

任之恭 著

微波量子物理学

科学出版社

132214

微波量子物理学

任之恭 著

科学出版社

1980

内 容 简 介

本书是根据任之恭教授回国所作的学术报告的讲稿整理而成。书中综述了电子、原子、分子、原子核和固体以及生物分子和天文系统内的微波量子效应和激发现象，强调了微波量子物理学在近代科学研究和技术应用中的重要作用。

本书可供从事波谱学、磁共振、固体物理学、射电天文学和生物物理学方面的研究工作者和高等院校有关专业的师生参考。

微波量子物理学

任之恭 著

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1980年11月第一版 开本：787×1092 1/32

1980年11月第一次印刷 印张：6 5/8

印数：0001—7,250 字数：145,000

统一书号：13031·1284

本社书号：1784·13—3

定价：1.05 元

序

1977年夏,我应中国科学院的邀约,曾做过关于“微波量子物理学”的学术报告。为了此事,我曾事先仓促地写出过一份报告草稿,在报告过程中用幻灯或投影仪映出,或在黑板上写出要点,据以进行讲解。

一年之后我再回国时,偶与中国科学院物理研究所和电子研究所有关负责人谈起那些报告,他们说大家对那些报告颇有兴趣,建议将报告原稿加以整理出版。这就是这本小书的由来。

原稿由我提供参考书及文献目录,经贾惟义和裴力伟两位同志整理。他们除了对文字进行修改润色和加以条理化外,还在原子核物理、固体物理和量子电子学三个方面增添了一些内容,作了十分重要的提纲性补充,使本书增色不少。承科学出版社热心赞助,遂使本书能够出版。我在此谨向各方面的大力协助致以谢意。

任之恭

整 理 说 明

任之恭教授是著名的物理学家,美国 John Hopkins 大学应用物理实验室研究中心副主任(现已退休,聘为顾问),长期从事波谱学方面的研究。1977年5月,任教授应邀回中国讲学,在中国科学院物理所和电子所做了题为“微波量子物理学”的学术报告,并进行了专题座谈,历时一个多月。这些学术报告涉及到电子、原子、原子核、分子以及固体系统中微波频率下的量子效应和激发现象等,内容新颖丰富,讲述生动形象,富有启发性。任教授的学术报告得到许多听众的赞赏,留下的讲稿也引起一些读者的兴趣。

我们受委托整理任教授的讲稿,以便在国内出版。在整理过程中,大多数地方基本上只做了文字整理,以保留任教授原来的丰富的学术见解。有些地方也根据演讲时情况对讲稿做了一些补充。个别地方所做的补充较多一些,其目的是便于各方面的读者理解有关内容,同时也照顾到全书的系统性和完整性。在内容编排上也做了一些调整,例如将原来“电子自旋共振、核磁共振在分子生物学上的应用”和“射电天文学”两章已放到“微波量子物理学的应用”一章中。这样一来,原讲稿分为十章现在已归并为八章。我们征得任教授的同意,又将任教授于1978年7月在清华大学的两个专题学术报告也收集在本书中。这两个专题报告的题目是“Josephson 效应”和“电子回旋激射器(迴转电子管)与毫米波的产生”。

任教授的学术报告内容十分广泛。我们为学识所限,理解不够深入全面,加之整理时间很紧,书中可能会有一些不妥

之处,敬请读者批评指正。

整理后的讲稿曾请管惟炎和张恩虬等同志审阅。

贾惟义 裴力伟

目 录

第一章 绪言	1
第二章 电子	6
2.1 电子的特性	6
2.2 电子自旋的共振现象	7
2.2.1 Larmor 旋进	7
2.2.2 电子在磁场中的自旋共振现象——电子自旋共振 (ESR)	9
2.3 电子自旋共振的量子力学的简单解释	11
2.4 电子迴旋共振	16
2.4.1 电子迴旋共振	16
2.4.2 电子迴旋加速器	18
2.4.3 电子直线加速器	20
2.4.4 存储环中迴旋正负电子束的交叉实验	21
第三章 原子	23
3.1 Bohr, Schrödinger 和 Dirac 的氢原子模型	23
3.1.1 Bohr 的氢原子模型	23
3.1.2 Schrödinger 氢原子模型	25
3.1.3 Dirac 氢原子模型	26
3.2 精细结构中的 Lamb 位移	28
3.3 精细结构常数 α 在物理学上的重要性	29
3.4 超精细结构	30
3.5 原子在恒定磁场和电场中的效应	32
3.5.1 原子中的 Zeeman 效应	33
3.5.2 原子中的 Stark 效应	38
3.6 原子中的共振研究	40

3.6.1	氮原子的电子自旋共振	41
3.6.2	同位素效应	43
3.6.3	冷凝陷阱技术	43
3.7	其他形式的原子	44
3.7.1	电子偶素	44
3.7.2	μ 介子素	47
3.7.3	μ 介子原子	48
第四章	分子	50
4.1	微波谱	50
4.1.1	分子的能级	50
4.1.2	分子光谱	51
4.1.3	二原子分子的刚性转动	52
4.1.4	二原子分子的转动能级	55
4.1.5	线型三原子分子	56
4.1.6	非线型对称陀螺分子	56
4.1.7	非线型不对称陀螺分子	58
4.1.8	利用微波谱测定键长及键角	59
4.1.9	反演波谱	60
4.1.10	由分子内部转动谱线求内旋势垒	62
4.2	微波波谱中的 Zeeman 与 Stark 效应	63
4.2.1	Zeeman 效应	63
4.2.2	Stark 效应	67
4.3	分子顺磁共振现象	69
4.3.1	自由基	69
4.3.2	气体中的自由基共振	72
4.3.3	液体中的自由基共振	73
4.3.4	固体中的自由基共振	74
4.4	分子激发态及其变态	75
第五章	原子核	79
5.1	核磁矩与核磁共振	79

5.1.1	核磁性	79
5.1.2	Bloch 核磁共振 (NMR) 的唯象理论	81
5.1.3	饱和现象	83
5.1.4	某些核的自旋角动量和磁矩	84
5.2	位移、内场和超精细相互作用	85
5.2.1	化学位移	85
5.2.2	Knight 位移	86
5.2.3	内场和超精细相互作用	86
5.3	核电四极矩与四极矩共振	87
5.3.1	核电四极矩	87
5.3.2	核电四极矩超精细相互作用对分子转动波谱的影响	90
5.3.3	轴对称场中纯核电四极矩波谱	92
5.3.4	原子核磁矩、电四极矩与原子核幻数的关系	96
5.4	核自旋系统的双共振	98
5.4.1	核磁双共振 (DNMR)	98
5.4.2	电子核磁双共振 (ENDOR)	100
5.4.3	铁磁核磁双共振 (FNMR)	104
5.4.4	核磁声共振 (NMAR)	105
5.5	Fourier 变换波谱学	107
第六章 固体物理学		109
6.1	磁学与铁磁共振	109
6.1.1	铁磁性	109
6.1.2	铁磁共振	111
6.1.3	自旋波共振	113
6.2	微波声子与声磁共振	119
6.2.1	固体的声子谱	119
6.2.2	微波声子的产生和检测	120
6.2.3	声磁共振	122
6.2.4	声 Maser	123
6.3	过渡族元素及稀土元素在固体中的顺磁共振	123

6.3.1	过渡元素的电子组态	123
6.3.2	过渡元素的例子: 红宝石中的 Cr^{3+}	124
6.3.3	稀土元素的例子	126
6.3.4	声子与顺磁共振弛豫	127
6.4	光泵磁共振——微波光学双共振 (MODR)	130
6.4.1	光泵磁共振	130
6.4.2	磁共振的光检测	130
6.4.3	调制光谱学	131
6.4.4	用光泵磁共振观测 Na 原子 $3f$ 等能级的红外 荧光辐射	134
6.5	色心的电子自旋共振	135
6.5.1	F 色心	135
6.5.2	F 色心的电子自旋共振	137
6.5.3	其他色心	137
6.6	固体中的激子	138
6.7	Landau 能级与迴旋共振	140
6.8	半导体中的微波振荡 Gunn 氏效应	142
6.8.1	Gunn 氏效应	142
6.8.2	负阻现象	143
6.8.3	空间电荷积累畴和偶极畴	145
6.8.4	微波振荡	147
6.9	Josephson 效应	148
6.9.1	Josephson 效应	148
6.9.2	简单的理论解释	149
6.9.3	Josephson 效应的一个粗略类比	153
6.9.4	Josephson 结的应用	154
6.10	等离子体激元	157
第七章	微波量子电子学	160
7.1	感生发射	160
7.2	Townes 的氨微波激光器	162
7.3	Ramsey 的氢原子微波激光器	164

7.4	固体微波激光器	166
7.5	电子回旋激光器(回转电子管)与毫米波的产生	168
7.5.1	电子回旋激光器	168
7.5.2	简略的理论分析	170
7.5.3	自由电子激光器	173
第八章	微波量子物理学的应用	177
8.1	微波在技术方面的应用	177
8.1.1	医学方面的应用	177
8.1.2	工业方面的应用	177
8.1.3	工程方面的应用	178
8.1.4	一般科学仪器方面的应用	178
8.2	检验相对论的实验	178
8.2.1	验证狭义相对论的实验	178
8.2.2	验证广义相对论的实验	179
8.3	射电天文学	182
8.3.1	射电天文的发展简况	183
8.3.2	星际分子的观测结果	184
8.3.3	与宇宙间可能存在的其他文明世界通讯	186
8.3.4	脉冲星	187
8.3.5	类星体	187
8.3.6	射电超新星	188
8.3.7	微波背景辐射	188
8.4	电子自旋共振和核磁共振在分子生物学上的应用	189
8.4.1	生物分子中的自由基和顺磁离子中心	189
8.4.2	电子自旋作为生物分子中的标记	190
8.4.3	电子转移在生物生理过程中的作用	192

第一章 绪 言

我报告的题目是“微波量子物理学”。我想以此为题，根据量子力学的理论，阐明微波与各种物质的相互作用。我将按照由简单体系到复杂体系的顺序，先从电子、原子谈起，然后再讨论分子、原子核、固体等。这一领域是十分广泛的，许多方面都已经形成了专门的学问，诸如波谱学、核磁共振、顺磁共振、铁磁共振、量子电子学和射电天文等等，每一方面都有许多优秀的专门著作。在这个演讲中，我不准备，实际上也不可能对这些专门的领域都作深入的讨论。我只打算从总的历史的角度对这一领域作一概述，借以阐明量子物理学对现代科学和技术的发展曾经起过并且正在起着多么巨大的作用。许多内容或许是大家熟知的，我所强调的则是其整体。

另一方面，我想指出，这里所讲的微波量子物理学，其主体并不包括经典的微波物理学，后者涉及的是宏观现象，它研究电磁波在介质和波导系统中的传播以及与带电粒子的相互作用，理论方法是 Maxwell 场方程及边界值问题。微波量子物理学涉及的则是微观的量子效应，它的理论基础是量子力学。

在人类文明的发展中，到处可以看到科学和技术之间相互促进的例证，微波技术和微波量子物理学的关系也正是如此。微波量子物理学为微波技术提供了丰富的物理基础；同时，微波技术的发展又为揭示物质中的微波量子现象提供了强有力的手段，从而既对量子力学提供了有力的证明，也暴露出它的若干缺陷。

按照无线电工程对电磁波的分类，微波的频率处于 300 MHz—300GHz，波长自 1 m 至 1 mm。更长的波长属于射频，更短的波长属于亚毫米波和远红外波段及光波。当然，这种定义是不严格的。从物理学的角度来看，这种分类常常是没有太大的必要。在我的报告中，使用的是广泛意义上的微波，它包括频率从零至亚毫米波甚至远红外的电磁波。

射频电磁波技术的发展大约起源于 1885 年，即 H. Hertz 通过火花放电产生电磁波辐射的时代。在第一次和第二次世界大战之间发明了真空管，射频技术得到了飞速发展。狭义上的微波技术的发展则开始于二十世纪三十年代，发现了空心金属管能够传播高频电磁波，并发明了微波电子管。微波技术的重要发展是在第二次世界大战期间，其重要标志是雷达的发明和使用。在第二次世界大战之后，半导体器件如晶体管的问世，使整个射频和微波几乎连成一片，从极低频覆盖到毫米波。

微波量子物理学大约开始于第二次世界大战之后。那时战争留下了许多与雷达技术有关的微波设备，科学家们正在考虑它们的用处。另一方面，由于当时原子、分子物理学、光谱学以及量子力学的发展，人们对于物质结构有了相当深刻的认识，而对于有些实验结果与理论的差异，如光谱学得到的许多精细结构等，却仍然迷惑不解；有些人甚至觉得，连当时的量子力学本身都有改进的必要。这两种因素为微波量子物理学的发展提供了需要和可能。在不到几年的时间内，发现了一系列磁共振现象：

1944 年，顺磁共振(电子自旋共振)，E. K. Завойский.

1945 年，核磁共振，E. M. Purcell 等及 F. Bloch 等.

1946 年，铁磁共振，J. H. E. Griffiths.

1950 年，核四极矩共振，H. G. Dehmelt 和 H. Kruger.

1950—1954年,光泵磁共振, Kastler, Brossel, Bitter.

这些磁共振技术在物质结构研究中的应用,进一步促进了微波量子物理学的发展,使人们对原子、分子、原子核及固体中精细和超精细结构有了相当丰富的了解,并直接导致了微波激射器(Maser, 1955年)和激光器(Laser, 1960年)的发明。

微波量子物理学的研究代表着量子力学原理在波动频率最低的范围内的应用。一方面,微波量子物理学深刻地显示出量子力学有广泛的应用性,它在低频方面应用的有效程度并不亚于其他物理学部门。另一方面,量子力学原理很需要像微波量子物理学那样的极高的测量准确性,借以研究并证明自身的高度准确性。

微波的能量子 $h\nu$ (h 是 Planck 常数, ν 是频率)极其微小,它代表物理学中各种能量子很精细的效应。频率 ν 可以测量得极其准确, h 也是一个被测得相当精确的基本常数。很小的能量子可以用 ν 或 ν/c (波数, c 为光速) 很准确地表示出来。简言之,低的能量子和高度的精确性是微波量子物理学的两个最重要和最显著的特点。

微波量子物理学的贡献大部分在微波谱学方面。以下列举微波谱的几个例子,借此可以进一步体会微波量子物理学的特点。

1. 精细结构和超精细结构

在原子或分子光谱学中,常常发现有所谓精细结构谱线,其来源是原子或分子原有的单纯能级由于某种相互作用(比如自旋轨道耦合等)而分裂成几个互有差别的能级,这些能级之间的跃迁过程使原来的单条谱线变成几条相距很近的谱线。这类精细结构能级之间的能量差常常落在微波范围。

超精细结构来源于核外电子与原子核自旋(以及与自旋

相关的磁矩)之间的相互作用,这种相互作用引起原子或分子的能级发生超精细结构分裂,使得有关的光谱线也出现分裂现象。由核自旋引起的这种分裂谱线称为超精细谱线。

2. 电场或磁场引起的光谱或波谱分裂

由电场或磁场引起的能级分裂分别称为 Stark 分裂和 Zeeman 分裂。电场或磁场的强度当然可大可小,但实验室通常用的电场或磁场往往偏于弱场或者中等强度,能级分裂往往不怎么大,分裂开的谱线也相差不多。用光谱学的测量方法可能分辨不出来。微波量子物理学分辨能力非常高,可以很准确地测量出能级分裂的程度。

3. 测定核磁矩和核电四极矩

利用上述 Stark 分裂和 Zeeman 分裂,再加上以后要详细论述的电的或磁的共振现象,可以由微波谱的测定结果确定核磁矩及核的电四极矩的数值,具有相当高的测量精确度。

4. 分子转动能级跃迁波谱学

在第二次世界大战后,这种研究很快发展起来,测定了许多分子的转动波谱及转动常数,从而确定了相关的分子转动惯量、分子电偶极矩以及分子的几何结构等等。一般人所称的微波谱学,如不加说明,就是指的这一门学问。

5. 星际射电源

这是近代射电天文学的研究对象。观察星际的微波辐射,大大开阔了我们对宇宙视野,借此还可以研究天体的演化。例如,我国宋代(1054年)观察到的那颗超新星,现在用射电望远镜还可以对它的残骸进行研究。宇宙间还存在着许多有机物质,其特征辐射正落在微波范围。观察这些特征辐射,可以了解宇宙有哪些化合物及其丰度,从而研究生命的起源。氢原子光谱人们早就研究得相当透彻了,但在微波范围内,则还有谱线未被发现。宇宙间经常射来 1420MHz 的频

第二章 电 子

2.1 电子的特性

电子的发现及研究,即使不算前期没有实验根据的假说,也已经有了一百多年的历史。在最早研究电子的那些人当中,值得提到的有 Lorentz, Thomson 和 Millikan 等人。在初期,人们都把注意力集中在电子的电荷和质量上。人们早就知道,电子带负电荷,所以有时候也称它为负电子(英文名称是 negatron, 这比通常所用的 electron 更确切,因为它指明了电子带负电的性质)。早期的许多实验是要测定电子的电荷与其质量之比 e/m , 叫做荷质比。后来,又有不少人采用各种方法,通过测量 e/m 而进一步去确定 e 和 m 各自的数值。

电子自旋的发现则起源于 1925 年 Goudsmit 和 Uhlenbeck 的工作。他们假定电子具有自旋特性,完全是为了解释氢原子和碱原子光谱中出现的一些精细结构佯谬。他们认为,如果假定电子具有自旋,其角动量为 $\frac{\hbar}{4\pi} = \frac{\hbar}{2}$, 那么,许多精细结构佯谬便都可以得到解释。没有经过多少时候, G-U 两人的电子自旋理论就得到了整个学术界的公认。在量子力学刚提出来的时候, Heisenberg 和 Schrödinger 并没有涉及到电子自旋问题,后来,电子自旋现象虽然被引入 H-S 两人的量子力学,但始终不是这种力学的自然产物。直到 1928 年, Dirac 把相对论引入以前的量子力学,得到一个相对论形式的