

中学物理奥赛辅导

ZHONGXUE WULI AOSAI FUDAO

热学·光学·近代物理学

REXUE GUANGXUE JINDAI WULIXUE

第2版

崔宏滨 编著

中国科学技术大学出版社

中学物理奥赛辅导

热学 · 光学 · 近代物理学

第2版

崔宏滨 编著



中国科学技术大学出版社

内 容 简 介

本书是为高中生参加全国中学生物理竞赛(也称“物理奥赛”)而编写的一本辅导教材,内容包括热学、光学、狭义相对论、原子物理及核物理。上述内容是物理学的重要组成部分,也是近代物理学发展和应用的主要领域。据作者粗略统计,这些内容在历年的竞赛试题中约占 35%。为了便于学生自学,一方面,对每一部分内容都从实验和理论方面进行了详细的论述;另一方面,列举了大量的习题,并进行了详细的解答,特别是对历年的竞赛题目,都采用与参考答案不同的方法进行了讲解,并对部分试题加以点评。这样做的目的是使读者学有所得,能对光学、热学和近代物理学的基础内容有较全面和正确的认识,使自己已有的物理知识得到进一步深化,从而具备坚实的物理基础,能够处理较复杂的物理问题。

本书采用高中阶段的数学知识处理所涉及的问题。例如,对于光的干涉、衍射,用振幅矢量法进行讲解,从而避免了复数和积分的运算;对于波粒二象性的内容,则从相关的实验中总结出相应的结论;等等。

本书既便于学生自学,也可供中学教师作为参考资料使用。

图书在版编目(CIP)数据

中学物理奥赛辅导. 热学·光学·近代物理学/崔宏滨编著. —2版. —合肥:中国科学技术大学出版社,2018.11

ISBN 978-7-312-04466-3

I. 中… II. 崔… III. 中学物理课—高中—教学参考资料 IV. G634.73

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 120299 号

出版 中国科学技术大学出版社

安徽省合肥市金寨路 96 号,230026

<http://press.ustc.edu.cn>

<https://zgkxjstxcbs.tmall.com>

印刷 安徽省瑞隆印务有限公司

发行 中国科学技术大学出版社

经销 全国新华书店

开本 787 mm×1092 mm 1/16

印张 34.75

字数 890 千

版次 2012 年 6 月第 1 版 2018 年 11 月第 2 版

印次 2018 年 11 月第 10 次印刷

印数 48001—53000 册

定价 88.00 元

第 2 版前言

本书自 2012 年出版以来,颇受欢迎,多次重印。在使用过程中,作者感到书中有许多不足之处,读者亦指出了书中的一些讹误,而且我国高中物理竞赛的内容也经过了多次调整。虽然每次重印时都尽力改进,但难遂人愿。这次再版,主要做了以下改动:

第一,对原书中发现的错误予以更正;

第二,对原书中的内容进行增删,以适应调整后物理竞赛的要求;

第三,增加了例题和习题,便于读者自学。

作者一向认为,有错必改是科研教学工作的基本要求;时刻反躬自省,不断认识到自身的不足,才能不断进步。但是,自己所犯的错误,往往自己很难发现。感谢读者对本书的批评和指正,希望在读者的帮助下,本书能够不断改进。

崔宏滨

2017 年 11 月 13 日于中国科学技术大学

前 言

物理学是一门实验科学,同时,物理学的各个分支都是一个完整的理论体系,都具有完备的数学逻辑。这是物理学的特征,也体现了牛顿的物理学是“自然哲学的数学原理”的思想。对于牛顿的上述思想,可以这样理解:物理学的研究对象是自然界中物质的运动、作用和结构的基本规律,这些规律必须从实验中得到,也必须用数学知识加以阐述,用数学逻辑进行推导。这样,才能在物理学各个部分之间建立起合理的关系,形成一个理论体系,较方便地进行推理、验证和推广,并作为一门学科、一种基础知识,被越来越多的公众所理解和接受。

事实正是如此。由于物理学的正确和严谨,物理学的知识迅速得到发展和普及,从事物理研究的人越来越多,所获得的成果也越来越多,从而对人类的进步和社会的发展产生了巨大的推动作用。第一次工业革命就是经典的力学、热学所导致的机械和热机在生产中应用的结果。在20世纪,相对论、量子力学的发展和应用更是导致了各种新技术的产生,从而推动了社会的巨大进步。

全国高中生物理竞赛自1984年开办以来,至今已举办了28届。这样的全国性物理竞赛不仅对提高广大中学生学习物理的兴趣、促进物理知识的普及起到了很好的作用,还使学生了解和掌握了处理物理问题的方法和技巧。本书就是针对参加竞赛的学生而编写的一本辅导教材,主要讲述热学、光学、狭义相对论、原子物理与核物理的基础知识。在中学阶段,学生大多较系统地学习了力学、电磁学的基础知识,但对热学、光学以及近代物理学的知识了解得较少,而这些知识又是物理竞赛中相当重要的部分。因此,本书对这些内容的基础知识做了系统而详细的介绍。

热学、光学和近代物理学虽然在物理竞赛的知识范围内,但超出了中学的教学范围,因而多数学生只能在课余时间学习这些知识。因此,在构思和写作本书的过程中,既要尽量将这些内容中最基本、最核心、最重要的部分系统地加以阐述,又要力求深入浅出、简明扼要。为了做到这一点,每一单元都首先介绍重要的物理模型,之后围绕核心内容进行阐述。例如,热学部分讲述在平衡态和准静态过程中的热力学定律及其应用;几何光学部分讲述建立在三大实验定律基础之上的以光线模型为基础的高斯成像理论;波动光学部分讲述以光波的叠加原理为基础的高频电磁辐射的相干叠加和非相干叠加;相对论部分重点阐述以光速不变为基础的时空关联和时空变换关系;量子力学部分则从实验出发讲述波粒二象性的物理基础,以及由此得到的量子态和不确定原理;原子物理部分讲述以卢瑟福核式结构模型为基础、基于量子原则的玻尔原子理论;原子核部分一方面讲述原子核的构成和粒子的简单分类,另一方面讲述粒子之间的相互作用所遵循的守恒定律。对每一部分,都兼顾实验的准确性和理论的完整性。

为了使学生能够对这些内容有较深刻的认识并且可以灵活地运用,书中列举了大量结合实际例题,并对竞赛试题用独特而巧妙的方法加以求解。例如,历来求解光束通过光楔的问题,都是采用折射定律进行推算的,但这样做既繁琐,又要在计算过程中多次采用近似方法加以处

理。而本书将这一过程作为两次连续的成像过程进行处理,非常简洁地得到了答案,因为成像公式是已经做过傍轴近似的定理,故用以解决这类问题,就无需再从基本的近似做起。书中类似的例题还有许多,相信学生在阅读之后一定会有新的体会。

最后,作者希望学生能够具有这样的认识:尽管物理学始终在不断地发展,不断地取得新成果,并将新成果转化为最新的技术,但是,物理学是整个自然科学最重要的基础,也是现代社会成员必备的基础知识。所以,不管你将来学习什么专业,从事何种行业,坚实的物理基础一定会使你在成功的道路上跑得更快、走得更远。

书中难免有不足或疏漏之处,作者诚恳地希望读者能够发现并指出书中的错误和不足,以便有机会加以改正。

崔宏滨

2012年5月15日于中国科学技术大学

目 录

第 2 版前言	(i)
前言	(iii)
第 1 章 热现象及其微观机制	(1)
1.1 描述热现象的物理参量	(1)
1.1.1 体积	(1)
1.1.2 压强	(1)
1.1.3 温度与温标	(3)
1.2 热平衡	(9)
1.2.1 热平衡态	(9)
1.2.2 热力学第零定律	(10)
1.3 理想气体的状态方程	(10)
1.3.1 阿伏伽德罗定律	(11)
1.3.2 玻意耳定律	(11)
1.3.3 盖·吕萨克定律	(13)
1.3.4 查理定律	(14)
1.3.5 理想气体的状态方程	(15)
1.3.6 道尔顿定律	(19)
1.4 分子的热运动	(20)
1.4.1 气体、液体、固体中的分子	(20)
1.4.2 分子的热运动	(21)
1.4.3 建立热平衡的微观过程	(22)
1.5 系统的内能	(22)
1.5.1 分子的动能	(22)
1.5.2 分子间的势能	(23)
1.6 热与功	(23)
1.7 气体分子运动论基础	(23)
1.7.1 理想气体的微观模型	(24)
1.7.2 气体分子运动的特点	(24)
1.7.3 气体压强的微观机制	(26)
1.7.4 气体温度的微观机制	(27)
1.8 实际气体的状态方程	(30)

1.9 热量的测量	(32)
1.10 热传递的各种形式	(34)
1.10.1 热传导	(34)
1.10.2 热对流	(37)
1.10.3 热辐射	(38)
习题	(43)
参考答案	(45)
第2章 物态及物态变化	(46)
2.1 固态	(46)
2.1.1 晶体	(46)
2.1.2 非晶态	(48)
2.1.3 准晶态	(48)
2.1.4 固体的热膨胀	(48)
2.2 液态	(50)
2.2.1 液体的表面张力	(51)
2.2.2 表面张力引起的压强	(52)
2.2.3 液体与固体表面之间的附着力	(54)
2.2.4 浸润	(55)
2.2.5 接触角	(56)
2.2.6 毛细现象	(56)
2.3 熔化与凝固	(60)
2.3.1 熔点	(61)
2.3.2 熔化热	(61)
2.3.3 凝固	(61)
2.4 升华与凝华	(61)
2.5 汽化与液化	(62)
2.5.1 蒸发	(63)
2.5.2 饱和气与饱和蒸气压	(63)
2.5.3 沸腾	(65)
2.5.4 汽化热	(68)
2.5.5 液化与临界温度	(68)
2.5.6 空气的湿度	(69)
2.5.7 露点	(69)
2.6 三相图	(70)
习题	(72)
参考答案	(72)
第3章 准静态过程与热力学第一定律	(73)
3.1 准静态热力学过程	(73)

3.2 功	(74)
3.3 热量	(75)
3.4 内能	(76)
3.5 热力学第一定律	(76)
3.6 热力学第一定律对理想气体的应用	(77)
3.6.1 焦耳实验	(77)
3.6.2 焦耳-汤姆孙实验	(77)
3.6.3 理想气体的内能表达式	(79)
3.6.4 定容过程	(80)
3.6.5 定压过程	(80)
3.6.6 等温过程	(80)
3.6.7 绝热过程	(81)
习题	(108)
参考答案	(114)
第4章 热力学循环与热力学第二定律	(116)
4.1 循环过程	(116)
4.2 热机循环	(117)
4.3 制冷机循环	(119)
4.4 热过程的不可逆性	(121)
4.5 热力学第二定律	(122)
4.5.1 热过程不可逆性的表述	(122)
4.5.2 开尔文表述与克劳修斯表述的等效性	(123)
4.5.3 热力学第二定律的统计解释	(124)
4.6 卡诺定理与热力学温标	(125)
4.6.1 卡诺定理	(125)
4.6.2 关于“可逆热机”与“不可逆热机”	(126)
4.6.3 热力学温标	(127)
4.7 熵与熵变	(128)
4.7.1 克劳修斯等式	(128)
4.7.2 态函数熵	(129)
4.7.3 计算熵变的实例	(130)
4.8 熵增加原理	(132)
4.8.1 不可逆过程的数学表达式	(132)
4.8.2 熵增加的实例	(133)
习题	(134)
参考答案	(136)
第5章 几何光学的物理基础	(137)
5.1 光线与几何光学的实验定律	(137)

5.1.1	光线模型	(137)
5.1.2	几何光学的实验定律	(138)
5.2	费马原理	(142)
5.3	光在平面上的反射	(143)
5.4	光在平面上的折射	(146)
5.4.1	平面折射成像	(146)
5.4.2	棱镜	(148)
5.4.3	全反射	(151)
5.4.4	全反射棱镜	(157)
5.4.5	全反射光纤	(159)
5.4.6	虹与霓	(163)
5.5	变折射率光学	(164)
5.5.1	变折射率介质	(164)
5.5.2	光线方程	(164)
	习题	(169)
	参考答案	(172)
第6章	透镜与透镜组的成像	(174)
6.1	成像的基本概念	(174)
6.1.1	从盲人摸象说起	(174)
6.1.2	光学成像的基本要素	(174)
6.2	傍轴光线经球面折射成像	(177)
6.2.1	轴上物点经单球面折射成像	(178)
6.2.2	轴外物点经单球面折射成像	(180)
6.2.3	像的横向放大率	(181)
6.2.4	焦平面	(182)
6.2.5	成像光学的符号约定	(185)
6.2.6	成像作图法	(188)
6.3	傍轴光线经球面反射成像	(189)
6.3.1	球面反射的物像公式	(189)
6.3.2	球面镜成像的特点	(191)
6.3.3	球面镜成像的作图法	(192)
6.4	傍轴光线经薄透镜成像	(193)
6.4.1	薄透镜	(193)
6.4.2	薄透镜成像的物像公式	(194)
6.4.3	薄透镜成像的作图法	(199)
6.5	光具组成像	(210)
6.5.1	光具组成像的计算	(210)
6.5.2	光具组成像的作图	(213)
6.6	焦距的实验测量	(231)

6.6.1 正镜焦距的测量	(232)
6.6.2 负镜焦距的测量	(233)
6.7 非傍轴光成像	(234)
6.7.1 透镜组的阿贝正弦条件	(235)
6.7.2 球形齐明透镜与齐明点	(235)
6.7.3 齐明透镜组	(237)
习题	(237)
参考答案	(247)
第7章 光学成像仪器	(250)
7.1 眼睛	(250)
7.1.1 眼睛的光学特性	(250)
7.1.2 视力的矫正	(252)
7.2 目镜	(253)
7.2.1 放大镜	(253)
7.2.2 显微镜和望远镜中的目镜	(255)
7.3 物镜	(257)
7.3.1 照相物镜	(257)
7.3.2 显微物镜	(259)
7.4 显微镜	(259)
7.4.1 显微镜的结构	(259)
7.4.2 显微镜的标志	(260)
7.5 望远镜	(262)
7.6 照相机	(263)
习题	(272)
参考答案	(275)
第8章 波动光学基础	(277)
8.1 光波产生的微观机制	(277)
8.2 光波的数学表示	(278)
8.2.1 振动的数学表示	(278)
8.2.2 波的数学表示	(279)
8.2.3 光的辐射通量与光强	(280)
8.2.4 球面光波的数学表达式	(282)
8.2.5 平面光波的数学表达式	(283)
8.3 接收屏上的波函数	(287)
8.3.1 接收屏上的平面波	(287)
8.3.2 接收屏上的球面波	(288)
8.4 光波的复振幅	(289)
8.5 光波的叠加	(290)

8.5.1	光波的独立传播定律	(291)
8.5.2	光波的叠加原理	(291)
8.6	光波的叠加方法	(291)
8.6.1	代数法(瞬时值法)	(292)
8.6.2	复数法	(292)
8.6.3	振幅矢量法	(293)
8.7	光波叠加的强度	(294)
8.7.1	光波叠加的特点	(294)
8.7.2	光波加强度的计算方法	(295)
8.7.3	光波的相干叠加与非相干叠加	(295)
8.7.4	光波的相干条件	(297)
8.8	波包与群速度	(300)
8.9	光波的偏振	(303)
8.9.1	横波的偏振性	(303)
8.9.2	起偏与检偏	(305)
8.9.3	光的偏振态	(305)
8.10	利用波片改变光的偏振态	(313)
8.10.1	波片	(313)
8.10.2	波片对光的偏振态的改变	(315)
8.11	偏振光的干涉	(324)
8.11.1	平行偏振光的干涉装置	(324)
8.11.2	干涉分析与实验现象	(325)
8.12	光与物质的相互作用	(327)
8.12.1	光的吸收	(327)
8.12.2	光的色散	(328)
8.12.3	光的散射	(330)
	习题	(331)
	参考答案	(336)
第9章	光的干涉	(339)
9.1	光的干涉装置概述	(339)
9.2	杨氏干涉	(339)
9.2.1	相干叠加与非相干叠加	(339)
9.2.2	干涉的特点	(341)
9.2.3	干涉花样的特点	(341)
9.3	两列平面波的干涉	(344)
9.4	其他分波前的干涉装置	(346)
9.4.1	菲涅耳双面镜	(346)
9.4.2	劳埃德镜	(347)
9.4.3	菲涅耳双棱镜	(348)

9.5 薄膜干涉	(354)
9.5.1 等倾干涉	(354)
9.5.2 等厚干涉	(359)
9.6 分振幅的干涉装置	(361)
9.6.1 迈克尔孙干涉仪	(361)
9.6.2 马赫-曾特干涉仪	(363)
9.6.3 干涉滤波片	(364)
9.6.4 牛顿环(圈)	(366)
9.7 光的空间相干性与时间相干性	(367)
9.7.1 光波场的空间相干性	(368)
9.7.2 光波场的时间相干性	(371)
习题	(373)
参考答案	(382)
第10章 光的衍射	(385)
10.1 惠更斯-菲涅耳原理	(385)
10.1.1 次波模型	(385)
10.1.2 次波的相干叠加	(386)
10.2 夫琅禾费单缝和矩孔衍射	(389)
10.2.1 夫琅禾费衍射装置	(389)
10.2.2 单缝衍射强度分布	(390)
10.2.3 单缝衍射花样的特点	(391)
10.2.4 夫琅禾费矩孔衍射	(393)
10.3 夫琅禾费圆孔衍射	(394)
10.3.1 圆孔衍射的强度分布	(394)
10.3.2 圆孔衍射花样的特点	(395)
10.3.3 望远镜的分辨本领	(395)
习题	(399)
参考答案	(399)
第11章 狭义相对论	(400)
11.1 物理规律与参考系	(400)
11.2 光速不变与相对性原理	(401)
11.3 洛伦兹变换	(404)
11.3.1 时空坐标的洛伦兹变换	(404)
11.3.2 同时的相对性	(405)
11.3.3 运动时钟的延缓	(406)
11.3.4 运动尺度的缩短	(407)
11.3.5 相对论的速度变换公式	(408)
11.4 相对论多普勒效应	(413)

11.4.1 经典的多普勒效应	(413)
11.4.2 光的多普勒效应	(414)
11.5 相对论力学	(421)
习题	(428)
参考答案	(429)
第 12 章 原子的结构与能级	(430)
12.1 汤姆孙的原子模型	(430)
12.1.1 电子的发现	(430)
12.1.2 葡萄干布丁模型	(432)
12.2 卢瑟福的原子模型	(432)
12.2.1 α 粒子的散射实验	(433)
12.2.2 对汤姆孙模型的否定	(433)
12.2.3 卢瑟福的原子核式结构模型	(434)
12.2.4 原子核大小的估算	(435)
12.2.5 卢瑟福散射公式的意义	(436)
12.3 氢原子的光谱	(436)
12.3.1 光谱	(436)
12.3.2 氢原子的光谱	(438)
12.4 玻尔的氢原子模型	(440)
12.4.1 经典理论解释氢原子光谱的困难	(440)
12.4.2 玻尔的氢原子模型	(441)
12.4.3 氢的里德伯常数实验值与理论值的偏差	(444)
12.5 类氢离子的光谱	(445)
12.5.1 类氢离子与皮克林线系	(445)
12.5.2 氘的发现	(447)
12.6 弗兰克-赫兹实验	(447)
12.6.1 基本思想	(447)
12.6.2 弗兰克-赫兹实验的装置与结果	(447)
12.6.3 改进的弗兰克-赫兹实验装置	(448)
12.6.4 阴极射线激发光源	(450)
习题	(460)
参考答案	(461)
第 13 章 量子力学初步	(462)
13.1 量子论的实验依据	(463)
13.1.1 黑体辐射与普朗克能量子	(463)
13.1.2 光电效应与爱因斯坦光量子	(467)
13.1.3 康普顿效应	(468)
13.1.4 电子的衍射	(469)

13.1.5 电子的干涉	(471)
13.1.6 分子的衍射	(471)
13.2 物质的波粒二象性	(472)
13.2.1 德布罗意的物质波	(472)
13.2.2 物质的波动性与粒子性	(472)
13.3 波粒二象性的必然结果——量子态	(474)
13.3.1 轨道角动量的量子化	(474)
13.3.2 刚性匣子中的粒子	(474)
13.4 不确定关系	(475)
13.4.1 几个典型的例子	(476)
13.4.2 不确定关系的严格表述	(477)
13.4.3 不确定关系的物理含义	(478)
13.5 波函数及其统计解释	(479)
13.5.1 波粒二象性的数学描述	(479)
13.5.2 电子的双缝干涉实验	(480)
13.5.3 波函数的统计解释	(482)
习题	(489)
参考答案	(491)
第 14 章 原子核物理概论	(492)
14.1 原子核的基本情况	(492)
14.1.1 物质的天然放射性	(492)
14.1.2 原子核的组成	(493)
14.1.3 原子核的大小	(496)
14.1.4 原子核的电荷与质量	(497)
14.1.5 核素	(498)
14.1.6 原子核的结合能	(499)
14.2 核力	(501)
14.2.1 核力的概念	(501)
14.2.2 核力的介子理论	(502)
14.3 放射性核衰变	(504)
14.3.1 放射性衰变的一般规律	(504)
14.3.2 α 衰变	(511)
14.3.3 β 衰变	(513)
14.3.4 γ 衰变	(517)
14.4 核反应	(519)
14.4.1 反应能与 Q 方程	(519)
14.4.2 核反应的阈能	(521)
14.5 核裂变	(521)
14.5.1 核裂变的发现及其特点	(521)

14.5.2 实现核裂变的主要方式	(523)
14.6 核聚变	(526)
14.6.1 核聚变的能量	(526)
14.6.2 核聚变的条件	(527)
习题	(536)
参考答案	(537)
参考文献	(538)

第 1 章 热现象及其微观机制

1.1 描述热现象的物理参量

在人们的生活和生产中,热现象以及对热现象的利用几乎是无处不在的。热现象的表现之一是物体和环境都有冷热之分。例如,冰与水的冷热不同;一天中的不同时刻,一年中的不同季节,天气的冷热也不相同。热现象的表现之二是在物质变化过程中,往往伴随着热的变化。这里所谓的变化通常有两种不同的类型:一种是物理变化,例如水结成冰要放热,冰融化成水要吸热;另一种是化学变化,如煤炭燃烧要放热,原子核发生裂变会放出很多的热量,还有很多反应要吸热。热现象的表现之三是物质的相互作用也能引起热的变化。例如,电流通过导体要放热,物体受到光的辐照会变热,冷热不同的物体相互接触后,冷热程度会渐趋一致。人们利用热现象的例子更是不胜枚举,例如冰块降温、空调取暖和制冷、蒸汽做功、核反应发电等。

在几百年来对热现象进行研究的过程中,物理学的一个经典分支逐渐建立起来,并不断得到发展和完善,这就是热学。人们发现,热的变化会导致物质许多相关特性的变化,因而赋予这些特性以物理上的定义,用相应的物理量描述这些特性,并根据物理实验的结果用数学逻辑将这些物理量相关联,就构成了热学理论体系的基础。以下首先介绍这些物理量的定义、标度和实验测量。

1.1.1 体积

各种形态的物质,当温度改变时,体积也随之改变,因而体积是描述热现象的一个重要的物理参量。

若研究对象的体积不受限制,在多数情况下,温度升高,体积膨胀;温度降低,体积收缩。固体和液体就是这样的。气体往往处在容器中,对固定容积的容器,由于气体受到限制,其体积不能够随温度改变;若容器的容积可变,例如弹性容器,或带有可自由移动的活塞的容器,其中的气体的体积可以随温度而变化。

1.1.2 压强

若体积的变化受到某种限制,则温度的变化会导致压强的变化,因而压强也是研究热现象过程中一个非常重要的物理量。

在国际标准单位制中,压强的单位是帕斯卡,符号为 Pa,即牛/米²。1 标准大气压(符号为 atm)约等于 760 mm 汞(Hg,俗称水银)柱所产生的压强,即 $1.013\ 25 \times 10^5$ Pa,可见 Pa 是一个非常小的压强单位。