

大学物理学

第四分册

近代物理及物理学
在现代科学技术中的应用

秦德培 主编



重庆大学出版社

105383

(二)

大学物理学

第四分册

近代物理及物理学在现代科学技术中的应用

秦德培 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制定的《大学物理课程教学基本要求》及其修改意见编写。全书分《力学·热学》、《电磁学》、《波动学》和《近代物理及物理学在现代科学技术中的应用》4个分册出版。本分册包括近代物理基础中的狭义相对论基础和量子物理基础以及物理学在现代科学技术中的应用的8个专题:超声、工业无损检测、传感器技术、光纤技术及应用、激光、半导体物理基础、超导电性和扫描隧道显微镜。前两章附有内容提要,配置有现今较为流行的习题和思考题。

本书可作为工科院校大学物理课程的通用教材,也可作为其它院校非物理专业和成人教育学院、职工大学等院校各工科专业的教学参考书。

DW56/04

近代物理及物理学在现代科学技术中的应用

秦德尊 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
重庆通信学院印刷厂印刷

*

开本:850×1168 1/32 印张:12.75 字数:339千
1996年10月第2版 1996年10月第5次印刷
印数:30501—38000

ISBN 7-5624-0031-8/O·11 定价:13.60元

(川)新登字 020 号

常用物理常量表

名 称	(符号)	数 值
引力常量	G	$6.67 \times 10^{-11} \text{N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$
地球质量	M	$5.98 \times 10^{24} \text{kg}$
地球半径	R	$6.4 \times 10^6 \text{m}$
阿伏伽德罗常量	N_A	$6.02 \times 10^{23} \text{mol}^{-1}$
气体常量	R	$8.31 \text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
玻耳兹曼常量	k	$1.38 \times 10^{-23} \text{J} \cdot \text{K}^{-1}$
理想气体标准状态下的摩尔体积	V_m	$22.4 \times 10^{-3} \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$
标准大气压	p_0	$1.013 \times 10^5 \text{Pa}$
电子电量	e	$1.602 \times 10^{-19} \text{C}$
电子静质量	m_e	$9.11 \times 10^{-31} \text{kg}$
电子静能	E_e	0.511MeV
质子静质量	m_p	$1.673 \times 10^{-27} \text{kg}$
中子静质量	m_n	$1.675 \times 10^{-27} \text{kg}$
1 电子伏特能量	eV	$1.602 \times 10^{-19} \text{J}$
真空电容率	ϵ_0	$8.85 \times 10^{-12} \text{F} \cdot \text{m}^{-1}$
真空磁导率	μ_0	$4\pi \times 10^{-7} \text{H} \cdot \text{m}^{-1}$
真空中光速	c	$3.00 \times 10^8 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
普朗克常量	h	$6.63 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$
里德伯常量	R_∞	$1.097 \times 10^7 \text{m}^{-1}$
玻尔半径	a_0	$5.29 \times 10^{-11} \text{m}$
电子康普顿波长	λ	$2.426 \times 10^{-12} \text{m}$

前 言

本书是为工科各专业编写的大学物理课程教材,是何世湘主编的西南地区 11 所院校联合编写的《大学物理学》的再版。在原书的编写过程中,各参编单位进行了卓有成效的合作,对各校的教学工作都起到了积极的促进作用。教学形势在不断发展,为适应各校教改的需要,不少的院校已先后编出并在教学中使用了一批切合本校实际的新教材。作为主编和参编人员较集中的重庆大学,经连续八年的教学实践,也深感有必要对原书进行合理的修订,在各参编单位的理解和赞同下,决定继续发扬该书的成果,改由重庆大学修订再版。

再版充分吸收了原版的优点,并认真总结了校内广大教师长期积累的教学经验,力求编成一套便于学生阅读,有利教师教学的简明教材。再版在以下几个方面作了改进:

- (1)对教学中的重点和难点,作了更深入细致的分析。
- (2)根据修订后的《基本要求》,对内容作了相应的调整,删去了绝大部分的超纲部分,重点更突出,内容更精炼。
- (3)物理概念和基本规律的阐述更符合近代科学的发展水平。
- (4)例题更切合基础教学的需要,习题和思考题的配置,更符合当前教学的要求。

此外,鉴于物理学正在现代科学技术和工程实践中发挥着越来越重要的作用,为开阔学生视野,激发学生学习物理学和自然科学的兴趣,除基础教学内容之外,本书还选编了一些反映物理学在现代科学技术中应用的简明专题材料,供学生课外阅读或作专题选讲。

本教材由秦德培主编,唐南任副主编。参加编写的有王佳眉、陈宁、金属东和林德华(以姓氏笔划为序)。本分册除由秦德培(第

一章),王佳眉(第二章),唐南(第三、七、八章)和林德华(第九章)编写外,还特邀有关方面的专家参加撰写了《物理学在现代科学技术中的应用》专题。他们是陶纯匡(第四章)、俞自强(第五章)、刘恩承(第六章)和蔡从中(第十章)。第五篇《近代物理基础》和第六篇《物理学在现代科学技术中的应用》分别由秦德培和唐南统稿。

前课程指导委员会委员、原主编何世湘教授对再版工作给予了热忱的指导和帮助,原版的一些作者也表达了对再版工作的关心。在此,我们对她(他)们表示衷心的感谢,对于编写过程中借鉴的其它教材的作者们,也谨致诚挚的谢意。限于编者的业务水平和教学经验,书中难免有不当和错误之处,敬请读者批评指正。

编者

1995年10月

目 录

第五篇 近代物理基础

第一章 狭义相对论基础	2
§ 1.1 经典时空观与伽里略变换式	2
§ 1.2 经典时空观的困难与狭义相对论的基本原理	5
§ 1.3 相对论的时空特性	8
§ 1.4 洛伦兹变换式	16
§ 1.5 相对论的速度加法公式	20
§ 1.6 光的多普勒效应	22
§ 1.7 动力学基本方程	25
§ 1.8 相对论能量	30
内容提要	35
思考题	38
习题	40
第二章 量子物理基础	44
§ 2.1 普朗克量子假设	44
§ 2.2 光子理论和光电效应	47
§ 2.3 康普顿效应	55
§ 2.4 玻尔的氢原子理论	61
§ 2.5 波粒二象性	68
§ 2.6 波函数	74
§ 2.7 不确定关系	76
§ 2.8 薛定谔方程	81
§ 2.9 一维无限深势阱中的粒子	82
§ 2.10 量子力学对核外电子的描述	90
§ 2.11 原子的壳层结构	97
内容提要	100

思考题	103
习题	105
第三章 超声波	110
§ 3.1 声波	110
§ 3.2 超声波的传播特性	117
§ 3.3 超声的作用	121
§ 3.4 超声的发生	123
§ 3.5 超声的测量	126
§ 3.6 超声无损探伤	130
§ 3.7 超声加工	134
§ 3.8 超声清洗和超声焊接	137
习题	138
第四章 工业无损检测	142
§ 4.1 射线无损检测	143
§ 4.2 光学检测	150
§ 4.3 磁粉检测	161
§ 4.4 液体渗透检测	166
§ 4.5 超声波检测	171
习题	176
第五章 传感器技术	178
§ 5.1 概述	178
§ 5.2 光学传感器	183
§ 5.3 温度传感器	194
§ 5.4 压力传感器	199
§ 5.5 磁传感器	206
§ 5.6 气体传感器	214
第六章 光纤技术及应用	221
§ 6.1 迅速发展的光纤技术	221
§ 6.2 光纤	224
§ 6.3 光纤技术用光源和光探测器	236
§ 6.4 光纤传感技术	244
§ 6.5 主动光纤和光纤放大技术	253

习题	259
第七章 激光	262
§ 7.1 光放大和粒子数反转.....	262
§ 7.2 激光的产生.....	269
§ 7.3 激光器.....	275
§ 7.4 激光的特点.....	282
§ 7.5 激光的应用.....	283
§ 7.6 光学全息.....	288
习题	292
第八章 半导体	295
§ 8.1 晶体的结构.....	295
§ 8.2 晶格的振动 光散射.....	298
§ 8.3 固体的能带结构.....	302
§ 8.4 导体、绝缘体和半导体	305
§ 8.5 本征半导体和杂质半导体.....	309
§ 8.6 半导体的电导率.....	312
§ 8.7 PN 结	318
§ 8.8 PN 结击穿	323
练习题	327
第九章 超导电性	329
§ 9.1 超导体的基本电磁学性质.....	329
§ 9.2 超导电性的物理图象.....	340
§ 9.3 约瑟夫森效应.....	345
§ 9.4 高温超导体.....	354
§ 9.5 超导电性的应用.....	356
习题	358
第十章 扫描隧道显微镜	359
§ 10.1 显微学	359
§ 10.2 扫描隧道显微镜	362
§ 10.3 STM 在现代科学技术中的应用	378
习题	388
习题答案	390

第五篇 近代物理基础

19世纪末叶,物理学已经发展到了很高的水平:融汇了开普勒和伽里略研究成果的牛顿力学,可以十分完美地解决一切低速、宏观物体的运动问题;不断完善的热力学和统计物理学,使人们能够从宏观和微观角度统一地阐明物质的热运动规律;麦克斯韦的电磁场理论,更把电磁学和波动光学纳入了统一的理论体系。可以说,物理学已经进入了完整、系统和成熟的阶段。面对这一辉煌的成就,当时的物理学界,沉浸在一派盲目乐观的气氛之中。一种有代表性的看法是:“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,留给下一代人的工作,只是把实验数据测量得更精确些”。就连为建立量子理论作出了开创性贡献的普朗克也曾说过,“物理学的重要规律已经发掘完了,想在物理学上有所作为的人无不感到沮丧”。然而,就在19世纪末,伦琴、贝克勒尔和汤姆逊在1895~1897的短短三年间,就相继发现了X射线、放射性和电子。这三大发现,连同其它一些新的实验,都超越了当时的物理学的研究范围,有的还与传统理论发生了尖锐的矛盾。这其中最引人注目,并直接向传统理论提出挑战的,是探索“以太”存在的迈克耳孙-莫雷实验和造成“紫外灾难”的黑体辐射实验,被称为“万里晴空”(指传统理论)中的两朵令人不安的“乌云”。一系列新的实验结果使传统的物理学陷入了严重的危机,也使人们发现还有许多新的领域需要进行探索,更迫使一些有革新精神的人改变旧的观念,去寻求新的理论。终于,乌云演变成了暴风雨,物理学发生了革命性的变革,划时代的理论——相对论和量子力学相继诞生了。现在,人们为了区分物理学的两个重要发展阶段,常把以牛顿力学、热力学和统计物理学、电磁场理论为主要支柱的物理学称

为经典物理学,而把以相对论和量子力学为代表的物理学称为近代物理学。相对论研究高速运动的规律,量子力学是关于微观世界运动规律的理论,它们的建立,为 20 世纪自然科学的进一步发展奠定了坚实的基础,为新材料的研制和新技术的应用开辟了广阔的前景。

第一章 狭义相对论基础

§ 1.1 经典时空观与伽里略变换式

一、经典时空观

任何一个物理事件,例如发出光波和火车到站,都有事件发生的空间和时间。在给定的参考系中,事件发生的地点,可在固连于参考系的坐标系中进行测量,而事件发生的时间,则要依据同时事件的判断,由事件发生地静置于参考系中的“钟”的指示来读取。例如,“火车 10 点正到站”,应是指火车到站这一事件与站上的钟指示 10 点正的事件在同一地点同时发生。当然,为了了解不同事件发生的时间先后,所有静置于参考系中的钟必须同步,也即必须全同并事先校准。而且,为了便于研究不同参考系中事件的时空关系,各参考系中用以标定坐标系的静止的“尺”和用来计时的钟,也都应该是全同的,所有的钟还都应该事先按照一定的程序进行校准。

在狭义相对论建立以前,关于时间和空间的认识,是以牛顿的经典时空观为代表的。这种时空观认为,在自然界中,除了物质以外,还存在着与物质运动无关的,彼此之间也相互独立的“绝对时

间”和“绝对空间”，时间象滚滚不断的流水，空间是盛有万物的无形的不动的框架。按照这种时空观，两事件发生的时间间隔和发生地的空间距离，在所有的参考系中都是相等的和绝对不变的。这也意味着，同一把尺，在任何参考系中测量都一样长，同一只钟，在任何参考系中都走得一样快。这种时空观，也叫绝对时空观，是一种人们早已习以为常，似乎是不容置疑的时空观。事实上，20世纪以前的物理学，特别是被认为已经完美无缺的牛顿力学，就是建立在绝对时空观的基础上。

二、伽里略变换式

经典的时空观认为，在不同的参考系中，两事件的时间间隔都相同，两事件发生地的空间距离也都相等。这里所要寻求的，则是不同参考系中同一事件的时空坐标 (t, x, y, z) 之间的相互关系。

设有两个相对作匀速直线运动的参考系 S 和 S' ，固连于它们的坐标系分别为 $oxyz$ 和 $o'x'y'z'$ 。为了简化讨论，规定它们对应的坐标轴互相平行指向同一方向，且 x

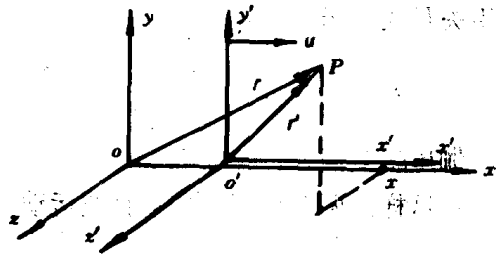


图 1.1 两相对作匀速直线运动的参考系

轴和 x' 轴重合， S' 系以匀速 u 沿 x 轴的正向运动，如图 1.1 所示。假定两参考系中放置有一系列已经校准静止的钟，并统一在 o' 、 o 坐标原点重合时开始计时，即 o' 、 o 重合时 $t=0, t'=0$ 。设有一运动质点 P ，它在 S 和 S' 系中的时空坐标分别为 (t, x, y, z) 和 (t', x', y', z') 。由于时间的绝对性，在质点 P 运动的任一时刻，都有 $t=t'$ ，由于空间的绝对性， P 点到 xz 平面和 $x'z'$ 平面的距离相等，到 xy 平面和 $x'y'$ 平面的距离也相等，应有 $y=y', z=z'$ ，只是沿 x, x' 方

向的测量值,才由于 yz 平面与 $y'z'$ 平面不重合出现 $x \neq x'$ 。 x 应为 ut 加上 P 点到 $y'z'$ 平面的距离,且该距离在 S 系中测量仍为 x' , 故有

$$x = x' + ut = x' + ut'$$

或

$$x' = x - ut' = x - ut$$

综合上述结果,便得联系 S 和 S' 参考系中时空坐标的变换式

$$\begin{cases} x = x' + ut' \\ y = y' \\ z = z' \\ t = t' \end{cases} \quad (1.1)$$

$$\begin{cases} x' = x - ut \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = t \end{cases} \quad (1.2)$$

或用矢量式表示为

$$r = r' + ut' \quad (1.3)$$

$$r' = r - ut \quad (1.4)$$

称为伽里略变换式。

在这样的两个相对作匀速直线运动的参考系中,按速度定义

$$v = \frac{dr}{dt}$$

$$v' = \frac{dr'}{dt'}$$

和 $dt = dt'$, 可由

$$v = \frac{dr}{dt} = \frac{d}{dt'}(r' + ut') = \frac{dr'}{dt'} + u$$

得到速度变换公式

$$v = v' + u \quad (1.5)$$

也即质点运动学中的速度合成公式。

此外,由

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d}{dt}(v' + u) = \frac{dv'}{dt'}$$

和 $a' = \frac{dv'}{dt'}$, 还可得到加速度的变换公式

$$a = a' \quad (1.6)$$

三、力学相对性原理

在牛顿力学里, 质量 m 和时间、空间一样, 也是一个与参考系无关的不变量, 加之在两个相对作匀速直线运动的 S 和 S' 参考系中 $a = a'$, 按照惯性系中的牛顿第二定律, 便有

$$ma' = ma$$

和

$$F' = F \quad (1.7)$$

表明在所有的惯性系中力也和参考系的选择无关。基于时、空的绝对性, 可以推论: 在任何惯性系中, 力的各种积累效果都一样, 包括牛顿第二定律在内的所有其它的力学定律都会具有相同的表达形式。这叫做**力学相对性原理**。按照这个原理, 在一个惯性系中作任何力学实验, 都无法确定这一惯性系本身相对其它惯性系是静止还是作何种匀速直线运动, 亦即不存在任何一个比其它惯性系更为特别或更为优越的惯性系。早在 1632 年, 伽里略就曾根据在匀速前进的封闭船舱中观察到的力学现象, 表明了力学规律在所有惯性系中等价的思想。因此, 力学相对性原理也称**伽里略相对性原理**。

§ 1.2 经典时空观的困难与狭义相对论的基本原理

一、经典时空观的困难

根据前面的讨论, 按照经典的时空观, 当参考系 S' 以匀速 u 相对参考系 S 运动时, 两参考系中运动速度的关系为

$$v = v' + u$$

照此推理,光在 S 和 S' 系中的传播速度,也应为

$$c = c' + u$$

即光速是一个可变量,光速的大小与参考系的选择有关。

另外,在麦克斯韦的电磁场理论中,真空中的光速为 $c = 1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$ (ϵ_0 和 μ_0 分别为真空电容率和真空磁导率),如果光速可变,就意味着麦克斯韦的电磁理论只在某个特定的参考系中成立,而不是象在经典力学中那样,各个力学定律在所有的惯性系中都有相同的表达形式。

然而,所有为了测量出不同参考系中光速大小差别的实验,最终都归于失败。例如:

1. 迈克耳孙-莫雷实验

实验装置是一台安装在地球上的等臂长的迈克耳孙干涉仪。假定地球相对于电磁场理论成立的特殊参考系(当时称为以太参考系)的运动速度为 u ,按照经典时空观的速度变换公式,在地球上测得的真空中的光速,应为

$$c' = c - u$$

由于光在两臂中的传播方向不同,在一般情况下,两臂中光速的大小

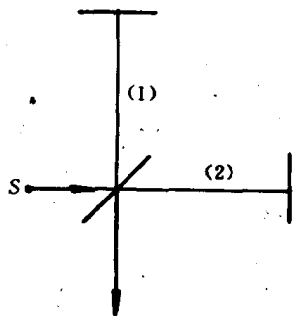


图 1.2 迈克耳孙-莫雷实验

是不同的,两相干光在视场中叠加时会有一定的光程差,如果在水平面内将仪器旋转 90° ,使图 1.2 中(1),(2)两臂的方位互换,在旋转的过程中,就应该发生光程差的改变,在视场中就应该观察到干涉条纹的移动。然而,实验结果表明,不管实验在地球上的什么地方和什么季节进行(由于地球的自转和公转等运动,不同的地点和时间 u 会有所不同,光程差也会有所不同),条纹的移动量都在实验允许的误差范围以内,根本就无法确定地球相对以太的运动,或

者说,根本就无法测出参考系对光速大小的影响。

2. 双星观察

双星由两颗高速旋转的恒星组成,并绕它们的质心作近似的圆周运动,如图 1.3 所示。一种理论认为,光速与光源的运动状态有关,实际光速为光在以太中的传播速度 c 与光源运动速度 v 的合速度。按照这种理论,当双星中的一颗子星 A 到达图中的 1、2 位置时,由于 v 分别离开地球和向着地球方向, A 在 1、2 位置发出的光的速度,将分别是 $c-v$ 和 $c+v$,这样,在 A 星于 1 处发出的光到达地上时,就有可能出现 A 星经半周期从 1 到 2 处于 2 处发出的光也同时到达地上,在 1、2 两处同时看到 A 星。这就是所谓的“魅星”。但是,天文上观察到的双星都是正常的,从未观察到“魅星”。

除此之外,较为近代的一些实验结果,如高速运动粒子向前发出的高能光子,测出它的速率与静止辐射源发出的光子速率极为一致,也都说明经典的速度变换公式失效,暴露出经典时空观所遇到的困难。

二、狭义相对论的基本原理

面对经典时空观所遇到的困难,在科学地总结了他人的失败和成功经验之后,爱因斯坦(Albert Einstein)以敢于向传统观念提出挑战的大无畏勇气,提出了两条基本假设,并在其基础上建立了具有全新时空观的狭义相对论。这两条基本假设或狭义(只涉及惯性系)相对论的两条基本原理是:

1. 光速不变原理

在所有惯性系中,真空中的光速都是 c ($c = 299792458\text{m/s}$),与光源的运动状态无关。

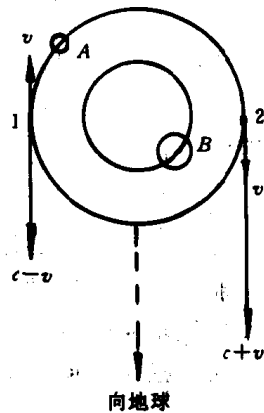


图 1.3 双星观察

光速不变原理是对经典时空观的直接否定,预示着时间和空间都与物质的运动有关,与参考系的选择有关。

2. 相对性原理

在所有惯性系中,物理定律都是相同的。

相对性原理亦称狭义相对性原理,是力学相对性原理的推广。它指出,不仅不能通过力学实验,也无法通过任何其它的物理实验来确定观察者所在的惯性系是静止的或是作匀速直线运动。相对性原理也否定了特殊参考系和绝对空间的存在。

狭义相对论的两条基本假设以及在它基础上建立的狭义相对论的正确性,只能用实践来检验。相对论不仅能解释当时所有的有关的实验结果,还预言了许多新的物理效应,而且这些经典物理学不可理喻的新效应都一个一个地被实验所证实。可以说,自相对论(包括讨论非惯性系的广义相对论)建立以来,还没有发现一个与相对论理论相违背的具有说服力的实验结果。

§ 1.3 相对论的时空特性

爱因斯坦认为,时间和空间都和物质运动相联系。真实存在的时间,是用自己的钟来读取的;真实存在的空间,是用自己的尺来量度的。由于时间和空间都与物质的运动相联系,而运动又是相对的,相对论时空观的一个直接结果,就是两事件的时间间隔和空间距离都和参考系的选择有关。

前已指出,事件发生地的空间位置,可通过固连于参考系中的尺或坐标系来测量,事件发生的时间,则是用静置于参考系中事件发生地的钟来读取。时间与物质的运动相联系,钟的计时标准应该依赖于一定的物质运动规律(如机械钟依赖于摆轮或摆锤的振动规律,石英钟依赖于晶体的振荡规律),特别是,为了使时间具有可比性,不同参考系中的计时标准,还应该与参考系的选择无关。真空中的光速与惯性系的选择无关,在狭义相对论中,就是以此来制