个量的不确定程度就越大，这就是测不准原理。

### 1.2.1 位置和动量的测不准关系

海森堡测不准原理认为：当观测电子、离子、光子等量子时，观测仪器发射的光子就能对量子产生作用，从而影响量子的运动，这样，对于量子位置的测量越准确，对于其动量的测量就越不准确，反之亦然。



海森堡于 1927 年在德国最高的学府海德堡大学进行的一场量子物理学实验，得出一个举世震惊的实验结果，并创出了“测不准原理”，海森堡因此获得了 1932 年的诺贝尔物理学奖。

“测不准原理”“不确定关系”是量子力学的一个基本原理。

一个微观粒子的某些物理量(如位置和动量,或方位角与动量矩,时间和能量等),不可能同时具有确定的数值,其中一个量越确定,另一个量的不确定程度就越大。测量一对共轭量的误差的乘积必然大于常数  $h/(2\pi)$  ( $h$  是普朗克常量),它反映了微观粒子运动的基本规律,是物理学中又一个重要原理。

在量子力学中,一个电子只能以一定的不确定性处于某一位置,同时也只能以一定的不确定性具有某一速度。可以把这些不确定性限制在最小的范围内,但不能等于零。用  $\Delta$  表示精确,  $\Delta P$  表示粒子动量的精确范围,  $\Delta x$  表示粒子位置的精确范围,动量和位置的测不准关系是

$$\Delta p \Delta x \geq \frac{h}{2\pi} = \hbar \quad (1.18)$$

海森堡测不准原理是通过一些实验来论证的。设想用一个  $\gamma$  射线显微镜观察一个电子的坐标  $x$ , 因为  $\gamma$  射线显微镜的分辨本领受到波长  $\lambda$  的限制,所用光的波长  $\lambda$  越短,显微镜的分辨率越高,从而测定电子坐标不确定的程度  $\Delta x$  就越小,所以  $\Delta x \propto \lambda$ 。但是,光照射到电子可以看成光量子和电子的碰撞,波长  $\lambda$  越短,光量子的动量就越大,所以有  $\Delta p \propto 1/\lambda$ 。在位置被测定的一瞬间,即当光子正被电子偏转时,电子的动量发生一个不连续的变化,因此,在准确测定电子位置的瞬间,关于它的动量我们就只能知道相应于其不连续变化的大小的程度。于是,位置测量得越准确,  $\Delta x = 0$ , 动量的测量就越不准确,  $\Delta p = \infty$ ; 反之,动量测量得越准确,  $\Delta p = 0$ , 位置的测量不准确范围就越大,  $\Delta x = \infty$ 。

1927 年玻尔提出著名的互补原理。他指出,在物理学理论中,大家总认为可以不必干涉所研究的对象,就可以观测该对象,但从量子理论看来却不可能,因为对原子体系的任何观测,都将使所观测的对象在观测过程中已经有所改变,因此不可能有单一的定义,平常所谓的因果性不复存在。对经典理论来说是互相排斥的不同性质,在量子理论中却成了互相补充的一些侧面。波粒二象性正是互补性的一个重要表现。测不准原理和其他量子力学结论也可以从这里得到解释。

### 1.2.2 原子内部的分立能级结构

玻尔定态假设:原子内部的电子只能在一系列分立的轨道上绕核运动,且并不辐射电磁波,在这些分立轨道上运行的电子能量是稳定的。

每一个电子运行的轨道对应着原子的一个能级,如图 1.4 所示。

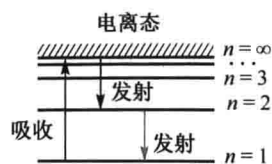


图 1.4 原子定态能级图