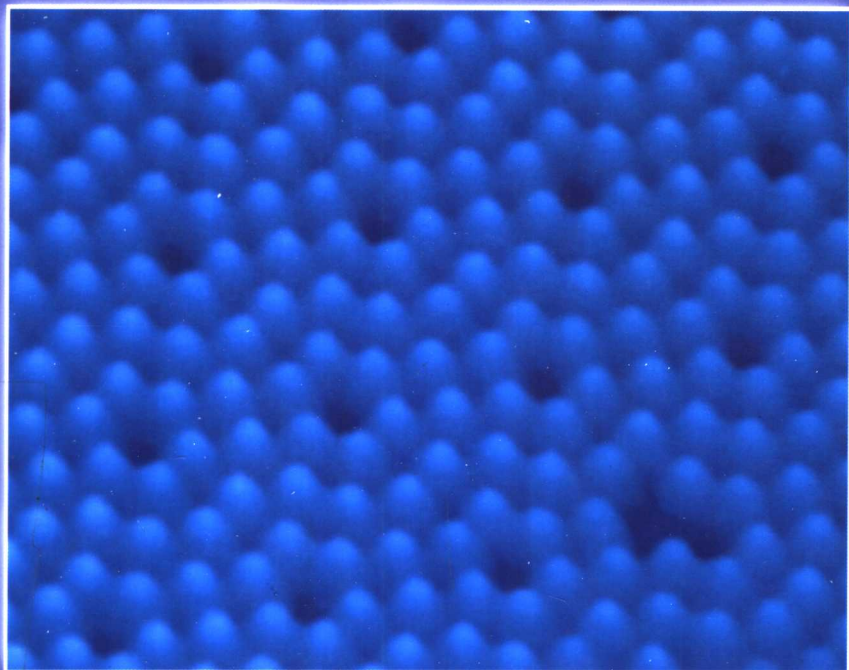


张延惠 林圣路 王传奎 编

原子物理教程



山东大学出版社

Shandong University Press

原子物理教程

张延惠 林圣路 王传奎 编

山东大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

原子物理教程/张延惠,林圣路,王传奎编. —济南:山东大学出版社,2003.8

ISBN 7-5607-2639-9

I. 原…

II. ①张…②林…③王…

III. 原子物理学—高等学校—教材

IV. 0562

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 074302 号

山东大学出版社出版

(山东省济南市山大南路 27 号 邮政编码:250100)

山东省新华书店经销

山东省恒兴实业总公司印刷厂印刷

850×1168 毫米 1/32 12.5 印张 325 千字

2003 年 8 月第 1 版 2003 年 8 月第 1 次印刷

印数:1—2000 册

定价:26.00 元

版权所有,盗印必究

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社营销部负责调换

前 言

原子物理学是研究原子、分子、原子核等微观粒子运动规律的一门基础学科。原子物理学既是普通物理的一部分,又是近代物理课程的主要内容,它是随着量子力学的发展而不断得到充实和发展的。原子物理学所形成的物理思想,物理图像和实验方法可为化学、生物、材料科学等学科提供指导作用。

本书在编写的过程中,不仅注重了物理学基本实验、物理图像与物理模型的建立,还体现了理论联系实际的思想,例如,对“量子隧道效应”应用的讨论;“光电效应”在现实生活中的应用等等,以提高学生用物理学的基本原理分析和解决实际问题的能力。

本书在编写的过程中,增加了量子力学的内容,缩减了传统玻尔理论的内容。本书在介绍玻尔旧量子论以前较详尽地向学生描绘了微观粒子的波粒二象性,让学生能尽早接触到量子世界最基本的概念,以利于学生后续内容的学习。对部分知识点作了比较深入的阐述,如“洪特定则”的应用等。增加了能反映本学科前沿现状的新理论与新成果,如“中微子”研究现状等内容。书中还吸收了近年来山东师范大学物理系原子与分子物理实验室的部分最新科研成果,从而丰富了本书的知识内容。书中的很多内容始终贯穿了量

子思想与经典物理的衔接与渗透。

本书尽可能多地介绍了诺贝尔物理奖获得者以及他们在原子物理领域内的创新性理论与实验方法。他们的思想不仅对学生的创造性思维有所启迪,还能提高学生的学习兴趣。

本书的编写工作是这样的:林圣路教授编写第六章,王传奎教授编写第八章,张延惠副教授编写其余各章,并负责全书的统稿。

本书可作为高等师范院校或其他高等院校的教材,也可作为相关科技人员的参考用书。本书的讲授约需 70 学时,教师可根据自己的课程进度及学时数对内容进行选取。

本书在编写过程中参阅了许多专著,受益匪浅,篇幅所限,在此不再一一赘述,谨向各位专家、学者表示深切谢意。

本书在编写过程中得到山东师范大学科研处、教务处、物理系领导以及原子与分子物理实验室各位老师的支持和帮助,对此表示衷心的感谢。

由于出书时间紧迫和作者水平所限,书中不妥和疏漏之处在所难免,真诚地希望读者批评指正。

编 者

2003 年 7 月于山东师范大学物理系

目 录

第一章 光的粒子性和电子的波动性	(1)
§ 1.1 黑体辐射与普朗克的量子化假设	(2)
1.1.1 黑体辐射的实验规律:	(2)
1.1.2 黑体辐射的经典理论公式	(4)
1.1.3 普朗克公式以及能量子假设	(5)
§ 1.2 光电效应与爱因斯坦光子量子理论	(7)
1.2.1 光电效应实验规律	(7)
1.2.2 爱因斯坦光子假说	(9)
1.2.3 光电效应的应用	(10)
§ 1.3 康普顿效应	(11)
1.3.1 实验结果	(11)
1.3.2 理论解释	(13)
§ 1.4 德布罗意波与电子衍射	(15)
1.4.1 光的波粒二象性	(15)
1.4.2 德布罗意假设	(16)
1.4.3 电子衍射实验	(17)
1.4.4 对电子波粒二象性的理解	(20)
§ 1.5 波函数及玻恩解释	(23)

1.5.1	自由粒子的波函数	(23)
1.5.2	玻恩对波函数的解释	(24)
1.5.3	波函数具备的标准条件	(25)
§ 1.6	海森伯不确定关系	(26)
思考题		(30)
习题		(31)

第二章 原子的核式结构和玻尔理论 (32)

§ 2.1	原子结构模型	(32)
2.1.1	原子的基本状况	(32)
2.1.2	电子的发现	(33)
2.1.3	汤姆逊原子结构模型	(35)
2.1.4	α 粒子散射实验	(35)
2.1.5	卢瑟福原子核式模型	(36)
2.1.6	卢瑟福散射理论	(38)
2.1.7	原子核大小的推断	(46)
§ 2.2	玻尔的氢原子理论	(46)
2.2.1	氢原子光谱的实验规律	(47)
2.2.2	玻尔理论	(50)
2.2.3	里德伯常数的变化	(56)
2.2.4	类氢离子的光谱	(58)
2.2.5	里德伯原子和奇异原子	(59)
§ 2.3	夫兰克—赫兹实验	(62)
§ 2.4	索末菲对玻尔理论的推广	(64)
2.4.1	电子的椭圆轨道运动	(64)
2.4.2	相对论效应	(67)
2.4.3	轨道空间取向量子化的理论简介	(68)
§ 2.5	对应原理和玻尔理论的地位	(69)
2.5.1	玻尔的对应原理	(69)
2.5.2	玻尔理论的历史地位	(72)

思考题	(73)
习题	(74)
第三章 量子力学基础	(76)
§ 3.1 薛定谔方程	(77)
§ 3.2 一维无限深势阱中的粒子	(80)
§ 3.3 势垒贯穿	(83)
§ 3.4 简谐振子	(86)
§ 3.5 量子力学中的一些理论和方法	(88)
3.5.1 平均值及算符的引进	(88)
3.5.2 本征值和本征函数	(90)
3.5.3 角动量	(92)
3.5.4 全同粒子和泡利不相容原理	(94)
§ 3.6 氢原子	(97)
3.6.1 氢原子的能量本征值与本征函数	(97)
3.6.2 电子的几率分布	(99)
§ 3.7 宇称	(105)
思考题	(106)
习题	(106)
第四章 碱金属原子	(108)
§ 4.1 碱金属原子光谱与能级	(108)
§ 4.2 价电子模型和原子实极化与轨道贯穿	(113)
4.2.1 碱金属原子的价电子模型	(113)
4.2.2 原子实极化和轨道贯穿	(114)
4.2.3 碱金属原子光谱和能级的形成	(115)
4.2.4 跃迁选择定则	(116)
§ 4.3 碱金属原子光谱的精细结构	(117)
§ 4.4 史特恩—盖拉赫实验	(119)
4.4.1 电子轨道运动的磁矩	(119)

4.4.2 史特恩—盖拉赫实验	(120)
§ 4.5 电子的自旋假设	(123)
§ 4.6 电子自旋与轨道运动的相互作用	(125)
4.6.1 电子的总角动量	(125)
4.6.2 电子自旋与轨道运动的相互作用能	(127)
4.6.3 碱金属原子态的符号	(130)
4.6.4 对碱金属原子谱线精细结构的解释	(132)
§ 4.7 氢原子光谱的精细结构与兰姆移位	(134)
4.7.1 氢原子能级精细结构	(135)
4.7.2 氢原子光谱的精细结构	(137)
4.7.3 兰姆移位	(139)
§ 4.8 碱金属原子能级的超精细结构	(141)
思考题	(143)
习题	(144)

第五章 多电子原子

§ 5.1 原子的电子壳层结构	(145)
5.1.1 元素性质的周期性变化和元素周期表	(146)
5.1.2 泡利不相容原理与原子的电子壳层结构	(148)
5.1.3 原子基态时电子在各壳层上排列的详细情况	(151)
§ 5.2 角动量的耦合模型	(160)
5.2.1 角动量耦合的一般规律	(161)
5.2.2 $L-S$ 耦合模型	(161)
5.2.3 两个价电子原子的能级与光谱	(164)
5.2.4 $j-j$ 耦合模型	(170)
5.2.5 多电子原子光谱的一般规律	(173)
§ 5.3 等效电子角动量的合成	(175)
5.3.1 泡利不相容原理与等效电子	(175)
5.3.2 洪特定则的应用	(178)

§ 5.4 氦氖激光器	(183)
§ 5.5 X射线	(186)
5.5.1 X射线的产生及其波长的测定	(186)
5.5.2 X射线的发射谱	(188)
5.5.3 莫塞莱定律	(191)
5.5.4 X射线的吸收谱	(192)
思考题	(195)
习题	(195)
第六章 磁场中的原子	(197)
§ 6.1 原子的磁矩	(198)
6.1.1 单个价电子原子的磁矩	(198)
6.1.2 多电子原子的磁矩	(200)
§ 6.2 外磁场对原子的作用	(201)
6.2.1 拉莫尔(Larmor)进动	(201)
6.2.2 原子在外磁场中的能级分裂	(203)
6.2.3 史特恩—盖拉赫实验结果的再分析	(204)
§ 6.3 塞曼(Zeeman)效应	(206)
6.3.1 塞曼效应的观察	(206)
6.3.2 正常塞曼效应	(208)
6.3.3 反常塞曼效应	(210)
6.3.4 塞曼效应的偏振特性	(213)
6.3.5 帕邢—贝克效应	(215)
6.3.6 有超精细结构时塞曼分裂	(217)
6.3.7 塞曼效应的物理意义	(219)
§ 6.4 磁共振	(220)
6.4.1 电子顺磁共振	(221)
6.4.2 核磁共振	(223)
6.4.3 有关磁共振的实验方法	(223)
* § 6.5 强磁场中的原子回归谱	(228)

6.5.1	强场条件和里德堡态	(228)
6.5.2	准朗道振荡谱	(230)
6.5.3	抗磁开普勒问题的经典动力学	(232)
6.5.4	闭合轨道理论和回归谱	(235)
思考题		(237)
习题		(239)
第七章 原子核物理学		(241)
§ 7.1	原子核的基本性质	(242)
7.1.1	原子核的电荷、质量和密度	(242)
7.1.2	原子核的电四极矩、自旋和磁矩、宇称及统计性质	(244)
§ 7.2	原子核的结合能与核力	(251)
7.2.1	原子核的结合能	(251)
7.2.2	核力及其基本性质	(255)
§ 7.3	原子核的结构模型	(258)
7.3.1	液滴模型	(258)
7.3.2	壳层模型	(261)
* 7.3.3	集体模型	(264)
§ 7.4	原子核的放射性衰变	(266)
7.4.1	放射性衰变的统计规律	(266)
7.4.2	放射系	(269)
7.4.3	α 衰变	(271)
7.4.4	β 衰变	(276)
7.4.5	γ 衰变和内转换	(282)
7.4.6	穆斯堡尔效应	(284)
7.4.7	放射性的应用	(288)
§ 7.5	原子核反应	(289)
7.5.1	核反应及遵循的守恒定律	(289)
7.5.2	核反应中的能量	(291)

7.5.3 核反应截面和反应道	(295)
§ 7.6 核反应机制	(296)
7.6.1 复合核反应	(296)
7.6.2 核反应的其他机制	(298)
7.6.3 核反应机制的三阶段描述	(299)
§ 7.7 原子核的裂变与聚变	(300)
7.7.1 重核的裂变	(300)
7.7.2 裂变机制	(302)
7.7.3 链式反应和裂变能的利用	(302)
7.7.4 轻核聚变	(306)
7.7.5 热核反应和聚变能的利用	(307)
思考题	(310)
习题	(311)
第八章 分子结构与光谱	(314)
§ 8.1 分子结构的普遍特征	(314)
§ 8.2 波恩—奥本海默近似	(318)
§ 8.3 双原子分子的振动和转动	(321)
§ 8.4 双原子分子的电子结构	(327)
8.4.1 对称性质	(327)
8.4.2 自旋	(329)
8.4.3 氢分子离子	(329)
§ 8.5 分子光谱	(333)
8.5.1 转动谱	(334)
8.5.2 振转谱	(335)
8.5.3 电子带系光谱	(336)
· § 8.6 分子非线性光学性质	(337)
8.6.1 态求和方法	(339)
8.6.2 有限场方法	(339)
8.6.3 少态方法	(340)

8.6.4 解析导数法	(340)
8.6.5 响应理论方法	(341)
8.6.6 硝基苯胺分子	(342)
思考题与习题	(344)
第九章 粒子物理学	(345)
§ 9.1 粒子间的相互作用	(346)
9.1.1 相互作用	(346)
9.1.2 强、弱、电磁三种相互作用的区别	(348)
§ 9.2 粒子分类	(349)
9.2.1 规范粒子	(350)
9.2.2 轻子	(350)
9.2.3 强子	(355)
§ 9.3 对称性和守恒律	(361)
9.3.1 各种对称性和相应的守恒定律	(361)
9.3.2 宇称守恒和宇称破缺——弱相互作用下宇称不守恒	(366)
§ 9.4 强子分类与夸克模型	(375)
9.4.1 强子分类	(375)
9.4.2 夸克模型	(376)
9.4.3 标准模型理论简介	(380)
§ 9.5 粒子加速器的发展	(383)
思考题	(385)
习题	(385)
附录 物理学常数	(387)
主要参考书目	(388)
封面说明	(388)

第一章 光的粒子性和 电子的波动性

19 世纪末,经典物理学已经在经典力学、热力学、统计物理学和电动力学等各个方面取得很大成绩,人们甚至认为未来的物理学真理将不得不在小数点后第六位去寻找.然而经典物理学的发展不是尽善尽美的,许多新的实验事实都在动摇经典物理学的基本概念.1900 年 4 月 27 日,著名的英国物理学家开尔文(Lord · Kelvin)在《19 世纪热和光的动力理论上空的乌云》的长篇讲话中指出:“在已经基本建成的科学大厦中,后辈物理学家似乎只要做一些零碎的修补工作就行了;但是,在物理学晴朗天空的远处,还有两朵令人不安的乌云.”他所指的这两朵“乌云”,就是当时物理学无法解释的两个现象,其中一个称之为“紫外灾难”,与黑体辐射有关;另一个为“以太风”,与迈克尔逊 — 莫雷实验有关.正是这两朵“乌云”不久便掀起了物理学上一场深刻的革命,一个导致量子力学的诞生,一个导致相对论的诞生.

§ 1.1 黑体辐射与普朗克的量子化假设

1.1.1 黑体辐射的实验规律

热辐射是物体的一种电磁辐射现象,所有物体都能发射热辐射,例如炽热物体的发光就是一种热辐射现象.室温下的物体通常不辐射可见光,但辐射大量看不见的红外光,红外光也是电磁波,当物体温度升高后,辐射就容易为人们所觉察.一般地说,温度越高的物体的热辐射中,包含的短波长成分越多;温度越低则长波长的成分越多.例如,普通家用煤炉温度不高,煤火中波长较长的红光较多;被鼓风机吹旺的炼钢炉膛温度很高,发出耀眼的白光,其中包含了波长较短的黄光、绿光和蓝光.因此,在冶金学中,人们通常根据炉内钢水的颜色来分析炼钢的好坏.在天文学中,靠辐射的强度分布来判断星体表面温度.这一切都大大推动了对热辐射的研究.

物体不仅有热辐射现象,对光也会有吸收现象.通常用吸收系数 $\alpha(\lambda, T)$ 来表示物体的吸收本领.它定义为物体在温度 T 时,有波长为 λ 的光入射,被物体吸收的该波长的光能量与入射的该波长的光能量之比.如果 $\alpha(\lambda, T) = 1$,我们就称这种物体叫**黑体**,黑体能够吸收射到它表面的全部电磁辐射.自然界不存在真正的黑体,任何物体的表面都对电磁波有一定的反射能力.我们可以用人工方法得到十分近似的黑体,例如,只要在一个空腔的壁上挖一个小孔,小孔的表面就是一个相当好的黑体了,只要进入这个小孔的光线就很难再逃逸出空腔,它在腔内壁经过若干次反射,能量便

完全被吸收了,如图 1.1.1 所示.

1859 年基尔霍夫 (G · R · Kirchhoff) 指出:任何物体在同一温度 T 下的辐射本领 $r(\nu, T)$ 与吸收本领 $\alpha(\nu, T)$ 成正比,其比值只与 ν 和 T 有关:

$$\frac{r(\nu, T)}{\alpha(\nu, T)} = \frac{c}{4} \rho(\nu, T)$$

(1.1.1)

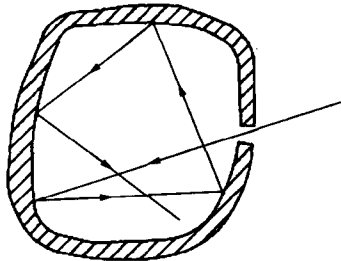


图 1.1.1 空腔小孔

$\rho(\nu, T)$ 是与物质无关的普适函数,称为热辐射的标准能谱.表示在频率 ν 附近单位频率范围内的能量密度.在实验和理论上探求普适函数 $\rho(\nu, T)$ 成为当时物理学家解决热辐射问题的关键.对吸收本领 $\alpha(\nu, T) = 1$ 的绝对黑体,只要测出其发射本领 $r(\nu, T)$,就得到热辐射能量谱 $\rho(\nu, T)$.有时将热辐射能量谱表示成波长和温度的函数 $\rho(\lambda, T)$.如图 1.1.2 给出了不同温度下黑体辐射的能谱分布曲线.

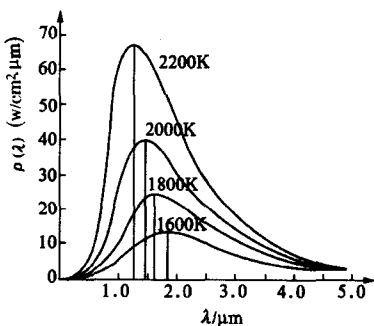


图 1.1.2 黑体辐射谱

通过对大量实验结果的分析可归纳出下列几点结论:

(1) 每条曲线都只由温度决定,与腔壁的材料无关.

(2) 每条曲线都有一个极大值,其相应的波长设为 λ_{max} ,随着温度的增加, λ_{max} 的值减小,与绝对温度 T 成反比

$$\lambda_m T = b \quad (1.1.2)$$

其中 b 是一个常数, $b = 2897.756 \mu\text{m} \cdot \text{K}$. 1893 年维恩 (W · Wien)

曾在理论上推导出这一结果,因此式(1.1.2)称为维恩定律.

(3) 黑体辐射的总辐射本领与它的绝对温度的四次方成正比

$$R(T) = \int_0^{\infty} r(\nu, T) d\nu = \int_0^{\infty} \frac{c}{4} \rho(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4 \quad (1.1.3)$$

其中 $\sigma = 5.670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ 称为斯忒藩—玻耳兹曼系数. 上式称为斯忒藩—玻耳兹曼(Stefan—Boltzman)定律.

1.1.2 黑体辐射的经典理论公式

1893年维恩(W. Wien)利用热力学知识及一些假设得到辐射能量分布的经验关系式

$$\rho(\nu, T) = C_1 \nu^3 e^{-C_2 \nu / T} \quad (1.1.4)$$

式中 C_1, C_2 为经验参数, T 为平衡时的温度. 除了在低频部分有显著的偏差外,此公式与实验相符合得很好. 见图 1.1.3 所示.

1899年,瑞利(J. Rayleigh)和金斯(J. Jens)认为空腔内的电磁辐射形成一切可能形成的驻波,其节点在空腔壁处,由此得到辐射场中单位体积内频率 ν 附近单位频率间隔内电磁辐射的振动模数

$$N(\nu) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \quad (1.1.5)$$

这也是辐射场的自由度数目.

根据经典的能量均分定理, 图 1.1.3 各黑体辐射公式与实验的比较

当系统处于热平衡时,经典的玻耳兹曼分布律仍可应用,每一个简谐振子的能量可以在 0 到 ∞ 之间连续取值,则一个振动自由度的平均能量为

