



普通高等教育“九五”国家级重点教材



清华大学教材

# 大学物理学

第五册

# 量子物理

第二版

张三慧 主编



清华大学出版社

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

(京)新登字 158 号

## 内 容 简 介

本书是清华大学教材《大学物理学》第二版第五册,讲述量子力学的基本概念和规律,包括微观粒子的二象性,薛定谔方程,原子中的电子和发光机制,固体中的电子,量子统计的基本概念和核物理的基础知识等。除了基本内容外,还专题介绍了自由电子激光,激光冷却,多光子吸收,核磁共振,扫描隧穿显微镜,正电子湮没技术等今日物理趣闻与现代技术。此外,还介绍了几位有关科学家的传略。基本内容简明扼要,附加内容通俗易懂。

本书可作为高等院校的大学物理教材,也可以作为中学物理教师教学和其他读者自学的参考书。

书 名: 大学物理学(第五册)量子物理(第二版)

作 者: 张三慧 主编

出版者: 清华大学出版社(北京清华大学学研大厦,邮编 100084)

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

印刷者: 北京丰华印刷厂

发行者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 850×1168 1/32 印张: 8.375 字数: 211 千字

版 次: 2000 年 8 月第 2 版 2001 年 2 月第 4 次印刷

书 号: ISBN 7-302-04010-9/O·247

印 数: 52001~67000

定 价: 11.00 元

# 目 录

量子物理概述	(1)
<b>第 1 章 波粒二象性</b>	<b>(3)</b>
1.1 黑体辐射	(3)
1.2 光电效应	(8)
1.3 光的二象性 光子	(11)
1.4 康普顿散射	(16)
1.5 粒子的波动性	(21)
1.6 概率波与概率幅	(26)
1.7 不确定关系	(32)
提要	(38)
思考题	(39)
习题	(40)
科学家介绍 德布罗意	(44)
<b>第 2 章 薛定谔方程</b>	<b>(47)</b>
2.1 薛定谔得出的波动方程	(47)
2.2 无限深方势阱中的粒子	(53)
2.3 势垒穿透	(61)
2.4 谐振子	(67)
提要	(69)
思考题	(70)
习题	(71)

科学家介绍 薛定谔 ..... (74)

物理学与现代技术 I 扫描隧穿显微镜 ..... (76)

### 第3章 原子中的电子..... (80)

3.1 氢原子..... (80)

3.2 电子的自旋与自旋轨道耦合..... (95)

\*3.3 微观粒子的不可分辨性和泡利不相容原理 ..... (103)

3.4 各种原子核外电子的排布 ..... (105)

\*3.5 X射线 ..... (111)

3.6 激光 ..... (115)

\*3.7 分子的转动和振动能级 ..... (122)

提要..... (129)

思考题..... (132)

习题..... (133)

科学家介绍 玻尔..... (138)

物理学与现代技术 II 激光冷却与捕陷原子 ..... (141)



#### 今日物理趣闻 A 自由电子激光



#### 今日物理趣闻 B 多光子吸收



#### 今日物理趣闻 C 非线性光学

C.1 倍频与混频 ..... (154)

C.2 自聚焦 ..... (156)

C.3 受激拉曼散射 ..... (156)



**第 4 章 固体中的电子** ..... (158)

4.1 自由电子按能量的分布 ..... (158)

4.2 金属导电的量子论解释 ..... (165)

\*4.3 量子统计 ..... (167)

4.4 能带 导体和绝缘体 ..... (173)

4.5 半导体 ..... (177)

4.6 PN 结 ..... (179)

4.7 半导体器件 ..... (181)

提要 ..... (185)

思考题 ..... (187)

习题 ..... (188)

**第 5 章 核物理** ..... (190)

5.1 核的一般性质 ..... (190)

5.2 核力 ..... (194)

5.3 核的结合能 ..... (196)

\*5.4 核的液滴模型 ..... (200)

5.5 放射性和衰变定律 ..... (205)

5.6  $\alpha$  衰变 ..... (211)

\*5.7 穆斯堡尔效应 ..... (214)

5.8  $\beta$  衰变 ..... (221)

5.9 核反应 ..... (226)

提要 ..... (230)

思考题 ..... (232)

## IV 目录

---

习题.....	(233)
物理学与现代技术 III 正电子湮没技术 .....	(236)
物理学与现代技术 IV 核磁共振 .....	(239)
<b>元素周期表</b> .....	(242)
<b>数值表</b> .....	(243)
<b>习题答案</b> .....	(245)
<b>诺贝尔物理学奖获得者名录</b> .....	(250)
<b>索引</b> .....	(255)

# 量子物理概述

量子概念是1900年普朗克首先提出的,到今天已经整整一百年了。期间,经过爱因斯坦、玻尔、德布罗意、玻恩、海森伯、薛定谔、狄拉克等许多物理大师的创新努力,到20世纪30年代,就已经建成了一套完整的量子力学理论。这一理论是关于微观世界的理论。和相对论一起,它们已成为现代物理学的理论基础。量子力学已在现代科学和技术中获得了较大的成功,尽管它的哲学意义还在科学家中间争论不休。应用到宏观领域时,量子力学就转化为经典力学,正像在低速领域相对论转化为经典理论一样。

量子力学是一门奇妙的理论。它的许多基本概念、规律与方法都和经典物理的基本概念、规律和方法截然不同。本书将介绍有关量子力学的基础知识。第1章先介绍量子概念的引入——微观粒子的二象性,由此而引起的描述微观粒子状态的特殊方法——波函数,以及微观粒子不同于经典粒子的基本特征——不确定关系。然后在第2章介绍微观粒子的基本运动方程(非相对论形式)——薛定谔方程。对于此方程,首先把它应用于势阱中的粒子,得出微观粒子在束缚态中的基本特征——能量量子化、势垒穿透等。

第3章用量子概念介绍(未经详细的数学推导)了电子在原子中运动的规律,包括能量、角动量的量子化,自旋的概念,泡利不相容原理,原子中电子的排布,X光和激光的原理等。

第4章介绍固体中的电子的量子特征,包括自由电子的能量分布以及导电机理,能带理论及对导体、绝缘体、半导体性能的解释。由于固体中的电子的讨论已涉及大量微观粒子的运动,所以简要地介绍了量子统计概念。

## 2 量子物理概述

---

最后一章介绍原子核的基础知识,包括核的一般性质、结合能、核模型、核衰变及核反应等。关于基本粒子的知识和当今关于宇宙及其发展的知识也都属于量子物理的范围,其基本内容在本套书第一册力学“今日物理趣闻 A 基本粒子”和第二册热学“今日物理趣闻 A 大爆炸和宇宙膨胀”中已分别有所介绍,在本书中不再重复。



# 第1章 波粒二象性

量子物理理论起源于对波粒二象性的认识。本章着重说明波粒二象性的发现过程、定量表述和它们的深刻含义。先介绍普朗克在研究热辐射时提出的能量子概念,再介绍爱因斯坦引入的光子概念以及用光子概念对康普顿效应的解释,然后说明德布罗意引入的物质波概念。最后讲解概率波、概率幅和不确定关系的意义。这些基本概念都是对经典物理的突破,对了解量子物理具有基础性的意义,它们的形成过程也是很发人深思的。

## 1.1 黑体辐射

当加热铁块时,开始看不出它发光。随着温度的不断升高,它变得暗红、赤红、橙色而最后成为黄白色。其他物体加热时发的光的颜色也有类似的随温度而改变的现象。这似乎说明在不同温度下物体能发出频率不同的电磁波。事实上,仔细的实验证明,在任何温度下,物体都向外发射各种频率的电磁波。只是在不同的温度下所发出的各种电磁波的能量按频率有不同的分布,所以才表现为不同的颜色。这种能量按频率的分布随温度而不同的电磁辐射叫做热辐射。

为了定量地表明物体热辐射的规律,引入**光谱辐射出射度**的概念。频率为 $\nu$ 的光谱辐射出射度是指单位时间内从物体单位表面积发出的频率在 $\nu$ 附近单位频率区间的电磁波的能量。光谱辐射出射度(按频率分布)用 $M_\nu$ 表示,它的SI单位为 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{Hz})$ 。实验测得的100 W白炽灯钨丝表面在2750 K时以及太阳表面的

$M_\nu$  和  $\nu$  的关系如图 1.1 所示(注意图中钨丝和太阳的  $M_\nu$  的标度不同。太阳的吸收谱线在图中都忽略了)。从图中可以看出,钨丝发的光的绝大部分能量在红外区域,而太阳发的光中,可见光占相当大的成分。

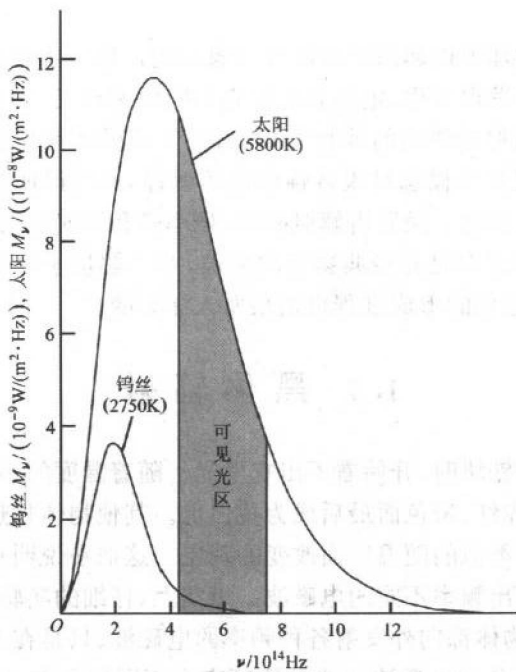


图 1.1 钨丝和太阳的  $M_\nu$  和  $\nu$  的关系曲线

物体在辐射电磁波的同时,还吸收照射到它表面的电磁波。如果在同一时间内从物体表面辐射的电磁波的能量和它吸收的电磁波的能量相等,物体和辐射就处于温度一定的热平衡状态。这时的热辐射称为平衡热辐射。下面只讨论平衡热辐射。

在温度为  $T$  时,物体表面吸收的频率在  $\nu$  到  $\nu + d\nu$  区间的辐射

能量占全部入射的该区间的辐射能量的份额,称做物体的**光谱吸收比**,以 $a(\nu)$ 表示。实验表明,辐射能力越强的物体,其吸收能力也越强。理论上可以证明,尽管各种材料的 $M_\nu$ 和 $a(\nu)$ 可以有很大的不同,但在同一温度下二者的比( $M_\nu/a(\nu)$ )却与材料种类无关,而是一个确定的值。能完全吸收照射到它上面的各种频率的光的物体称做**黑体**。对于黑体, $a(\nu) = 1$ 。它的光谱辐射出射度应是各种材料中最大的,而且只与频率和温度有关。因此研究黑体辐射的规律就具有更基本的意义。

煤烟是很黑的,但也只能吸收 99% 的入射光能,还不是理想黑体。不管用什么材料制成一个空腔,如果在腔壁上开一个小洞(图 1.2),则射入小洞的光就很难有机会再从小洞出来了。这样一个小洞实际上就能完全吸收各种波长的入射电磁波而成了一个黑体。加热这个空腔到不同温度,小洞就成了不同温度下的黑体。用分光技术测出由它发出的电磁波的能量按频率的分布,就可以研究**黑体辐射**的规律。

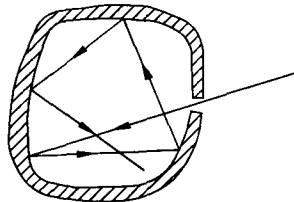


图 1.2 黑体模型

19 世纪末,在德国钢铁工业大发展的背景下,许多德国的实验和理论物理学家都很关注黑体辐射的研究。有人用精巧的实验测出了黑体的 $M_\nu$ 和 $\nu$ 的关系曲线,有人就试图从理论上给以解释。1896 年,维恩(W. Wien)从经典的热力学和麦克斯韦分布律出发,导出了一个公式,即**维恩公式**

$$M_\nu = \alpha \nu^3 e^{-\beta\nu/T} \quad (1.1)$$

式中 $\alpha$ 和 $\beta$ 为常量。这一公式给出的结果,在高频范围和实验结果符合得很好,但在低频范围有较大的偏差(图 1.3)。

1900 年 6 月瑞利发表了他根据经典电磁学和能量均分定理

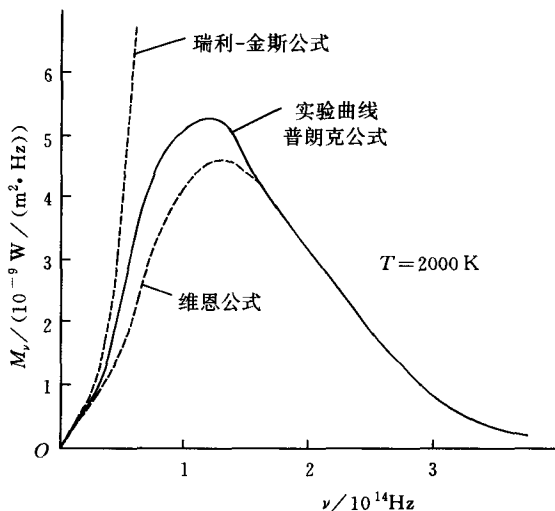


图 1.3 黑体辐射的理论和实验结果的比较

导出的公式(后来由金斯(J. H. Jeans)稍加修正),即**瑞利-金斯公式**

$$M_{\nu} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT \quad (1.2)$$

这一公式给出的结果,在低频范围内还能符合实验结果;在高频范围就和实验值相差甚远,甚至趋向无限大值(图 1.3)。在黑体辐射研究中出现的这一经典物理的失效,曾在当时被有的物理学家惊呼为“紫外灾难”。

1900年12月14日普朗克(Max Planck)发表了他导出的黑体辐射公式,即**普朗克公式**

$$M_{\nu} = \frac{2\pi h}{c^2} \frac{\nu^3}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad (1.3)$$

这一公式在全部频率范围内都和实验值相符(图 1.3)!

普朗克所以能导出他的公式,是由于在热力学分析的基础上,

他“幸运地猜到”，同时为了和实验曲线更好地拟合，他“绝望地”，“不惜任何代价地”（引文均为普朗克本人的话）提出了**能量量子化**的假设。对空腔黑体的热平衡状态，他认为是组成腔壁的带电谐振子和腔内辐射交换能量而达到热平衡的结果。他大胆地假定谐振子可能具有的能量不是连续的，而是只能取一些离散的值。以  $E$  表示一个频率为  $\nu$  的谐振子的能量，普朗克假定

$$E = nh\nu \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (1.4)$$

式中  $h$  是一常量，后来就叫**普朗克常量**。它的现代最优值为

$$h = 6.626\ 075\ 5 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

普朗克把(1.4)式给出的每一个能量值称做“**能量子**”，这是物理学史上第一次提出量子的概念。由于这一概念的革命性和重要意义，普朗克获得了1918年诺贝尔物理学奖。

至于普朗克本人，在提出量子概念后，还长期尝试用经典物理理论来解释它的由来，但都失败了。直到1911年，他才真正认识到量子化的全新的、基础性的意义。它是根本不能由经典物理导出的。

读者可以证明，在高频范围内，普朗克公式就转化为维恩公式；在低频范围内，普朗克公式则转化为瑞利-金斯公式。

从普朗克公式还可以导出当时已被证实的两条实验定律。一条是关于黑体的全部**辐射出射度**的**斯特藩-玻耳兹曼定律**：

$$M = \int_0^{\infty} M_{\nu} d\nu = \sigma T^4 \quad (1.5)$$

式中  $\sigma$  称做**斯特藩-玻耳兹曼常量**，其值为

$$\sigma = 5.670\ 51 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$$

另一条是**维恩位移律**。它说明，在温度为  $T$  的黑体辐射中，光谱辐射出射度最大的光的频率  $\nu_m$  由下式决定：

$$\nu_m = C_2/T \quad (1.6)$$

式中  $C_2$  为一常量，其值为

$$C_v = 5.880 \times 10^{10} \text{ Hz/K}$$

此式说明,当温度升高时,  $\nu_m$  向高频方向“位移”(图 1.4)。

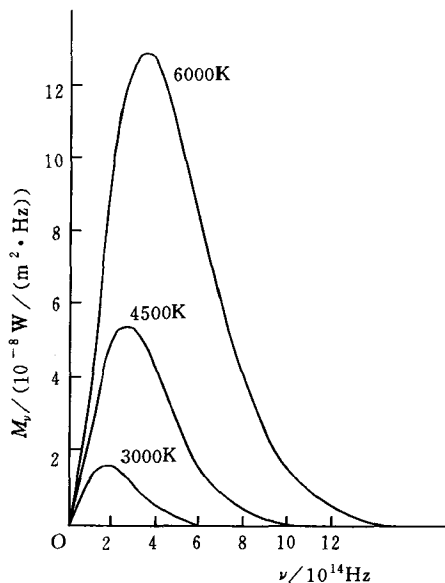


图 1.4 不同温度下的普朗克热辐射曲线

## 1.2 光电效应

19 世纪末,人们已发现,当光照射到金属表面上时,电子会从金属表面逸出。这种现象称为光电效应。

图 1.5 所示为光电效应的实验装置简图,图中 GD 为光电管(管内为真空)。当光通过石英窗口照射阴极 K 时,就有电子从阴极表面逸出,这电子叫光电子。光电子在电场加速下向阳极 A 运动,就形成光电流。

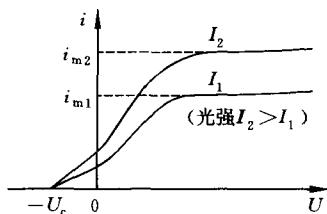
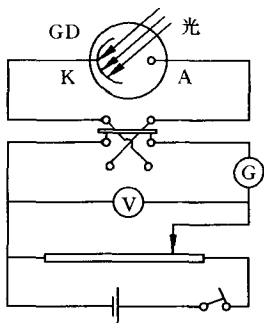


图 1.5 光电效应实验装置简图      图 1.6 光电流和电压的关系曲线

实验发现,当入射光频率一定且光强一定时,光电流  $i$  和两极间电压  $U$  的关系如图 1.6 中的曲线所示。它表明,光强一定时,光电流随加速电压的增加而增加,当加速电压增加到一定值时,光电流不再增加,而达到一**饱和值**  $i_m$ 。饱和现象说明这时单位时间内从阴极逸出的光电子已全部被阳极接收了。实验还表明饱和电流的值  $i_m$  和光强  $I$  成正比。这又说明单位时间内从阴极逸出的光电子数和光强成正比。

图 1.6 的实验曲线还表示,当加速电压减小到零并逐渐变负时,光电流并不为零。仅当反向电压等于  $U_c$  时,光电流才等于零。这一电压值  $U_c$  称为**截止电压**。截止电压的存在说明此时从阴极逸出的最快的光电子,由于受到电场的阻碍,也不能到达阳极了。根据能量分析可得光电子逸出时的最大初动能和截止电压  $U_c$  的关系应为

$$\frac{1}{2}mv_m^2 = eU_c \quad (1.7)$$

其中  $m$  和  $e$  分别是电子的质量和电量,  $v_m$  是光电子逸出金属表面时的最大速度。

实验表明,截止电压  $U_c$  和入射光的频率  $\nu$  有关,它们的关系由

图 1.7 的实验曲线表示,不同的曲线是对不同的阴极金属做的。这一关系为线性关系,可用数学式表示为

$$U_c = K\nu - U_0 \quad (1.8)$$

式中  $K$  是直线的斜率,是与金属种类无关的一个普适量。将 (1.8) 式代入 (1.7) 式,可得

$$\frac{1}{2}mv_m^2 = eK\nu - eU_0 \quad (1.9)$$

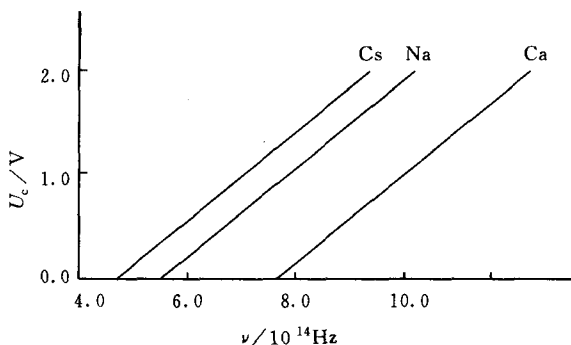


图 1.7 截止电压与入射光频率的关系

图 1.7 中直线与横轴的交点用  $\nu_0$  表示。它具有这样的物理意义:当入射光的频率等于大于  $\nu_0$  时,  $U_c \geq 0$ , 据 (1.7) 式, 电子能逸出金属表面, 形成光电流; 当入射光的频率小于  $\nu_0$  时, 电子将不具有足够的速度以逸出金属表面, 因而就不会产生光电效应。由图 1.7 可知, 对于不同的金属有不同的  $\nu_0$ 。要使某种金属产生光电效应, 必须使入射光的频率大于其相应的频率  $\nu_0$  才行。因此, 这一频率叫光电效应的**红限频率**, 相应的波长就叫**红限波长**。由 (1.8) 式可知, 红限频率  $\nu_0$  应为

$$\nu_0 = \frac{U_0}{K} \quad (1.10)$$



几种金属的红限频率如表 1.1 所列。

表 1.1 几种金属的逸出功和红限频率

金 属	钨	锌	钙	钠	钾	铷	铯
红限频率 $\nu_0/10^{14}\text{Hz}$	10.95	8.065	7.73	5.53	5.44	5.15	4.69
逸出功 $A/\text{eV}$	4.54	3.34	3.20	2.29	2.25	2.13	1.94

此外,实验还发现,光电子的逸出,几乎是在光照到金属表面上的同时发生的,其延迟时间在  $10^{-9}\text{s}$  以下。

19 世纪末叶所发现的上述光电效应和入射光频率的关系以及延迟时间甚小的事实,是当时大家已完全认可的光的波动说——麦克斯韦电磁理论——完全不能解释的。这是因为,光的波动说认为光的强度和光振动的振幅有关,而且光的能量是连续地分布在光场中的。

### 1.3 光的二象性 光子

当普朗克还在寻找他的能量子的经典根源时,爱因斯坦在量子概念的发展上前进了一大步。普朗克当时认为只有振子的能量是量子化的,而辐射本身,作为广布于空间的电磁波,它的能量还是连续分布的。爱因斯坦在他于 1905 年发表的“关于光的产生和转换的一个有启发性的观点”的文章中,论及光电效应等的实验结果时,这样写道:“尽管光的波动理论永远不会被别的理论所取代,……,但仍可以设想,用连续的空间函数表述的光的理论在应用到光的发射和转换的现象时可能引发矛盾。”于是他接着假定:“从一个点光源发出的光线的能量并不是连续地分布在逐渐扩大的空间范围内的,而是由有限个数的能量子组成的。这些能量子个个都只占据空间的一些点,运动时不分裂,只能以完整的单元产生或被吸收。”在这里首次提出的光的能量子单元在 1926 年被刘易斯(G. N. Lewis)定名为“光子”。