



〔美〕G. L. 特里格 著

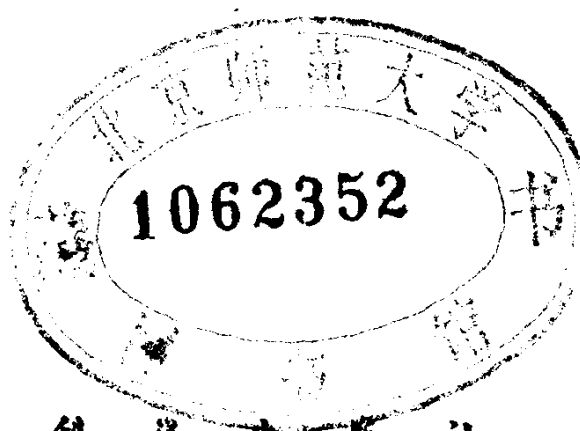
现代物理学中的关键性实验

科学出版社

现代物理学中的 关键性实验

〔美〕G. L. 特里格 著

尚惠春 王罗禹 译



科学出版社

1983

内 容 简 介

本书以严谨而通俗的笔调,描述了一些关于物理学发展史中的关键性实验。这些实验对从经典物理学过渡到近代物理学起了重要作用,并奠定了量子力学和原子理论的基础。

书中引用了许多著名学者的原著,可使读者认识到科学概念的形成和发展经过了多么复杂的道路,并有助于了解这些概念。

本书可供大专院校师生、科技人员以及对物理学发展史感兴趣的读者参阅。

G. L. TRIGG
CRUCIAL EXPERIMENTS IN
MODERN PHYSICS
Van Nostrand Reinhold Company, 1971

现代物理学中的关键性实验

〔美〕G. L. 特里格 著

尚惠春 王罗禹 译

责任编辑 吴检保

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1983 年 1 月第 一 版 开本: 787×1092 1/32

1983 年 1 月第一次印刷 印张: 4 1/4

印数: 0001—11,550 字数: 93,000

统一书号: 13031·2136

本社书号: 2915·13—3

定 价: 0.70 元

中 译 本 前 言

实验是物理学发展的基础，又是检验物理理论的唯一手段。特别是现代物理学的兴起，更和实验有着密切的联系。正是实验技术的发展，不断地揭示和发现各种新的物理学现象，日益加深人们对客观世界规律的认识，从而推动着物理学向前发展。因此，详细了解在物理学发展中起过关键性作用的一些实验，对我们学习现代物理学，掌握其中的许多基本概念，具有十分重要的意义。正是基于这一观点，美国物理学家特里格编著了两本书，一为本书，偏重于核物理方面的实验；另一为《二十世纪物理学的重要实验》⁽¹⁾，偏重于核物理以外的实验。两书互为姊妹篇，有选择性地介绍了现代物理学中的一些关键性实验，以帮助读者更好地掌握现代物理学的基本概念。这些实验有的导致了新学科的诞生，有的对新理论起了判决性作用。为此，我们把两书译为中文出版，以供读者参考。

作者在两书中有力地证明了，作为二十世纪物理学坚实基础的量子理论，并不是依据单一实验，而是建立在一系列关键性的实验之上。但是，在一般教科书或教学工作中，由于篇幅和时间的限制，或由于其他原因，往往只能选择最有说服力的实验作为依据，尽管从历史角度来说，其它许多关键性实验也都是很好的论据。因此，这两本书正好可以弥补教科书的不足，并进一步加深读者对现代物理学的理解。

(1) 已由科学出版社翻译出版。

大家知道，相对论也是现代物理学的两大支柱之一。但作者鉴于有关实验在别的书中已有详细介绍⁽¹⁾，在这两本书中就不再重复了。

书中对每个关键性实验的全过程、它的历史背景及其结论都作了详细描述，并对当时实验中所出现的各种问题和困难作了细致分析，有助于我们加深物理学是实验科学的认识，了解实验在物理学发展中所起的重大作用。同时从摘录的引文中可以看出，物理学家在实验研究过程中长年累月，不分昼夜，不避寒暑，不畏艰苦地集中观察各种新现象，勇于攀登科学高峰的崇高精神，以及他们在工作中表现出来的严肃认真和实事求是的优良作风，都是值得我们学习的。

本书对于研究工作者，大专院校师生和物理学史工作者以及对物理学发展有兴趣的读者，都是一本较好的参考书。

本书根据俄译本译出，尚惠春、王罗禹翻译，宋玉升、吴检保协助校订。译文不当之处，欢迎读者批评指正。

(1) 例如 *R. Katz: An Introduction to the Special Theory of Relativity, Amsterdam, 1964.*

作者原序

1956年夏，西雅图华盛顿大学召开了一次关于物理教学新方法会议。在预备会议上讨论会议日程时曾提到，许多大学生对接受现代物理学的一些概念感到有困难，尤其是关于量子论的概念，并且指出，详细地介绍一下产生这些概念的实验是很有益的。本书就是试图为满足这一类教材的需要而编写的。

选择哪些实验纳入书中，不可避免地有一定的任意性，但是很清楚，应当把主要注意力放在量子理论的基本概念上，因为它们经常与“普通常识”有矛盾。另一方面，狭义相对论虽然也与“普通常识”有类似矛盾，但却没有包括在所讨论的问题之中，这是因为，第一，狭义相对论完全是在一个单一实验的基础上发展起来的，而这个实验⁽¹⁾又是人们所熟知的，没有必要在这里重述它。第二，这个内容在卡茨（Katz）著的《狭义相对论概论》⁽²⁾一书中已有较详尽介绍。至于电子性质的研究，毫无疑问也是很重要的，不过也与上面的情况一样，安德森（Anderson）著的《电子的发现》⁽³⁾一书已有了介绍。

本书对具有不同水平的读者都可能是有益的。但编写本

(1) 指的是迈克耳孙-莫雷实验。

(2) R. Katz, An Introduction to the Special Theory of Relativity, Momentum Book № 9, Amsterdam, 1964.

参见 С. И. Вавилов, Экспериментальные основания теории относительности, Собр. соч., т. 4, М., 1956.

(3) D. L. Anderson, The Discovery of the Electron, Momentum Book № 3.

书时是以大学二年级学生,或者基础较好、对经典物理学有了一些定性概念的大学一年级学生的理解能力为基础的,本书有助于他们更容易地了解现代物理学中一些奇异的概念.本书对于那些希望把自己所学的物理知识更好地与物理学发展历史结合起来的高年级学生也是有帮助的.从这点出发,我力图用当年中等物理学工作者的观点介绍了每一个实验(其中有一个除外),并使实验的讨论尽可能地详尽些,以便将实验方法的主要特点表达清楚,同时把进行实验和解释实验过程中遇到的困难也介绍出来.

书中大部分摘录都取自两本原著:一是斯特拉纳坦(Stranathan)著的《现代物理学中的“粒子”》⁽¹⁾,这本书可以说是一代物理学工作者的一本手册.另一是论文集《原子世界》⁽²⁾,其中全部或部分地收集了许多原始资料.本书中各章节的参考文献均注有论文名称和页码.

在编写本书过程中,很多同事给予了协助.我在此谨对高等院校物理学教学委员会、华盛顿大学和全国科学基金会在西雅图会议期间给予的帮助表示感谢.

G. L. 特里格

(1) J. D. Stranathan, The «Particles» of Modern Physics, Philadelphia, 1942.

(2) The World of the Atom, ed. H. A. Boorse, L. Motz, New York, 1966.

目 录

第一章	绪论	1
第二章	量子概念的产生	4
第三章	元素的转变	22
第四章	原子的存在	35
第五章	原子核	53
第六章	电子和原子的碰撞	66
第七章	光电效应	73
第八章	原子磁矩的空间取向	84
第九章	光的粒子性	92
第十章	物质的波动特性	99
附录 A		126
附录 B		128

第一章 绪 论

现在的大学生可能会感到奇怪,为什么对多数在1930年以前完成的实验使用了“现代”这个名词,尽管这个名词在一定意义上不是很准确的,但它仍被普遍采用来表示物理学发展中两个主要历史阶段中的一个阶段.从伽利略和牛顿开始到1900年左右为止的“经典”时期,力学几乎发展成为物理学中的完整体系,并且成为物理学其他发展方向的典范.在这个时期末,电磁学从娱乐场中表演的魔术节目转变为一种完整的理论体系,并且包括了大部分光学物理,这个转变几乎用了一个多世纪的时间.与此同时,利用热能的经验技术也转变成为热力学科学.到十九世纪末,物理学已能对当时物理世界中已知的各种现象作出合乎逻辑的和相当完整而协调的解释.当然,在这些解释中尚有某些缺陷和漏洞,但是,似乎没有充分的理由怀疑,如果测量精度能提高到“小数点以后第二位”⁽¹⁾,就可以把那些缺陷消除掉.

这种信念看来是没有根据的.大约从1895年开始,实验研究得到了越来越多的结果和经典概念完全不一致.在某些情况下,为了取得一致,只须稍微修改一下经典概念就够了,但在另外一些情况下,就不得不彻底改变那些经典概念,甚至现在也不能说这种改变已经完全结束了.当然,由实验

(1) 这个说法可能是开耳芬勋爵提出的,由于科学家 A. A. 迈克耳孙在芝加哥大学年鉴中曾用过它,因而获得了广泛的引用.迈克耳孙的实验奠定了两大理论之一的基础.这两大理论从根本上改变了旧的概念,标志着二十世纪前半叶现代物理学的诞生.

得到的认识是由许多个别的实验结果形成的，就像用砖头建造大楼一样，其坚固性取决于这些砖头之间的相互联系。但是，在讲到物理学发展的主要阶段时，我们总可以指出一些个别的实验，说它们是“关键性实验”。本书各章讨论的正是这样一些实验。为了全面地评价这些实验的意义和它们在科学发展中所起的作用，我们应该首先指出经典物理学的某些特点。

首先，经典物理学的概念大都是在日常经验的范围内发展起来的，并根据需要而外推到它的界限以外。这并不奇怪，因为人们总是本能地期望能找到更为广泛的规律性，而且在所有条件下都能适用。例如，向火星发射一枚火箭，它带有拍摄火星表面的设备，如果我们没有足够的信心认为，这些照相设备和火箭本身在火星附近将会按照在地球表面所发现的规律进行活动，那么向火星发射火箭将是荒谬的事。同样，我们相信，五年前按当时自然规律制造的汽车，在将来也一定会照常工作。

但是，把规律的适用范围加以扩大，或者外推，也可能会导入迷途。例如，1662年玻意耳发现的著名物理学定律：当温度不变时，一定量气体的体积与气体对容器器壁的压力之乘积是一个常数，而且其中一个量增加时，另外一个量将减少，正好相互补偿，反之亦然。但是，如果温度特别低，或者压力特别高时，这个定律就被破坏了，因为气体开始凝聚，而且体积可以发生很大变化，并没有压力的变化予以补偿。这种外推的失败，常常是因为存在有原来的关系所没有考虑到的规律或现象。在我们所举的例子中，玻意耳定律遭到破坏，是由于气体凝聚后成了液体的缘故。

我们讨论的第二个问题是物质结构的经典图象。由亚里士多德开创的观点只允许有两种可能性：物质是连续的，如

凝胶;或者是一种分立结构,如一堆鹅卵石. 经典理论是在第一种概念的基础上发展起来的. 当然,关于原子的假说是众所周知的,但是,甚至在化学家当中,本来应该有它的坚定的拥护者,可是却存在有公开的强烈的反对派. 如果撇开现在称之为分子运动论的这一物理学领域的原理,那么原子概念在经典物理学中并没有起过显著作用⁽¹⁾. 如果说在什么地方曾经使用过原子概念,那也只是最萌芽的形式,而且关于原子结构的问题几乎从未涉及过⁽²⁾.

这就是下面要谈到的一些实验工作的背景. 在讨论这些实验时,有一部分将从这个背景上明显地突出起来,有一部分将用新的观点来阐述. 这些实验有一个共同的特点,就是在所有这些实验中,研究人员必须与一些在规模上或在精细程度上超出了人们感觉的现象打交道,也就是说,要和我们日常经验之外的现象打交道. 因此,对这些现象的解释和估计就需要摆脱“普通常识”所带来的限制,要超出“普通常识”所规定的那些界限.

(1) 俄文译本编者注:作者显然不正确地降低了原子概念在物理学发展中的作用,对气体分子运动论的意义也估价不足. 关于原子学说的更正确评价,读者可参考:В. П. Зубов, Развитие атомистических представлений до начала XIX века, М., 1965, 以及玻耳兹曼一系列论著(参看Л. Больцман, Статьи и речи, М., 1970.)

(2) 这一论点也不存在什么理由. 1897年才发现电子,而且只是在此之后,才提出了关于原子内部的结构问题,和“不可分割”的原子进一步分裂的问题.

第二章 量子概念的产生

二十世纪前半叶物理学发展的特征，是出现了两个原则上崭新的方向，这就是相对论和量子论。关于第一个理论，通常都认为早在十九世纪就由“迈克耳孙-莫雷实验”奠定了基础。相对论事实上完全是由爱因斯坦建立的⁽¹⁾。在本书中我们将不讨论它。

量子论的发展史则要复杂得多。实质上，本书所描述的大部分实验是与它有直接联系的。初看起来，量子论好像是关于单个原子构造和原子结构的理论，但事实上它的意义要广泛得多，而且它的产生不是与原子物理有联系，而是与试图全面解释炉壁小孔的辐射现象有联系。从下面要谈到的一些事实可以看到，这种辐射现象已成为广泛理论研究的对象，并从研究结果中导出了一系列关于辐射的一般性质。但是，辐射的基本公式所依据的假设却是令人怀疑的。本章所描述的第一个实验，对这个公式作了相当严格和全面的检验，结果证明，原来的公式是不完善的，为了修正它，必须引入一个新的普适常数，该常数后来取名为“作用量子”。

为了详细地追述我们感兴趣的那些概念的发展过程，我们要引用一个特殊的理想化的研究对象，即所谓黑体。我们知道，当光线照射到物体表面上的时候，会发生两种现象：一部分光从表面“反射”回来，而其余的光则穿透到物体内部。

(1) 这种说法只表示相对论的基本内容完全是由爱因斯坦的原著阐述的。关于狭义相对论，请参看 R. Katz, *An Introduction to the Special Theory of Relativity*, Amsterdam, 1964.

这部分入射光中有一部分(或全部)被物体“吸收”,剩下的一部分可能达到物体的另一面,并穿过它而射到物体之外,即物体能够“透光”。我们之所以能看到其本身并非光源的各种物体,就是因为物体表面能够反射照在它上面的光,而反射光有一部分射进了我们的眼睛内的缘故。物体反射的光越少,我们就觉得物体越暗。如果有一种物体能够把入射光全部吸收,一点也不反射,我们就认为它是一个完全黑的物体⁽¹⁾。具有这种性质的物体叫做绝对黑体。当然,在自然界中这样的物体是不存在的。然而,完全可以假定这种物体是存在的,并研究它的性质。在科学上作这样的理想化是很平常的事情,尤其当实际物体的性质非常近似于理想物体时,这种理想化更有价值。正如下面将表明的,在这种情况下也是正确的。

被黑体吸收的辐射自然会传递能量,结果使物体的内能增加,物体的温度也相应地随之升高。假如没有内能损失的过程,则物体的温度就会无止境地上升。显然,这种损失能量的机理应该是这样的:即使把物体放在真空中,即在热传导和对流都不存在的条件下,物体仍会损失能量。这个过程就是辐射。实际上,不仅黑体,就是处在不变的外界条件下的任何物体,总是趋向于这样一种状态:在单位时间内吸收多少能量,也就辐射出多少能量(或者说辐射出同样的功率)⁽²⁾。

辐射的波长组成连续光谱,不仅有可见光区,而且有紫外光区、红外光区等。辐射能量按波长的分布不仅与物体的温

(1) 在现实中我们一般是看不见这种物体的,只能说“看见”了这样一个空间区域,从这个区域中没有光射到我们的眼睛里来。

(2) 应当指出,这个过程完全不同于反射。光的反射特性既取决于反射体的性质,又取决于入射光的性质,而热辐射的性质只在特殊的情况下才与射到物体上的光有关。

度有关⁽¹⁾，也与物体表面材料的性质有关。这种能量分布用一个叫做“谱线密度”的物理量 E_λ 来定量表示⁽²⁾，其定义如下：波长为 λ 的谱线密度，就是在单位时间内在 λ 附近每单位波长间隔中辐射体单位面积所辐射的能量。乘积 $E_\lambda d\lambda ds dt$ 就是从 λ 到 $\lambda + d\lambda$ 间隔内表面单元 ds 在时间 dt 内所辐射的能量。黑体的辐射谱线密度与表面材料的性质无关，因此它具有普遍性或绝对性。这个特点正是人们对黑体辐射的性质很感兴趣的理由之一。考虑到黑体，辐射的谱线密度有特殊的重要性，后面我们将用一个专门的符号 e_λ 来表示它。

下面由浅入深地介绍一下研究黑体辐射的方法。设有一个空腔，即由某种材料的腔壁围成的一个空间。我们假设这个空腔壁有一恒定温度 T 。因腔壁能够辐射，显然在这个空腔中也有一定的辐射。基尔霍夫在 1860 年利用黑体的概念证明了空腔中的辐射有下列重要性质：第一，它具有各向同性（在任意方向上都相同）和均匀性（在空腔中任意点上都相同）。这两种性质不仅对整个波段是如此，而且对任意波长也是如此。第二，它恒等于黑体的辐射，就是说，在单位时间内，入射到单位表面上的能量等于单位时间内单位黑体表面辐射的能量，并且不仅对某一波长如此，而且对于整个频谱也是如此。

空腔中辐射的各向同性和均匀性并不难证明。因为如果不是这样，那就是可以制造永动机了。譬如，空腔中某一点的辐射强度比另外一点的高一些，那么在这两点上放置两个相同的吸收器，经过一段时间后，它们就会获得不同的温度，这

(1) 这个事实在日常的谈话中也有反映，譬如，我们说“赤热”、“白热”来粗略地表示辐射体的温度。

(2) 这个量有时也叫做“发射本领”，有时也用“发射系数”这个术语。——原编者注

就能在热机中加以利用：一个作为热源，另一个作为致冷器，这样一来，这个系统不要任何变化就可以做功了。

为了证明空腔辐射和黑体辐射是等效的，我们设想，把温度为 T 的黑体放在空腔中，腔壁的温度也为 T 。我们用 R_λ 表示波长为 λ 的辐射在每单位波长间隔单位时间内射到物体单位表面上的能量。按黑体的定义，此能量应该全部被吸收。另一方面，在单位波长间隔单位时间内单位面积所辐射的能量等于 e_λ 。这两个量应该彼此相等，否则，处于相同温度下的两个物体之间就会发生自然的能量传递。（那种在某一波长上这两个量的不相等而在另一波长上以相反的不等量予以补偿的可能性是不存在的。否则，在这种情况下我们就可以使用经过适当调整的有选择性的反射器了），因此，可以写成：

$$R_\lambda = e_\lambda.$$

我们将看到， e_λ 这个量之所以能用实验来测量，实际上是根据这个恒等式。

现在我们假设，放入空腔的物体是普通物体，而不是黑体，其温度为 T ：在单位波长间隔中投射在单位表面上的能量仍等于 R_λ ，但吸收的不是全部辐射。物体吸收的那部分波长为 λ 的辐射叫做吸收系数⁽¹⁾，用 a_λ 表示。它既与物体的温度有关，又与表面材料的性质有关。在单位波长间隔内，物体单位表面所吸收的 λ 波长的辐射能量显然应等于 $a_\lambda R_\lambda$ 。另一方面，在单位波长间隔内，单位表面辐射的波长为 λ 的能量，根据定义，应等于 E_λ 。这些量应当相等，即：

$$a_\lambda R_\lambda = E_\lambda,$$

或

$$\frac{E_\lambda}{a_\lambda} = R_\lambda.$$

(1) 这个量也叫“吸收能力”。——原编者注

利用前面的等式可得出

$$\frac{E_{\lambda}}{a_{\lambda}} = e_{\lambda}.$$

因此,我们得出结论: 对于实际物体,谱线密度与吸收系数的比值在一定波长和温度下与材料性质无关.

这个关系式再次指出了黑体辐射所具有的意义. 正象卢梅尔 (Lummer) 和普林舍姆 (Pringsheim) 在他们研究黑体辐射的实验中所阐明的那样:

“因此,如果我们知道黑体辐射是温度的函数,那么我们就可以知道所有的那些吸收系数与波长和温度的关系为已知的物体的辐射规律. 在实验中可能比较容易解决的是相反的问题,即用研究物体辐射的方法得出 E ,再根据 E 来确定吸收系数 A .”

上述讨论引起了十九世纪末出现的对于黑体辐射的巨大兴趣. 但是,大部分有意义的结论都是经验性的,都是根据对实际物体辐射的能量分布进行观察所得出的资料作出的. 例如,在 1896 年帕邢公布了他独立完成的研究结果. 他引用了五、六位前人的著作,提出了辐射能量分布的简单表达式为: $E_{\lambda} = C\lambda^{-a}e^{-c/\lambda T}$, 式中的 C , a 和 c 是与材料性质有关的常数, T 为绝对温度⁽¹⁾. 当时公认的直到现在还有用的唯一的经验结论是 1879 年由斯忒藩提出的,斯忒藩确定了单位表面辐射的总能量(对于整个波谱)正比于辐射体绝对温度的四次方.

在理论研究中当时也没有发现什么缺点. 因此,1884 年玻耳兹曼发表了两篇文章,文章指出,斯忒藩得到的经验公式对于黑体辐射应当是正确的(这个公式后来被称为斯忒藩-玻

(1) 字母 e 表示自然对数的底 2.71828... . 读者不要被字母 e 表示的不同量弄混乱. 斜体字 e 已经用来表示过辐射度,以后还要用它表示电子的电荷.

耳兹曼定律)。过了九年、维恩得出两个更重要的关系式。他指出, 如果通过活塞的移动使空腔体积减小, 那么空腔单位体积的辐射能量将会增加。这不仅是由于它的体积减小造成的, 而且也因为辐射对活塞有压力的缘故。因此, 当活塞压缩辐射时, 要克服压力而做功。能量密度因空腔的温度升高也可能增大。由于这两种原因而引起的能量密度的增大与热力学第二定律有关, 它们的关系式不仅对总能量密度是正确的, 而且对无限小波长间隔内的能量密度也是正确的。但是, 从另一方面, 由于多普勒效应, 活塞运动导致反射波长的变化。因此, 温度的变化也应伴随有能量密度按波长分布的变化。从这些讨论中势必得出双重的定量结论: 第一, 如果必须在两个不同温度下比较两个与波长有关的物理量时, 则在一样的波长中不能取得这些值。这样, 如果在温度为 T , 波长为 λ 时所确定的物理量与在温度为 T' 时所确定的另一物理量进行比较, 则在波长为 λ' 时的取值, 必须满足下列条件:

$$\lambda' T' = \lambda T. \quad (2.1)$$

第二, 对应于这些波长的谱线密度, 应按下列关系式随温度而变化:

$$\frac{e_{\lambda}}{e_{\lambda'}} = \frac{T'^5}{T^5}. \quad (2.2)$$

如果 e_{λ} 值 (在固定的绝对温度 T 时) 对某一波长 λ_m , 有极大值 $e_{\lambda, \max}$, 则 $e_{\lambda, \max}$ 在其它温度时应满足关系式(2.2a):

$$e_{\lambda, \max} T^{-5} = \text{const}, \quad (2.2a)$$

这时 λ_m 应满足关系式(2.1a)

$$\lambda_m T = \text{const}. \quad (2.1a)$$

关系式(2.1)和(2.2)就是著名的维恩位移定律。虽然维恩本人并没有提到, 但这些公式说明 e_{λ} 的表达式在一般情况下应有下列形式: