



普通高等教育“十二五”创新型规划教材

主编 刘竹琴

# 近代物理实验

Jindai Wuli Shiyan

 北京理工大学出版社  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

本书获延安大学学术专著与教材出版经费资助

# 近代物理实验

主 编 刘竹琴

 **北京理工大学出版社**  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

## 内容简介

本书是在延安大学物理与电子信息学院多年来使用的《近代物理实验讲义》的基础上,总结近年来教学改革的实践并参考国内外实验教材编写的。全书共有16个实验项目,分为两部分,第一部分为绪论和我校多年来开设的9个传统实验项目,即密立根油滴实验、电子自旋共振实验、核磁共振实验、夫兰克-赫兹实验、塞曼效应、氢原子光谱、全息照相、单光子计数实验及微波实验;第二部分是供学生选做的实验项目或我校将要开设的实验项目,包括半导体激光器实验、功能材料制备实验、功能材料测试实验、X射线发射谱实验、全息平面光栅制作、分光光度计、微波铁磁共振共7个实验项目。另有6个附录和2个附表。本书在注重培养学生用实验方法研究物理现象、培养实验技能的同时,重在向学生展现近代物理学发展过程中的重要实验所包含的科学思想、科学方法和科学发展的艰难历程。力求将物理思想与人文精神的融合贯穿于全书之中,也注重对学生的科学兴趣及科学素质的培养。

本书适合作为高等学校理工科本科生和研究生的近代物理实验课程教材或教学参考书,也可供有关学科实验研究人员参考。

版权专有 侵权必究

---

### 图书在版编目(CIP)数据

近代物理实验/刘竹琴主编. —北京:北京理工大学出版社, 2014. 8

ISBN 978-7-5640-9393-8

I. ①近… II. ①刘… III. ①物理学-实验-高等学校-教材 IV. ①O41-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第192774号

---

出版发行/北京理工大学出版社有限责任公司

社 址/北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编/100081

电 话/(010) 68914775 (总编室)

82562903 (教材售后服务热线)

68948351 (其他图书服务热线)

网 址/http://www.bitpress.com.cn

经 销/全国各地新华书店

印 刷/北京富达印务有限公司

开 本/710毫米×1000毫米 1/16

印 张/12.5

字 数/204千字

版 次/2014年8月第1版 2014年8月第1次印刷

定 价/26.00元

责任编辑/张慧峰

文案编辑/张慧峰

责任校对/周瑞红

责任印制/王美丽

---

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换



## 前 言

“近代物理实验”是继“普通物理实验”之后为高年级学生开设的一门综合性较强的实验学科。与普通物理实验不同，近代物理实验所涉及的物理知识面广，具有较强的综合性与技术性，它在培养学生的独立工作能力、学习如何用实验的方法与技能、配合理论课程掌握近代物理主要领域中的新概念方面起着重要的作用。近代物理实验可以丰富和活跃学生的物理思维，锻炼他们对物理现象的洞察能力，引导他们了解物理实验在物理学发展过程中的作用，正确认识新物理概念的产生、形成和发展过程。学习近代物理中的一些常用的实验方法、实验技术及仪器的使用，可进一步培养正确和良好的实验习惯以及严谨的科学作风，使学生获得一定程度的用实验方法和技术研究物理现象及规律的独立工作能力。

本书重在向学生展现近代物理学发展过程中的重要实验所包含的科学思想、科学方法和科学发展的艰难历程，力求将物理思想与人文精神的融合贯穿于全书之中，注重对学生的科学兴趣及科学素质的培养。

本书是根据面向 21 世纪物理实验教学内容与课程体系改革的精神，为培养重基础、宽口径、高素质、强能力的复合型人才，参照延安大学多年使用的《近代物理实验讲义》编写而成。

全书由刘竹琴老师负责编写定稿。

本书虽由刘竹琴老师执笔编写，但实际上是一项在继承基础上的集体创作，融入了不少老同志的贡献。实验课的教材和教学离不开实验室的建设和发展，无论是实验项目的筹建、准备和开出，还是教材的编写，都是实验室全体任课教师和实验技术人员多年辛勤劳动的成果，是集体智慧的结晶，在此对关心和支持本书编辑的所有同志表示衷心的感谢。本书在编写过程中参考了许多兄弟院校的教材，甚至引用了其中的某些内容，在此表示衷心的感谢。本书还得到了陕西省高水平大学建设专项资金资助项目（物理学 2012

SXTS05) 的资助, 在此也表示衷心感谢。

本书在编写过程中, 虽然做了许多调查和探索, 但由于编者水平有限, 书中难免出现错误和不足之处, 恳请使用本书的读者和专家提出批评和建议。

编 者



# 目 录

绪 论 .....	1
第一节 近代物理实验简介 .....	1
第二节 近代物理学相关发展史 .....	5
第三节 误差与数据处理 .....	19
实验 1 密立根油滴实验 .....	26
实验 2 电子自旋共振实验 .....	34
实验 3 核磁共振实验 .....	44
实验 4 夫兰克 - 赫兹实验 .....	54
实验 5 塞曼效应 .....	63
实验 6 氢原子光谱 .....	72
实验 7 全息照相 .....	78
实验 8 单光子计数实验 .....	86
实验 9 微波实验 .....	103
实验 10 半导体激光器实验 .....	115
实验 11 功能材料制备实验 .....	124
实验 12 功能材料测试实验 .....	131
实验 13 X 射线发射谱实验 .....	136
实验 14 全息平面光栅制作 .....	147
实验 15 分光光度计 .....	151
实验 16 微波铁磁共振 .....	160
附 录 .....	165
附录 I OMWIN Ver 1.4 使用说明 .....	165

附录 II	倍增管处理系统 .....	166
附录 III	全息照相术简介 .....	173
附录 IV	磁共振现象中“尾波”的讨论 .....	174
附录 V	平板剪切法检查光束的不平行度 .....	177
附录 VI	复合光栅的制作 .....	177
附表	.....	179
附表 I	物理基本常数 .....	179
附表 II	历届诺贝尔物理学奖获得者 .....	180
参考文献	.....	189

# 绪 论

## 第一节 近代物理实验简介

近代物理实验是继普通物理实验和无线电电子学实验之后的一门重要的实验课程，是为大学高年级学生开设的专业基础课，本课程所涉及的物理知识面较广，具有较强的综合性和技术性。物理学发展的事实说明，物理学是一门实验科学，重要的实验往往是新兴科学技术的生长点。在人们进行生产实践的背景下，实验—理论—实验相互促进，使物理学和其他科学技术得到长足的进步。

做近代物理实验，学生往往要用比做普通物理实验更多的时间进行实验前的准备及实验数据的处理和分析。因为近代物理实验有一定的难度，亦有它自身的特点。常有少数同学达不到课程要求，许多学生往往是因为不懂得如何做好实验或思想上对实验能力和素质的训练缺乏正确的认识。下面阐述一下本课程的任务、基本要求、教学内容和学习方法等几个方面的问题。

### 一、课程的目的和任务

物理学是以实验为基础的科学。物理实验在物理学发展史上占有重要的地位。近代物理实验不同于普通物理实验，是一门涉及知识面较广、综合性和技术性较强的实验课，在整个物理专业实验教学中具有承上启下的作用。从近代物理学的主要领域选取一些在物理学发展史中起过重要作用的著名实验以及在实验方法和实验技术上具有代表性的实验进行教学，可丰富和活跃学生的物理思想，培养学生对物理现象的观察能力和分析能力，引导学生了解实验在物理学发展过程中的地位和作用，学习近代物理中一些常用的实验方法和现代物理测试技术，进一步培养良好的实验素养和严谨的科学作风，使学生获得一定的用实验方法和技术研究物理现象和规律的独立工作能力。



## 二、课程教学的基本要求

(1) 学生得到实验素质的培养和实验技能的训练。通过基本实验理论的深入学习,使学生养成正确地采集实验数据、处理数据、分析结果导出正确结论的习惯,养成严谨的科学作风;通过适当数量的不同类型的实验项目的训练,培养学生的动手、动脑能力,提高学生的实验技能。

(2) 学生充分认识、深刻体会物理实验在物理学的发展中,在社会与科学的进步中的重要地位与作用。培养学生实事求是、严肃认真的科学态度与刻苦钻研、坚韧不拔的工作作风。学习深入洞察事物,正确遵从物理规律,进行敏锐思维的科学精神。

(3) 强化知识的系统化、综合化训练,促进理论与实践的结合。通过适当数目的典型实验项目的深化教学,起到对所学的多分支物理知识的有机链接与系统化的作用,从而加深对所学知识的理解。懂得物理规律的认识与数学、电子学等许多学科知识是密不可分的,要进行多学科知识的综合训练。学会用正确的理论为指导、设计正确的实验方案,选用恰当的仪器设备并进行正确的操作,掌握理论与实际相结合的科学工作过程。

## 三、课程教学内容及特点

(1) 近代物理以量子论的建立为标志,量子力学的发展与原子物理有着密切的联系。原子物理实验是近代物理实验课程选题的重要组成部分,其中有些是物理学发展史上的著名实验。这些实验提供学生亲自研究近代物理学中一些基本物理现象和规律的机会,亲自动手测量一些基本物理量,做好这些实验有助于学生了解如何利用实验手段研究物理现象与规律,加深对物理概念和理论的理解,并认识物理实验在物理学发展史中的地位和作用。

(2) 近代物理实验综合性较强,它要求学生运用涉及物理学许多领域的知识和实验技术。学生在普通物理实验中使用过的仪器如示波器、真空泵等,在本课程中还需进一步熟练并灵活地运用。在本课程中还将接触一些比较精密的、近代物理研究中常用到的测试仪器和技术,如X射线衍射技术、微波测试技术、磁共振技术等。通过实验进行科学实验技能、特别是正确选用和使用基本仪器设备能力的培养。

(3) 实验误差与数据处理是一个重要的训练内容。实验课中中学生要在普通物理实验训练的基础上,提高分析实验系统误差和随机误差的能力,用简明的方法有条理地表达数据,科学地处理数据,正确地表达实验结果,还要学习对大量数据进行理论曲线拟合的方法。

(4) 电子计算机在科学研究、现代管理和生产流程、工艺控制等方面应用越来越广泛。将计算机引入物理实验,大大提高了测量精度和实验自动化的程度。

## 四、学习方法

(1) 在近代物理实验的选题中,有许多历史上著名的实验。成功地做出这些实验的第一个物理学家(有的实验就是以他们的名字命名的)以坚韧不拔的精神,经历了长期的努力。这些典型的实验已被重复过成千上万次,一个真正的物理学家正是从重复这些人所共知的实验开始训练出来的。历史事实证明,一个新的物理现象的发现往往需要物理学家从成千上万个几乎相同的物理现象中发现具有新鲜的、差别微小然而也可能是本质不同的性质。这种对物理现象的洞察能力是物理学家取得成功的极其可贵的素质。

实验课和理论课不同,主要靠学生自己动脑思考、动手操作。近代物理实验课中许多选题是需要学生自己做好实验准备的。特别是有些选题是三年级学生在理论课中没有涉及的内容,需要学生自己学习。所以实验前一定要认真阅读有关资料,努力做好实验前理论的各种准备:弄明白命题的目标,实验的物理思想,实现的方法,所用的公式,需要什么仪器及其精确度以及关键的实验步骤等。总之,一个有科学头脑的、善于且勤于学习的学生,应将大量时间花在实验前的准备上。

(2) 学生通过实验课要锻炼自己设计实验和选用仪器的能力。一个物理现象或物理规律需要用实验方法予以实现;物理量需要通过一定的仪器来测量;实验结果要达到一定的精确度需要各种仪器精确度的配合。用成套的仪器测量所需要的全部实验结果的机会在现实生活中是很少的。一个新的物理现象的发现往往没有现成成套的仪器可以利用。所以设计实验和选用仪器的能力是进行科学研究工作、解决实际问题必须具备的能力。

(3) 原始记录是实验中获得的物理信息的最重要、最珍贵的资料。每个学生必须准备实验数据原始记录纸。实验前设计好记录表格,严肃认真地记录一切现象和数据,不要涂改或撕掉。不要怕记了“坏数据”,只有通过对其数据的分析才能确定是否需要实验仪器或实验操作进行改进。

## 五、实验课的进行程序

### 1. 实验预习

实验前进行预习。通常包括弄清命题目标、实验的物理思想、所用公式、需直接测量的物理量和记录数据的表格等。不做预习就不得动用仪器,这是

实验课的纪律。

### 2. 进行实验

完成充分预习后,指导教师要对部分内容讲解,并特别强调注意事项,经指导教师允许后,方可进行操作。

### 3. 书写实验报告

实验报告的内容通常包括:实验题目、实验仪器、实验原理、实验步骤、数据记录、数据处理、表达结果、误差分析、对结果进行讨论等。

## 六、实验室安全知识

安全操作是实验室全体工作人员以及实验人员应予以足够重视的问题。

### 1. 电气

除 220 V 的供电外,许多实验设备(如各种放电管、激光管、X 射线衍射仪等),均使用从 400 V 到 40 000 V 不等的高压电源。这些高压电都是能致命的,一定要注意实验中各种高压电器的标志。实验前在确认断电的情况下先检查地线,接好高压线后再连接供电线(有的仪器不必另外接高压线,应先接通低压电源再开高压开关),用完后一定要将高压降下来再断电。作为一个常识,接高压线或高压开关,只能用一只手操作。

射频电磁波能够通过小电容器耦合。接触高频高电压器件的任何部分都是危险的。因为人体起着接地电容器的一个板极的作用。例如高频火花发生器约 20 MHz,你的身体对地电容的作用几乎像一根电线连到水管上一样,所以要严格遵守操作规程。

需要打开仪器外壳时,一定要先拔掉电源插头!

### 2. 防辐射

$\gamma$  射线和 X 射线都能伤害人体。实验中已采取了必要的防护措施。一次实验接触和吸收的剂量是微量的,对身体并无妨碍。但即使这样,也应该尽量避免直接接触放射射线。

在调整 X 射线仪时,不要让 X 射线直接照射眼睛。不用的窗口要用铅板遮盖,并加防护罩。因为高压使空气电离产生臭氧和  $N_2O$ ,实验室内要有良好的通风。

激光能使人产生灼伤。小功率激光管发射的激光也不能直接照射眼睛。因为人眼就像一个小透镜,它将光斑聚焦在眼底,局部能量将增大许多倍。

### 3. 机械

在转动机械装置旁工作,要将头发束好。有过长的头发、过宽的裤腿和飘动的衣裙等都不适宜在转动机械旁工作。

#### 4. 低温

有的实验要接触液氮。直接接触易使皮肤局部冻伤，但主要危险来自残存液体蒸发使密闭容器爆炸，抛出玻璃碎片，所以要将容器充足液体。容器不用时，要让残存液体顺利地自然蒸发。

#### 5. 仪器

仪器损坏的主要原因来自学生违反操作规程。其中又以接错电源占多数。所以学生一定要在接线路时谨慎一些，弄清楚输入、输出电压以后再连线。对不做预习、违反操作规程、严重损坏实验设备的学生均要做处理，直至取消实验资格。我们希望不要出现这种情况，所以同学们要认真做好实验前的准备工作，用科学的态度和踏实的作风完成实验课的学习任务。

## 第二节 近代物理学相关发展史

### 一、经典物理学发展概况

#### 1. 经典力学的建立与完善

牛顿 (Isaac Newton, 1643—1727) 早在 1666 年就有了我们称之为“万有引力”的思想。在此后的二十余年中，牛顿为了证明自己的结论，对月球绕地球的运动做了极其认真的观察，在他的朋友哈雷 (Edmund Halley, 1656—1742) 的鼓励下，他于 1685—1686 年写了《自然哲学的数学原理》。它标志着物理学的真正诞生。



图 0-1 牛顿

牛顿澄清了自亚里士多德以来一直含混不清的力和运动的观念，明确了时间、空间、质量、动量等基本的物理概念。他以运动三定律和万有引力定律为主线，以他发明的微积分为工具，巧妙地构造出他的力学体系。

牛顿力学既成功地描述了天上行星、卫星、彗星的运动，又完满地解释了地上潮汐和其他物体的运动。在牛顿之前，还没有一个关于物理因果性的完整体系能够表示经验世界的任何深刻特征。

牛顿力学的辉煌成就，使其得以决定后来物理学家的思想、研究和实践的方向。《自然哲学的数学原理》采用的是欧几里得几何学的表述方式，处理的是质点力学，以后牛顿力学被推广到流体和刚体，并逐渐发展成严密的解析形式。拉格朗日 (Joseph Louis Lagrange, 1736—1813) 1788 年的《分析力学》和拉普拉斯 (Pierre Simon Marquis de Laplace, 1749—1827) 的《天体力



学》是经典力学的顶峰。到 18 世纪初期，经典力学已经成为当时的科学建筑群中无与伦比的建筑。

## 2. 经典物理学的发展

经典力学成为科学解释的最高权威和最后标准。而且直到 19 世纪末，它一直充当着物理学家在各个领域中的研究纲领。人们普遍认为，经典力学是整个物理学的基础，只要把经典力学的基本概念和基本原理稍加扩充，就能够处理面临的一切物理现象。

声学在早期几乎是独立地发展的，自牛顿以后，力学原理首先被顺利地应用于声学研究，声音被看作在弹性介质中传播的机械振动。热学是继经典力学之后发展起来的又一个成功的理论体系。热现象的研究起初是以“热质”这一力学模型为先导的。19 世纪中叶，克劳修斯（Rudolf Emanuel Clausius, 1822—1888）、麦克斯韦（James Clerk Maxwell, 1831—1879）、玻耳兹曼（Ludwig Boltzmann, 1844—1906）等人利用统计方法，把热学的宏观物理量归结为与之对应的微观分子或原子运动的统计平均值。就这样，热力学以及统计力学先后在经典力学的基础上形成了。

光学也是如此，牛顿本人一开始就把他的力学观念用于光学，他假定光是由惯性微粒组成的，以此解释已知的光学现象。虽然牛顿以后的 200 年间一直交织着微粒说和波动说的斗争，但是在牛顿运动定律应用到连续分布的媒质以后，甚至连光的波动论也不得不求助于这些定律。19 世纪初，逐步发展起来的波动光学体系已初具规模，其中以托马斯·扬（Thomas Young, 1773—1829）和菲涅耳（Augustin Jean Fresnel, 1788—1827）的著作为代表。他们两人都把以太看作传播光振动的实体。菲涅耳弄清楚光是横波，因此以太必须具有传播横波媒质那样的弹性，从力学角度讨论这种弹性体的振动，必然能够用数学方法推导出光学定律。尽管以太在性质上还有不甚明确之处，但是它作为光现象的媒质，在相当长一段时间内并未引起根本的异议。

电磁现象的早期研究是在“电流体”和“磁流体”两种力学模型的前提下进行的。库仑（Charles Augustin de Coulomb, 1736—1806）1785 年所做的著名的扭秤实验，虽然确定了电荷之间作用力与距离平方的反比关系，但他对自己的主张并未提出足够的证据，因为当时还没有电荷的量度，库仑定律本身就是对万有引力定律的类比。后来，法拉第（Michael Faraday, 1791—1867）、麦克斯韦、赫兹（Heinrich Hertz, 1857—1894）在电磁学的发展史上谱写了动人的三部曲。1831 年，法拉第发现了电磁感应定律，并首次把“场”这一崭新的概念引入物理学。1864 年，麦克斯韦把法拉第等人的研究

成果概括为一组优美的偏微分方程式，并由此预言存在着电磁波，其传播速度等于光速，而光不过是波长在某一狭小范围内的电磁波。1887年，赫兹用实验证实了电磁波，弄清楚电磁波和光波一样，也具有波动性。已经十分习惯于力学模型的物理学家同样寄希望于臆想出的媒质电磁以太，认为它与光以太一样，弥漫于整个空间，电磁波正是通过以太的振动传播的。

19世纪末期，物理学理论在当时看来已发展到相当完善的阶段。那时，一般的物理现象都可以从相应的理论中得到说明：物体的机械运动在速度比光速小得多时，准确地遵循牛顿力学的规律；电磁现象的规律被总结为麦克斯韦方程；光的现象有光的波动理论，最后也归结到麦克斯韦方程；热现象理论有完整的热力学以及玻耳兹曼、吉布斯等人建立的统计物理学。在这种情况下，当时有许多人认为物理现象的基本规律已完全被揭露，剩下的工作只是把这些基本规律应用到各种具体问题上，进行一些计算而已。

## 二、近代物理学的发展

### 1. 经典物理学遇到的困难

这种把当时物理学的理论认作“最终理论”的看法显然是错误的，因为“在绝对的总的宇宙发展过程中，各个具体过程的发展都是相对的，因而在绝对真理的长河中，人们对于在各个一定发展阶段上的具体过程的认识只具有相对的真理性”。

19世纪末，大量为经典物理学理论所无法解释的实验事实，即所谓的“反常现象”涌现出来。例如黑体辐射、光电效应、原子的光谱线系以及固体在低温下的比热等，都是经典物理理论所无法解释的。这些现象揭露了经典物理学的局限性，突出了经典物理学与微观世界规律性的矛盾，从而为发现微观世界的规律打下基础。黑体辐射和光电效应等现象使人们发现了光的波粒二象性；玻尔（Bohr）为解释原子的光谱线系而提出了原子结构的量子论，由于这个理论只是在经典理论的基础上加进一些新的假设，因而未能反映微观世界的本质。由此更突出了认识微观粒子运动规律的迫切性。直到20世纪20年代，人们在光的波粒二象性的启示下，开始认识到微观粒子的波粒二象性，才开辟了建立量子力学的途径。

像所有的科学发展的过程一样，物理学的发展过程也是一个充满着矛盾和斗争的过程。一方面，新现象的发现暴露了微观过程内部的矛盾，推动人们突破经典物理理论的限制，提出新的思想、新的理论；另一方面，不少的人（其中也包括一些对突破经典物理学的限制有过贡献的人），他们的思想不能（或不完全能）随变化了的客观情况而前进，不愿承认经典物理理论的局

限性，总是千方百计地企图把新发现的现象以及为说明这些现象而提出的新思想、新理论纳入经典物理理论的框架之内。

## 2. “紫外灾难”和普朗克量子论的提出

金属物体在加热时会改变颜色，这是一个普通常识。例如，铁棍加热时开始会发出暗暗的红光，然后是樱桃红，然后便是明亮的橘红或黄色。最后铁会熔化，但是如果所用的不是铁棍而是密封在一真空或惰性气体环境中避免与空气发生化学反应的一段钨丝的话，这段金属丝的温度能够升至相当高。钨丝越热，放出的光的颜色变化就越多，结果其颜色会从鲜黄转为白炽。如果钨丝封闭在一玻璃灯泡中通电加热，我们便得到一盏白炽灯。实际上，所放出的还不仅是一种光色，而是各种不同强度的光色带。白炽灯泡中白炽状态的钨丝会放出紫、蓝、绿、黄、橘黄和红色（以及它们之间的所有的颜色）。这包括我们可以看到的光以及那些我们看不到的电磁光谱的“颜色”，如红外线及紫外线。

研究表明，高温中电磁辐射的最佳或最理想的辐射体同时也是最佳的辐射吸收体。能够很容易地吸收所有光频率（颜色）的物体表面，也可以很容易地发射各种频率的光。因此，最佳辐射体应该具有黑色的表面。此外，白色（即使一个普通反射的物体）表面既不能很好地吸收也不能很好地辐射。

怎样才能做出一个真正的黑色表面呢？对于这个问题来说黑色表面究竟又意味着什么？一个真正的黑面应该是绝对没有任何入射光能够从之逃离的一种表面。任何用来照射这种表面的光都不能被看到。考虑一下一种空心体，其上的一个小孔使其内部与外部表面相联通，这样我们便可设想出这样一种黑色表面，如图 0-2 所示。任何入射到小孔的光都会透入内部，并且尽管该光可能会从内壁反射多次，但它不会找到回路从小孔逸出。代表理想的辐射吸收体的“表面”正是这个“小孔”。而另一方面，如果空腔的内壁受到加热。来自小孔的辐射将会与理想的辐射发射体所发射的辐射一致。这样，

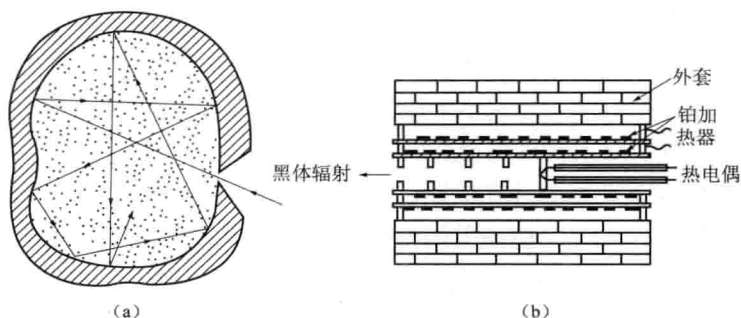


图 0-2 黑体的模型

该理想辐射体或黑体辐射体也被称为空腔辐射体。做出一个“近似”于空腔辐射体的方法是，在壁炉口的上方牢固地安上一个钻有一个小孔的不透明的罩。壁炉内燃着大火，该孔洞便是黑体的“表面”。

19 世纪的最后几年，由于实验方法的改进，使人们得出以下几点结论：

(1) 黑体辐射发出具有多种波长（或频率）的电磁波（波长越短，能量越大），这个现象说明黑体辐射发出的能量存在着从小到大的分布，它仅与温度有关而和黑体是什么物质无关；

(2) 如果把能量分布与波长（或频率）的关系作图（图 0-3）表示出来，得到的是一条在波长很长和波长很短的方向都趋于零的曲线，曲线有个高峰（即极大值），表明在那个波长辐射出的能量最多，即能量分布最大；

(3) 温度越高，曲线上的高峰向波长短的方面移动，即向能量大的方面移动，这就是维恩（Wilhelm Wien, 1864—1928）位移定律，这个定律可以表述为：波长的极大值和绝对温度的乘积为一常数，或频率的极大值和绝对温度成正比。

维恩在 1893 年利用麦克斯韦和波尔兹曼的统计思想，从理论上推导出黑体辐射能量分布的公式，在波长较短的范围内与实验结果吻合得较好，随着波长的增加，其理论推导的结果与实验的偏差越来越大。这表明从古典物理学推导出的结论并不能圆满地解释黑体辐射能量分布的事实。

瑞利用古典物理学的原理，做了另一种尝试，在金斯（James Hopwood Jeans, 1877—1946）的修正下，得出了另外的数学表达式，这个表达式最初发表于 1900 年。和维恩做出的结果相反，这个数学表达式在波长较长的范围内与实验结果吻合得较好，而随着波长的变短，辐射能趋于无限大：这是不可想象的，同时也是与事实不符的：波长变短意味着从可见光的波段向紫外方面移动，因此它被称为“紫外灾难”（图 0-4）。

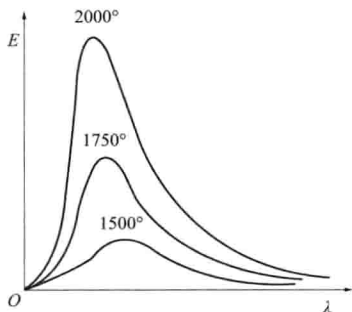


图 0-3 维恩位移定律图

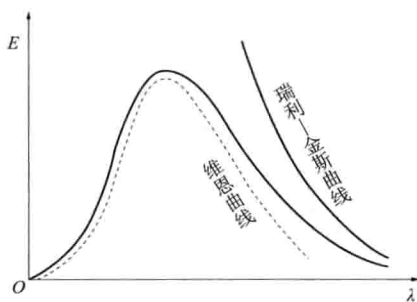


图 0-4 瑞利-金斯曲线、维恩曲线与实验曲线的偏离



无论是维恩还是瑞利和金斯，他们的失败都意味着古典物理学在解释黑体辐射的能量分布问题上的无能为力。这就是普朗克（图0-5）在1900年前后所面对的形势和矛盾。要想圆满地解释这些，必须抛开古典物理学的一些传统观念，开辟一条新的道路。这里所说的古典物理学，不仅指牛顿力学，还包括在19世纪得到惊人发展的热力学、统计物理学以及电磁学。



图0-5 普朗克

黑体辐射的问题是普朗克在1900年引进量子概念后才得到解决的。普朗克假定，黑体以  $h\nu$  为能量单位不连续地发射和吸收频率为  $\nu$  的辐射，而不是像经典理论所要求的那样可以连续地发射和吸收辐射能量。能量单位  $h\nu$ ，称为量子， $h$  是普朗克常数，它的数值是  $h = 6.625\ 59\ (16) \times 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s}$ 。基于这个假定，普朗克得到了与实验结果符合得很好的黑体辐射公式：

$$\rho_\nu d\nu = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} d\nu$$

式中， $\rho_\nu d\nu$  是黑体内频率在  $\nu$  到  $\nu + d\nu$  之间的辐射能量密度， $c$  是光速， $k$  是玻耳兹曼常数， $T$  是黑体的绝对温度。普朗克的理论开始突破了经典物理学在微观领域内的束缚，打开了认识光的微粒性的途径。

能量在物理学中一向被认为是连续地传递的，在普朗克以前没有任何人怀疑过这一点，能量的连续性和物质的原子（粒子）性质是古典物理学中牢不可破的传统观点。普朗克在做出“量子论”的结论之前已处于这种时期。虽然在此后相当长的时期内普朗克仍然致力于“消除鸿沟”或“搭桥”的工作，然而物理学的新的革命时期毕竟从此开始了。用原子观点来看，“量子论”只不过是能的“原子化”；用量子论的观点来看，原子只是物质“量子化”的结果。波是粒子，粒子又可以是波，古典物理学不能说明这些“颠倒”和“混乱”，物理学必须冲破旧思想的束缚，进行一场前所未有的革命，这也