

大学物理学

第四分册

近代物理基础

何世湘 主编

重庆大学出版社

大学物理学

第四分册

近代物理基础

何世湘主编

重庆大学出版社

内 容 提 要

本书根据全国高等学校工科物理课程教学指导委员会修改审定的《大学物理课程教学基本要求(送审稿)》编写。全书分《力学、分子物理和热力学》、《电磁学》、《波动学》、《近代物理基础》四个分册出版。除主要内容按基本要求独立编写外,还有一定数量的拓宽和加深的内容,供各种不同类型的学校和专业选用。同时,还配有适量的思考题和习题。本分册包括狭义相对论基础、光的量子性、卢瑟福-玻尔原子物理、量子力学初步、激光、固体物理等内容。

本书可作为工科院校大学物理课程的教材,也可作为其它院校非物理专业和夜大学、职工大学各工科专业的教学参考书。

大 学 物 理 学

第四分册

近代物理基础

何世湘 主编

责任编辑 黄开植

重庆大学出版社出版发行

新华书店经销

重庆建筑工程学院印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/32 印张: 8.75 字数: 197 千

1987年12月第1版

1987年12月第1次印刷

印数: 1-17400

标准书号: ISBN 7-5624-0031-8 统一书号: 13403·13
O·11 定 价: 1.20元

序 言

作为一门科学，物理学并不直接着眼于经济效益，而只从事各种物质最基本的运动现象和规律的探索，所以物理学是人类精神文明中文化科学知识的一个组成部分。但它一旦和其他科学或工程技术相结合，就可采取它的成果，开拓为各种应用，乃至掀起一次次工业革命的浪潮。因此，物理学又是创造物质文明的一个重要基础和源泉。尽管近代科学门类繁多，工程技术日新月异，物理学本身也在不断发展，但物理学仍继续保持着在精神和物质文明建设中既有的地位和作用。

文化革命以后，我国工科大学物理经过人们的再认识后，理所当然地比过去更为受到重视。现在工科大学物理教学改革已进入一个新的阶段。即以教材来说，大家都希望能在统一的基本要求下，有各种不同风格、不同重点和深度的教材，以供不同学校、不同专业选用。且自实行改革和开放政策以来，我国科学技术力争先进，为此，工科大学物理不仅要求确保必要的传统基本内容，尤其要求尽可能加强近代物理内容。这就在物理学教师们面前提出了编写新教材的任务。

教材编写是一件严肃而繁重的科学工作。由于课程内容和授课时数之间的矛盾十分突出，教材内容轻重繁简的布置，深浅难易的处理，都需要编写人的反复琢磨和实践。而如何在短时间内融汇教师们长期积累的经验，有效而又合理地纳入一部教材，显然又是一个重要的组织问题。西南地区

十一所有关工科院校的教师同志们早有编印适用于本地区各学校的教材的愿望，所以一经倡议，就于1986年组织起来，合力编写并出版了这部《大学物理学》教材。这在西南地区算是一个创举。

这部教材最显著的特点就是切实加强了与近代工程技术密切相关的物理基础，但由于处理上花了很多功夫，即或是较深较难的内容，估计对大学一、二年级学生，接受起来也不会有大的困难。为了说明这点，可举教材中狭义相对论一章为例。此章从分析迈克尔逊-莫雷实验入手，先将光速不变、相对性原理和有关重要概念如同时性、时间膨胀和长度收缩等一一讲清。随之很自然地就得出洛仑兹时空变换式和速度合成法则，然后扩展去讨论相对论动力学和电磁规律，以及其他一些问题。由于前面基本概念垫底厚实，所以后面说明较难的问题，如双生子问题，也易于为人理解。

逐章读去，就可以知道，书中原理之所以易于接受，就在于各部分的关键性概念，如能量、动量、叠加原理，场的概念，波动的特征，统计行为、时空相对性和物理量的量子化，都在一开始就作为重点问题来讲述。

统观全书，不但重视传授物理知识，而且注意培养学生学习和工作的能力。在传授知识方面，除研究对象上的统一性（统一为物质运动）和多样性（分为力、热、电磁、波动等多种运动形式），规律上的概括性（能量守恒、叠加原理、时空相对性、量子规律等）和特殊性（统计规律、波动的特征、适用于低速运动的牛顿力学、宏观物体运动不显量子效应），都随课程进展，逐处指明以外，特别还强调了方法上的连贯性和应变性。例如力学中的一些处理问题的方法继续使用于电磁学，波动学以至量子力学。但各部分又因研

究对象的变化，所用的主要方法和观点又大不相同。这些关节在各部分开始都讲得十分清楚。学生掌握了这个纵横关系的脉络，就可在了解关键性概念的基础上，把全部普通物理知识融会贯通起来。

在培养能力方面，教材力求培养学生的物理思维能力。这包括观察和描述物理现象，进而抽象、概括物理本质的能力；自学和独立获取新知识的能力（为此，教材中备有一些学生阅读材料）；用数学表述物理过程和规律的能力，计算解题的能力以及用数量级估算的能力。这在讲述的内容上，例题、习题的挑选和安排上，都显得费过很多心思，要求学生在听课和研习过程中，循序渐近，不断熏陶，在教学各环节的配合下，最后形成这些能力。

教材中还穿插若干物理学史的段落。这可以使学生活跃思想，扩大眼界，提高学习兴趣。也有利于他们在知识和能力增长的同时，养成辩证唯物主义世界观。

所有这些，对工程技术人员来说，都是到处需要，永不过时，终身发挥作用的。

选用这套教材的教师们，讲授中有了依据，自不碍其灵活使用，更好地临场发挥。因为编写人都在同一地区，教材使用几年以后，再商量修改，也是比较方便的。

虽然国内外工科大学物理教材迄今已为数不少，中国西南地区十一所工科院校的教师同志们合编的这部具有地区和时代特色的《大学物理学》，无疑是教材建设中一次很有意义的尝试，也是对工科大学物理教学改革的一项贡献。

当然，大而言之，这也绝不能说是与精神和物质文明建设无关的劳动成果罢！

刘之邨 1986年11月于重庆

目 录

引言.....	(1)
---------	-------

第一章 狭义相对论基础

§ 1-1 迈克尔逊-莫雷实验.....	(3)
一、神秘的以太	(3)
二、迈克尔逊-莫雷实验	(5)
三、对迈克尔逊-莫雷实验的分析	(8)
§ 1-2 狭义相对论的基本假设.....	(11)
§ 1-3 一些重要的相对论效应.....	(13)
一、同时性的定义及时钟校准问题	(13)
二、同时性的相对性	(14)
三、时间膨胀效应	(18)
四、长度收缩效应	(19)
*五、多普勒效应	(22)
§ 1-4 洛伦兹变换 相对论时空观及速度合成法则 (27)	
一、洛伦兹变换式	(29)
二、用洛伦兹变换式来讨论相对论时空观	(31)
三、相对论速度合成法则.....	(34)
•§ 1-5 双生子佯谬	(40)
§ 1-6 狭义相对论的动力学基础	(45)
一、相对论动力学的基本方程 相对论的质速关系式	(46)
二、质量和能量的关系式	(53)
三、相对论动量和能量的关系	(59)

习 题

*按工科大学物理基本要求属拓宽加深的内容，可选讲，以下同。

第二章 光的量子性

§ 2-1 黑体辐射和普朗克假设	(73)
一、有关黑体辐射的一些基本概念	(73)
二、黑体辐射的实验研究	(75)
三、经典物理对于黑体辐射的解释及其困难	(79)
四、普朗克假设 黑体辐射的普朗克公式	(80)
§ 2-2 爱因斯坦光子理论 光电效应	(82)
一、光电效应的实验研究	(83)
二、经典理论不能解释光电效应	(86)
三、爱因斯坦光子理论	(87)
四、光电效应方程	(89)
§ 2-3 康普顿散射	(90)
一、康普顿散射的实验描述	(90)
二、康普顿散射的理论解释	(92)
三、几点重要附注	(95)

习 题

第三章 卢瑟福-玻尔原子物理

§ 3-1 有关原子的一般情况 卢瑟福的原子核式模型	(103)
*一、原子的一般情况	(104)
二、卢瑟福的 α 粒子散射实验	(105)
三、卢瑟福原子模型	(109)
§ 3-2 氢原子光谱的实验规律	(112)
一、氢原子光谱的实验规律 (一) —— 巴尔末公式	(112)
二、氢原子光谱的实验规律 (二) —— 广义巴尔末 公式	(114)
§ 3-3 玻尔的氢原子理论	(115)
一、经典物理学对氢原子问题的处理及其遇到的严	

重困难	(116)
二、玻尔假设	(117)
三、玻尔的氢原子理论	(119)
四、氢原子的能级和光谱	(122)
*§ 3-4 原子能级存在的实验证据——夫兰克-赫芝 实验	(124)
*§ 3-5 索末菲椭圆轨道理论 角动量量子数	(127)
一、索末菲量子化条件及其处理	(128)
二、椭圆轨道情况下氢原子的能量	(130)
三、椭圆轨道形状与量子数 n 和 n_φ 的关系	(131)
*§ 3-6 史忒恩-盖拉赫实验 空间量子化电子自旋	(133)
一、电子轨道运动的磁矩	(133)
二、史忒恩-盖拉赫实验 空间量子化	(135)
三、电子自旋 电子状态的描述	(138)
*§ 3-7 玻尔理论的地位和局限性	(139)
习 题	

第四章 量子力学初步

§ 4-1 物质的波粒二象性	(146)
一、光的波粒二象性	(146)
二、德布罗意假设	(147)
三、德布罗意假设的实验验证	(149)
§ 4-2 测不准关系	(153)
一、由电子衍射实验估计电子位置及动量的精度	(153)
二、海森堡测不准关系式	(154)
三、测不准关系的意义	(155)
§ 4-3 波函数的物理意义	(157)
一、自由粒子的波函数	(158)
二、波函数的物理意义	(159)
三、波函数的标准化条件	(161)

§ 4-4 薛定谔方程	(162)
一、薛定谔方程的建立	(163)
二、定态薛定谔方程	(165)
*三、连续性方程和守恒定律	(166)
四、经典力学和量子力学粗略比较	(169)
§ 4-5 一维无限深势阱	(170)
一、势阱描述	(170)
二、薛定谔方程及其求解	(171)
三、用标准化条件确定A, δ	(172)
四、能量量子化	(173)
五、用驻波法求解一维无限深势阱问题	(175)
*§ 4-6 一维势垒 隧道效应	(176)
一、势垒描述	(176)
二、薛定谔方程	(177)
三、标准化条件的应用	(178)
四、反射率和透射率	(179)
五、隧道效应	(180)
六、任意形状的势垒	(182)
§ 4-7 泡利原理 元素周期表	(183)
一、泡利原理 壳层结构	(184)
二、元素周期表	(187)
习 题	

第五章 激 光

§ 5-1 原子的激发和辐射 激光原理	(197)
一、原子在各能态的分布	(197)
二、原子的自发辐射	(199)
三、受激辐射和受激吸收	(202)
四、激光原理	(206)

§ 5-2 氦-氖激光器	(210)
一、氦-氖激光器的结构	(210)
*二、氦-氖激光器的能级结构	(211)
三、氦-氖激光器的工作原理	(212)
四、光放大	(214)
§ 5-3、激光应用简介	(216)
一、激光应用简介	(216)
二、一些激光器件	(217)

习 题

第六章 固体概论

*§ 6-1 固体的类型和结构	(221)
一、离子键型晶体	(222)
二、共价键型晶体	(223)
三、金属键型晶体	(223)
§ 6-2 金属中的自由电子气体及导电性	(224)
一、金属中的自由电子气体理论	(224)
二、金属的导电性	(227)
*三、超导性	(231)
§ 6-3 固体的能带理论	(235)
一、固体的能带理论	(235)
二、能带中电子的分布	(242)
三、电子在能带中的运动 绝缘体、导体和半导体	(243)
§ 6-4 半导体物理及半导体器件简介	(246)
一、半导体物理学简介	(246)
二、半导体的结	(251)
三、半导体器件	(255)

习 题

习题答案

引 言

十九世纪末,物理学已发展到相当完善的阶段。对于机械运动,以牛顿运动定律为基础的力学可以给出几乎是尽善尽美的描述;对于热运动,有分子运动论从统计观点出发对其微观过程给出了定量的描述,热力学则从能量角度出发对其宏观过程的规律性作了定量的阐明,而且分子运动论,热力学在处理热现象的问题上相辅相成,互相补充;对于电磁现象,麦克斯韦集前人研究之大成,建立了完整的电磁场理论,把古老的光学也纳入其中。面对着物理学的这些辉煌成就,当时的物理界呈现出一派盲目的乐观气氛。不少物理学家认为:

“物质世界的运动已构成了一幅清晰的图象,基本问题都已研究清楚了,留给下一代人所做的工作,只是把实验数据测得更精确些。”似乎物理学已不可能有什么大的发展,今后的物理学家只能缅怀前人的业绩而无所作为了。

但是,也就是在十九世纪末,随着科学技术的发展,实验物理学相继发现了电子,X射线和原子的放射性。这三个著名的重要发现完全超越了当时物理学的研究范围,使物理学步入研究高速、微观领域的崭新的天地。用当时现成的物理理论去处理涉及这种高速、微观领域内的新的物理现象(实验),就显得无能为力了:其理论结果与实验事实出现了尖锐的矛盾。

著名的英国物理学家开尔文在1900年一次物理学年会上

的一段讲话清楚地描述了当时物理学所面临的这种情景。他首先说：“在已经建成的科学大厦中，后辈物理学家只要作一些零星的修补工作就行了”，接着他又不无忧心地指出：

“但是，在物理学晴朗的天空的远处，还有两朵小小的令人不安的乌云”。他所指的这“两朵小小的令人不安的乌云”就是当时现成的物理理论无法解释的涉及高速、微观领域的两个著名实验：一个是迈克尔逊-莫雷实验，一个是黑体辐射实验。开尔文是很有眼力的。他没有完全陷入盲目乐观，仍然清醒地指出存在两朵令人不安的乌云。但是即便是有眼力的开尔文也完全没有预料到正是这两朵小小的乌云，瞬夕之间即发展为席卷整个物理学的一场革命风暴，导致了近代物理学的两个重要分支——量子论和相对论的诞生。前者是处理微观过程的理论，后者是处理高速过程的理论。

为了区分这一明显的发展阶段，物理学史把1900年以前的物理学（包括牛顿力学，热力学和经典统计物理，电磁场理论）称为经（古）典物理学，而把1900年以后的物理学（包括相对论，量子力学）称为近代物理学。

本书主要介绍近代物理的基础知识和几个物理学前沿的选题，目的是让读者学习本书后获得近代物理的基础知识。通过学习，使读者了解、理解近代物理学的一些基本观点、基本结论，在其专业课程中遇到涉及这些观点和结论时，能够找到出处；并在今后的实际工作中有较强的后劲，能够应用这些结论，或者在此基础上进一步学习近代物理学。

第一章 狭义相对论基础

狭义相对论是爱因斯坦于1905年创立的。本章主要介绍迈克尔逊-莫雷实验，狭义相对论的基本假设，一些重要的相对论效应，洛伦兹变换及相对论时空观，狭义相对论的动力学基础。此外，我们还列出了双生子佯谬作为拓宽加深的内容。

§ 1-1 迈克尔逊-莫雷实验

一、神秘的以太

上个世纪，人们已经知道，声波的传播需要以空气、水等物质作为介质；光是一种电磁波，光的传播当然也需要介质，当时人们把传播光的介质称为“以太”（ether）。光在以太中的传播速度为 C 。由于光既可在“空无一物”的浩瀚的太空中传播，又可在稀薄的大气中传播，因此以太应是一种密度极小（几乎为零）的无处不在的物质，整个宇宙就是一个“以太的海洋”。下面，我们还会看到以太具有一些极为奇妙的特性。

由于以太传播的光波是横波，因而以太能够承受切变，故以太应具有固体的属性；由于光在以太中的传播速度为 $C = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ，这就要求以太具有极大的弹性模量，也就是说以太有极大的硬度。总之，以太是一种神秘的物质，它具有的奇妙特性是不可思议的，但是十九世纪由于牛顿机械

唯物论的影响，人们对于以太的存在不仅深信不疑，而且由于下面就要讲到的原因，对于以太的研究还极感兴趣。

我们知道，牛顿运动定律对于伽利略变换下的一切惯性系都是不变的，一切惯性系都是平衡的、等价的，不存在任何一个处于优越地位的惯性系。也就是说，在惯性系中进行的一切力学实验，不能测出该系相对于绝对参照系（亦即具有优越地位的惯性系）的“绝对速度”来。

由于光相对于以太的速度为 c ，人们又确信伽利略的速度合成法则（即伽利略变换）是普遍适用的，在此前提下，上个世纪五十年代进行的有名的斐索水管实验证实以太不被媒质的运动所带动。这样，以太参照系就是一个绝对静止的参照系，只有在以太系中测定的光速才为 c ；在其他相对于以太系以速率 v 沿某方向作匀速直线运动的参照系中的测量者将会感受到“以太风”（恰如在大气中快速骑自行车的人会感受到“空气风”一样），因而他在自己的参照系中测得的光速不再为 c ；当光传方向与以太风同向时，观察者测得的光速为 $c+v$ ，而当光传方向与以太风反向时，测得的光速则为 $c-v$ 。也就是说，在以太系以外的其他惯性系内测得的光速与该惯性系相对于以太系的速度有关。因此，人们可以指望在某个惯性系内进行测量光速的实验而感知该系相对于以太系的运动，并可据此测出这种运动的速度来。这就是说，对于电磁学来说（麦克斯韦电磁场理论已把光学纳入电磁学的范畴），以太系是一个处于特别优越地位的参照系，只有在该系中光速才为 c ，亦即只有在以太系中麦克斯韦电磁理论才是正确的；而在其他一切相对于以太系作匀速直线运动的惯性系中，电磁理论都应作出相应的修正。

这就是上个世纪里人们对于以太学说的兴趣不衰达数十

年之久的一个重要原因。

二、迈克尔逊-莫雷实验

通过上一段的分析得知，光在以太中传播，如果在电磁现象中能应用伽利略速度合成法则，那么，对于电磁现象就存在一个占优越地位的惯性系——以太系。在确认这两条假设的基础上，斐索实验证实了以太不为运动介质所带动。因此，我们可以通过在相对于以太系运动的惯性系（例如地球系）中进行测定光速的实验来测定该惯性系（例如地球系）相对于以太系的“绝对速度”。

迈克尔逊循着以上的思路，希图通过在地球上进行实验来测出地球相对于以太的速度。

图 1-1-1a 是迈克尔逊-莫雷实验的示意图。它实际上是一台迈克尔逊干涉仪，该干涉仪是等臂长的。开始时，让干涉仪的 PM_1 臂沿地球绕日公转方向， PM_2 臂与这个方向垂直。现在，让光源 L 发出的一束单色光（设波长为 λ ）一部分被 P 反射，经 PM_2PT 至目镜 T （称为 II 支路），另一部分被 P 透射经 PM_1PT 至目镜 T （称为 I 支路）。I、II 支路光束重汇于 T （目镜），因二支路有光程差而在 T 可观察到干涉条纹。今计算于后。

由图 1-1-1b 可知 I 支路 PM_1P 光需要的时间为

$$t_I = \frac{l}{c-v} + \frac{l}{c+v} = \frac{2lc}{c^2 - v^2} = \frac{2l}{c} \frac{1}{1 - v^2/c^2}$$

考虑到

$$\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1} = 1 + \frac{v^2}{c^2} + \left(\frac{v^2}{c^2}\right)^2 + \cdots \approx 1 + \frac{v^2}{c^2}$$

得

$$t_I = \frac{2l}{c} \left(1 + \frac{v^2}{c^2} \right) \quad (1-1-1)$$

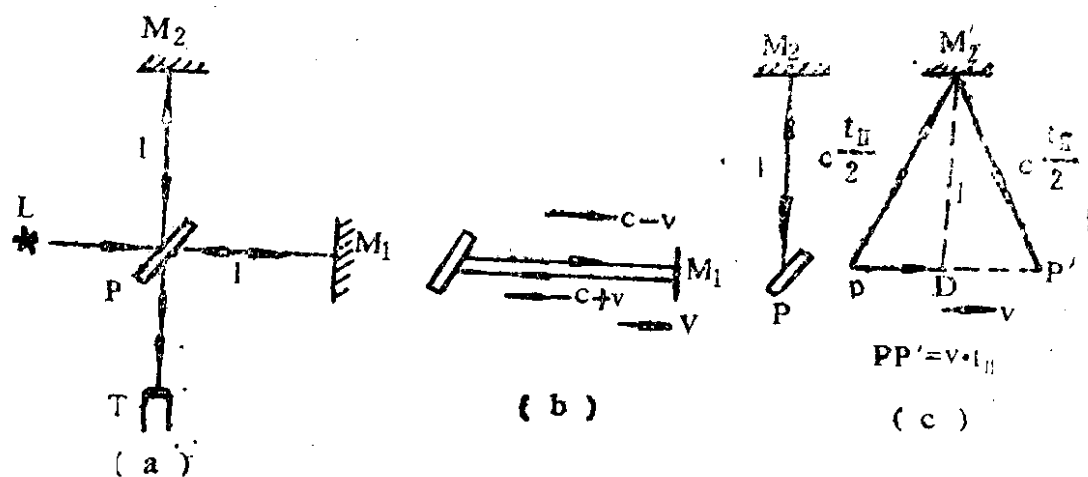


图 1-1-1

a. 实验装置示意图 b. I支路光路图 c. II支路光路图

由图1-1-1c知 II 支路 PM_2P 光需要的时间 t_{II} 要满足如下的几何关系

$$\left(c \cdot \frac{t_{II}}{2} \right)^2 = l^2 + \left(v \cdot \frac{t_{II}}{2} \right)^2$$

因而有

$$t_{II} = \frac{2l}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{2l}{c} \frac{1}{(1 - v^2/c^2)^{1/2}}$$

考虑到 $(1 - \frac{v^2}{c^2})^{-\frac{1}{2}} = 1 + \frac{1}{2}(\frac{v^2}{c^2}) + \frac{3}{8}(\frac{v^2}{c^2})^2 + \dots \approx 1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2}$

得:

$$t_{II} = \frac{2l}{c} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} \right) \quad (1-1-2)$$

于是, 光经 I、II 分支达目镜T的时间差为

$$\Delta t = t_I - t_{II} = l(v^2/c^3)$$

相应的光程差为

$$\delta = c\Delta t = l(v^2/c^2) \quad (1-1-3)$$