普通高等教育“十五”国家级规划教材

大学物理学

上　册

吴百诗　主　编
罗春荣　马永庚　张孝林　副主编

高等教育出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

内容简介

本书是普通高等教育“十五”国家级规划教材，是吴百诗教授及参编学校数十年来大学物理课程教学经验的总结。全书以大众化教育形势下对人才培养的要求为出发点，针对当前学生的特点编写而成。本书在教学内容上进行了改革，虽然在体系上变化不大，但在内容选取、教学安排、讲法上等有一定的创新。考虑到对工科学生培养的特点，本书十分注意物理学与实际的联系，特别是与工程实际、科技实际的联系，在例题和习题的选取上更是尽可能反映工程实际和科技新成就。

全书分3册出版，上册包括力学和热学，中册包括电磁学，下册包括波动、光学和近代物理。与本书配套有习题解答、电子教案等辅助用书。这套书可供高等学校工科各专业作为大学物理课程的教材或参考书使用，也可供其他专业的社会读者阅读。

图书在版编目（CIP）数据

大学物理学.上册/吴百诗主编.—北京：高等教育出版社，2004.11
ISBN 7-04-015573-7

Ⅰ.大… Ⅱ.吴… Ⅲ.物理学—高等学校—教材
Ⅳ.O4

中国版本图书馆CIP数据核字（2004）第106348号

策划编辑 庞永江 责任编辑 庞永江 封面设计 张申申 责任绘图 朱 静
版式设计 王 莹 责任校对 胡晓琪 责任印制

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-64054588
社 址	北京市西城区德外大街4号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010-58581000		http://www.hep.com.cn
经 销	新华书店北京发行所		
印 刷			
开 本	787×960 1/16		
印 张	22.5	版 次	年 月第1版
字 数	420 000	印 次	年 月第 次印刷
插 页	1	定 价	23.90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：15573-00

序

人类的科学发展史表明,物理学是一切自然科学的基础,它的基本概念和基本规律被广泛应用到所有的自然科学领域。当代高新技术的发展也都起源于对物理规律的探索。我们人类都生活在由物理学基本规律所约束的时空中,物理学的发展对人类的物质观、时空观、世界观,以及对整个人类的文化都产生了极其深刻的影响,因此,物理学是人类现代文明之源。

物理学的每一个新思想、新发现,甚至那些原本看来是“纯”基础的研究成就,都会发展成为高新技术和产业。例如,20世纪30年代末,固体的能带理论的出现使得巴丁、布拉顿和肖克莱在1947年发明了晶体管,1958年基尔比和诺伊斯又发明了锗、硅集成电路。从此,半导体集成电路迅猛发展,出现了一系列新技术、高技术和新产品。以计算机为代表的信息电子产业已成为世界上最大的产业。又例如,在爱因斯坦受激辐射理论的基础上,60年代初诞生了激光器,这又是一个划时代的物理技术应用成果,激光物理的进展为激光在制造工业、通讯工业、国防工业以及医学等领域的发展提供了重要的技术基础。今天,物理学的研究仍在不断更新着人们对客观世界的认识。

“大学物理”课程是一门以研究和阐明物质的基本结构形态、基本运动规律和相互作用关系,为大学生提供全面系统的物理学基础为目标的基础课程。在大学物理课程学习中,不仅要掌握自然界的事实、定律、方程和解题技巧,更重要的是要从整体上认识和掌握物理学。也就是说,通过物理学课程的学习,要认识物理学各个分支之间的关系,认识基本物理规律的普适性和适用范围,认识理论和应用之间的关系,认识物理思想和数学工具,从整体上准确地掌握物理学的基本内容,建立科学的物质观,时空观和世界观。

另外,在物理学课程的学习中,要关注物理学的基本概念、基本规律的产生和发现的历史过程,关注在物理学历史上曾经有过的实验和争论,学会举一反三、触类旁通的方法。如利用已掌握的物理学基本概念去理解和解释新的物理规律,增强学习的创新意识和创新能力的培养。在探讨科学的奥秘过程中,谁最有创新精神,敢于突破旧观念、旧理论的束缚,谁就能率先做出重要贡献。同时,创新也是深化学习的动力。因此,在学习中要勤于思考、善于提问、敢于尝试,多问几个为什么,使自己对物理学的内涵有深刻的理解,为将来做出创新性的工作打下良好的基础。

总之,要学好物理学重要的是以学习物理基础知识为载体,系统掌握物理学

的思维方式和研究方法,而不是死记硬背一些物理公式。因为这些基本知识、物理思想、思维方式和研究方法将会使学生在今后长期的学习工作中,在观察、分析和解决问题时得到重要的借鉴和应用。

吴百诗教授主持编写的这本“十五”国家级规划教材,突出了在物理教育中知识传授和能力培养相结合的特色,集成了数名作者多年来丰富的教改研究和教学实践的经验,在打好学生必备的物理基础、激发学习兴趣、增强科学思考、分析和处理问题的能力、将现代科学技术成就融入基础课程教材等方面都下了很大功夫,为理工科学生全面掌握物理学提供了一个很好的范本。祝愿这本教材在教学实践中得到更加普遍的欢迎和推广,也祝愿读者从中深刻领悟到物理学的“伟大”。

西安交通大学校长
郑南宁　院士

前　言

“大学物理”是理工科低年级学生的一门重要基础理论课，它的作用一方面是为学生打好必要的物理基础，而打好物理基础，不仅对学生在校学习起着十分重要的作用，而且对学生毕业后的工作和在工作中进一步学习新理论、新知识、新技术，不断更新知识都将产生深远的影响；另一方面是使学生初步掌握科学的思维方法和研究问题的方法，这些都起着增强学生适应能力，开阔思路，激发探索和创新精神，提高人才科学素质的重要作用。

本书是由西北工业大学、西安电子科技大学和西安交通大学三校物理教师合编的。编者们对编写指导思想的共识是：

⑴ “大学物理”课是一门基础理论课，教材内容的选取应着眼于在大学物理水平上切实为学生打好物理理论基础。

⑵ 编写的教材应在总结我国大学物理长期教学经验的基础上，充分考虑我国目前工科大学物理教学实际（包括学生实际，教学时数实际等），并适当地吸收国外新教材编写的经验，使得教材便于教和学。

⑶ 在处理经典物理和近代物理关系上，编者们认为，经典物理不但是学习工科各专业知识的理论基础，而且也是学习近代科学技术新理论、新知识的理论基础。不仅如此，经典物理当今在科学和技术各领域仍然是应用最广泛的基础理论，而且大学物理中的经典部分对训练和培养大学低年级学生科学思维方法和分析问题、解决问题能力的作用是其它课程所不能代替的，因此在大学物理课程和教材中必要的经典物理内容应予以切实保证。鉴于近半个世纪以来，科学技术以前所未有的速度发展着，新理论、新技术日新月异并向现代高技术中渗透，在这样的情况下，在大学物理课程中加强近代物理内容是十分必要的，问题是加强些什么内容。编者们认为，加强近代物理内容，首先应加强那些学习新理论、新知识所必需的近代物理基础理论，主要是量子物理和统计物理有关的基本概念和基本理论。

⑷ 编者们认为现有的大学物理教材体系是国内外经过长期教学实践形成的，为理工科高级人才打好物理基础是卓有成效的，因此对体系进行大的改革，宜认真总结过去教学实践中的经验，明确现有体系存在什么问题，改什么，怎么改？大的体系改革更应经过仔细论证，通过试点，成功后再根据具体情况（条件）进行推广。

⑸ 考虑到工科大学物理涉及面宽，内容多，而教学学时数少的具体情况，

需要全本请访问 www.ertongbook.com

本书在保证物理基础理论的前提下,尽量在不过多增加教材篇幅和教学负担情况下,采取多种形式向读者介绍新知识,特别是我国当前科研和技术领域的新成就,以扩大读者新知识面,激发学生爱国热情和学习积极性。

(6) 编者们认为,着力于训练和培养学生的科学思维方法、分析问题和解决问题的能力,帮助低年级学生打好物理基础,提高他们独立获取知识的能力是在基础课教学中贯彻加强科学素质培养的一种重要途径。

(7) 本书分上、中、下三册,分别由西北工业大学、西安电子科技大学和西安交通大学编写,参加编写的有罗春荣、郑建邦、王济民、陈长乐 (西北工业大学)、马永康、李存志、白璐 (西安电子科技大学)、张孝林、陈光德、王小力、徐忠锋、吴百诗 (西安交通大学)。各章后注有编写者,吴百诗先生对全书作了仔细地修改。

(8) 全书采用 SI,考虑到改革开放,对外交流日益增多,书中也适当介绍了当前欧、美尚广泛使用的单位以及这些单位与相应 SI单位的换算因子。

(9) 西安电子科技大学理学院院长吴振森教授对本书的形成给予了极大的支持,在此特表谢意。

(10) 西安交通大学刘丹东老师为本书编制了两套应用计算程序,对此编者们表示感谢。

(11) 全书插图由西安交通大学李普选老师精心绘制,对此编者们表示感谢。

(12) 由于编者们的学识和教学经验的限制,书中不当之处和错误在所难免,还请使用本书的师生和同志们指正。

吴百诗

2004年 8月

目　　录

第一篇　力 学 基 础

第 1章　质点运动学 …… 3
§1.1 质点运动的描述 …… 4
§1.2 质点运动学的基本问题 …… 13
§1.3 抛体运动 …… 22
§1.4 自然坐标　自然坐标中的速度和加速度 …… 25
§1.5 相对运动 …… 37
本章小结 …… 42
习题 …… 43

第 2章　质点动力学 …… 53
§2.1 牛顿运动定律及其应用 …… 54
§2.2 惯性系与非惯性系 …… 74
§2.3 功与能 …… 77
§2.4 动量定理与动量守恒定律 …… 100
§2.5 质心运动定理 …… 113
§2.6 对心碰撞 …… 119
§2.7 质点的角动量定理与角动量守恒定律 …… 123
本章小结 …… 127
习题 …… 129

第 3章　刚体力学基础 …… 143
§3.1 刚体运动概述 …… 144
§3.2 刚体定轴转动的运动学规律 …… 147
§3.3 刚体绕定轴转动定律 …… 153
§3.4 刚体绕定轴转动的功能关系 …… 166
§3.5 刚体的角动量定理与角动量守恒定律 …… 175
§3.6 进动 …… 184
本章小结 …… 187
习题 …… 188

第 4章 狭义相对论基础 …… 199
§4.1 伽利略相对性原理和伽利略变换 …… 200
§4.2 狭义相对论的基本假设与洛伦兹变换 …… 204
§4.3 狭义相对论的时空观 …… 208
§4.4 相对论的速度变换 …… 219
§4.5 狭义相对论动力学 …… 223
* §4.6 广义相对论简介 …… 232
本章小结 …… 235
习题 …… 237

第二篇 热 学

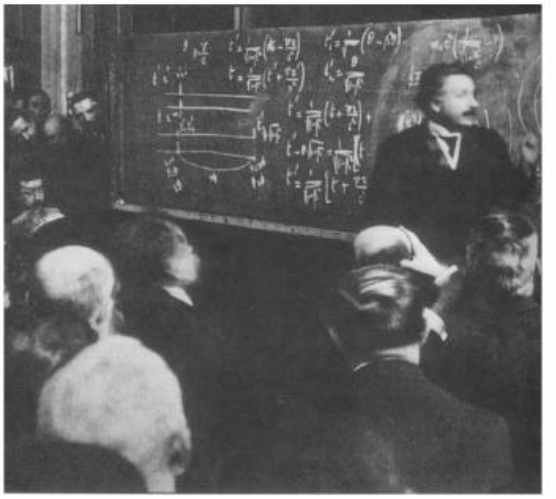
第 5章 气体动理论 …… 245
§5.1 统计规律性的基本概念 …… 246
§5.2 系统的状态及其描述 …… 248
§5.3 理想气体的压强和温度 …… 254
§5.4 能量按自由度分配的统计规律 …… 259
§5.5 气体分子数按速率分布的统计规律 …… 265
§5.6 分子数按能量分布的统计规律 …… 273
§5.7 气体分子的平均碰撞频率及平均自由程 …… 276
本章小结 …… 279
习题 …… 280

第 6章 热力学基础 …… 287
§6.1 热力学的基本概念 …… 288
§6.2 热力学第一定律 …… 293
§6.3 绝热过程与多方过程 …… 298
§6.4 循环过程 …… 306
§6.5 热力学第二定律 …… 318
§6.6 熵 …… 324
本章小结 …… 328
习题 …… 329

附录 物理量的量纲和单位 …… 338
习题答案 …… 344

.

第4章　狭义相对论基础



爱因斯坦 (A. Einstein, 1879—1955) 是 20世纪最伟大的物理学家.他生于德国,1900年毕业于瑞士苏黎世联邦工业大学.

爱因斯坦在物理学三个不同领域取得了历史性的成就.

1. 创建了光量子理论

这是历史上第一次揭示了微观客体具有波粒二象性 .由于光电效应定律的建立,爱因斯坦获得了 1921年的诺贝尔物理学奖.

2. 创建了狭义相对论

狭义相对论的建立在很大程度上解决了 19世纪出现的经典物理学的危机,推动了整个物理学理论的革命.狭义相对论揭示的质能关系已成为原子核物理学和粒子物理学的理论基础,也为核能的利用奠定了理论基础.

3. 分子运动论

爱因斯坦对布朗运动的研究,不仅为分子运动理论奠定了基础,而且解决了半个多世纪来科学界和哲学界争论不休的有关原子是否存在的问题.

爱因斯坦在 1915年到 1917年还在三个不同的领域做出了历史性的杰出贡献,即建立了广义相对论、辐射量子理论和现代科学的宇宙论.其中辐射量子论中的受激辐射概念为 20世纪 60年代发展起来的激光技术奠定了理论基础.

提到相对论,人们就想到伟大的科学家爱因斯坦.爱因斯坦对自然科学的贡献是多方面的,其中最重要的贡献是建立了相对论.相对论包括两部分内容,即狭义相对论和广义相对论.1905年爱因斯坦发展了牛顿力学,首先提出了狭义相对论,在狭义相对论的基础上进一步发展牛顿万有引力理论,1916年又建立了广义相对论.相对论是关于物质运动和时间、空间关系的理论.局限于惯性参考系的理论称为狭义相对论,推广到一般参考系并包括引力场在内的理论称为广义相对论.

本章主要讨论狭义相对论的基本理论,对广义相对论仅作简单介绍.

§4.1 伽利略相对性原理和伽利略变换

4.1.1 伽利略相对性原理

凡是牛顿运动定律适用的参考系称为惯性系.相对于已知惯性系作匀速直线运动的参考系也都是惯性系,不言而喻,牛顿运动定律同样适用.因此,对不同的惯性系,力学的基本定律——牛顿定律的形式都是相同的,或者说力学规律对于一切惯性系都是等价的.这个理论称为伽利略相对性原理或经典力学的相对性原理.

4.1.2 伽利略变换

伽利略变换是伽利略相对性原理的数学表达式.

在物理学中对物质运动的描述都是相对的,观测者所选的参考系不同,对运动的描述也就不同.现在讨论相对运动速度为 u的两个惯性系 S系和 S系上的观测者对某一运动物体所作的运动学和动力学描述有何异同.

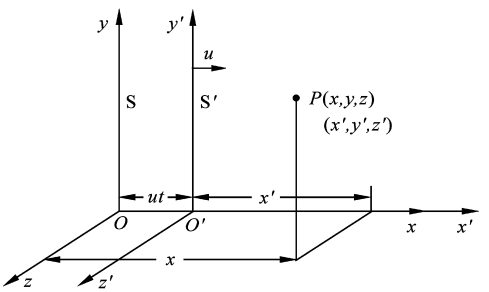


图 4.1

为了方便起见，采用如图 4.1所示的两个惯性系，S系和 S系各对应轴相互平行，S系相对于 S系以速度 u沿 x轴方向作匀速直线运动.当 S系和 S系的坐标原点 O与 O重合时，两个惯性系中的时钟开始计时（$t=t'=0$）.如果某时刻在空间某一点 P发生了一个事件，这里所说的事件是指某一时刻发生在空间某一点上的一个事例.设想 S系和 S系的观测者都在观测这一事件，在 S系中以时空坐标（x, y, z, t）表示，在 S系中以时空坐标（x', y', z', t'）表示.一个事件在两个惯性系中两组时空坐标之间的变换关系为

$$\boxed{\begin{aligned} x' &= x - ut \\ y' &= y \\ z' &= z \\ t' &= t \end{aligned}} \tag{4.1a}$$

式（4.1a）是从 S系变换到 S系的变换式.从 S系变换到 S系的变换式，即上述变换的逆变换为

$$\begin{aligned} x &= x' + ut \\ y &= y' \\ z &= z' \\ t &= t' \end{aligned} \tag{4.1b}$$

这两组公式称为伽利略时空坐标变换式，简称伽利略变换.它给出了同一个事件在两个不同惯性系 S和 S中时空坐标之间的变换关系.在伽利略变换中 $t=t'$意味着，不论在哪一个惯性系中，都有一个相同的绝对时间.或者说，在任何惯性系中的观测者都可以用同一只钟计时.这实际上是经典力学隐含的一个基本假定.

从伽利略变换可得到经典力学的速度变换关系

$$\begin{aligned} v_x' &= v_x - u \\ v_y' &= v_y \\ v_z' &= v_z \end{aligned}$$

写成矢量式

$$\boxed{\boldsymbol{v}' = \boldsymbol{v} - \boldsymbol{u}} \tag{4.2}$$

其中，u是 S系相对于 S系的速度，v是质点相对于 S系的速度，v是该质点相对于 S系的速度.

还可得到经典力学的加速度变换关系

$$\boxed{\boldsymbol{a}' = \boldsymbol{a}} \tag{4.3}$$

上式表明，质点在两个惯性系中的加速度是相同的.在经典力学中，质量 m是一个恒量，则有 $ma=ma'$.另一方面在牛顿力学中所有的力都是由于质点之

需要全本请访问 www.ertongbook.com

间的相互作用,而相互作用又取决于质点的相对坐标(两个质点间的距离).同时,两个质点之间空间间隔在伽利略变换中是不变量,因而在伽利略变换中,两个质点之间的相互作用力也是不变量,即

$$F'=F$$

因此牛顿定律对伽利略变换是不变的.即对 S系和 S系,牛顿第二定律有相同的表达形式:

$$F=ma \text{ 和 } F'=ma'$$

由于在力学中各种守恒定律例如能量守恒定律、动量守恒定律和角动量守恒定律,都可以证明为牛顿定律的推论,由此可知,力学规律对伽利略变换是不变的,即力学规律对一切惯性系都是等价的.

4.1.3 经典力学的绝对时空观

所谓时空观,就是有关时间和空间的物理性质的认识.伽利略变换是力学相对性原理的数学描述.它集中反映了经典力学的绝对时空观.

1. 时间间隔

伽利略变换说明了同一个事件在两个不同惯性系中的时空坐标之间的关系,这里特别注意 $t=t'$的含意.若有两事件先后发生,在两惯性系中的观测者测得的时间间隔为

$$\boxed{\Delta t=\Delta t'} \tag{4.4}$$

式 (4.4)表明时间间隔与惯性系的选择无关.

2. 空间间隔

如果在空间有任意两点,它们在上述 S系和 S系的坐标分别为 (x_1,y_1,z_1)、(x_2,y_2,z_2)和 (x_1',y_1',z_1')、(x_2',y_2',z_2'),利用伽利略变换,可以得到

$$(x_2-x_1)^2+(y_2-y_1)^2+(z_2-z_1)^2=(x_2'-x_1')^2+(y_2'-y_1')^2+(z_2'-z_1')^2$$

即

$$\boxed{\Delta r=\Delta r'} \tag{4.5}$$

式 (4.5)表明空间任意两点之间的距离与惯性系的选择无关.

由上面伽利略变换得到,在不同惯性系中,时间间隔和空间间隔的测量与参考系的选择和观测者的相对运动速度无关.即时空和物质运动是互相分割的,无联系的.

如果把随惯性系而变的量看成是相对的,把不随惯性系而变的量看成是绝对的.我们可以看出,在经典力学中,物体的坐标和速度是相对的,同一地点也是相对的.但时间、长度和质量这三个基本物理量是绝对的,同时性也是绝对的.这就是经典力学的绝对时空观.

4.1.4 经典力学的局限性

经典力学的相对性原理用于低速的力学现象是非常成功的.它是否可用于电磁现象呢?光是电磁波,其在真空中传播的速度为 c光的传播是否可用经典力学的规律讨论呢?下面的事实将说明这个问题.

900多年前,有一次非常著名的超新星爆发事件.当时北宋天文学家作了详细记载.据史书称,爆发出现在宋仁宗至和元年(公元 1054年)5月,在开始的23天中,这颗超新星非常之亮,白天也能在天空上看到它,随后逐渐变暗,直到嘉佑元年(公元 1056年)3月才不能被肉眼看见,前后历时 22个月.这次爆发的残骸就形成了著名的金牛座中的星云,称为蟹状星云.

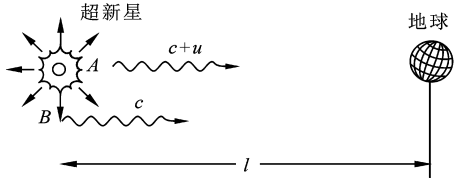


图 4.2

这条古老的记录同光速颇有关系,当一颗恒星发生超新星爆发时,它的外围物质向四面八方飞散.也就是说,有些抛射物向着我们以速度 u运动,如图 4.2中的 A点.有些抛射物的运动方向则在垂直方向,如图 4.2中的 B点.如果光速服从经典力学的速度变换定理,那么,A点向我们发出的光的速度是 c+u,而 B点向我们发来的光的速度则大约是 c这样由 A点发出的光到达地球的时间是 $t_A=\frac{l}{c+u}$,而 B点发出的光到达地球的时间是 $t_B=\frac{l}{c}$.蟹状星云与地球距离 $l\approx 5\,000$ l.y.,爆发中抛射物的速度 $u=1\,500\ \mathrm{km\cdot s^{-1}}$.用这些数据来计算,很容易得到 $t_B-t_A\approx 25$ a.也就是说,我们至少在 25年里都可以看到开始爆发时所产生的强光.然而这是错误的,不符合事实的.历史的记录是不到两年就看不见了.这就证明这种推算有问题.似乎应该是从 A点和 B点向我们发射的光的速度是一样的,即光速与发光物体本身的运动速度无关.无论光源的运动速度多么大,向我们发来的光的速度都是一样的.光速并不遵从经典力学的速度变换定理.



4.1 什么是经典力学的时空观？

4.2 光和电磁波的运动服从伽利略变换吗？

§4.2 狭义相对论的基本假设与洛伦兹变换

19世纪末，作为电磁学基本规律的麦克斯韦方程组得到了确立.它的一个重要成果是预言了电磁波的存在，并证明了电磁波在真空中的传播速度等于真空中的光速 c，从而揭示了光的电磁本性.随之出现的问题是：电磁波或光在什么介质中传播？从麦克斯韦方程组得出的光速 c是对哪一个参考系而言的？现在大家都知道，电磁场本身就是一种物质形式，它可以在空间传播而不需要其它物质作为介质.但在当时的历史条件下，由于经典力学的广泛成功，人们总是倾向于把一切物理问题都纳入一个机械模型.当时人们认为，电磁波或光是在某种称为“以太”的介质中传播，如同声波是在空气等介质中传播一样.光速 c应该是对“以太”参考系而言的，如同声速是对空气参考系而言的一样.这样，在电磁现象中，“以太”参考系是一个具有特殊地位的惯性参考系.只有在这个参考系内真空中的光速才是 c，麦克斯韦方程组才能适用.因为麦克斯韦电磁场理论中光速 c是以普适常量的形式出现的，这与经典力学中伽利略相对性原理不相容.爱因斯坦认为，要使麦克斯韦电磁场理论与力学的相对性原理协调起来，不变更传统的时空观是根本不行的.1905年，他发表了第一篇狭义相对论的论文，以新的时空观指出了绝对时空观的局限性.

4.2.1 狭义相对论的两个基本假设

1. 相对性原理

物理规律在所有惯性系中都具有相同的形式.

2. 光速不变原理

在所有惯性系中，光在真空中的传播速率具有相同的值 c

爱因斯坦的相对性原理使相对性原理不仅包括力学规律，而且也包括电磁相互作用规律以及所有的物理规律.这就是说，一切物理规律在所有惯性系中都具有相同的形式.光速不变原理明确地指出它与经典力学的速度变换定理是根

本对立的,光速与观测者及光源的运动状态无关,在任何惯性系中,测得的真空中的光速都相同.

整个狭义相对论就是由上述两条基本假设通过数学上和逻辑上的推导得到的.

4.2.2 洛伦兹变换

时空的性质是通过坐标系的变换关系体现出来的,与经典力学的绝对时空观相对应的是伽利略变换,满足狭义相对论两条基本假设的时空变换关系是洛伦兹变换.

下面我们就从这两个基本假设出发导出洛伦兹变换.

为了让洛伦兹变换形式简单,而又不失普适性,我们仍选用图 4.1所示的两个惯性系 S系和 S系.S系和 S系的各对应坐标轴彼此平行,x轴与 x轴重合.S′系沿 x轴以速率 u相对于 S系作匀速直线运动,在 t=t′=0时,坐标原点 O与 O重合.

设当 O与 O重合时,位于 O点处的点光源发出一光脉冲,将此时刻看作在 S系和 S系中的计时起点.在 S系中,光脉冲以速率 c向各个方向传播,在任意时刻 t,光波波前与点光源的距离为

$$r=ct$$

而
$$r=\sqrt{x^2+y^2+z^2}$$

所以
$$x^2+y^2+z^2-c^2t^2=0 \tag{4.6}$$

这正是在 S系中描写光脉冲波前的球面方程.

根据光速不变原理,在 S系中同样观测到光脉冲以速率 c自 O′点向各个方向传播,所以在 S系中光脉冲波前同样为球面,其方程为

$$x'^2+y'^2+z'^2-c^2t'^2=0 \tag{4.7}$$

式 (4.6)和 (4.7)表明

$$x^2+y^2+z^2-c^2t^2=x'^2+y'^2+z'^2-c^2t'^2 \tag{4.8}$$

式 (4.8)表明 $x^2+y^2+z^2-c^2t^2$不随惯性系的变化而变,是不变量,在狭义相对论中称为间隔不变性.由于光速不变原理与伽利略变换是不相容的,所以伽利略变换不可能使 (4.6)和 (4.7)两式同时成立.要使上述的 (4.6)、(4.7)两式能够同时成立,必须寻找一种新的时空变换关系.

这种新的时空变换关系应该满足狭义相对论的相对性原理,因此新的时空变换关系必须是线性的,因为只有这样才能保证当物体在一个惯性系作匀速直线运动时,在另一个惯性系也观测到它作匀速直线运动.还应该考虑到当速率 $u \ll c$时,这个变换应过渡到伽利略变换.因为在这种情况下,伽利略变换被实践

检验是正确的.为此,我们设:

$$\begin{aligned} x' &= a_{11}x + a_{12}t \\ y' &= y \\ z' &= z \\ t' &= a_{21}x + a_{22}t \end{aligned} \tag{4.9}$$

为了简单起见,现在研究在 S系中观测 S系中的 O点 (即 $x'=0$) 的运动.很显然,在 S系中各点 (S系中的坐标为 x) 观测到 S系中 $x'=0$的点沿 x轴运动,速度为 u,即 $x'=0$,$\frac{dx}{dt}=u$.根据式 (4.9),若 $x'=0$,则有

$$a_{11}x + a_{12}t = 0$$

由此得

$$x = -\frac{a_{12}}{a_{11}}t$$

故

$$\frac{dx}{dt} = -\frac{a_{12}}{a_{11}} = u \tag{4.10}$$

联立式 (4.8)、(4.9)、(4.10) 可解得

$$a_{11} = \frac{1}{1-u^2/c^2}$$

$$a_{12} = \frac{-u}{1-u^2/c^2}$$

$$a_{11} = \frac{-u/c^2}{1-u^2/c^2}$$

$$a_{22} = \frac{1}{1-u^2/c^2}$$

将此结果代入式 (4.9),即可得到洛伦兹时空坐标变换关系:

$$\boxed{\begin{aligned} x' &= \frac{x-ut}{1-\frac{u^2}{c^2}} \\ y' &= y \\ z' &= z \\ t' &= \frac{t-\frac{u}{c^2}x}{1-\frac{u^2}{c^2}} \end{aligned}} \tag{4.11}$$

式 (4.11) 称为洛伦兹时空坐标变换关系,简称为洛伦兹变换.将式 (4.11) 中带

撇的量与不带撇的量互换，并将 u 换成 $-u$，即可得到洛伦兹变换的逆变换，即从 S系到 S系的变换关系为

$$\begin{aligned} x&=\frac{x'+ut'}{1-\frac{u^2}{c^2}}\\ y&=y'\\ z&=z'\\ t&=\frac{t'+\frac{u}{c^2}x'}{1-\frac{u^2}{c^2}} \end{aligned} \tag{4.12}$$

对于洛伦兹变换，我们作如下几点说明：

⑴ 洛伦兹变换表达的是同一事件在不同惯性系中时空坐标的变换关系．从变换式中可以看出 x 是 x 和 t 的函数，t 也是 x 和 t 的函数，而且都与 S系和 S′系的相对运动速度 u 有关．揭示出时间、空间和物质运动之间的联系．

⑵ 该变换彻底否定了 $t=t'$ 的绝对时间概念，明确地表示出时间坐标与空间坐标有关，指出在不同的惯性系中，一般 $t\neq t'$．在相对论中，时间和空间的测量互相不能分离，而是联系成一个整体．因此常把一个事件发生时的位置和时刻联系起来称为它的时空坐标．

⑶ 从变换式可以看到，因为时间和空间坐标都是实数，所以 $1-\frac{u^2}{c^2}$ 不应该出现虚数．这就要求 $u<c$，而 u 代表两个惯性系的相对速度．由此得到一个结论：宇宙中任何物体的运动速度不可能等于或超过真空中的光速．这是狭义相对论理论本身要求的，它已被科学实验所证实．

⑷ 当 $u\ll c$ 时，洛伦兹变换就转化为伽利略变换，此时相对论力学的规律也就转化为经典力学的规律．这意味着相对论指出了牛顿力学的局限性和适用范围，即在 $u\ll c$ 的低速情况下，经典力学的结论是成功的．

⑸ 洛伦兹变换是爱因斯坦狭义相对论的必然结果，爱因斯坦以狭义相对论的两条基本假设为基础，推导出了此变换式（1905年），为什么却称为洛伦兹变换呢？

前面讲过，用经典力学无法解释光的传播速度在任何惯性系中都为 c 的事实，人们认为光速 c 是对“以太”这个绝对惯性系而言的．地球相对于“以太”的速度成为当时许多科学家关注的焦点之一．著名的迈克尔逊－莫雷实验否定了“以太”的存在．为了解释迈克尔逊－莫雷实验，荷兰物理学家洛伦兹提出相对于“以太”运动的物体会有长度缩短，尽管这收缩的物理原因无法解释，但却在

需要全本请访问 www.ertongbook.com