



信息科学与工程系列专著

量子通信原理与技术

尹浩 韩阳 等编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

工业和信息产业科技与教育专著出版资金 资助出版
信息科学与工程系列专著

量子通信原理与技术

尹 浩 韩 阳 等编著

电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是关于量子通信原理与技术的专著,对国内外近年来该领域的研究成果和作者自身研究成果进行了总结。全书由12章组成,遵循“量子力学基础—量子信息论—量子通信协议—实现量子通信所涉及的关键技术—典型量子通信系统举例—量子通信技术发展展望”的主线,详细介绍量子通信的基本原理和关键实现技术。主要内容有:绪论,量子力学基础,量子信息的基本概念,量子信息论简介,量子通信协议,量子信号产生技术,量子信号调制技术,量子信号探测技术,量子中继技术,量子网络技术,典型量子通信系统和量子通信发展展望。

本书可供从事量子信息、量子通信、信息与通信工程、密码学等专业或其他对量子通信感兴趣的科技人员参考,还可作为上述专业高年级本科生或研究生的教材或参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

量子通信原理与技术/尹浩等编著. —北京:电子工业出版社,2013.1

(信息科学与工程系列专著)

ISBN 978-7-121-18901-2

I. ①量… II. ①尹… III. ①量子力学—光通信 IV. ①TN929.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 266868 号

责任编辑:窦 昊(<http://weibo.com/douh>)

印 刷:涿州市京南印刷厂

装 订:涿州市京南印刷厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:20.5 字数:524.8 千字

印 次:2013 年 1 月第 1 次印刷

定 价:88.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

序 言

近几十年来,由于光纤和半导体激光器的发明,通信技术有了飞速的发展。光纤通信以其容量大、可靠性高而成为现阶段通信的主要手段之一。光纤通信主要采取用脉冲强度调制,并结合波分复用技术,极大地拓展了单根光纤内的信道容量。由于光信号在传输中会逐步衰减,为了达到长距离传输的目的,每隔一定距离需要通过掺铒光纤放大器组成的中继站将光信号恢复,达到长距离通信的目的。在光网络之上,还承载着电话网、移动通信网、IP 网等业务网,为社会生产、生活活动提供不同种类的通信服务,其中应用最广泛的是以 Internet 为代表的 IP 网。在 Internet 中,信息传递的基本单元称为数据包,其数据格式、同步方式、传送步骤和纠错方式等方面的约定称为协议。由路由器在通信的枢纽节点对各个方向来的数据包进行必要的分配和调度。路由器的作用是从输入数据流中分离出数据包及包头,并将其转给转发引擎以做后续处理。

在网络通信中,军用或者民用的某些部门需要保密通信,为此发展了各种密码学。从原则上讲,最理想的保密通信是量子通信。相对于量子通信而言,现在的通信可以称为经典通信。量子通信尽管在原理上、理论上已经进行了许多深入的研究,但是离实用阶段还有一定距离,直观地说,问题在于,经典通信中所有的设备、功能如何能被对应的量子通信的设备、功能代替,如光源、中继器、路由器、协议等。目前经典通信的通信量、通信速度随着“硬件”的发展不断提高,而量子通信发展的瓶颈也在于这些“硬件”。

本书全面系统地介绍了量子通信的原理和一些关键技术,如量子通信协议、量子信号产生技术、量子信号调制技术、量子信号探测技术、量子中继技术和量子通信网络技术等。与已出版的国内外有关的量子信息书籍相比较,本书结合通信的每一环节介绍量子通信的原理和技术,以及尚待解决的问题,也就是结合使用来学习,这样可以明确研究的方向,以便学习得更深入,而不是一般泛泛地从理论到理论,陷入量子力学的“陷阱”中。

前面说到,量子通信存在着一些“瓶颈”,制约着量子通信进入实用阶段。例如:

(1) 单光子源、纠缠光子源。最理想的量子通信光源是单光子源,但是目前实用的、可控制的、电激励的单光子源还没有研制成功。正如本书 6.2.1 节“单光子枪”中提到的:“到目前为止,斯坦福大学、东芝欧洲研究中心等机构都有相关研究成果发表。对于量子点光源,仅限于实验室针对于其制备、物理方面的研究。受现有技术的制约,在量子点光源的尺寸、形状一致性、光子的发射特性、光谱的单色性控制等方面都存在诸多困难。”

(2) 量子中继器。本书 9.4.1 节“单光子量子中继技术的实验验证”中提到:“在 2008 年潘建伟小组的实验中,在存储时间为 4.5 ns 的条件下,仍观察到光子 1 和 4 间的纠缠现象,上述演示说明通过纠缠交换建立远距离量子纠缠是可能的,相当于实现量子中继过程中相邻站点间的一次纠缠产生过程。一方面,此实验验证了量子中继的一般原理;另一方面,也说明了现阶段量子中继所需设备复杂,实验难度大。由于现阶段对于光与物质相互作用的操控能力有限,量子中继技术距离实际应用还有较长的路要走。”

(3) 光子存储器。电子存储器技术已经解决，现在已经做到信息的海量存储，而光子存储器连原理到原型器件都没有。在量子通信网络技术中，最关键的“硬件”是光子存储器。本书 10.1.4 节“其他量子交换技术”中提到：“光量子可控缓存器是量子时分交换实现的关键。定时的光量子缓存器可以采用光纤延时线来实现，但为了实现任意时隙间的交换过程，必须要求各个分路上的时隙是可以调节的。光量子信号存储一直是困扰量子通信网络的一大难题，现在还处于理论研究和实验室验证阶段，暂还不具备实用化条件。”

目前，中国科技界存在一种不好的倾向，要宣传一个东西好，就描写得十全十美，一点问题也没有，好像马上就能实现的样子。俗话说就是“忽悠”。本书在介绍量子通信优点的同时，又实事求是地指出了它目前存在的困难和问题，使领导和科技工作者头脑保持清醒，知道量子通信前面的路还很长，还需要我们继续努力，刻苦钻研，攻克一个个堡垒，最后才能达到顶峰。

本书的作者是以尹浩研究员为代表的一批中年和青年科技专家，他们长期致力于量子通信领域的理论研究和工程化实践工作，具有坚实的理论基础和丰富的实践经验。这支团队在繁重的科研工作间隙，基于自身的研究成果和相关素材，编著了这本理论与实践相结合的优秀著作，相信他们严谨求实的科学态度和深入浅出的写作文风会给读者留下深刻的印象，并希望本书能对我国量子通信相关知识的普及和专业人才的培养做出一定的贡献。

中国科学院院士 夏建白
于北京中国科学院半导体研究所
2012 年 7 月 2 日

前 言

20 世纪物理学史上最重要的成就之一是量子力学的创立。量子力学揭示了经典物理学规律只是量子规律在宏观条件下的近似，世界本质上是量子的，微观物理系统的状态和其动力学特性必须在量子力学下才能完整描述，而物理量的测量结果是概率的、统计性的，而不应是简单的拉普拉斯决定论的。量子力学通过一整套自洽的理论框架和数学结构，改变了我们对自然界的描述方法，也大大加深了我们对自然界本质的认识。

量子力学自诞生以来，取得了巨大的成功。许多现象通过量子力学才得以真正地被解释，奇妙的、全新的物理现象被量子力学精确地预言。量子力学的发展，还促成了半导体技术、微电子技术、激光技术、新能源技术与材料科学的出现和发展，极大地促进了人类文明的进步。

20 世纪另一项对人类社会影响深远的科技进步是信息与通信技术。信息技术的兴起以电子计算机的出现为标志。随着计算机技术的不断进步以及卫星通信、光通信和互联网的大规模应用，信息的存储、传输、处理和应用过程发生了根本性的变化，人类从此进入信息时代。正如 19 世纪热力学和蒸汽机技术相互促进的发展模式一样，在信息技术取得极大飞跃的同时，一门抽象地研究信息本质的科学——信息论也随之诞生。1948 年，香农发表了划时代的论文《通信的数学理论》，文中用精巧的数学形式将信息学初步确立为一门可以定量描述的现代科学。60 多年以来，以香农理论为核心的经典信息论经历了一个发展成熟的过程，并对信息与通信技术的进步起到了重要的指导和推动作用。

信息与通信技术、信息论和物理学存在着深刻和密切的联系。信息必须以一定的物理态作为载体才能进行表示、传输、存储和处理。因此，人们对信息的处理过程实际上都归结为对物理状态的操控。例如，信息的表示是对物理态编码和调制的过程，通信是编码物理态的远距离传输过程，信息处理是按算法要求对编码物理态进行演化控制的过程，信息的提取则是对编码物理态的解调和后续的测量过程。因此，人们对信息的利用能力紧密地依赖着我们z对物理系统的操控能力，从烽火台到无线电，从磁盘到光盘，无不深刻地揭示了这一点。随着人们对量子系统操控能力的不断增强，而既然经典物理态和量子态的性质和演化又遵循完全不同的规律，可以想见，若我们将信息编码在量子态上，信息的存储、传输和处理方式将发生根本性的变革，由此诞生了量子信息学。

量子信息学是量子力学、计算机科学、信息与通信工程学科相结合的一门交叉学科，主要包含量子通信和量子计算两个基本领域。基于编码物理系统的量子特性，如量子相干性、非局域性、量子纠缠、量子不可克隆性等，量子信息有着许多经典信息无法比拟的优势。它的发展突破了许多经典信息技术的物理极限，开拓出新的信息功能，如量子搜索、因式分解、量子保密通信和量子隐形传态等，展示了量子信息学在通信密码破译、超快计算、安全通信等方面的巨大应用前景。

我国已将以量子信息技术为核心的量子调控技术列入了《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020）》中重大科学研究计划，并在多所高校或科研院所成立了相关的研究机

构。经过十数年的发展，我国已经在光纤量子通信、空间量子隐形传态、纠缠分发和量子存储等关键技术方向取得了一批具有国际先进水平的科研成果，整体发展水平居于世界前列。虽然在现阶段，由于对量子体系操控能力的不足，量子通信系统相对于经典通信系统的很多优势还停留在实验室验证阶段，暂未能大规模地进行工程化应用。然而，信息技术逐步走向由量子力学规律支配的微观世界是大势所趋，量子通信系统的能力和适用性也正随着量子技术的发展不断提高，应用成本不断降低，世界各国已经涌现了一批以量子信息为主业的商业机构，开发了多种诸如量子随机数发生器、量子保密通信系统等产品上市销售。随着量子通信在理论和实验上的不断突破，这一领域很可能会在本世纪上半叶引起关于信息和通信技术的一场革命。

与此同时，我国在量子信息领域的学术著作还不够丰富，尤其是量子通信领域高水平参考资料比较匮乏，无法满足广大科研工作者和工程技术人员的需求。本书的作者来自量子通信领域理论研究和工程化实现的一线科研团队，具有扎实的理论基础和丰富的工程实践经验。作者力争将本书编写成为一本既着眼共性基本原理，又反映最新研究成果，并直接面向工程实践的优秀参考书籍，从而为改善国内量子通信领域高水平参考资料不足的现状做出自己的贡献。

本书主要介绍量子通信的基本原理和实现量子通信系统所需的相关关键技术。本书分 12 章，内容遵循“量子力学基础—量子信息论—量子通信协议—实现量子通信所需关键技术—典型量子通信系统举例—量子通信技术发展展望”主线，各个章节的基本内容和逻辑联系如下：

第 1 章绪论，通过回顾量子力学的发展历程，简介量子信息学的研究范畴，并概述量子通信领域的发展现状，力图使读者对本书涉及的各学科领域有一个概貌性的了解。

第 2 章量子力学基础，将主要给出与量子通信领域相关的量子力学的基本原理和光场量子化等内容，为读者进一步学习后续内容做好铺垫。

第 3 章量子信息的基本概念，将引入量子比特、量子纠缠等量子信息学中特有的信息资源，并对其特性进行总结。

第 4 章量子信息论简介，将通过与经典信息论的对比，介绍量子信息论的基本概念和主要结论，作为后续学习具体量子通信协议的信息论基础。

第 5 章将分类介绍主流的量子通信协议，并给出协议的简要安全性分析，为全书的核心章节之一。通过对比经典通信协议，力图使读者较为全面地了解量子通信的特点和优势，理解我们着力发展量子通信技术的主要驱动力来源。

第 6 章至第 10 章将分别介绍实现量子通信所涉及的关键技术，包括量子信号产生、量子信号调制、量子信号探测、量子中继和量子网络技术。

第 11 章将举例介绍不同类型的典型量子通信系统，分别针对有线信道和无线信道点对点量子通信系统，以及已公开报道的量子通信实验网络，给出了系统组成、工作原理和技术发展现状。

第 12 章将介绍量子通信领域中的一些新进展，包括现实量子通信系统的安全性问题、量子存储技术、量子复用技术、星地量子通信技术等，并试图对量子通信未来的发展进行预测和展望。

本书由尹浩研究员、韩阳博士策划编著，确定了全书的总体思路和章节内容，编写了部分内容并负责统稿。参与本书编写的人员还包括徐馥芳博士、裴昌幸教授、邹宏新副教授、

张军副教授、陈腾云副教授、朱畅华副教授、沈咏博士等。此外，在本书编写期间，陈凯教授、陈宇翱教授、任继刚副研究员、权东晓副教授、赵楠博士、唐军博士等与作者进行了多次有益的学术交流和讨论，提供了部分参考资料和写作素材，提出了很多宝贵的意见和建议，作者在此一并表示感谢。作者还要感谢电子工业出版社，特别是通信分社窦昊社长对本书按期高质量出版给予的大力支持。

由于作者水平有限，成书时间也较为仓促，书中难免出现疏漏及不足之处，恳请业界专家、学者和使用本书的广大专业技术人员批评、指正。

编者

2012年9月 于北京

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 量子力学发展历史回顾	(1)
1.1.1 黑体辐射与普朗克的能量子假说	(1)
1.1.2 光电效应与爱因斯坦的光量子理论	(3)
1.1.3 玻尔的旧量子论	(3)
1.1.4 德·布罗意的物质波	(4)
1.1.5 波动力学和矩阵力学	(5)
1.2 量子信息学的研究范畴	(6)
1.2.1 量子计算	(6)
1.2.2 量子通信	(9)
1.3 量子通信的发展现状	(11)
参考文献	(14)
第 2 章 量子力学基础	(18)
2.1 量子力学公设	(18)
2.1.1 状态空间	(18)
2.1.2 力学量	(19)
2.1.3 量子态的演化	(20)
2.1.4 量子测量	(21)
2.1.5 复合系统	(22)
2.2 纯态与混合态	(23)
2.2.1 混合态的定义与描述	(23)
2.2.2 混合态的动力学方程与测量	(24)
2.2.3 约化密度矩阵	(25)
2.2.4 Schmidt 分解与混合态的纯化	(26)
2.3 光场的量子化	(28)
2.3.1 麦克斯韦方程的量子化	(28)
2.3.2 光子数态	(31)
2.3.3 相干态	(34)
2.3.4 压缩态	(38)
参考文献	(42)
第 3 章 量子信息的基本概念	(43)
3.1 量子比特	(43)

3.1.1	经典比特	(43)
3.1.2	量子比特定义与表示	(44)
3.1.3	量子比特的物理实现举例	(45)
3.2	量子纠缠	(46)
3.2.1	量子纠缠态	(47)
3.2.2	连续变量纠缠	(49)
3.2.3	EPR 佯谬与 Bell 不等式	(51)
3.3	量子信息特性	(53)
3.3.1	非正交量子态的不可区分性	(53)
3.3.2	未知量子态的不可克隆性	(54)
3.3.3	海森堡不确定性原理	(55)
	参考文献	(57)

第 4 章	量子信息论简介	(58)
4.1	量子信息测度	(58)
4.1.1	经典香农熵	(58)
4.1.2	量子冯·诺依曼熵	(61)
4.1.3	量子保真度	(63)
4.1.4	可访问的最大信息	(64)
4.2	量子信源编码	(66)
4.2.1	经典信源编码定理	(66)
4.2.2	量子信源编码定理	(68)
4.3	量子噪声理论	(71)
4.3.1	开放量子系统的动力学	(71)
4.3.2	典型的量子噪声信道模型	(76)
4.4	量子信道编码	(78)
4.4.1	经典噪声信道编码定理	(79)
4.4.2	量子噪声信道编码定理	(82)
4.4.3	量子单一界	(84)
	参考文献	(85)

第 5 章	量子通信协议	(86)
5.1	基于纠缠光子信号的量子通信协议	(86)
5.1.1	量子隐形传态通信协议	(87)
5.1.2	量子密集编码通信协议	(89)
5.1.3	Ekert91 量子通信协议	(91)
5.2	基于单光子信号的量子通信协议	(94)
5.2.1	BB84 量子通信协议	(94)
5.2.2	B92 协议及六态量子通信协议	(97)
5.2.3	诱骗态量子通信协议	(98)

5.3 基于连续变量信号的量子通信协议	(102)
5.3.1 连续变量量子隐形传态通信协议	(103)
5.3.2 连续变量量子密集编码通信协议	(105)
5.3.3 基于相干态的连续变量量子通信协议	(107)
参考文献	(116)
第6章 量子信号的产生技术	(120)
6.1 纠缠光子信号的产生技术	(120)
6.1.1 参量下转换纠缠光子产生技术	(121)
6.1.2 光子晶体光纤纠缠光子产生技术	(124)
6.2 单光子信号的产生技术	(125)
6.2.1 单光子枪	(126)
6.2.2 弱相干光脉冲产生技术	(128)
6.3 连续变量量子信号的产生技术	(130)
6.3.1 压缩态的产生技术	(130)
6.3.2 连续变量纠缠态的产生技术	(135)
6.3.3 连续变量相干态信号产生技术	(138)
参考文献	(145)
第7章 量子信号的调制技术	(147)
7.1 真随机数的产生技术	(147)
7.1.1 基于光子路径的真随机数源	(149)
7.1.2 基于真空态量子噪声的真随机数源	(153)
7.2 单光子量子信号的调制技术	(158)
7.2.1 偏振调制	(159)
7.2.2 相位调制	(162)
7.2.3 频率调制	(164)
7.3 连续变量量子信号的调制技术	(166)
7.3.1 高斯调制	(166)
7.3.2 离散调制	(169)
参考文献	(175)
第8章 量子信号的探测技术	(177)
8.1 单光子信号探测技术	(177)
8.1.1 基于雪崩光电二极管的单光子探测技术	(178)
8.1.2 基于超导体的单光子探测技术	(189)
8.2 连续变量体系的探测技术	(192)
8.2.1 平衡零拍探测技术	(192)
8.2.2 连续变量信号探测中的光电转换技术	(195)
参考文献	(199)

第 9 章 量子中继技术	(202)
9.1 基于拉曼散射的量子中继技术	(203)
9.1.1 基于单光子测量的纠缠产生	(204)
9.1.2 基于单光子测量的纠缠交换	(206)
9.2 基于双光子测量的量子中继方案	(209)
9.2.1 基于双光子测量的纠缠产生	(209)
9.2.2 基于双光子测量的纠缠交换	(211)
9.3 基于薛定谔猫态的连续变量量子中继方案	(212)
9.3.1 光学薛定谔猫态的制备	(213)
9.3.2 纠缠态的非局域制备	(215)
9.3.3 接近确定性的纠缠交换	(218)
9.4 量子中继技术的实验验证	(219)
9.4.1 单光子量子中继技术的实验验证	(219)
9.4.2 连续变量量子中继技术的实验验证	(220)
参考文献	(222)
第 10 章 量子通信网络技术	(223)
10.1 量子通信网络中的交换技术	(223)
10.1.1 量子空分交换的基本原理	(224)
10.1.2 量子空分交换网络的实现	(228)
10.1.3 基于量子门的量子交换技术	(229)
10.1.4 其他量子交换技术	(231)
10.2 量子通信网络的体系结构	(232)
10.2.1 量子通信网络的功能体系	(232)
10.2.2 量子通信网络的协议体系	(233)
10.2.3 量子通信网络的拓扑结构	(234)
参考文献	(235)
第 11 章 典型的量子通信系统	(236)
11.1 有线量子通信系统	(236)
11.1.1 光纤量子信道特性	(236)
11.1.2 基于单光子的光纤量子通信系统	(238)
11.1.3 基于连续变量的光纤量子通信系统	(243)
11.2 无线量子通信系统	(247)
11.2.1 自由空间量子信道特性	(247)
11.2.2 基于单光子的自由空间量子通信系统	(251)
11.2.3 基于纠缠光子的自由空间量子隐形传态	(256)
11.3 量子通信实验网络	(259)
11.3.1 DARPA 量子保密通信网络	(260)
11.3.2 SECOQC 量子保密通信网络	(263)

11.3.3 Tokyo Quantum Network 高速量子保密通信网络	(267)
11.3.4 量子电话网	(270)
参考文献	(274)
第 12 章 量子通信发展展望	(276)
12.1 量子通信的现实安全性	(276)
12.1.1 实际量子通信系统的安全性问题	(276)
12.1.2 几种典型的量子攻击技术	(277)
12.2 量子存储技术	(281)
12.2.1 光量子存储器的基本原理	(281)
12.2.2 量子存储技术的技术现状和发展展望	(284)
12.3 量子信道复用技术	(285)
12.3.1 波分复用技术原理	(285)
12.3.2 量子信道的波分复用中的噪声源	(286)
12.3.3 量子信道复用的实验验证	(288)
12.4 星地量子通信技术	(290)
12.4.1 星地量子通信	(290)
12.4.2 星地纠缠分发	(291)
12.4.3 星地量子隐形传态	(292)
12.4.4 全球量子通信网络	(292)
12.5 量子时代与全量子网络	(294)
参考文献	(298)
附录 A 线性代数相关知识	(300)
附录 B 本书中涉及的重要缩写词	(309)

第1章 绪 论

量子通信是量子力学的基本原理和通信理论相互结合产生的交叉学科。本章 1.1 节简要介绍量子力学的发展历史，以帮助读者理解第 2 章介绍的量子力学的公设和量子信息学及量子通信的基本原理；1.2 节主要介绍量子信息学的研究范畴，重点给出与量子通信相关的一些基本概念；1.3 节归纳量子通信的发展现状，以期使读者对量子通信领域有一概貌性的了解。

1.1 量子力学发展历史回顾

在 19 世纪末，物理学界普遍存在着一种乐观情绪，认为物理学大厦已经建立，对于物理现象的本质已经有了基本全面的认识，后辈的物理学家只需做一些修补工作。物理学家们陶醉于 17 世纪建立起来的力学体系、19 世纪建立起来的电磁学、热力学及统计物理学，直到被开尔文（Kelvin）爵士一篇名为“19 世纪的乌云笼罩着热和光的动力学理论”的报告所震动。报告中指出经典物理学的两个未能圆满解释的基本问题，被比喻为物理学悬浮着两朵乌云。“第一朵乌云”是指迈克尔逊—莫雷（Michelson-Morley）实验结果和以太漂移说相矛盾；“第二朵乌云”则指观测到的物理比热总是低于经典物理学中能量均分定理给出的值，其中尤以黑体辐射理论出现的“紫外灾难”最为突出。经典物理学经历着前所未有的巨大危机，急需新的理论来补充，相对论和量子力学就是在这种背景下进入了历史舞台的中心。爱因斯坦（Einstein）提出的狭义相对论，改变了牛顿（Newton）力学中的绝对时空观，指明了牛顿力学的适用范围，即只适用于速度 v 远小于光速的物质的运动。量子力学则涉及物质运动形式和规律的根本变革，经典物理学只适用于描述一般宏观条件下物质的运动，而对于微观世界和一定条件下的某些宏观现象，则只有在量子力学的理论上才能说明。本节从 19 世纪末经典力学遇到的困难出发，简要介绍量子力学的形成过程。

1.1.1 黑体辐射与普朗克的能量子假说

1895 年，基尔霍夫（Kirchhoff）定量地研究了物体对光的吸收和辐射效应，发现所有物体发射光与吸收光的能力之比是一常数，这种能力只与物体自身的温度和光的波长有关，而与物体的材料及其结构无关。随后，基尔霍夫引入了黑体的概念，所谓黑体是指在任何温度下都能全部吸收到达其上的一切辐射的理想吸收体。可见，黑体的吸收能力达到最大，因此随后的研究大都集中在黑体的辐射能力上。

1896 年，维恩（Wien）提出了一个辐射能量分布的半经验公式：

$$E(\nu)d\nu = c_1 \nu^3 e^{-c_2 \nu/T} d\nu \quad (1.1)$$

式中, $E(\nu)d\nu$ 表示在频率范围 $(\nu, \nu + d\nu)$ 和单位体积中温度为 T 的黑体辐射能量, c_1 与 c_2 是两个参数。但后来的实验发现维恩公式只适用于较高频率和较低温度时的情形, 如图 1.1 所示, 在较高频率时维恩公式与实测值符合得较好。

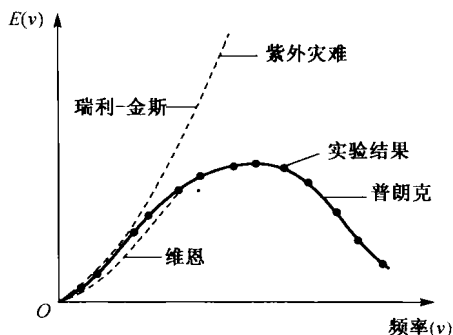


图 1.1 黑体辐射的能量密度随频率的变化

1900 年, 瑞利 (Rayleigh) 根据经典电动力学和统计物理理论得出一个黑体辐射公式, 并由金斯 (Jeans) 在 1905 年进行了修正, 即瑞利-金斯公式:

$$E(\nu)d\nu = \frac{8\pi k T \nu^2}{c^3} d\nu \quad (1.2)$$

该式在低频段时与实验值符合较好, 但在高频段时与实验值相差较大。而且由式 (1.2) 可见, 辐射能量密度与频率的平方成正比, 当频率较高时, 辐射能量趋于无穷大, 即向紫外端发散, 这完全不符合黑体辐射的真实情况, 历史上称为“紫外灾难 (Ultra-Violet Catastrophe)”, 如图 1.1 所示。

1900 年, 普朗克 (Planck) 在分析维恩、瑞利-金斯公式的基础上, 根据黑体辐射能量密度在红外波段 (低频区) 的精密测量结果, 提出了普朗克公式:

$$E(\nu)d\nu = \frac{c_3 \nu^3 d\nu}{e^{c_4 \nu/T} - 1} \quad (1.3)$$

c_3 与 c_4 是两个参数。普朗克公式在全波段都与观测极为符合。在高频区 ($e^{c_4 \nu/T} - 1 \approx e^{c_4 \nu/T}$), 普朗克公式化为维恩公式, 在低频区 ($e^{c_4 \nu/T} - 1 \approx c_4 \nu/T$), 普朗克公式化为

$$E(\nu)d\nu = \frac{c_3 T \nu^2}{c_4} d\nu \quad (1.4)$$

当 $c_3/c_4 = 8\pi k/c^3$ 时, k 为玻耳兹曼常数, 式 (1.4) 与瑞利-金斯公式等价。

普朗克发现, 如果假定对于一定频率 ν 的辐射, 物体只能以 $h\nu$ 为单位吸收或辐射能量 (h 是一个普适常数, 后来人们称之为普朗克常数), 则可以从理论上导出它的黑体辐射公式 (1.3)。也就是说, 物体吸收或发射电磁辐射, 只能以“量子” (Quantum) 的方式进行, 每个“量子”的能量为 $\varepsilon = h\nu$, 称为“作用量子” (Quantum of Action)。从经典力学来

看, 能量不连续的概念是绝对不允许的, 所以尽管从这个量子假设可以导出与实验观测极为符合的普朗克公式, 在相当长一段时间里普朗克的工作并未引起人们的重视。

爱因斯坦及德拜 (Debye) 进一步把能量不连续的概念应用于固体中原子的振动, 成功地解决了当温度 $T \rightarrow 0 \text{ K}$ 时, 固体比热趋于零的现象。至此, 普朗克提出的能量不连续的概念才逐渐引起物理学家的重视, 随后爱因斯坦将能量量子化引入到对光电效应的解释, 玻尔将 (Bohr) 能量量子化引入到对原子结构和氢原子辐射光谱的解释, 获得了成功。能量量子化的思想成了量子力学的基石。普朗克由于对基本作用量子的突出贡献, 获得 1918 年诺贝尔物理学奖。

1.1.2 光电效应与爱因斯坦的光量子理论

光电效应是指物质 (包括金属, 以及非金属的固体、液体或气体) 中的电子在吸收较短波长的电磁辐射 (如可见光或紫外线) 的能量后从物质中发射出来的现象。从物质中发射出来的电子称为光电子。

实验发现, 对于特定的物质, 只有辐射的光大于某一临界频率时才能激发出光电子。该临界频率仅取决于物质组成, 而出射的光电子能量取决于光的频率而与光强度无关, 这一点无法用光的波动性理论解释。另外, 光电效应还有一点与波动说矛盾。按照波动理论, 如果入射光较弱, 照射的光要经过一段时间的积累才能发射光电子, 而实验发现, 即使光强很弱, 入射光的到达时刻与光电子的产生时间间隔非常短, 实验测定值小于 10 ns 。

光电效应最早是 1887 年发现的。当时, 赫兹 (Hertz) 发现用紫外线照射电极时更容易产生火花放电, 随后, 霍尔瓦克 (Hallwachs) 证实这是由于放电间隙出现电荷的缘故。之后, 汤姆逊 (Thomson)、勒纳德 (Lenard) 进行了深入的研究, 但一直没有合理地解释观察到的现象, 直到爱因斯坦给出了正确的解释。1905 年, 爱因斯坦认为光是由离散能量包 (后来叫做光子) 组成的, 而不是连续波。在此思想的启发下, 爱因斯坦得出了光电效应方程, 与实验结果很吻合。公式如下:

$$h\nu = \frac{1}{2}mv^2 + \phi \quad (1.5)$$

式中, v 为光电子的速率, ν 为入射光的频率, h 为普朗克常数, m 为光电子的质量, ϕ 为从原子中逸出一个电子所需的能量。在该式中, 爱因斯坦扩展了普朗克的黑体辐射理论, 认为光量子能量等于频率乘以一个常数 (即普朗克常数)。截止频率以上的光子拥有的能量能激发出电子, 产生光电效应。采用光量子概念之后, 光电效应中出现的疑难随即迎刃而解。由于对光电效应的研究和数学物理理论的卓越贡献, 爱因斯坦获得了 1921 年诺贝尔物理学奖。

通过对光电效应的研究提出的光量子的概念发展了普朗克的能量子假说, 对量子理论的发展起重要的作用, 同时玻尔也将量子化的思想引入到原子结构中去。

1.1.3 玻尔的旧量子论

原子的组成和内部结构是 19 世纪末物理学家关注的重点。1896 年, 汤姆逊提出如下原子模型: 正电荷均匀分布于原子中, 电子以某种规则排列镶嵌其中。然而, α 粒子 (He^{2+} 离

子)原子散射实验中出现的大角度散射现象对这一模型提出了疑问。基于此,1911年卢瑟福(Rutherford)提出了原子核式结构模型:原子的正电荷都集中在原子的中心,形成原子核,而电子则围绕原子核旋转。此模型可以很好地解释 α 粒子的大角度散射,但却遇到了如下难题:(1)如果电子围绕原子核做加速旋转运动,则按照经典电动力学,电子将不断产生电磁辐射而动能减小,轨道半径会不断缩小,最后将掉到原子核上去,原子随之塌缩,但是事实表明原子稳定地存在于自然界;(2)电子因电磁辐射而发射的光的频率等于原子中电子的运动频率,应当是连续的光谱,然而从氢气放电管中观察到的氢原子光谱是线状光谱。玻尔创造性地将量子化观点应用到原子中,将普朗克常数 h 引进卢瑟福模型,提出了三个假设:

(1)原子能够而且只能够稳定地存在于一些稳定的状态,即定态(Stationary State),这些状态分别对应于离散的能量 $E_1, E_2, \dots$,可称为能级,原子状态的变化,包括吸收或发射电磁辐射,只能在两个定态之间跃迁(Transition);

(2)原子在两个定态间(对应能级为 E_1 和 E_2 ,设 $E_2 > E_1$)跃迁时,发射或吸收的电磁辐射的频率 ν 为 $\nu = (E_2 - E_1)/h$,如图1.2所示;

(3)电子绕核运动的角动量是量子化的。

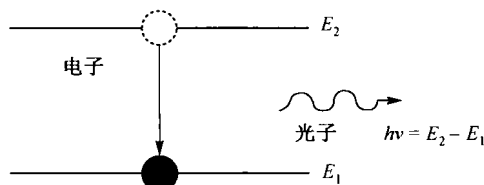


图 1.2 原子轨道跃迁示意图

由上述假设(1)可知,原子能够稳定地存在于稳态,除非吸收或发射电磁辐射而改变状态,因而原子可稳定地存在于自然界中;由上述假设(2)可知,电磁辐射的频率与能级之间的能量差有关,因而是离散的;再结合假设(3),可以定量地确定氢原子的能级和光谱频率。可见,玻尔的理论对人们认识原子内部电子运动规律做出了重大贡献。

但是玻尔理论仍存在局限性。玻尔理论虽然成功地说明了氢原子和类氢离子的光谱结构,而且还肯定了氢同位素氘的存在,但是对于更复杂的原子(如氦原子)的光谱,则无能为力;玻尔在描述电子运动时仍采用了轨道的概念,难以解释电子定态能级之间跃迁的物理本质;玻尔理论未能提供处理谱线强度的方法;玻尔理论只能处理周期运动,而不能处理非束缚态问题等。但是,玻尔理论创造性地把量子化的思想用到卢瑟福的原子结构模型中,成功地解释了氢原子光谱之谜,玻尔创立的旧量子理论在量子力学的发展上起到了非常重要的作用,为量子理论的发展奠定了基础,他本人也于1922年获得了诺贝尔物理学奖。

1.1.4 德·布罗意的物质波

光的干涉和光电效应等现象说明了光具有波粒二象性。在普朗克-爱因斯坦的光量子论和玻尔的原子论的启发之下,1923年,德·布罗意(de Broglie)提出微观粒子,如电子、质子