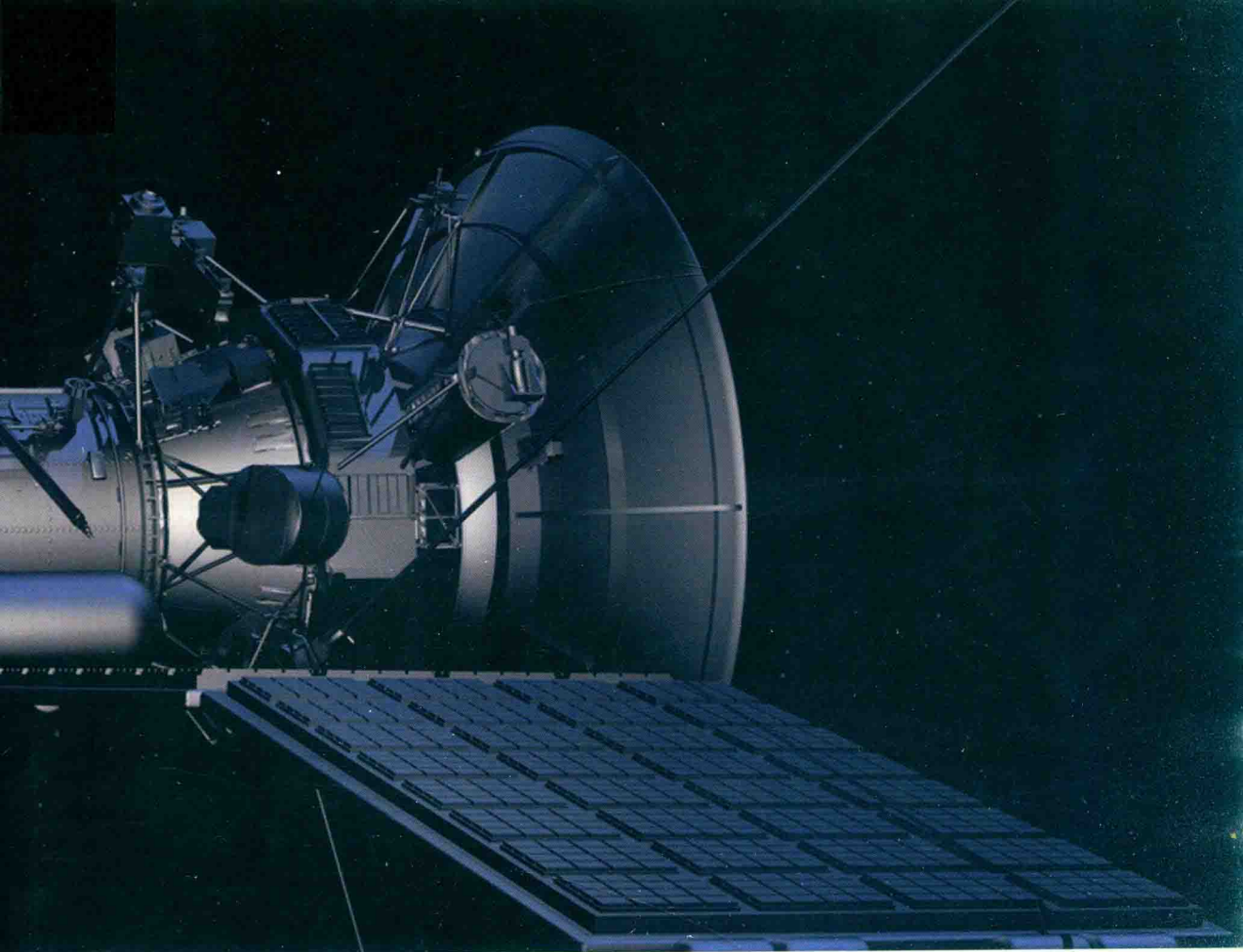




iCourse · 教材

大学物理

(第四卷)近代物理

主编 胡海云 缪劲松 冯艳全 吴晓丽

高等教育出版社



iCourse · 教材

大学物理 (第四卷)近代物理



主编 胡海云 缪劲松 冯艳全 吴晓丽



高等教育出版社·北京

内容简介

本套教材分为四卷,第一卷力学与热学,包括质点力学、刚体力学、连续体力学、气体动理论、热力学基础;第二卷波动与光学,包括振动、波动、几何光学基础、光的干涉、光的衍射、光的偏振;第三卷电磁学,包括静电场、静电场中的导体和电介质、恒定磁场、电磁感应和电磁场;第四卷近代物理,包括狭义相对论力学基础、微观粒子的波粒二象性、薛定谔方程及其应用、固体中的电子、原子核物理。各章后均有本章提要、思考题和习题,书末备有习题参考答案和活页作业单。

本书适合作为理工科各专业的大学物理课程的教材或教学参考书,也可作为综合性大学和高等师范院校相关专业的教材或教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理. 第四卷, 近代物理 / 胡海云等主编. --
北京: 高等教育出版社, 2017.6

iCourse·教材

ISBN 978-7-04-047599-9

I. ①大… II. ①胡… III. ①物理学-高等学校-教材 IV. ①O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 074322 号

DAXUE WULI (DI SI JUAN) JINDAI WULI

策划编辑 缪可可能

责任编辑 缪可可能

封面设计 张志奇

版式设计 杜微言

插图绘制 杜晓丹

责任校对 陈旭颖

责任印制 耿 轩

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市西城区德外大街 4 号

邮政编码 100120

印 刷 北京鑫海金澳胶印有限公司

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 15.75

字 数 390 千字

购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

<http://www.hep.com.cn>

网上订购 <http://www.hepmall.com.cn>

<http://www.hepmall.com>

<http://www.hepmall.cn>

版 次 2017 年 6 月第 1 版

印 次 2017 年 6 月第 1 次印刷

定 价 29.90 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物 料 号 47599-00

前言

物理学是研究物质的基本结构、基本运动形式、相互作用的自然科学,它具有完整的科学体系、独特有效的研究方法、丰富的知识,所有这些对于培养 21 世纪的科学研究工作者及工程技术人员都是必不可少的。因此以物理学基础为内容的大学物理课程是理、工、经、管、文等本科各非物理专业必修的一门基础课。

当前,以计算机、手机和网络技术为核心的现代信息技术正在改变着我们的生产方式、生活方式、工作方式和学习方式,并可能引起教育和教学的革命性改革。北京理工大学大学物理教学团队充分利用自身的教育资源优势,一直积极开展大学物理课程的网络建设。北京理工大学“大学物理”课程 2008 年被评为北京市精品课;2014 年入选中国大学 MOOC 首批建设课程,分力学与热学、波动与光学、电磁学、近代物理四个模块进行讲授,并基于 MOOC 开展面向多元化专业人才培养的大学物理模块化分层次混合式教学;“物理之妙里看‘花’”2016 年被评为国家级精品视频公开课。

我们之所以新编一套教材,是因为不仅要考虑结合国内外的教学改革进展及信息化技术,还要考虑在充分总结和吸取广大教师和学生对原北京市精品教材《大学物理》(苟秉聪、胡海云主编)意见的基础上,依据教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会编制的《理工科类大学物理课程教学基本要求》(2010 年版)进行编写。在写作风格上力求物理图像清晰,物理思想突出;论述力求深入浅出并有适量的技术应用和理论扩展。同时力求贯彻以学生为主体、教师为主导的教育理念,遵循学生混合式学习的认知规律,结合 MOOC 教学,通过立体化设计,体现“导学”“督学”“自学”“促学”思想,展现物理以“物”喻理、以“物”明

理、以“物”悟理的学科特点,使学生多方位地开展学习,增加教材的可读性和趣味性。

本套教材编者均为大学物理教学的一线优秀教师,具有多年丰富的教学、教改经验。第一卷主编老师为:刘兆龙(第1、第2章),石宏霆(第3章),冯艳全(第4、第5章);第二卷主编老师为:李英兰(第1、第2章),郑少波(第3—第6章);第三卷主编老师为:胡海云(第1、第2章),吴晓丽(第3章),缪劲松(第4章);第四卷主编老师为:缪劲松(第1章),胡海云(第2、第3章),冯艳全(第4章),吴晓丽(第5章)。我们感谢北京理工大学的物理学前辈苟秉聪教授等为本套教材打下的良好基础,感谢北京理工大学教务处、高等教育出版社物理分社等对本套教材的编写与出版的积极支持。

编者

2016年4月

目 录

第 1 章 狭义相对论力学基础	1	假设	68
1.1 狭义相对论的基本原理	2	2.1.1 黑体辐射	68
1.1.1 力学相对性原理、绝对时空观和 伽利略变换	3	2.1.2 普朗克能量子假设	72
1.1.2 爱因斯坦相对性原理和光速 不变原理	5	2.2 光电效应 爱因斯坦光子 理论	75
1.2 相对论时空效应	8	2.2.1 光电效应	75
1.2.1 空间和时间的测量	8	2.2.2 爱因斯坦光子理论	77
1.2.2 时间延缓	11	2.2.3 光的波粒二象性	82
1.2.3 长度收缩	15	2.3 康普顿效应	84
1.2.4 同时性的相对性	18	2.3.1 康普顿效应	84
1.3 洛伦兹变换	23	2.3.2 康普顿效应的光量子理论解释	86
1.3.1 洛伦兹变换的推导	23	2.4 氢原子光谱 玻尔的氢原子 理论	90
1.3.2 利用洛伦兹变换验证相对论 时空效应	29	2.4.1 氢原子光谱	90
* 1.3.3 闵可夫斯基空间	40	2.4.2 玻尔的氢原子理论	92
1.4 相对论速度变换	46	2.5 粒子的波动性 玻恩的统计 解释	97
1.5 相对论动力学基础	49	2.5.1 德布罗意波	97
1.5.1 相对论动量和质量	49	2.5.2 德布罗意波的实验验证	98
1.5.2 质能关系	51	2.5.3 玻恩的统计解释	102
1.5.3 相对论能量和动量的关系	54	2.5.4 自由粒子的波函数	109
* 1.6 广义相对论简介	56	2.6 不确定关系	110
1.6.1 广义相对论基本原理	56	本章提要	116
1.6.2 广义相对论的几大实验验证	59	思考题	119
本章提要	62	习题	119
思考题	63		
习题	64	第 3 章 薛定谔方程及其应用	122
		3.1 薛定谔方程	123
第 2 章 微观粒子的波粒二象性	67	3.1.1 自由粒子薛定谔方程	123
2.1 黑体辐射 普朗克能量子		3.1.2 一般情况下的薛定谔方程	124

3.1.3 定态薛定谔方程	126	4.3 半导体导电	178
3.2 一维方势阱中的粒子	128	4.3.1 半导体分类	178
3.2.1 一维无限深方势阱中的粒子	128	4.3.2 pn 结	181
3.2.2 一维有限深方势阱中的粒子	133	* 4.3.3 半导体器件	182
3.2.3 一维方势垒 势垒贯穿	134	本章提要	187
3.3 简谐振子	136	思考题	188
3.4 原子中的电子	138	习题	188
3.4.1 氢原子	138		
3.4.2 施特恩-格拉赫实验和电子 自旋	144	第 5 章 原子核物理	190
3.5 四个量子数和原子的壳层 结构	148	5.1 原子核的基本性质	190
3.5.1 四个量子数	148	5.1.1 原子核的组成	190
3.5.2 泡利不相容原理与能量最低 原理	149	5.1.2 原子核的形状与大小	192
3.5.3 原子的壳层结构	149	5.1.3 原子核的自旋与磁矩	193
* 3.6 激光	152	5.2 原子核的结合能和核力	195
3.6.1 激光的产生	152	5.2.1 原子核的结合能	195
3.6.2 激光的特性	155	5.2.2 核力	197
3.6.3 激光的应用:激光冷却	155	5.3 原子核的放射性衰变	199
本章提要	156	5.3.1 放射性	199
思考题	159	5.3.2 放射性衰变规律	200
习题	159	5.3.3 α 衰变	202
		5.3.4 β 衰变	203
		5.3.5 γ 衰变	205
		5.3.6 放射性的应用	205
		5.4 核反应	207
第 4 章 固体中的电子	161	5.4.1 人工核反应	207
4.1 金属中的自由电子	161	5.4.2 核裂变	208
4.1.1 自由电子气模型	162	5.4.3 核聚变	212
4.1.2 自由电子气的费米能量	163	本章提要	215
4.1.3 态密度 费米-狄拉克分布	167	思考题	217
4.2 固体能带理论	170	习题	217
4.2.1 固体的能带	171		
4.2.2 价带、导带和禁带	174	附录	219
4.2.3 导体、绝缘体和半导体	175		

第 1 章 狭义相对论力学基础

至 19 世纪末期,经典物理学的理论已经基本完整地建立了起来,它包括牛顿力学、热学、光学及电磁学等内容. 利用经典物理学的理论不仅能够解释实际遇到的绝大多数自然现象,而且在其建立过程中还直接引发了两次工业革命,其中在第一次工业革命中诞生了蒸汽机和内燃机,在第二次工业革命中实现了电气化和无线电通信. 这些都极大地促进了生产力的发展,使人类的生产和生活方式发生了巨大变化.

当时,人们认为对物理现象本质的认识几乎已经完成,后辈物理学家的主要任务似乎只是去做一些零碎的修补工作. 但是,两个实验结果却使当时的物理学家感到了不安. 1900 年 4 月 27 日,英国物理学家汤姆孙(W. Thomson,被封为开尔文爵士)在英国皇家学会迎接新世纪的年会上作了名为《19 世纪热和光的动力学理论上空的乌云》的演讲,他开门见山地说:“动力学理论断言,热和光都是运动的方式. 但现在这一理论的优美性和明晰性却被两朵乌云遮蔽,显得黯然失色了……”. 汤姆孙所指的经典物理学晴朗天空中的“两朵乌云”,一个是著名的迈克耳孙-莫雷(Michelson-Morley)实验寻找“以太”的零结果;另一个是黑体辐射理论中的“紫外灾难”. 前者和牛顿经典力学的时空观及伽利略变换相矛盾,后者则无法用传统的热力学或电磁学理论进行解释. 正是这两朵乌云孕育了物理学史上的巨大变革,在接下来的三十年时间里,经典物理的观念和思想被突破. 迈克耳孙-莫雷实验的零结果催生了爱因斯坦相对论的建立,黑体辐射中的“紫外灾难”直接导致了量子力学的诞生. 相对论和量子力学正是近代物理学的两大分支,这两门新学科是 20 世纪物理学最伟大的发现,没有它们就不会有今天的核能、宇宙探索、计算机、激光、纳米等各种各样的高新技术.

如果说量子力学的建立是众多科学家智慧的结晶,那么相对论的创立却可以说主要是归功于个人成就,这个人就是 20 世纪最伟大的物理学家爱因斯坦(A. Einstein). 19 世纪末期在麦克斯韦电磁理论建立以后,科学家们意识到,麦克斯韦方程组中出现

- 1.1 狭义相对论的基本原理
- 1.2 相对论时空效应
- 1.3 洛伦兹变换
- 1.4 相对论速度变换
- 1.5 相对论动力学基础
- * 1.6 广义相对论简介

本章提要

思考题

习题



授课录像:近代物理引言

的光速并未指定是相对于哪一个参考系,换句话说,真空中光在任何方向都以同一速度 c 传播,与参考系无关. 迈克耳孙-莫雷实验的零结果正好从实验上证明了真空中的光速与参考系无关,但这却与经典力学的伽利略速度变换发生了矛盾. 要解决这一矛盾,要么修改麦克斯韦电磁理论,要么放弃伽利略变换. 爱因斯坦在对实验结果和物理学基本概念综合分析的基础上选择了后者. 他认为,所有的物理规律,不仅是力学规律,还包括电磁规律,对于任何惯性系都是成立的,在此基础上他创立了狭义相对论. 然后,爱因斯坦又将物理规律的适用性进一步推广到了包括非惯性系在内的任意参考系,建立了广义相对论.

爱因斯坦相对论的建立,意味着人们必须放弃在头脑中早已形成的、根深蒂固的关于时间、空间和物体运动的概念,建立起一种全新的革命性的时空观. 爱因斯坦相对论给出了高速(接近光速)运动物体满足的物理规律,揭示了质量和能量的内在联系,开始了万有引力和大尺度空间本质关系的探索. 现在,相对论已经成为研究物质相互作用、宇宙起源、星系演化等方面的理论基础. 相对论包括狭义相对论和广义相对论两个部分. 本章主要讲授狭义相对论的力学基础,只在最后一节对广义相对论作简要介绍.

1.1 狭义相对论的基本原理

时间和空间是物质的存在形式,物质运动与时空性质紧密相连,不可分割. 对物质运动的描述是相对的,在讨论具体的物质运动时,必须先确定其所在的参考系. 在不同参考系中,物理定律应该具有相同的形式,这就是相对性原理,它是物理学最基本的原理之一. 相对性原理意味着,在一个参考系中建立起来的物理定律,只要通过适当的坐标变换(时间和空间变换),就同样适用于其他参考系. 因此,与相对性原理密切相关的是人们对时间和空间的认识,即时空观. 历史上,人们对相对性原理的认识经历了从力学相对性原理,到爱因斯坦的狭义相对性原理及广义相对性原理的发展过程,相应地,人类的时空观也经历了从牛顿的绝对时空观到爱因斯坦的相对论时空观的变革.

1.1.1

力学相对性原理、绝对时空观和伽利略变换



授课录像:力学相对性
原理和伽利略变换

建立在牛顿三定律及万有引力定律基础上的牛顿力学(经典力学)在任何惯性参考系中都有相同的形式,或者说,牛顿定律在一切惯性参考系中都成立,这就是力学相对性原理.历史上最早对相对性原理作出描述的是意大利科学家伽利略(G. Galilei),他在1632年发表的《关于两大世界体系的对话》一书中,对在相对于地面做匀速运动的封闭船舱中进行的力学实验进行了总结,他描述道:

不管船以任何速度前进,只要运动是匀速的,也不忽左忽右地摆动,观察到的各种力学现象,如人的跳跃、水滴的下落、鱼的游动以及蝴蝶的飞行等,都和船是静止不动时一样的发生,人们并不能从这些现象中来判断船是否在行进以及行进的快慢.

这段生动的描述包含着一个重要的真理:在任何惯性参考系中观测,同一力学现象都按相同的方式发生和演变,即所有惯性参考系都是等价的.这被爱因斯坦称为伽利略相对性原理,它是力学相对性原理的另一种表述形式.

我们知道,牛顿力学研究的是宏观物体的机械运动,而物体在运动过程中其空间位置会不断随时间而改变,因此,对宏观物体运动规律的讨论离不开对空间和时间的测量.人们在日常生活和生产实践中逐渐认识到,对时间持续长短和空间范围大小的描述需要依靠钟表和尺子来实现,一个过程所经历的时间与钟表指针走过的角度相联系,一个物体运动的位移需要通过与尺子对比才能知道.换句话说,对时间和空间的认识,应该开始于对物体运动所经历的时间间隔和空间间隔的测量.人们也就是在此过程中形成了相应的时空观.

在狭义相对论建立之前,人们在长期历史过程中形成的对时间和空间的基本看法,被概括为牛顿力学的时空观:空间是处处均匀的、各向同性的三维欧几里得空间,空间与物质的运动没有任何联系,空间中任意两点间的距离是一个与观测者所在参考系无关的绝对量,即空间长度是绝对的;时间是从过去、现在到将来均匀地流逝着的,在整个宇宙,时间是划一的,也与物质的运动无关,两个事件之间的时间间隔不随参考系的改变而改变,即时间间隔也是绝对的;空间与时间各自独立存在,是物体运动的基础,是第一位的,而物体运动在它们的框架内进行,是第二位的.牛顿力学的这种对时间和空间的认识也被称为牛顿绝对时空观.

牛顿绝对时空观

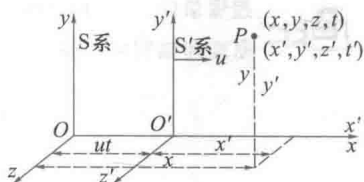


图 1-1 伽利略变换: S 系中观测

在力学相对性原理和牛顿绝对时空观这两个基本假定的基础上,可以推导得到伽利略变换.伽利略变换描述了同一事件在两个不同惯性系中的时间和空间坐标之间的关联:设有两个惯性系 S 和 S',并在上面分别建立直角坐标系 $Oxyz$ 和 $O'x'y'z'$ (即坐标系 $Oxyz$ 相对于 S 系固定不动,坐标系 $O'x'y'z'$ 相对于 S' 系固定不动).为简单起见,让两个参考系的 x 轴与 x' 轴重合, y 轴与 y' 轴平行, z 轴与 z' 轴平行,S' 系相对于 S 系以速度 u 沿着 x 轴正向做匀速直线运动,并规定 S' 系原点 O' 运动到与 S 系原点 O 重合时, $t = t' = 0$. 设某时刻在图 1-1 所示的 P 点处发生了一事件(例如某质点正好运动到 P 点处),根据 S 系中观测者的记录,事件发生在 t 时刻和空间 (x, y, z) 处,而根据 S' 系中观测者的记录,事件发生在 t' 时刻和空间 (x', y', z') 处.

根据力学相对性原理和牛顿绝对时空观,即牛顿运动定律在 S 系和 S' 系中都成立,且无论在哪个参考系中测量,同一物体运动过程所经历的时间是相同的,同一物体的长度也是固定不变的,可以推导得到两组测量值 (x, y, z, t) 和 (x', y', z', t') 之间满足如下对应关系:

$$\left. \begin{aligned} x' &= x - ut \\ y' &= y \\ z' &= z \\ t' &= t \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

伽利略变换

式(1-1)被称为伽利略变换.可以看出,对时间的测量与空间和相对运动无关,时间和空间彼此独立、毫无关系,伽利略变换直接反映了牛顿的绝对时空观.

把式(1-1)中前三个方程的左边对 t' 求导,右边对 t 求导,并考虑到 $t' = t$,可得到如下所示的伽利略速度变换公式:

$$\left. \begin{aligned} v'_x &= v_x - u \\ v'_y &= v_y \\ v'_z &= v_z \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

伽利略速度变换式还可写成矢量形式,即

$$\mathbf{v}' = \mathbf{v} - \mathbf{u} \quad (1-3)$$

上式已在力学第一章中导出过,其中 $\mathbf{v}$ 和 $\mathbf{v}'$ 分别为在 S 系和 S' 系中测得的质点运动速度.上式两边再对时间求导,考虑到 $\mathbf{u}$ 为常矢量,得

$$\mathbf{a}' = \mathbf{a} \quad (1-4)$$

其中 $\mathbf{a}$ 和 $\mathbf{a}'$ 分别为在 S 系和 S' 系中测得的质点运动的加速度.上式说明,在不同惯性系中测得的某一质点运动的加速度是相同的.

在牛顿力学中,物体的质量和所受的作用力被认为与参考系无关,即有 $m = m'$, $F = F'$, 因此,如果 $F = ma$ 在惯性系 S 中成立,那么在惯性系 S' 中就有 $F' = m'a'$,这说明牛顿定律在伽利略变换下具有不变性,力学规律在不同惯性系中都成立. 可见,伽利略变换同样也反映了力学相对性原理.

力学相对性原理

由以上讨论可以看出,牛顿的绝对时空观和力学相对性原理通过伽利略变换联系起来,三者相辅相成、不可分割. 由于牛顿力学在讨论几乎所有宏观物体的运动时都是成立的,牛顿力学所包含的绝对时空观也与我们实际生活中对时间和空间的认识相符合,因此绝对时间和绝对空间的概念在当时也被认为是理所当然的,人们并不对其进行过多的思考. 直到 19 世纪中后期,麦克斯韦建立了电磁理论,预言了电磁波的存在,计算出电磁波在真空中的传播速度为恒定的光速,绝对时间和绝对空间的观念才开始动摇. 爱因斯坦在对实验结果分析的基础上,提出了爱因斯坦相对性原理,并用光速不变原理取代了绝对时间和绝对空间的概念,在此基础上建立了具有划时代意义的狭义相对论,实现了时空观的巨大变革.

1.1.2

爱因斯坦相对性原理和光速不变原理

19 世纪中期,麦克斯韦根据前人对电场和磁场运动规律的研究结果,提出了麦克斯韦方程组. 它由描述电场和磁场变化的四个微分方程组成,表明了变化的电场和变化的磁场相互依存,在空间互相激发,向远处传播. 麦克斯韦在此基础上预言了电磁波的存在,计算得到了真空中电磁波的传播速度为 $c = 2.99 \times 10^8 \text{ m/s}$,是一个常量,且与实验测得的真空光速相同,从而进一步预言了光就是一种电磁波.

正是麦克斯韦在电磁理论的基础上得到的光在真空中的恒定传播速度 c ,给当时无所不能的牛顿力学带来了一场空前巨大的危机. 首先,麦克斯韦方程组在伽利略变换下并不具有协变性,它在不同惯性系中具有不同的形式,那么,麦克斯韦电磁理论是在什么样的一个参考系中成立的呢? 其次,根据经典力学中的伽利略速度变换,光相对于不同的参考系应该以不同的速度传播,那么,电磁理论计算出的恒定光速 c 又是相对于什么样的参考系呢? 问题都集中在了“是否存在一个麦克斯韦电磁理论在其中成立的特殊参考系”上. 当时的物理学家类比声波、水波等机械波,认为



授课录像:经典物理的困难



授课录像:狭义相对论基本假设

以太

电磁波或光在真空中传播也需要某种介质,这种介质被称为以太。这意味着,麦克斯韦电磁理论只是在这种“以太”参考系中成立,“以太”参考系被认为就是牛顿所说的绝对静止的参考系。

按当时的说法,宇宙中到处弥漫着以太,天体在其中畅行无阻。套用机械波传播速度公式 $c = \sqrt{G/\rho}$, 因为光速 c 很大,所以一方面以太的密度 ρ 极小,以太极其稀薄,另一方面以太的切变模量 G 又非常大,即以太比钢铁要硬千百倍。虽然以太的这些性质非常的怪异,但在牛顿的伟大光环下,没有人去怀疑“以太是否存在”,无数科学家也开始致力于寻找牛顿所说的绝对静止参考系,即寻找以太。

由于光只有在真空中相对于以太(绝对静止参考系)的速度才被认为是恒定值 c , 根据伽利略速度变换式(1-3),在其他相对于以太运动的参考系中,真空光速就应该不同于此恒定值 c , 实际光速应与该参考系相对于以太的运动速度有关系。因此,要找到以太,就是要在不同参考系中测出不同于恒定值 c 的实际光速。为此,大量的实验被设计出来,其中最具代表性的就是迈克耳孙-莫雷实验。

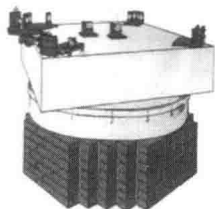
迈克耳孙-莫雷实验的基本原理就如同光学部分讲过的迈克耳孙干涉仪,其实验装置及工作原理如图 1-2 所示,整个干涉仪被置于防震平台上,防震平台能相对于地面非常平滑地转动。单色光源 S 发出的光经半透半反镜 G_1 被分成两束光,这两束光沿着彼此垂直的方向传播,再分别被两反射镜 M_1 和 M_2 反射回来,并在观察屏 T 处相遇。由于这两束光是相干光,因此观察屏 T 处会出现干涉条纹。由于地球相对太阳的公转速度大约是 $30 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 那么不管太阳相对以太的速度是多少,一年之中,地球相对以太的速度 u 总有超过 $30 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的时候。实验中首先调整实验平台的角速度,使其中的一条臂 $G_1 M_2$ 与相对速度 u 的方向平行,那么另外一条臂 $G_1 M_1$ 就与相对速度 u 的方向垂直。由于不管光往哪个方向传播,其相对于以太参考系的速度都是 c , 因此根据伽利略速度变换式,可以得到在地面参考系中往返平行臂 $G_1 M_2$ 的光的传播速度分别为 $c-u$ 和 $c+u$, 往返垂直臂 $G_1 M_1$ 的光的传播速度都为 $\sqrt{c^2 - u^2}$, 其速度变换关系如图 1-2(c) 所示。

设两条臂的光程彼此相等,都为 l , 因此光沿着平行臂 $G_1 M_2$ 往返的时间 t_1 为

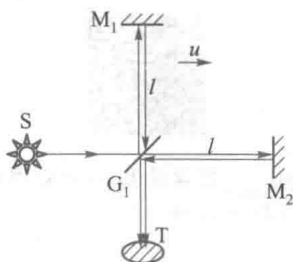
$$t_1 = \frac{l}{c+u} + \frac{l}{c-u} = \frac{2l/c}{1-u^2/c^2}$$

而光沿着垂直臂 $G_1 M_1$ 往返的时间 t_2 为

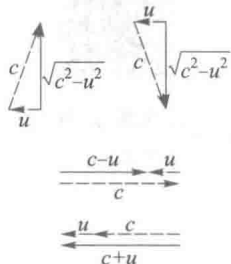
迈克耳孙-莫雷实验



(a) 迈克耳孙-莫雷实验装置



(b) 迈克耳孙-莫雷实验光路原理图



(c) 不同光束的速度变换

图 1-2 迈克耳孙-莫雷实验

$$t_2 = \frac{2l}{\sqrt{c^2 - u^2}} = \frac{2l/c}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}$$

由此可得两光束在 T 相遇时的光程差为 $c(t_1 - t_2)$ 。

在上述条件观察到干涉条纹后,再将实验平台旋转 90° ,这样就使臂 G_1M_1 变为与相对速度 u 的方向平行,臂 G_1M_2 变为与相对速度 u 的方向垂直,相应地两束光在 T 处相遇时的光程差变为 $c(t_2 - t_1)$ 。由于两束相干光的光程差在实验平台转动前后发生了改变,干涉条纹会因此发生移动。如果取地球相对以太的运动速度 $u = 30 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$,臂长 $l = 11 \text{ m}$,经过计算可知将会发生约 0.37 个条纹的移动。

但是,不论怎样改变实验条件(调整角度、改变光波长、在不同的地点和季节进行测量),条纹却几乎没有发生移动,这就是历史上著名的迈克耳孙-莫雷实验的“零结果”。这一结果与历史上其他一些实验结果(如恒星的光行差实验、斐索拖拽实验及双星实验等)相结合,从根本上动摇了当时在人们心中根深蒂固的以太理论,说明了光速不会因为相对运动而发生改变,在不同参考系中,光在真空中的传播速度都是恒定值 c 。这就意味着人们努力去寻求的“以太”参考系根本不存在,意味着伽利略变换在讨论光的运动时也不正确了,意味着力学相对性原理和牛顿绝对时空观必须进行修改。

爱因斯坦以其敏锐的洞察力指出:“我们发现不了以太的原因是因为以太根本就不存在。”爱因斯坦在分析总结前人的实验结果和思想的基础上,经过创造性的逻辑思维,于 1905 年 9 月发表了具有划时代意义的论文《论动体的电动力学》,文中提出了爱因斯坦相对性原理和光速不变原理,并以其作为两条基本假设(公理)建立了狭义相对论。

1. 爱因斯坦相对性原理

物理定律在所有惯性系中都具有相同的数学表达形式,即对包括电磁规律在内的所有物理规律,不同惯性系都是等价的,不存在任何特殊的惯性系(比如以太参考系)。这就是爱因斯坦相对性原理。

爱因斯坦相对性原理

可以看出,爱因斯坦相对性原理是力学相对性原理的推广,即相对性原理不仅适用于力学现象,而且也适用于所有的物理现象,包括电磁现象在内。这种推广包含了深刻的物理内涵,它说明在任一惯性系中,都不可能通过任何物理实验来确定该参考系是否在运动以及运动速度的大小。这样,绝对运动或绝对静止的概念就在整个物理学中被彻底否定了,这也直接导致了对物理学

基本问题——时空观认识的根本变革。

2. 光速不变原理

光速不变原理

在所有惯性系中光在真空中的传播速率都等于 c 。也就是说,无论光源和观察者在真空中如何运动,无论光的频率是多少,测得的光速都相等。这就是爱因斯坦光速不变原理。

爱因斯坦正是在“光速不变原理”这一基本假设的基础上推导得到了“同时性的相对性”这一狭义相对论中最本质的时空效应,并在此基础上得到了反映狭义相对论时空观的洛伦兹变换。

爱因斯坦认为,“相对性”是自然界的根本规律,这也是狭义相对论的实质,是对力学相对性原理的发展。爱因斯坦将相对性原理推广到电磁领域,否定了以太参考系,同样也否定了伽利略变换和牛顿绝对时空观,从根本上动摇了经典物理学的基础。爱因斯坦在相对性原理和光速不变原理的基础上建立起了狭义相对论,形成了具有革命性意义的相对论时空观。他认为,物质运动是客观的、第一位的,时间、空间与物质运动紧密相连,可随着物质运动的不同而变化,是第二位的。在爱因斯坦建立狭义相对论之后,他又将“相对性”这一自然界的根本规律推广到了非惯性系,继承了狭义相对论的合理内容,建立起了广义相对论。

1.2 相对论时空效应

在这里,我们将首先通过思想实验来引入相对论中重要的时空效应,如时间延缓、长度收缩以及同时性的相对性。

1.2.1 空间和时间的测量

在开始讨论这些时空效应之前,我们首先对即使在经典力学中也是最基本的几个概念进行说明。

在相对论中我们所研究的对象是事件,所谓事件就是指某时刻在空间某位置处发生的一件事。要对事件进行描述就需要确定事件发生的时间及空间位置,即事件发生的时空坐标。时空坐标由表示空间位置的三个独立参量和表示时间的一个独立参量构成,如在惯性系 S 中,时空坐标可以表示成 (x, y, z, t) 。每一



授课录像:时间的测量、
同地同时性

事件在任意惯性系中都有确定的时空坐标,同一事件在不同惯性系的时空坐标各不相同.狭义相对论首先要讨论的就是事件在不同惯性系中的不同时空坐标之间的对应关系,这种对应关系自然也就反映了狭义相对论的时空观.

根据爱因斯坦相对性原理,事件客观进程所遵从的物理规律在不同惯性系中都具有相同的形式,这就要求在不同惯性系中测得的事件的时空坐标之间应该有一种对应关系.又由光速不变原理,这种对应关系一定不是反映牛顿绝对时空观的伽利略变换.要找到这种对应关系,当然离不开对时空坐标的准确测量.在某一惯性系中,如何才能准确地测量事件发生的时空坐标呢?

对一个事件或过程的研究,本质上就是对时空坐标的测量.“测量”这一实验手段是物理学研究的基础,它是一种客观实践活动,在近代物理学中尤其具有特殊而重要的意义.要精确测量事件发生的空间位置坐标,不难想象,在任意的惯性系中都可以建立一组坐标系,只要确定事件发生位置在坐标系中的一组坐标值,就测量得到了事件发生的空间位置坐标.而要精确测量事件发生的时间坐标,就需要读出固定在事件发生位置处的时钟的读数,也就是说,事件不管发生在什么位置坐标处,该位置坐标处就有一个用于测量时间的时钟,该时钟在事件发生时也一定指向某一刻度,只要读出此刻度值就测得了该事件发生的时间坐标.

注意,在相对论中测量事件发生的时间坐标,不能再像我们所习惯的那样,通过“观测者在看见事件发生时,读出自己手中拿着的表的读数”来确定事件发生的时间坐标.这是因为相对论所研究的已不再是经典力学研究的低速运动的问题,而是接近光速的高速运动问题.“事件发生”和“观察者看见事件发生”实际上是有时间差的两个事件,虽然这两个事件通过光传播高速相连,但是在讨论接近光速的运动问题时,由此带来的测量误差却不能忽略不计.例如,运动会 100 米赛跑比赛,当坐在终点处的裁判员看见位于起点处的发令枪响冒出的一股青烟时,他启动秒表记录下运动员“起跑”这一事件的时间坐标,而当运动员冲线时,裁判员再停住秒表就测出运动员“冲线”这一事件的时间坐标,这两个时间坐标之差就是运动员跑 100 米所用的时间.这就是我们在日常生活中所熟悉的时间测量方式,由于运动员跑步的平均速度在 10 m/s 的数量级,而光的传播的速度却是 $3 \times 10^8\text{ m/s}$,因此看见冒烟再启动秒表在这里带来的测量误差可以忽略不计.但是如果参加比赛的是“光子飞人”,而“光子飞人”能以 $0.5c$ 的

速度运动,此时这种测量时间的方式显然就会带来很大的误差.那么,要精确测量运动员跑 100 米所用的时间,就需要在起点和终点处各有一只彼此对齐和同步的时钟,利用起点处时钟读出“起跑”事件的时间坐标,利用终点处时钟读出“冲线”事件的时间坐标,两个时间坐标之差就是运动员跑 100 米的精确成绩.

由以上讨论可以看出,对时间坐标的测量实际上是一个“同地同时性”问题.“事件发生”和“事件发生处的时钟指向某一刻度”是空间同一地点同时发生的两个事件,它们之间没有时间差,因此这样测得的事件的时间坐标是严格精确的.在狭义相对论中,同时性的定义被提到了非常重要的地位,是讨论所有问题的基础.爱因斯坦在他的《论动体的电动力学》论文中开始部分就提到:“如果我们要对与时间相关的问题作出判断,那么该判断总是与同时的事件相联系.比如我们说,‘那列火车 7 点钟到达这里’,这大概就是说,‘我的表的短针指到 7 和火车到达是同时的事件’.”

狭义相对论中将涉及两种类型的同时性:一类就是这里提到的“同地同时性”,它是时间测量的基础,“同地同时性”是绝对的,其同时性不会因为参考系的改变而发生改变,这意味着一个参考系对事件时间坐标的准确测量也会被其他参考系中的观测者所认同,这样,不同参考系中测得的同一事件的不同时间坐标之间的对比才有意义;另一类就是下面会讨论的“异地同时性”,“异地同时性”是相对的,其同时性会因为参考系的不同而不同,“异地同时性”的相对性是相对论时空效应中最本质的效应.

由于对事件时间坐标的测量要求用事件发生处的时钟,而事件可能发生在空间任意地点,因此在参考系的不同坐标处都有用于测量时间的时钟,这些时钟彼此间是对齐和同步的,也称为“同步钟”.每个参考系都有属于自己的一系列“同步钟”.例如,如果在惯性系 S 中只讨论 x 轴上发生的事件, x 轴上不同坐标处就需放置一系列“同步钟”,如图 1-3 所示.如果事件发生在 x 坐标处,就需要用 x 坐标处时钟来测量事件发生的时间坐标.设此时 x 处时钟的指针正好指向 t 时刻,则事件发生的时空坐标就为 (x, t) .虽然现实中不可能在参考系所有位置坐标处都放置同步时钟,但是在思想实验中设想这样去测量事件发生的时间坐标显然是严格精确的.

有了对时空坐标测量的正确理解,接下来我们就在光速不变原理的基础上,来讨论狭义相对论中重要的时空效应:时间延缓、长度收缩及同时性的相对性.

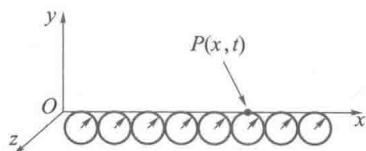


图 1-3 用同步钟测量事件的时间坐标