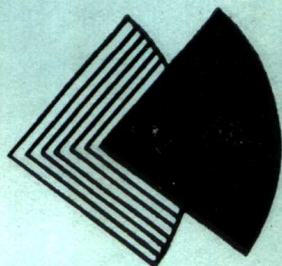


普通物理学辅导

量子物理学



(第五册)

西南师范大学出版社

电大 职大 夜大 函大
普通物理学辅导 (五)

(量子物理学基础)

殷 传 宗 编

西南师范大学出版社

普通物理学辅导(五)

殷传宗 编

西南师范大学出版社出版
(重庆 北碚)

新华书店重庆发行所发行
重庆印制第六厂印刷

开本: 787×1092 1/32 印张: 5 字数: 110千

1988年3月第一版

1988年3月第一次印刷

印数: 1—3,000

ISBN 7—5621—0674—8/O·5

定价: 1.12元

前 言

《普通物理学辅导》是为电视大学、职工大学、夜大学和函授大学一年级学生学习普通物理学编写的一套辅导丛书。其内容与电大大纲所规定的深度和广度相一致。编写时以现行电视大学教材《普通物理学讲义》一书为主要参考书，将书中大量习题作为本书的思考题和例题。本书亦可以作为自学者和中学物理教师的参考书。

为便于读者阅读，全书共分五个分册，第一分册为《力学》，第二分册为《热学》，第三分册为《电磁学》，第四分册为《波动光学》，第五分册为《量子物理学基础》。本分册由殷传荣编写。

由于水平有限，本书一定存在不少缺点和错误，敬希读者批评指正。

编 者

1986年12月

目 录

第五篇 量子物理学基础	(1)
第十九章 光的量子性	(4)
一、基本概念和基本公式	(4)
(一) 热辐射 基尔霍夫定律	(4)
(二) 黑体辐射定律	(7)
(三) 普朗克公式 能量子	(10)
(四) 光电效应 爱因斯坦方程	(15)
(五) 康普顿效应 伦琴射线的散射	(16)
二、思考题和例题	(22)
三、习 题	(50)
第二十章 原子的量子理论	(53)
一、基本概念和基本公式	(53)
(一) 卢瑟福的原子有核模型	(53)
(二) 氢原子光谱的实验规律	(54)
(三) 玻尔的氢原子理论	(57)
(四) 实物粒子的“波”“粒”两象性	(61)
(五) 波函数及其物理意义	(62)
(六) 不确定关系	(64)
(七) 薛定谔方程	(65)
(八) 氢原子的量子力学处理方法	(67)

(九) 电子自旋.....	(75)
(十) 原子壳层结构和元素周期表.....	(79)
(十一) 原子发光.....	(88)
(十二) 受激辐射 激光.....	(90)
二、思考题和例题.....	(93)
三、习题.....	(149)
附 习题答案.....	(152)

第五篇 量子物理学基础

量子物理是近代物理理论体系的两大组成部分之一，它是上一世纪末、本世纪初在实验基础上发展起来的。当时物理学受到几方面的挑战，例如：热辐射问题、光电效应问题、原子结构问题等，这些问题使经典物理遇到极大的困难，促进了新理论的建立。正是通过这些问题的研究，使人们逐步摆脱经典概念的束缚，建立起一门崭新的学科——量子物理学。可以说它是一门反映微观运动客观规律的学说。它研究微观粒子的运动变化规律和物质的微观结构等。

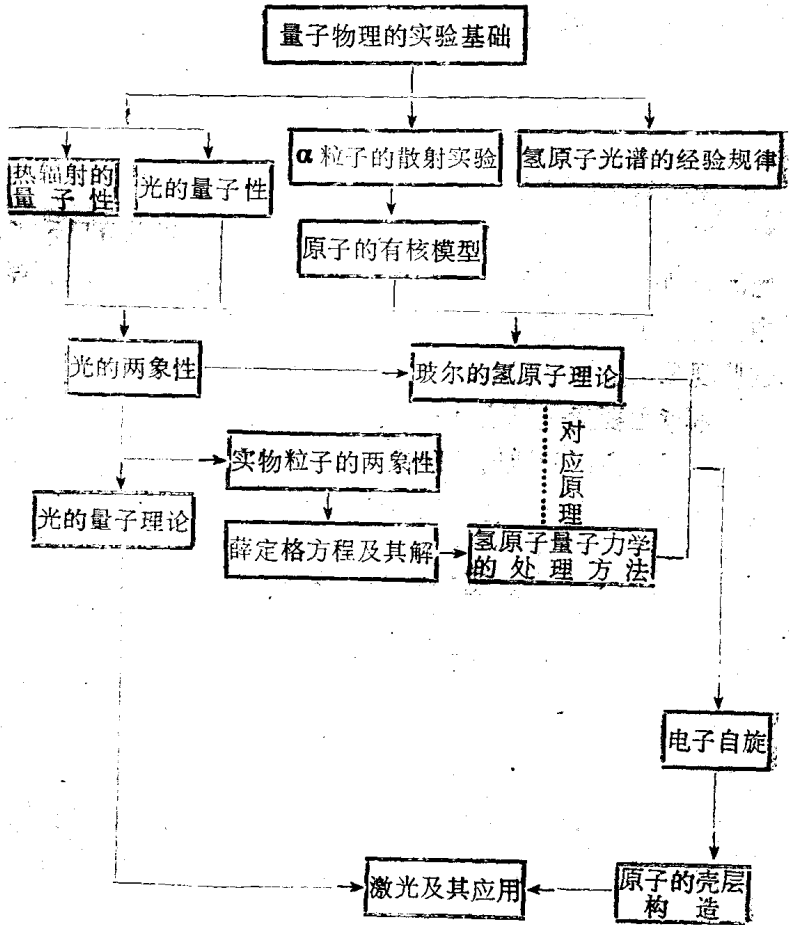
这一篇的特点是：内容抽象，概念全新。因为微观粒子（如电子、原子、原子核……），既看不见，又摸不着，而其中许多物理概念和物理思想又与经典物理有本质的区别，好多物理思想和概念又是第一次才接触到。因此在学习这部分内容时，非但不易藉助宏观现象作为模型用来引导我们很直观地理解，且过去形成的以宏观规律来考虑问题的习惯和成见，还会成为我们学习这些微观规律的主要障碍和困难。所以我们要特别注意搞清物理概念和物理思想，注意培养自学能力、抽象思维能力和逻辑推理能力，注意培养辩证唯物主义世界观。

要学好量子物理，还必须重视实验事实，特别是对量子物理的建立和发展起了重大作用的那些实验，如黑体辐射、

光电效应、原子光谱、电子衍射以及电子自旋等。要弄清楚这些实验得到了什么结果，经典物理在解释这些现象时遇到了什么困难，从而导致什么新的思想、概念的引入、新的规律的发现等等。在遇到一个新的现象和新的概念时应认真去体会、理解，不要因为它和自己已有的概念不符而对它抱怀疑态度。另一方面，对原有的规律也不要一概否定，因为有些规律是普适的，在微观领域中同样适用，这就要分清哪些是微观领域中特有的规律，哪些又是共同的。当然，这些都应通过实验来确定，切不可“想当然”。因此，要根据实验，建立理论，消除成见，澄清误解。

本篇着重叙述量子物理学的基础部分，其主要内容列表如下：

量子物理学基础的主要内容



第十九章 光的量子性

上一篇我们讨论了光在传播过程中的许多性质，如反射、折射、干涉、衍射和偏振等。光的这些性质充分显示了光的波动性。然而在进一步研究光和物质的相互作用过程中，发现了一些用光的波动理论无法解释的现象。正是在对这些现象的解释过程中，产生了最初的量子概念。

本章主要通过讨论热辐射、光电效应和康普顿效应，阐述光的另一方面的性质，即粒子性，从而使我们对光的本性——波粒二象性，有个全面的辩证的认识。

一、基本概念和基本公式

(一) 热辐射 基尔霍夫定律

1、什么是热辐射？

(1) 辐射能 处在任一温度下，一切宏观物体都以电磁波的形式向周围空间辐射能量，这种能量叫做辐射能。

(2) 热辐射 实验表明，物体在一定时间内以电磁波形式向周围辐射的能量以及辐射能按波长的分布都跟物体的温度有关。由于这种辐射在量值上以及在按波长分布上都取决于辐射物体的温度，所以这种辐射叫做温度辐射或热辐射。

(3) 平衡热辐射 物体在向外发射电磁波的同时，也在不断地吸收由周围物体发射来的辐射能。因此，物体决不

会因为热辐射而使自身的能量全部消耗掉。当某一物体从外界吸收的能量恰好等于这个物体因辐射而减少的能量时，这一物体的热辐射和吸收达到平衡，叫做平衡热辐射。物体处于这种状态时，温度恒定不变。

为了描述各种物体的热辐射现象，需要引入下列两个物理量，来描述物体向外发射辐射能的本领。

2、辐出度 单色辐出度

(1) 单色辐出度 (旧称单色辐射本领，简称辐射本领)。定义为：单位时间内从物体表面单位面积上所辐射的波长在 λ 到 $\lambda + d\lambda$ 区间内的辐射能 dM_λ 与波长间隔 $d\lambda$ 的比值叫做物体的单色辐出度，用 $M_\lambda(T)$ 表示。

$$\text{即 } M_\lambda(T) = \frac{dM_\lambda}{d\lambda} \quad (19-1)$$

实验表明， $M_\lambda(T)$ 与物体的温度 T 及辐射的波长 λ 有关，所以常用 $M(\lambda, T)$ 表示。它反映了在不同温度下辐射能按波长分布的情况。 $M_\lambda(T)$ 的单位是 $W \cdot m^{-2}$ (瓦/米²)。

(2) 辐射出射度 (旧称总发射本领) 或简称辐出度。定义为：单位时间内从物体表面单位面积上所辐射的各种波长的总辐射能，称为辐出度，用 $M(T)$ 表示。

$$\text{即 } M(T) = \int_0^\infty M_\lambda(T) d\lambda \quad (19-2)$$

显然，辐射出射度只是 T 的函数。 $M(T)$ 的单位是 $W \cdot m^{-2}$ 。

不同的物体，特别是在其表面情况 (如粗糙程度等) 不同时，将有不同的单色辐出度和辐射出射度。

3、吸收比 反射比

(1) 吸收比 在某一温度下物体吸收的能量与入射总能量的比值，称为该物体的吸收比（旧称吸收系数或吸收率）。

即

$$\text{吸收比} = \frac{\text{物体吸收的能量}}{\text{入射总能量}}$$

吸收比随入射能量的波长和物体的温度而变。

(2) 单色吸收比 它表示当物体在温度 T 时，对于物体吸收波长在 $\lambda \rightarrow \lambda + d\lambda$ 范围内的辐射能和该波长范围内入射总能量之比称单色吸收比，记作 $a(\lambda, T)$ 。显然， $a(\lambda, T)$ 是入射波长 λ 和物体温度 T 的函数。

(3) 单色反射比 对反射比同样有

$$\text{反射比} = \frac{\text{物体反射的能量}}{\text{入射总能量}}$$

并且用 $r(\lambda, T)$ 表示单色反射比，它也是 λ 和 T 的函数。

对于不透明物体，根据能量守恒定律，物体的单色吸收比与单色反射比之和为1，即

$$a(\lambda, T) + r(\lambda, T) = 1$$

(4) 单色透射比 对于透明物体，除吸收和反射外，还有一部分被透射。同样，可以引入透射比和单色透射比，记作 $t(\lambda, T)$ ，它也是 λ 和 T 的函数，并有

$$a(\lambda, T) + r(\lambda, T) + t(\lambda, T) = 1 \quad (19-4)$$

(5) $a(\lambda, T)$ 、 $r(\lambda, T)$ 和 $t(\lambda, T)$ 都是纯数，是无量纲的量。

4、基尔霍夫定律 1859年，基尔霍夫根据热平衡原理得出这样一个定律：任何物体的单色辐出度与单色吸收比的

比值与物体的性质无关，而只是波长（或频率）和温度的普适函数。

$$\text{即 } \frac{M(\lambda, T)}{a(\lambda, T)} = f(\lambda, T) \quad (19-5)$$

由此可见，在热平衡的情况下，单色辐出度较大的物体，其单色吸收比也一定较大，反之亦然。

（二）黑体辐射定律

1、黑体辐射

（1）什么叫黑体？能够在任何温度下全部吸收投射其上的各种波长的电磁辐射的物体，我们就称它为绝对黑体（简称黑体）。显然，它对任意波长的吸收比均为1，即 $a_B(\lambda, T) = 1$ ，没有任何反射（和透射），即

$$r_B(\lambda, T) = t_B(\lambda, T) = 0.$$

（2）哪些物体是绝对黑体？上面的定义是一种理想模型，自然界中并不存在真正的黑体。然而我们可以用人为的方法制成一种黑体模型，即用不透明材料制成开一小孔的空腔，因为外来的任何辐射通过小孔进入空腔后，在腔内进行多次反射（如图19-1），而每一次反射腔壁都将吸收一部分辐射能，最后将进入的辐射几乎全部被吸收而很少有机会再从小孔反射出去。所以可以认为小孔是绝对黑体。如果我们把这个空腔加热，那末，小孔向外的辐射，也可以认为是绝对黑体的辐射（即空腔辐射）。例如冶炼炉上开的小

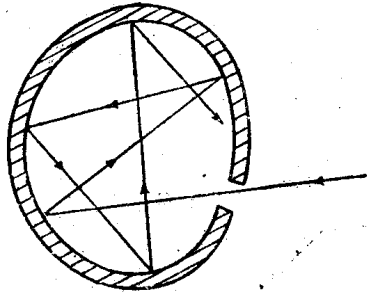


图19-1

射几乎全部被吸收而很少有机会再从小孔反射出去。所以可以认为小孔是绝对黑体。如果我们把这个空腔加热，那末，小孔向外的辐射，也可以认为是绝对黑体的辐射（即空腔辐射）。例如冶炼炉上开的小

孔，建筑物上的小窗口等，都可以认为是绝对黑体。

(3) 引进绝对黑体的概念后，基尔霍夫定律就可以表示为：

$$\frac{M(\lambda, T)}{a(\lambda, T)} = \frac{M_B(\lambda, T)}{a_B(\lambda, T)} = M_B(\lambda, T) = f(\lambda, T) \quad (19-6)$$

即任何物体的单色辐出度与单色吸收比的比值，等于同一温度下对同一波长的绝对黑体的单色辐出度 $M_B(\lambda, T)$ 。

将(19-6)式对所有波长积分，就有

$$M(T) = \int_0^{\infty} M(\lambda, T) d\lambda = \int_0^{\infty} a(\lambda, T) M_B(\lambda, T) d\lambda$$

于是

$$\frac{M(T)}{M_B(T)} = \frac{\int_0^{\infty} a(\lambda, T) M_B(\lambda, T) d\lambda}{\int_0^{\infty} M_B(\lambda, T) d\lambda} = \alpha(T)$$

上式可写成

$$\frac{M(T)}{a(T)} = M_B(T) \quad (19-7)$$

此式表明，任一物体在某一温度 T 下的辐出度 $M(T)$ 与吸收比 $a(T)$ 的比值，等于同一温度下绝对黑体的辐出度 $M_B(T)$ ，这就是基尔霍夫定律的积分形式。

基尔霍夫定律是一切物体热辐射的普遍规律。

(4) 黑体辐射

黑体所发出的电磁辐射。其辐射能量按波长的分布规律只和黑体的温度有关，而和组成黑体的材料无关。实验上是利用空腔辐射来测定黑体的单色辐出度 $M_B(\lambda, T)$ 随 λ 的变化情况，改变空腔壁的温度，可测出不同 T 时的情况(如图19-2)。

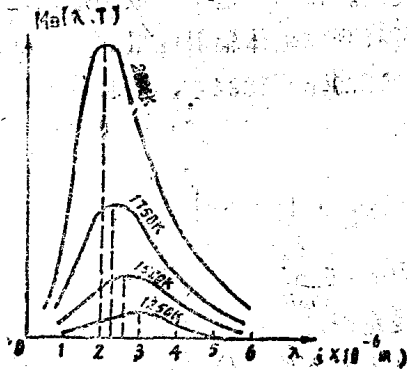


图19-2

由图可以看出两个明显的特点：一是随着温度的升高， $M_B(T)$ 将迅速增加

$[M_B(T) = \int_0^{\infty} M_B(\lambda, T) d\lambda]$ ，即黑体的辐出度，也就是曲线下的面积]；另一是每条曲线都有一个峰值。随着温度的升高，峰值位置左移，即相应的波长(称峰值波长)减小。

对于黑体辐射规律的研究在物理学的发展史上具有十分重要的意义。因为人类对于量子现象的认识正是从这一研究开始的。此外，黑体辐射规律在实际中有重要的作用。

2、黑体辐射定律

(1) 斯忒藩——玻尔兹曼定律 由基尔霍夫定律可知，绝对黑体的单色辐出度 $M_B(\lambda, T)$ 就是普适函数

$f(\lambda, T)$ 。因此，研究 $M_B(\lambda, T)$ 就成为研究热辐射的关键。找出了这个函数的形式，也就是从理论上解释了实验所得到的黑体辐射能量的分布曲线，这是热辐射的基本问题。1879年到1884年，斯忒藩和玻尔兹曼先后从实验和理论上指出黑体的辐出度与绝对温度 T 的四次方成正比，即

$$M_B(T) = \int_0^{\infty} M_B(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4 \quad (19-8)$$

式中 $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ 。这就是斯忒藩——玻尔兹曼定律。

(2) 维恩位移定律 维恩研究了图19-2中的实验曲线得知：曲线峰值 λ_m (相应于 $M_B(\lambda, T)$ 有一最大值的波长) 与 T 的关系为

$$\lambda_m T = b \quad (19-9)$$

式中 $b = 2.897 \times 10^{-3} \text{m} \cdot \text{K}$ 。这一结果称为维恩位移定律。它指出：当绝对黑体的温度升高时，其单色辐出度的最大值向短波方向移动。

(三) 普朗克公式 量子

1、实验结果 在上一世纪末，已经从实验上测定了绝对黑体的单色辐出度 $M_B(\lambda, T)$ 与 λ 、 T 的关系曲线如图19-8所示：

2、经典理论的困难 如何从理论上解释并导出符合实

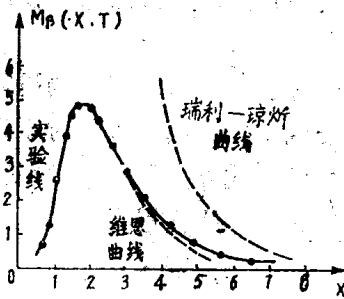


图19-3

验结果的函数式 $M_B(\lambda, T) = f(\lambda, T)$ ，即绝对黑体的单色辐出度与热力学温度及辐射波长的关系式。

上世纪末，许多物理学家都企图用经典物理理论导出这一关系式，但都失败了。由经典理论导出的公式都与实验结果不符，其中最著名的有：

(1) 瑞利——金斯公式 关于黑体辐射的能量按波长（或频率）分布的公式，首先由瑞利在1900年根据经典电动力学和分子运动论中的能量按自由度均分原理导出，后又由金斯在1905年仔细证明，故称瑞利——金斯公式。该公式给出了黑体的单色辐出度和波长及温度之间的关系，可表为

$$M_B(\lambda, T) = 2\pi CKT \cdot \lambda^{-4} \quad (19-10)$$

其中 C 为真空中的光速， K 为波尔兹曼常数。将此式与实验结果进行比较，发现在长波部分较为符合，但若把上式对所有波长积分，将得到：

$$M_B(T) = \int_0^{\infty} M_B(\lambda, T) d\lambda = \int_0^{\infty} 2\pi c \frac{KT}{\lambda^4} d\lambda \quad (19-11)$$

显然，在 $\lambda \rightarrow 0$ 时与实验结果不符，所以称为“紫外灾难”，如图19-3所示。

(2) 维恩公式 1896年维恩利用辐射按波长的分布类似于麦克斯韦分子速率分布的思想，导出：

$$M_B(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5} e^{-C_2/\lambda T} \quad (19-12)$$

式中 $C_1 = 3.70 \times 10^{-5} \text{ erg} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{S}^{-1}$ ， $C_2 = 1.43 \text{ cm} \cdot \text{K}$ ，都是由实验确定的。维恩公式只在短波范围内与实验结果相