



中国科学技术  
经·典·文·库

理论物理 (第二册)

# 量子论与原子结构

吴大猷 著

 科学出版社  
[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

中国科学技术经典文库·物理卷

理论物理(第二册)

# 量子论与原子结构

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书为著名物理学家吴大猷先生的著述《理论物理》(共七册)的第二册。《理论物理》是作者根据长期从事的教学实践编写的一部比较系统全面的大学物理学教材。本册主要叙述由量子论的创立至量子力学诞生前的物理学发展,内容分甲、乙两部,甲部介绍辐射理论、量子论对固体比热、光电现象、氢原子光谱、Bohr 理论、Sommerfeld 理论等,乙部扼要叙述原子的光谱及结构等。在一些章节之后还附有附录和习题供读者研讨和学习。

本书根据中国台湾联经出版事业公司出版的原书翻印出版,作者对原书作了部分更正,李政道教授为本书的出版写了序言,我们对原书中一些印刷错误也作了订正。

本书可供高等院校物理系师生教学参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

理论物理(第二册):量子论与原子结构/吴大猷著. —北京:科学出版社,2010  
(中国科学技术经典文库·物理卷)

ISBN 978-7-03-028727-4

I. 理… II. 吴… III. ① 理论物理学 ② 量子论 ③ 原子结构 IV. O41  
中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 162456 号

责任编辑:刘凤娟/责任校对:陈玉凤

责任印制:钱玉芬/封面设计:王浩

**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>

**中国科学院印刷厂** 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

1983年8月第一版 开本: B5(720×1000)

2010年9月第二次印刷 印张: 9 3/4

字数: 181 000

定价: **39.00 元**

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 序 言

吴大猷先生是国际著名的学者,在中国物理界,是和严济慈、周培源、赵忠尧诸教授同时的老前辈.他的这一部《理论物理》,包括了“古典”至“近代”物理的全貌.1977年初,在中国台湾陆续印出.这几年来对该省和东南亚的物理教学界起了很大的影响.现在中国科学院,特别是由于卢嘉锡院长和钱三强、严东生副院长的支持,决定翻印出版,使全国对物理有兴趣者,都可以阅读参考.

看到了这部巨著,联想起在1945年春天,我初次在昆明遇见吴老师,很幸运地得到他在课内和课外的指导,从“古典力学”学习起至“量子力学”,其经过就相当于念吴老师的这套丛书,由第一册开始,直至第七册.在昆明的这一段时期是我一生学物理过程中的大关键,因为有了扎实的根基,使我在1946年秋入芝加哥大学,可立刻参加研究院的工作.

1933年吴老师得密歇根大学的博士学位后,先留校继续研究一年.翌年秋回国在北大任教,当时他的学生中有马仕俊、郭永怀、马大猷、虞福春等,后均致力物理研究有成.抗战期间,吴老师随北大加入西南联大.这一段时期的生活是相当艰苦的,但是中国的学术界,还是培养和训练了很多优秀青年.下面的几段是录自吴老师的《早期中国物理发展之回忆》一书:

“组成西南联大的三个学校,各有不同的历史.……北京大学规模虽大,声望也高,但在抗战时期中,除了有很小数额的款,维持一个‘北京大学办事处’外,没有任何经费作任何研究工作的.在抗战开始时,我的看法是以为应该为全面抗战,节省一切的开支,研究工作也可以等战后再作.但抗战久了,我的看法便改变了,我渐觉得为了维持从事研究者的精神,不能让他们长期地感到无法工作的苦闷.为了培植及训练战后恢复研究工作所需的人才,应该在可能情形下,有些研究设备.西南联大没有此项经费,北大也无另款.……我知道只好尽自己个人的力量做一点点工作了.……请北大在岗头村租了一所泥墙泥地的房子做实验室,找一位助教,帮着我把三棱柱放在木制架上拼成一个最原始形的分光仪,试着做些‘拉曼效应’的工作”.

“我想在二十世纪,在任何实验室,不会找到一个拿三棱柱放在木架上做成的分光仪的了.我们用了许多脑筋,得了一些结果.……”

“1941年秋,有一位燕京大学毕业的黄昆,要来北大当研究生随我工作,他是一位优秀的青年.我接受了他,让他半时作研究生,半时作助教,可以得些收入.那年上学期我授‘古典力学’,下学期授‘量子力学’.班里优秀学生如杨振宁、黄昆、黄

授书、张守廉等可以说是一个从不易见的群英会。……”

“1945 年日本投降前，是生活最困难的时期。每月发薪，纸币满箱。因为物价飞跃，所以除了留些做买菜所需外，大家都立刻拿去买了不易坏的东西，如米、炭等。……我可能是教授中最先摆地摊的，……抗战初年，托人由香港、上海带来的较好的东西，陆续地都卖去了。等到 1946 年春复员离昆明时，我和冠世的东西两个手提箱便足够装了。”

就在 1946 年春，离昆明前吴老师还特为了我们一些学生，在课外另加工讲授“近代物理”和“量子力学”。当时听讲的除我以外，有朱光亚、唐敖庆、王瑞骥和孙本旺。

在昆明时，吴老师为了北京大学的四十周年纪念，写了《多原分子的结构及其振动光谱》一书，于 1940 年出版。这本名著四十多年来至今还是全世界各研究院在这领域中的标准手册。今年正好是中国物理学会成立的五十周年，科学出版社翻印出版吴大猷教授的《理论物理》全书，实在是整个物理界的一大喜事。

李政道

1982 年 8 月

写于瑞士日内瓦

## 总 序

若干年来, 由于与各方面的接触, 笔者对中国台湾的物理学教学和学习, 获有一个印象: (一) 大学普通物理学课程之外, 基层的课程, 大多强纳入第二第三两学年, 且教科书多偏高, 量与质都超过学生的消化能力. (二) 学生之天资较高者, 多眩于高深与时尚, 不知或不屑于深厚基础的莫立. (三) 专门性的选修课目, 琳琅满目, 而基层知识训练, 则甚薄弱.

一九七四年夏, 笔者拟想以中文编写一套笔者认为从事物理学的必须有的基础的书. 翌年夏, 得褚德三、郭义雄、韩建珊 (中国台湾交通大学教授) 三位之助, 将前此教学的讲稿译为中文, 有 (1) 古典力学, 包括 Lagrangian 和 Hamiltonian 力学, (2) 量子论及原子结构, (3) 电磁学, (4) 狭义与广义相对论等四册. 一九七六年春, 笔者更成 (5) 热力学, 气体运动论与统计力学一册. 此外将有 (6) 量子力学一册, 稿在整理中.

这些册的深浅不一. 笔者对大学及研究所的物理课程, 拟有下述的构想:

第一学年: 普通物理 (力学, 电磁学为主); 微积分.

第二学年: 普通物理 (物性, 光学, 热学, 近代物理); 高等微积分; 中等力学 (一学期).

第三学年: 电磁学 (一学年) 及实验; 量子论 (一学年).

第四学年: 热力学 (一学期); 狭义相对论 (一学期); 量子力学 (引论)(一学年).

研究院第一年: 古典力学 (一学期); 分子运动论与统计力学 (一学年); 量子力学 (一学年); 核子物理 (一学期).

研究院第二年: 电动力学 (一学年); 专门性的课目, 如固体物理; 核子物理, 基本粒子; 统计力学; 广义相对论等, 可供选修.

上列各课目, 都有许多的书, 各有长短. 亦有大物理学家, 集其讲学精华, 编著整套的书, 如 Planck, Sommerfeld, Landau 者. Landau-Lifshitz 大著既深且博, 非具有很好基础不易受益的. Sommerfeld 书虽似较易, 然仍是极严谨有深度的书, 不宜轻视的. 笔者本书之作, 是想在若干物理部门, 提出一个纲要, 在题材及着重点方面可作为 Sommerfeld 书的补充, 为 Landau 书的初阶.

笔者深信, 如一个教师的讲授或一本书的讲解, 留给听者或读者许多需要思索、补充、扩展、涉猎、旁通的地方, 则听者读者可获得较多的益处. 故本书风格, 偏于简练, 课题范围亦不广. 偶以习题的方式, 引使读者搜索, 扩大正文的范围.

笔者以为用中文音译西人姓名, 是极不需要且毫无好处之举. 故除了牛顿, 爱

因斯坦之外, 所有人名, 概用西文.\*

本书得褚德三、郭义雄、韩建珊三位中国台湾交通大学教授之助, 单越 (中国台湾清华大学) 教授的校阅, 笔者特此致谢.

吴大猷  
1977 年元旦

---

\* 商务印书馆出版之中山自然科学大辞典中, 将 Barkla, Blackett, Lamb, Bloch, Brattain, Townes 译为巴克纳, 布拉克, 拉目, 布劳克, 布劳顿, 汤里士, 错误及不准确可见.

## 本册前言

本册的主要目标,是叙述由量子论的创立为起点,至量子力学诞生前的 20 年物理学的发展.在 19 世纪的末一年代中,电磁学、热力学及统计力学等皆已发展至相当完善阶段.故当时应用这些“古典物理”的基本理论于黑体辐射能量之光谱分布问题而遭遇到基本性的(矛盾性的)困难时,诚是物理学发展史中所未有之大挑战.量子论之创建,使物理学转入一新的阶段.

甲部简述了辐射理论、量子论对固体比热、光电现象、氢原子光谱、Bohr 之理论、Sommerfeld 之理论等.第 1 章的最详尽参考书为 Jammer 之著,详述辐射理论发展的经过,为深入明了物理学(量子论及量子力学)的发展所应读的.

第 8 章所用的古典力学基础,可参阅本书《古典动力学》乙部.第 11 章略述古典统计及 Bose-Einstein、Fermi-Dirac 量子统计,目的是为了了解本册所论及的几项问题,如(1)金属中的自由电子的比热,(2)黑体辐射的 Planck 氏公式,(3)原子中的电子的分布等.这章嫌过简略,可参阅本书《热力学、气体运动论及统计力学》之第三部.

乙部对原子的光谱及结构,作一扼要的叙述.原子光谱的研究,先受量子论 Bohr 理论之刺激,于 20 世纪一二十年代中,猛速发展.至 20 世纪 20 年代,积实验的结果及理论之发展,物理学又面临一时机,而有矩阵力学、波动力学,或总称量子力学的创立.量子力学使物理学又重新改奠其基础观念及方法.本册所述的,是量子力学发展前夕的原子物理学状态——经验结果,理论的观念及方法,为进而研习量子力学的基础.

有人以为古典物理和量子论既已为量子力学所取代,吾人不必费时力于此,而经由量子力学着手.这是一种不健全的观点.须知物理学的发展史中,每一重大进展,都是建立于前此的知识上;必须明了“问题”之所在,作新的观察及理论,不是凭空一蹴而就.本册希望于一个学期中,以导游的方式,介绍近代物理学的一重要部门,为习量子力学的进阶.

本册初稿,是由中国台湾交通大学韩建珊和褚德三教授译成,特此致谢.



# 目 录

序言  
总序  
本册前言

## 甲部 量子论 (1900—1925)

第 1 章 黑体辐射	3
1.1 定义与基本关系	4
1.2 黑体辐射之经验定律	6
1.3 Rayleigh-Jeans 定律与 Wien 定律	8
1.4 Planck 之量子论	11
附录	14
习题	17
第 2 章 爱因斯坦之光量子理论与波-质点之二象性	18
2.1 光量子理论	18
2.2 光电效应	19
2.3 Compton 效应	20
第 3 章 固体之比热与量子论	22
3.1 Dulong-Petit 定律	22
3.2 爱因斯坦 (1905) 理论	23
3.3 Debye (1912) 理论	23
3.4 Born 与 von Kármán 理论	25
3.5 声子 (phonons)	27
习题	28
第 4 章 氢原子的 Bohr 理论	29
第 5 章 Bohr 理论之改进 (Sommerfeld 理论)	34
5.1 相对运动	34
5.2 椭圆轨道	34
5.3 精细结构之理论	37

习题	40
<b>第 6 章 空间量子化与 Zeeman 效应</b>	41
6.1 空间量子化与 Stern-Gerlach 实验	41
6.2 Zeeman 效应	43
6.3 气体的顺磁化率随温度之变化	45
习题	47
<b>第 7 章 对应原理</b>	48
习题	50
<b>第 8 章 古典力学对量子论之应用</b>	51
8.1 量子化条件与缓渐不变数 (adiabatic invariants)	51
8.2 氢原子	52
8.3 Zeeman 效应	54
<b>第 9 章 爱因斯坦的跃迁理论</b>	57
9.1 跃迁系数	57
9.2 受激 (或诱发) 放射	58
9.3 内禀的概率 (Inherent probability)	60
9.4 迈射 (maser) 与雷射 (laser) 的理论	61
<b>第 10 章 分子的振动-转动光谱</b>	63
10.1 双原分子的振动	63
10.2 线性分子的转动	64
10.3 异极分子 (heteropolar molecule) 的振动-转动光谱	64
10.4 多原分子	66
习题	68
<b>第 11 章 Boltzmann, Bose-Einstein 与 Fermi-Dirac 统计: 在量子论的   应用</b>	69
11.1 Boltzmann 统计	69
11.2 Planck 公式的 Bose 理论	73
11.3 气体的 Bose-Einstein 统计	74
11.4 Fermi-Dirac 统计	75
11.5 三种统计的性质	76
习题	83
<b>参考文献</b>	84

## 乙部 原子构造与光谱

导言	86
第 1 章 原子光谱的经验结果	87
1.1 Balmer 系, Ritz 原则与 Rydberg 系	87
1.2 多重谱系结构	88
1.3 选择法则	89
1.4 精细结构间距	90
1.5 反常 Zeeman 效应	91
第 2 章 电子自旋	93
2.1 碱金属原子: 自旋 $= \frac{1}{2}$	93
2.2 轨道角动量 $lh$	94
2.3 $\{L, S\}$ 耦合方式 —— 向量模型	94
2.4 Stern-Gerlach 银原子实验	96
2.5 反常 Zeeman 效应的 Landé $g$ 公式	96
第 3 章 自旋-轨道交互作用与光谱线的精细结构	98
3.1 自旋-轨道交互作用	98
3.2 精细结构, $H_\alpha$ 线, Lamb 移动	100
第 4 章 Zeeman 效应: 弱磁场与强磁场	103
习题	105
第 5 章 Pauli 原理与元素周期表	107
习题	112
第 6 章 多电子组态的原子能阶	113
6.1 $\{L, S\}$ 耦合方式	113
6.2 $\{j, j\}$ 耦合方式	115
6.3 中间耦合方式	117
6.4 选择定则	117
习题	117
第 7 章 超精细结构与核矩	118
7.1 超精细 (hfs) 间距	118
7.2 Zeeman 效应; Back-Goudsmit 效应	120
第 8 章 Stark 效应	122
第 9 章 原子与离子之 Thomas-Fermi 电位	125
9.1 中性原子	125
9.2 正 (原子的) 离子	127

---

习题	128
第 10 章 单电子原子: 非 Coulomb 场之能量	129
习题	132
第 11 章 X 射线光谱	133
11.1 X 射线的经验结果; Auger 效应	133
11.2 X 光谱理论	135
习题	138
第 12 章 量子论所遭遇的困难	139
参考文献	141
索引	142

# 甲部 量子论 (1900—1925)



# 第1章 黑体辐射

物理学发展至 19 世纪末期, 古典力学、电磁学、热力学与统计理论皆已完成. 至少有一位很卓越的物理学家, 认为物理的主要发展至此已经完成, 更进一步的发展只是对其精确度加以改进而已. 可是 1895 年 Roentgen 发现了 X 射线, 1896 年 Becquerel 发现了放射性现象, 随着对于气体中导电性的研究, 又有许多惊人的进展, 因此打开了另一完全崭新知识的领域之窗, 从而开创了物理历史的新纪元. 此一新纪元, 一般人皆称之为近代物理 (文献中与大学用书中都沿用此名). 此近代物理学, 乃由两个创新、革命性的基本理论所开创, 即量子论与相对论. 事实上, 全部近代物理的发现, 是完全建立于此两个基石上的.

本册分甲乙两部. 甲部将讨论量子论的起源, 以及其早期很成功地解释物理的一些问题. 在乙部中, 我们随着量子论的进展而将其应用于原子光谱及其结构等问题. 本册中我们所讨论的物理范围, 系至 1925 年为止的发展——正好是在量子力学诞生之前. 我们知道量子力学较优于量子论, 而我们为什么要花这么长的篇幅来讨论量子论呢? 其原因至少有下列两个, 因此我们绝不应该认为这是在浪费时间:

(1) 虽然在基本观念上, 量子力学与量子论极为不同, 但本册甲部和乙部中许多的物理观念和结果, 仍极有用且经修改后即可转移至量子力学的正确观念的. 此二部所讨论的阶段, 实系近代物理发展过程中极重要的一个阶段, 为量子力学之前奏.

(2) 有些科学哲学家 (如晚年的爱因斯坦) 以为物理学的基础是建立在思维 (演绎的), 而非在经验结果, 但本书作者不同意这样的观点. 物理学与数学不同, 他的对象是“现象”, 不能如纯粹数学地与现象完全脱离. 为了对物理学 (量子力学) 深入的了解, 物理学的主要发展知识虽非绝对必需, 但这样的知识无疑是有很大帮助的——至少是对绝大多数的习物理学者. 在此值得着重的是: 量子论是在原子光谱问题首先得到成功的应用的 (参阅第 4, 5, 6 章), 但后来也是在此同一领域内遭到了基本性的困难, 卒之导致了量子力学的诞生.

上面我们曾提起过近代物理学中之另一基本柱石——相对论. 此理论将在本书第四册中讨论之.

量子论的起源, 乃是为了解释“黑体”辐射能量在光谱中的分布的一些实验结果而来的. 首先我们要定义下面一些观念与基本关系.

## 1.1 定义与基本关系

1) 单色放射功率  $E_\lambda$  与总放射功率  $E$

$E_\lambda$  之定义由下式表示:

$E_\lambda d\lambda$  = 一物体之每单位面积, 每秒在波长介于  $\lambda$  和  $\lambda + d\lambda$  间放射辐射的能量.

$E$  的定义为

$$E = \int_0^\infty E_\lambda d\lambda \quad (1-1)$$

2) 单色辐射度  $I_\lambda$  与总辐射强度  $I$

$I_\lambda$  之定义为

$$dE_\lambda = I_\lambda d\Omega \cos \theta$$

$d\Omega$  为立体角单元,  $\theta$  为单位表面  $dS$  之法线与  $d\Omega$  之方向的交角 (参见图 1-1). 由于  $d\Omega = \cos \theta d\theta d\varphi$ , 因此对  $dS$  一边的所有方向积分后即可得

$$E_\lambda = \pi I_\lambda$$

同理可得

$$E = \pi I \quad (1-2)$$

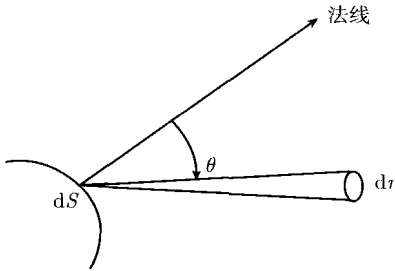


图 1-1

3) 空穴内辐射之能量密度  $\psi$

若一温度为  $T$  之物体中有一圆形空穴, 此空穴表面放出之辐射线, 纵横满布于空穴之空间内, 如图 1-2 所示. 为了得知空穴内辐射之能量密度, 我们考虑在空穴中央之一小体积  $V$  (任何形状皆可, 只须其大小比空穴的体积小). 因此由定义 2) 知从  $dS$  达到小体积  $V$  之  $ldA$  的能量为

$$I d\Omega \cos \theta \times \text{面积 } dS \times \text{时间} = I \frac{dA}{r^2} dS \frac{l}{c}$$

此处  $c$  为辐射 (光) 之速度, 因此由整个空穴表面达到  $V$  之辐射能量为

$$\sum_A \int_S I \frac{dA}{cr^2} dS = \int_S I \frac{dS}{cr^2} V = \frac{4\pi I}{c} V \quad (1-3)$$

故总能量密度为

$$\psi = \frac{4\pi I}{c} \quad (1-4)$$



同理可得单色辐射之能量密度为

$$\psi_{\lambda} = \frac{4\pi I_{\lambda}}{c}$$

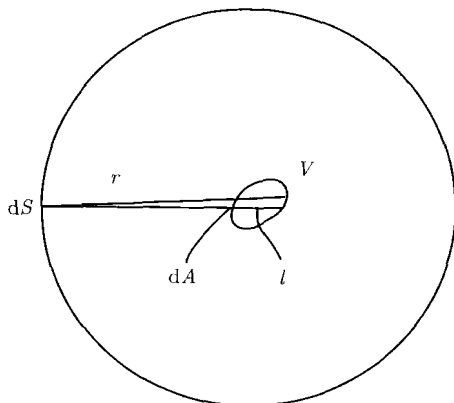


图 1-2

以上的结果与空穴和体积  $V$  之形状无关, 事实上可证明  $\psi_{\lambda}$ ,  $\psi$  只与物体的温度有关.

#### 4) 黑体辐射

下面将讨论黑体之重要观念. 我们定义“黑体”为一可吸收所有入射在其上之辐射线的物体. 因此它乃一理想之物体. 我们通常把从“空穴”的一小洞放射出来的辐射, 视为很接近于黑体辐射. 我们利用热力学的根据, 可证明下面定理:

“黑体辐射之光谱分布, 与同温度的空穴的相同.” 因为如果光谱分布不同的话, 如图 1-3 所示, 则利用几个滤过器 (selective filter) 我们即可建造一引擎, 在同一温度时, 在  $\lambda_1$  处从 A 吸收热量而连续不断地传递到 B 去, 但此过程系违背了热力学第二定律的, 因此黑体与空穴的光谱分布必须相同.

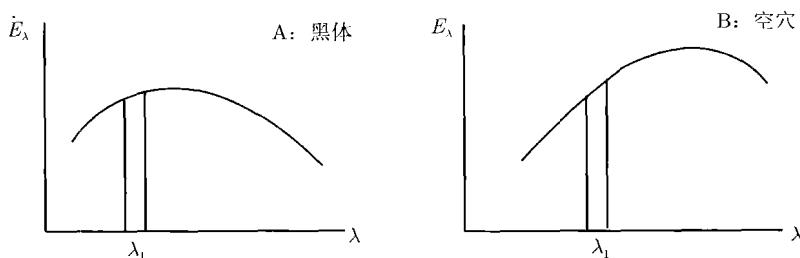


图 1-3