

现代科学技术

吕基强 王 朋 / 主编



山东省教育厅“九五”立项教材

现代科学技术

主 编：吕基强 王 朋
副主编：刘泰东 尹卓容

黄河出版社

内容简介

本书是山东省“高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划”重点项目的研究成果,是山东省教育厅“九五”立项教材。内容包括物理学、天文学、生命科学、材料科学、信息与自动化科学、能源科学、地球科学、航天科学、军事科学、高技术概述等现代科学技术知识及前沿动态,是大学本、专科各专业学习现代科学技术综合知识的通用教材。

图书在版编目 (C I P) 数据

现代科学技术/吕基强主编. — 济南: 黄河出版社, 2001.8
ISBN 7-80152-268-0

I. 现… II. 吕… III. 科学技术 - 概论 IV. N1
中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 046324 号

书名	现代科学技术
主编	吕基强 王 朋
出版	黄河出版社 (250002) (济南市英雄山路 19 号)
印刷	莱芜市圣龙印务书刊有限责任公司
规格	787 × 1092 毫米 16 开本 21.5 印张 500 千字
版次	2001 年 7 月第 1 版
印次	2001 年 7 月第 1 次印刷
印数	1 - 3000 册
书号	ISBN7-80152-268-0/G·049
定价	28.00 元

前 言

当今世界,科学技术突飞猛进,知识经济已见端倪,国力竞争日趋激烈。教育在综合国力的形成中处于基础地位,国力的强弱越来越取决于劳动者的素质,取决于各类人才的质量和数量,这对于培养和造就我国 21 世纪的一代科技新人提出了更高的要求。深化教育改革,推进素质教育,已成为全体教育工作者所面临的紧迫任务。在这样的历史背景下,我们从构建面向 21 世纪教学内容和课程体系的大目标出发,提出了在高等学校开展大学现代科技知识综合教育这一重要课题。

大学现代科技知识综合教育是适合大学生学习的多学科现代科技知识普及教育,是应现代科学技术发展潮流而提出的一种新的教学内容体系。当前,科学技术正向着高深度、高信息量、高分化和高综合的方向发展,新学科大量涌现,知识更新速度明显加快,学科分割的局面被打破,大量的交叉学科、边缘学科、横断学科和综合学科纷纷崛起,并占据了重要位置,学科的交叉、互融、重组和科技多学科联合攻关将成为 21 世纪的一种时代特征。进入 21 世纪的大学生应该更全面地掌握现代科技综合知识,对各学科发展的前沿状况有较多的了解。因此,开设现代科技知识综合教育课程,使学生在校期间就有较开阔的科技视野和较强的综合科技思维能力是非常重要的。

本课题提出后,得到了山东省教育厅及专家组的肯定与重视,被山东省教育厅列为山东省高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划重点项目。本课题组经过三年多的认真探索和研究,除在理论上建构起大学现代科技知识综合教育的框架外,主要成果是汇集研究所得,完成了《现代科学技术》的编写工作。

作为大学现代科技知识综合教育的教材,我们在本书的编写过程中突出了“现代科技”和“综合性”两个特点,兼顾了文、理科学学生的知识结构和教学需求。本书涵盖了物理学、天文学、生命科学、材料科学、信息与自动化科学、能源科学、地球科学、航天科学、军事科学等九大学科及高技术概述等现代科学技术内容,既讲授各学科的有关原理、基本特点、基本研究方法,又较多地介绍了各学科前沿知识和最新动态,既保持了各学科的独立体系,又体现了各学科之间的联系,在注重讲授当前主流学派理论和观点的同时,也适当提及了不同的学术见解,在涉及各学科较深的专业内容时,尽量避免复杂的公式推导,力求以深入浅出的论述使学生领会理论的精要。

本书有以下目的:

- (1) 传授多学科基础知识和前沿信息,拓宽学生的科技视野。
- (2) 从每一学科的特殊规律入手,建立多学科之间的联系,总结各学科具有共性的一般规律,使学生的思维方式更接近于科学实际。
- (3) 培养分析问题、解决问题的能力,引导学习兴趣,激发探索未知的愿望,提高学习积极性。
- (4) 传播科学精神,培养创新意识。

本书适合于大学本专科各专业学生学习现代科技综合知识所用,是山东省教育厅“九

五”立项教材。

本书是集体研究编写的成果，全体编委体现了老中青结合和团结协作、互相支持的精神，获得了优势互补、共同提高的效果。主编承担了编写提纲的拟订、编写过程指导和全书的修改定稿。各章节执笔人是：吕基强（第二章、第七章、第十章），王朋（第一章、第五章、第六章），刘泰东（第四章、第八章、第九章），尹卓容（第三章§3-5），宋俊梅（第三章§3-1、§3-4），吴琼（第三章§3-2），封德顺（第三章§3-3）。

在本书编写过程中得到了山东轻工业学院院领导和教务处的的大力支持，在此致以衷心的感谢。

现代科学技术知识浩翰如海，由于篇幅所限，许多精彩的内容未能编入本书，是为所憾。由于我们水平有限，书中难免有疏漏和错误之处，恭请广大师生批评指正。

编 者

2000年初冬于济南

目 录

第一章 物理学	(1)
§ 1-1 相对论原理	(1)
§ 1-2 粒子世界	(17)
§ 1-3 激光及其应用	(31)
§ 1-4 等离子体	(48)
§ 1-5 超导	(58)
§ 1-6 纳米科学技术	(66)
第二章 天文学	(76)
§ 2-1 行星 卫星 彗星	(76)
§ 2-2 恒星	(89)
§ 2-3 星系	(97)
§ 2-4 宇宙的起源和演化	(103)
§ 2-5 全波段天文学与天文探测新技术	(109)
第三章 生命科学	(115)
§ 3-1 生命起源	(115)
§ 3-2 生物遗传	(120)
§ 3-3 人体免疫系统	(127)
§ 3-4 人脑	(132)
§ 3-5 生物工程	(135)
第四章 材料科学	(145)
§ 4-1 精彩的金属世界	(145)
§ 4-2 新型玻璃与陶瓷	(152)
§ 4-3 高分子有机材料王国	(155)
§ 4-4 其他新兴材料	(165)
第五章 信息与自动化科学	(171)
§ 5-1 微电子与计算机技术	(171)
§ 5-2 传感和遥感技术	(180)
§ 5-3 信息技术	(187)
§ 5-4 虚拟现实技术	(202)
§ 5-5 机器人技术	(207)
第六章 能源科学	(212)
§ 6-1 地热能	(212)
§ 6-2 海洋能	(216)
§ 6-3 绿色能源	(226)
§ 6-4 核能	(236)
§ 6-5 太阳能	(240)

§ 6-6 21 世纪的能源趋势·····	(243)
第七章 地球科学 ·····	(249)
§ 7-1 地球大气层·····	(249)
§ 7-2 地球内部结构·····	(252)
§ 7-3 大陆漂移及板块构造学说·····	(254)
§ 7-4 地幔对流假说和巨型地幔柱假说·····	(258)
§ 7-5 地球的绝对年龄和地球年表·····	(263)
§ 7-6 海洋大观·····	(266)
第八章 航天科学 ·····	(271)
§ 8-1 空间环境·····	(271)
§ 8-2 航天器轨道·····	(274)
§ 8-3 航天系统组成·····	(276)
§ 8-4 航天运输系统·····	(280)
§ 8-5 人造地球卫星及其应用·····	(285)
§ 8-6 载人航天器·····	(292)
第九章 军事科学 ·····	(298)
§ 9-1 精确制导技术·····	(298)
§ 9-2 隐身技术·····	(302)
§ 9-3 夜视技术·····	(307)
§ 9-4 现代武器大观·····	(311)
§ 9-5 新概念武器·····	(321)
第十章 高技术概述 ·····	(326)
§ 10-1 高技术的内涵·····	(326)
§ 10-2 高技术发展浪潮·····	(329)
§ 10-3 21 世纪高技术发展趋势·····	(334)

第一章 物理学

§ 1-1 相对论原理

相对论包括狭义相对论和广义相对论。狭义相对论是在经典电动力学的发展基础上诞生的,着重讨论的是时间与空间的概念和时空理论。狭义相对论所阐明的时空效应是非常奇特而有趣的。但是这种效应只是在接近光速运动的物体中才明显地表现出来,在日常生活中它不易被观察到。广义相对论是严格的引力理论,它要用到高深的数学,是一个非常难懂的理论。然而在我们人类居住的地球上,引力是比较弱的,牛顿的引力理论是足够用了,广义相对论的效应极其微小。但是,当我们研究致密天体和研究整个宇宙时,牛顿理论就无能为力了,必须应用广义相对论。除此之外,爱因斯坦创建相对论还有更深刻的意义,这就是它从逻辑思想上统一了物理学,使物理学建立在严格的经过科学考察的时空理论的基础之上。现代的许多物理概念都是建立在相对性原理的基础之上,并且经过大量的科学实践检验证明是正确的,因此相对论原理是科学的真理。

一、相对论的提出

1. 相对性原理

在伽利略和牛顿的时代就有了对相对性原理的表述:对于力学规律,一切惯性系都是等价的。也就是说,牛顿定律以及由它所导出的规律,在一切惯性系中都有相同的形式。称为力学相对性原理。

伽利略变换:不同惯性系之间时间和空间坐标的变换关系。惯性系 K' 相对于惯性系 K 以速度 v 沿 x 轴正向运动,且当 $t' = t = 0$ 时,二系坐标完全重合。在上述简化条件下,伽利略变换公式为:

$$\begin{cases} x' = x - vt \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = t \end{cases} \quad \begin{cases} x' = x + vt \\ y = y' \\ z = z' \\ t = t' \end{cases}$$

(1-1)

伽利略变换的特征是,不同惯性系有完全相同的时间,刚性物体的长度是不变量。由伽利略变换所反映的时空关系,符合牛顿力学的要求。也就是说,利用伽利略变换,力学相对性原理成立,力学规律在各个惯性系的形式都完全相同。

速度加法定理:按照伽利略变换,在不同惯性系质点的速度不同,服从矢量求和的法则。作为简单的情况,一个质点在上述 K 系以速度 u 沿 x 轴正向运动,则该质点在 K' 系沿 x' 轴运动的速度是 u' , $u' = u - v$, $u = u' + v$ 这种关系在日常生活中很好理解。例如一只大船相对于河岸以速度 $v = 5$ 米/秒匀速前进。一个球在船甲板上以速度 $u' = 20$ 米/秒自船尾向船头运动,在岸边测量球的速度 $u = u' + v = 25$ 米/秒。如果一辆汽车沿河岸以速度 $u = 15$ 米/秒与船同方向前进,船上的人观测汽车的速度只有 $u' = u - v = 10$ 米/秒。这就是与相对性原理有关的一些认识。

随着电磁学的发展,麦克斯韦电磁理论取得巨大的成功,并且很好地解释了静止物体的

电磁过程；但是在推广到运动物体的电磁过程时却遇到了困难。首先碰到的就是，麦克斯韦方程组对于伽利略变换不是协变的，运用伽利略变换，麦克斯韦方程组在不同惯性系的形式不同。最简单的一个例子，按照麦克斯韦理论，真空中电磁波的速度，也就是光速是一个恒量，然而按照伽利略变换，如上述的速度加法定理，不同惯性系的光速是不同的。这就出现一个问题：适合于力学的相对性原理是否适合于电磁学？当时的物理学家一般都相信以太的存在，因此许多物理学家都在保留以太的条件下，寻求上述问题的解答。

2. 光行差现象

为了解决麦克斯韦电磁理论与伽利略变换的矛盾，有一些物理学家曾经设想了一种称为以太曳引假说。地球表面为空气所包围，地球运动，大气和地球一起运动，以太会不会也像空气那样被地球带着一起运动呢？想象中的以太是充满整个空间，密度和性质都是均匀的。如果以太被地球运动所曳引，以太相对于地球就是静止的；反之，从以太参照系看，地球也是静止的，就好像它飘浮在以太海中一个确定的地方。如果这个理论成立，众多的星都在运动，也都在曳引以太，也都与以太相对静止。那样的话，从以太参照系看众多的星，也都是静止的，都在以太海中有它的不动的确定位置。光是依赖于以太作为媒质传播的，光相对于以太的速度是 c ，按曳引假说，以太与所有星辰都是相对静止的，所以对所有星体来说光速都是 c 。这样，由电磁理论所确定的光速是一个恒量就可以得到解释。然而这种假说却被一些明显的观测事实所否定，最重要的是光行差现象。

我们知道天空中的星虽然都在运动，但因为它们距离地球很远，在地球上观测每一颗星，它在天空上的位置是确定的，短时间察觉不到它们位置的变化。然而用望远镜仔细观测，每颗星的位置都有周期性的微小变化，恰好一年走一个椭圆的轨迹。这个现象在 18 世纪前期就发现了，后来人们从理论上也弄清楚了，这是由于地球环绕太阳运动所引起的周年光行差。由于地球在运动，用望远镜筒对准星光时，镜筒对准的不是星的位置，而是向前倾斜了一个小角度，才能接收到该星的光。地球一年走了一个接近圆形的椭圆轨道，望远镜筒就要跟着旋转一周，扫过一个椭圆轨迹，由于星在天空上的位置不同，有的椭圆轨迹接近圆形，有的则可能接近一条往返的线。对所有星的光行差现象的观测，它们运行的轨迹形状虽然不同，但椭圆长轴相对于地球的视角都一样，大约是 41 秒。由此可以肯定，它不是星的运动效应，完全是由地球周年运动所引起的。

如果按照以太曳引假说，在传播光的媒质以太海中，所有的星和地球相对以太都是静止的，完全不应该有光行差现象。但是，到 19 世纪末为止，光行差现象已经观察了一百七十八年，所有的星都有同一类型的光行差现象，因此，以太被曳引的假设不能成立。如果存在以太的话，按照当时的看法，它只能静止于绝对空间，地球以及众多星辰则在以太海中运动。

3. 迈克耳孙 - 莫雷实验

到了 19 个世纪末，由洛伦兹所发展的电磁理论，与当时已知的天文观测现象和地面上的有关实验都符合得很好，唯独与一个实验不符，它就是迈克耳孙 - 莫雷实验。按照洛伦兹的观点，以太是普遍存在的，静止于绝对空间，成为绝对惯性参照系，因此地球相对于以太应该运动。然而许多人作了有关的实验，却无法证实这种情况，而迈克耳孙 - 莫雷实验却明确地得到了否定的答案。

迈克耳孙毕生都从事光速测量的工作。他首先改进了傅科的测光速的方法，利用凹面镜和透镜把光路延长到 600 米，获得了当时光速测定的最新记录。1881 年，他研制出一种干涉

仪，现在称迈克耳孙干涉仪，他利用这个干涉仪从光的干涉的方法测量地球相对于以太的运动，结果是否定的。然而这次实验由于测量精度不够，未能被物理学界所接受。1884年，两位英国著名物理学家开尔文和瑞利访问美国时，鼓励迈克耳孙提高精度，重新做这个实验。于是迈克耳孙与莫雷合作，改进了实验装置，把测量精度提高到 2.5×10^{-10} ，即一亿分之二点五。然而他们反复进行测量，仍然得到的是否定的结果。因此引起了物理学界的极大关注。因为这个否定的实验结果，揭示了现有理论的矛盾。

洛伦兹于1892年从电磁理论的研究中，为解释迈克耳孙-莫雷的实验结果，提出了收缩假说。1895年，洛伦兹在研究不同坐标系电磁场的相关态时，发现不能用一个时间概念，于是提出了普通时和局域时两个时间概念。到了1904年，洛伦兹总结他多年的研究成果，找到了一种新的坐标变换关系。这个新的变换关系后来就称之为洛伦兹变换。

从迈克耳孙-莫雷否定地球相对于以太运动的实验，再联系到其他观测现象和实验结果以及电磁理论发展中遇到的问题，许多杰出人物已经预感到理论上要有重大的突破，洛伦兹发展的麦克斯韦电磁理论，他对以太概念的简化，已经为新理论的建立奠定了基础。但洛伦兹本人未能创建新理论。而创建新理论的是由一个不知名的年轻人爱因斯坦完成的。

二、狭义相对论的时空观

1. 时间没有绝对的定义

在十年的探索过程中，爱因斯坦认真地钻研了麦克斯韦电磁理论，特别是经过赫兹与洛伦兹发展和阐述的电动力学。爱因斯坦坚信电磁理论是完全正确的，但是有一个问题使他不安心，这就是存在绝对参照系以太。他研究了洛伦兹的电磁理论后认识到，除了作为绝对参照系和电磁场的荷载物之外，以太在洛伦兹理论中已经没有实际意义了。于是他想到这样的问题：以太绝对参照系是必要的吗？电磁场一定要有荷载物吗？

爱因斯坦认为，相对性原理应该普遍成立，因此，电磁理论对于各个惯性系应该具有同样的形式。这里首先就面临光速的问题，按照电磁理论，真空中的光速，也就是真空中的电磁波的速度是一个恒量 c 。如果相对性原理成立，在所有惯性系，光速都应该是同一个恒量 c ，光速就是一个不变量，然而按照伽利略变换，由速度加法定理，却不能得到这个结论，在一个惯性系光速是 c ，在另一个相对于它以速度 v 运动的惯性系来看，光速就不是 c ，这可能吗？光速是个不变的量，还是可变的量，就成了相对性原理是否普遍成立的首要问题。1905年爱因斯坦发表了《论动体的电动力学》，在这篇文章中他提出代表狭义相对论的基本思想和基本原理：相对性原理和光速不变原理，有了这两条原理，由静体电动力学到动体电动力学就有了简单而又协调的关系。

爱因斯坦认为，根本不存在绝对的静止和绝对的运动，一切运动都是相对的，因此也就不存在绝对静止的空间，同样不存在绝对同一的时间。所有的时间和空间都是和运动的物体联系在一起的。对于任何一个参照系和坐标系，都只有属于这个参照系和坐标系的空间和时间。对于一切惯性系，运用该参照系的空间和时间所表达的物理规律，它们的形式都是相同的，这就是相对性原理，严格说是狭义的相对性原理。

然而只有相对性原理，并不能解决问题，还必须有一个光速不变原理，问题才能得到圆满解决。爱因斯坦指出，光速是一个恒量，是麦克斯韦电磁理论给出的结果，因为电磁理论已被事实证明是正确的，按照相对性原理，在不同惯性系光速应该是不变的。另一方面，包

括迈克耳孙-莫雷实验在内的许多实验,也证明了光速是恒量。不过在这里应该说明,已知的对光速的实验测量,都是双程的,也就是测量往返传播的光所用时间除双程距离,求出的是平均效果。要直接测量单程的光速,涉及两个地点的时间定义。爱因斯坦提出光速不变是一个大胆的基本假定,他是从电磁理论和相对性原理的要求而提出来的。

其实,爱因斯坦早就想到,按照麦克斯韦电磁理论和相对性原理,光速应该是个不变量,困难在于它与伽利略变换的速度加法定理相矛盾。如何解决这个困难,是他长期思索的问题。一旦他想明白了,时间没有绝对的定义,也就否定了伽利略变换中时间的同一性。因此,就可以根据时间和光信号的速度之间不可分割的联系,由光速来确定不同惯性系之间的时间关系和空间关系,进而得到另一种速度相加的法则,由这个新的法则可以证明光速是不变量。并由此创建了狭义相对论。

2. 同时的相对性

在狭义相对论的理论中,很重要的是探讨时间的概念。所谓同时性的定义,实际上讲的是时钟的校准。因为,要定义时间,首先要确定两个同时的事件。说火车七点到达,是说你的表指针正好指到7时,火车刚好停稳在站台上,表针指到7与火车到站两个事件的同时性。也就是说,用你的表的指针位置来定义时间。如果事情发生在同一地点,用一只表定义时间似乎足够了。然而事情不只是发生在一个地点,用一只表定义就不够了。要定义时间,必须在不同地点放上一系列的时钟,通过校准,使这一系列的时钟同步。问题是怎样校准不同地点的钟,使之同步呢?要校准不同地点的时钟,必须用第三者,这就是光信号,或者更广义地说用电磁波信号,当你走在大街上,用高大建筑物上面的大时钟来校准你的手表时,当你看大钟上面的时刻时,已经用到光信号了。没有光传递大钟所指时刻的信息,你什么也不知道。为什么用光信号或电磁波信号校准钟表呢?大家的直觉是,光速非常快,走这样一段距离所用的时间可以忽略不计。这在日常生活中,的确是这样。然而从科学的意义上,更重要的是光速是一个恒量,光和电磁波走过相等的距离所用的时间相等。

严格地定义时间,要在坐标系各个点上设立经过校准好的同步的钟。校准的方法如下:在坐标原点发出标准时刻 t_0 的光信号或电磁波信号,与坐标原点距离为 r 的点,接收到该信号的时刻为:

$$t_r = t_0 + r/c \quad (1-2)$$

通过这样不断地校准,就可以使同一个坐标系的各个不同地点的时钟完全同步。这样,在这个坐标系不同地点对时间才有共同的认识,才有共同的统一的时间,但请注意,这只是同一个惯性系和坐标系的时间。对于每一个惯性系及其坐标系来说,按照以上的校准方法,都可以得到该惯性系和坐标系的同一的时间定义。那么,不同惯性系的时间是否同一呢?

按照相对性原理和光速不变原理。爱因斯坦发现:对于两个作相对运动的惯性系来说,在不同惯性系观测,刚性杆的长度不是一个不变量。也就是说运动的物体会在运动方向上收缩。进一步观测时钟发现,在不同惯性系没有共同的时间。两个事件的同时没有绝对的意义。也就是说,在一个惯性系看,有两个事件是同时发生的,在另一个惯性系看,两个事件不是同时发生的。

同时的相对性,是爱因斯坦的时间概念和时空理论的基础。明了同时的相对性是理解相对论时空观的关键。在日常生活中,人们所用的都是统一的时间,从来没有感觉到有什么问题。在地球的各个地方,都有统一校准好的时钟,相对于地面运动的汽车、火车和飞机上的时钟,也是和地面上的时钟校准好的,用的都是统一的时间,从来没有发生过问题。原因很简单,相对于光速来说,汽车、火车和飞机的速度都太慢了。光速是每秒30万千米,比飞

机快几十万倍。在这些条件下，同时的相对性，观察不出来，为了理解同时的相对性这个概念，我们设想一列高速运行的列车，它的速度接近光速，当它穿过一条与它的长度差不多的隧道的时候，会有这种情况发生。隧道入口的时钟与隧道出口的时钟是校准好的，两个时钟的测量表明：列车前方到达隧道出口的时刻，刚好是列车末端进到隧道入口的时刻，两个事件是同时的，列车的长度刚好与隧道的长度相等。然而列车上前方的司机与列车末尾的警卫，却测出了不同的结果。司机与警卫的钟表也是彼此校准好了的，他们测出的结果是：列车前方先到达隧道出口，过了一段时间，列车后尾才到达隧道入口，两个事件不是同时的，一前一后，测出隧道的长度比列车的长度要短一些。这就是两个不同的惯性系，对于两个事件是否同时有不同的测量结果，一个惯性系的两个时钟测出是同时，另一个惯性系的两个时钟测出是不同时。这里再强调一下，高速列车上测出不同时的前后两个时钟，是经过严格校准的，在列车惯性系，两个时钟是同步的。读者或许会产生疑问：这样的事会发生吗？回答是肯定的。只要列车的速度足够快，与光速可以相比的快，例如每秒 10 万千米，相当于光速的三分之一，按照相对性原理和光速不变原理，这样的事会发生的。

3. 新的变换关系

爱因斯坦认识到同时性的概念没有绝对的意义，时间和长度都只有相对的意义。下一步自然要找出不同惯性系之间的时间与空间坐标的变换关系。他从相对性原理和光速不变原理出发，并且考虑到空间和时间的均匀性，推导出了一组两个惯性系之间的新的变换关系。惯性系 K，空间坐标是 x 、 y 、 z ，时间是 t 。惯性系 K' ，空间坐标是 x' 、 y' 、 z' ，时间是 t' 。 K' 相对于 K 以速度 v 沿 x 轴正向运动，它们之间的坐标变换式为：

$$\begin{cases} x' = \beta (x - vt) \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = \beta (t - \frac{vx}{c^2}) \end{cases} \quad \begin{cases} x = \beta (x' + vt') \\ y = y' \\ z = z' \\ t = \beta (t' + \frac{vx'}{c^2}) \end{cases} \quad (1-3)$$

其中

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

因为 $u = dr/dt$ 所以由上述坐标变换可以推导出新的速度加法定理：

$$\begin{cases} u'_x = \frac{u_x - v}{1 - \frac{u_x v}{c^2}} \\ u'_y = \frac{u_y \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{1 - \frac{u_x v}{c^2}} \\ u'_z = \frac{u_z \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{1 - \frac{u_x v}{c^2}} \end{cases} \quad \begin{cases} u_x = \frac{u'_x + v}{1 + \frac{u'_x v}{c^2}} \\ u_y = \frac{u'_y \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{1 + \frac{u'_x v}{c^2}} \\ u_z = \frac{u'_z \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{1 + \frac{u'_x v}{c^2}} \end{cases} \quad (1-4)$$

这里 u_x 、 u_y 、 u_z 代表一个运动在 K 系的速度分量

u'_x 、 u'_y 、 u'_z 代表同一运动在 K' 系的速度分量，

如果 u' 和 v 是同一个方向，只有一个表达式：

$$u' = \frac{u - v}{1 - \frac{uv}{c^2}} \quad u = \frac{u' + v}{1 + \frac{u'v}{c^2}}$$

从这个新的速度加法定理，爱因斯坦得到了重要的结果：(1) 两个小于光速的速度 v 和 u' ，合成之后的速度 u 仍然小于光速；(2) 如果运动以光速进行，合成后的速度仍然是光速。有了这个新的速度加法定理，在一切惯性系光速都是同一个恒量 c ，这就与相对性原理没有任何矛盾了。

另外爱因斯坦还证明了麦克斯韦方程组对于上述新的坐标变换是协变的。也就是说，通过这个新的变换公式，在各个惯性系麦克斯韦方程组的形式是相同的。这样就解决了电动力学与相对性原理的矛盾，说明运用这个新的变换关系，电动力学也是符合相对性原理的。这就使整个物理学都可以建立在相对性原理的基础之上，实质上是建立在新的时空观的基础之上。

爱因斯坦推导出的新的变换关系，就是前一年洛伦兹得到的。洛伦兹变换是狭义相对论的核心和数学表达形式，狭义相对论的许多结果，恰恰是通过洛伦兹变换得到的结果。狭义相对论是从相对性原理和光速不变原理出发，通过对时空概念的严格考察，建立了新的时空理论。可以这样说，相对性原理及其时空观是狭义相对论的思想实质，洛伦兹变换是它的表现形式，通过光速不变原理将两者联结起来，爱因斯坦的独到之处，在于提出了光速不变原理，建立了新的时空观，从而创建了狭义相对论。

有了洛伦兹变换，伽利略变换处于什么地位呢？大量的事实已经证明，当两个惯性系之间的相对速度 v 远小于光速时，洛伦兹变换就化为伽利略变换。由此可见，洛伦兹变换是普遍成立的，伽利略变换是低速运动条件下洛伦兹变换的极好的近似表示。在牛顿力学范围内的问题，在日常生活中碰到的问题，运动物体的速度都是远小于光速的，可以应用伽利略变换。在研究光学和电动力学问题时，常常要碰到高速运动的问题，这种情况下，必须应用洛伦兹变换。

4. 长度的缩短

从狭义相对论的理论可以得到运动的物体在其运动方向上长度收缩的效应，爱因斯坦认为，这种长度的收缩效应只不过是时空的一种性质，是时空测量中必然产生的效应，并不是物质自身的收缩。

例如有一根刚性棒，静止于 K 系测量，长度是 L_0 。如何测量的呢？将棒放在 x 轴的坐标上，一端的坐标是 x_1 ，另一端的坐标是 x_2 ，于是有 $x_2 - x_1 = L_0$ 。这种测量与时间的选择无关，因为棒静止于 K 系，两个端点的位置不随时间而改变。一个刚性棒，与时间无关测量出来的棒的长度，当然是代表了这个刚性棒的本征长度。将这同一根刚性棒放在 K' 系的 x' 轴上， K' 系相对于 K 系沿着 x 轴正向以速度 v 运动。棒在 K' 系上静止，用同样方法测量该棒的长度，一个端点的坐标是 x'_1 ，另一个端点的坐标是 x'_2 。这两个坐标的数值同样与该系的时间 t' 无关，测出的结果 $x'_2 - x'_1 = L_0$ 。这就是说，它的本征长度仍然是 L_0 ，刚性物质自身并未因运动状况有所改变。但是在这种情况下，由 K 系对这根刚性棒再次测量，却有了困

难, 因为该棒随 K' 系一起相对于 K 系运动, 它的两端在 K 系的位置坐标随时间 t 而不断改变, 位置坐标的数值依赖于时间了, 如何在 K 系测量运动物体的长度呢? 唯一的选择是, 在同一个时刻记录下两个端点的坐标值。要求在 $t_1 = t_2$ 的条件下, 测出 $x_1(t_1)$ 和 $x_2(t_2)$, 这时测出的 $x_2 - x_1 = L$, 代表它的长度应该说是没有疑问的。应用洛伦兹变换, 在上述测量条件下, 可以得到 L 与 L_0 的关系是:

$$L = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (1-5)$$

这就是长度缩短的公式。按照上述分析, 裴兹杰惹-洛伦兹收缩效应, 并不是刚性物质自身的压缩, 而是时空测量所带来的一种效应, 因此它反映的是时空的一种性质。

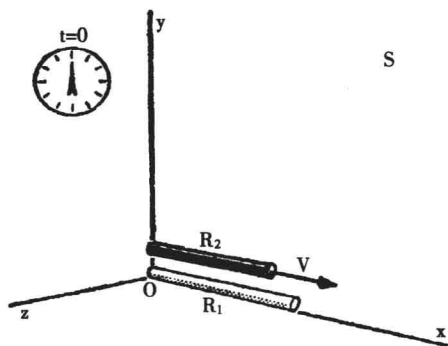


图 1-1 运动物体的收缩

从这里可以看出, 爱因斯坦狭义相对论的时空观与牛顿的绝对时空观是不同的。在牛顿看来, 时间和空间是互不相关的, 各自独立的, 时间有绝对的等同性, 空间也有绝对的等同性, 这就是说一个刚性量杆的长度是不变的。爱因斯坦认识到这种等同性是有局限的, 只是在低速运动下才成立。按照狭义相对论, 时间没有绝对的等同性, 空间也没有绝对的等同性, 只有时空联系在一起的时空绝对等同性。所以, 从狭义相对论的时空观来看, 反映空间大小的物理量长度, 不再是绝对不变的, 长度与运动速度有关, 随着速度增加长度缩短。这种长度的缩短效应, 是时空的一种性质, 并不是具体的物体自身的变化。

然而这种长度的缩短效应, 只是对于高速运动的物体才有意义, 对于低速运动的物体是没有意义的。例如, 长度 $L_0 = 100$ 米的宇宙飞船, 若速度 $v = 0.6c = 1.8 \times 10^8$ 米/秒, 长度 $L = 80$ 米, 缩短效应明显, 若速度 $v = 0.01c = 3 \times 10^6$ 米/秒, 长度 $L = 99.995$ 米; 若速度 $v = 0.0001c = 3 \times 10^4$ 米/秒, 长度 $L = 99.9999995$ 米, 很难测出它的缩短效应。从地面上看, 每秒 30 千米的速度是相当快了, 但比起光速却又太慢, 完全不必考虑长度的变化。

5. 时间的膨胀

运动物体的时间膨胀, 或者通俗地说, 运动的时钟变慢, 这是爱因斯坦首先提出来的相对论效应, 是与长度的缩短效应并存的一对双生的效应。前面讲到, 按照狭义相对论的时空观, 空间没有绝对的等同性。时间也没有绝对的等同性。后者包含两个含义。(1) 同时是相对的, 即同时的相对性; (2) 时间间隔是相对的, 表现为运动物体时间膨胀。

例如, K' 相对于 K 系沿 x 正向以速度 v 运动, 在 K' 系有两个事件同时发生。第一事件发生于 x'_1 和 t'_1 , 第二个事件发生于 x'_2 , 和 t'_2 ; 既然在 K' , 是同时发生的两个事件, 就有 $t'_2 = t'_1$, 但两个地点不同, $x'_2 \neq x'_1$, 对于 K 系来说, 这两个事件是否同时呢? 由洛伦兹变换

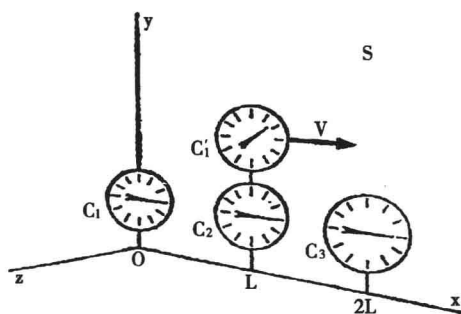


图 1-2 运动的钟走慢了

可以得到:

$$t_2 - t_1 = \beta \frac{v}{c^2} (x'_2 - x'_1) \quad (1-6)$$

$$\because x'_2 - x'_1 \neq 0$$

$$\therefore t_2 - t_1 \neq 0$$

$$t_2 \neq t_1$$

这就是说; 在 K 系测量, 两个事件不是同时发生。如果两个事件发生在同一个地点, $x'_2 = x'_1$, 就有 $t_2 = t_1$, 表明两个事件也是同时的。由此得到狭义相对论关于同时性的认识: 两个事件发生在同一地点, 同时是有绝对意义的, 各个惯性系都认为是同时; 两个事件不发生在同一地点, 同时只是相对的, 在一个惯性系看来是同时的, 在另一个惯性系看则不是同时的。这就是同时的相对性的完整表述。

又例如上述的 K 系和 K' 系, 在 K' 系的同一地点, 先后有两个事件发生, 第一个事件发生在 x'_1 和 t'_1 , 第二事件发生在 x'_2 和 t'_2 , 因为是在同一地点发生的, 就有 $x'_2 = x'_1$, 但是 $t'_2 \neq t'_1$, 两个事件的时间间隔 $\Delta t' = t'_2 - t'_1 = \tau_0$, 这里的 τ_0 代表本征时间的间隔, 是指在同一地点发生的两个事件之间的时间间隔。然而从 K 系测量, 这两个事件发生在 (x_1, t_1) 和 (x_2, t_2) , 既不同时 $t_2 \neq t_1$, 也不同地 $x_2 \neq x_1$ 这种情况在平常生活中可以见到。比如一个人在行进的火车里, 从座位上站起来是第一事件, 从货架上拿了点东西后, 又在原座位坐下是第二事件。从火车参照系看两个事件的位置没有变, $x'_2 = x'_1$, 然而从地面参照系看, 两个事件的地点发生很大变化, 因为人和火车一起在这段时间走过了一段距离, 所以 $x_2 \neq x_1$ 这里要问, 从两个惯性系测量, 两个事件之间的时间间隔是否一样呢? 对于 K' 系, 它的本征时间间隔 τ_0 , 运用洛伦兹变换计算, 它在 K 系的时间间隔 $\tau_0 + \Delta t$, 与 τ_0 有如下的关系:

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (1-7)$$

从 K 系得到的时间间隔 τ 比它的本征时间间隔 τ_0 要大, 因此从 K 系看, K' 系所测的时间短了, 认为它的时钟走得慢了, 或者说在 K 系时间膨胀了。这就是运动物体的时间膨胀效应。

爱因斯坦得到的这个效应, 一方面引起了人们的很大兴趣, 觉得非常奇怪和有意思, 另一方面也引起人们的怀疑。许多人难以接受爱因斯坦的看法, 提出过许多疑问和反对意见。问题在哪里呢? 问题在于人们的绝对的时间观念根深蒂固, 觉得相对论的这个效应不可思议。因为在日常生活中所碰到的问题, 运动速度都是相比光速来说是很低的, 看不出这个相

对论的效应。

6. 寿命的延长

相对论的时间膨胀效应，在日常生活中很难发现，因为日常生活中遇到的运动速度都太慢。然而随着科学的发展和技术的进步，人们从实验中发现了许多种微观粒子，它们的速度比宏观物体快得多，有些微观粒子以接近光速的速度运动。这就为从实验验证狭义相对论的正确创造了极好的条件。到现今为止，已经进行过的大量的有关微观粒子的实验，无可非议地证明，爱因斯坦提出的运动物体的时间膨胀效应是正确的。

例如：由加速器产生的 π 介子，它们的寿命就和它们的运动速度有关。 π 介子是在加速器中由高能质子撞击靶产生的，经过一个短暂的时间，它要衰变为 μ 子和中微子，从产生到衰变就是它们的寿命。实验上是测量产生的大量 π 介子的半衰期，换算出它们的平均寿命。经过多次不同条件下进行的实验，得到以下的结果。当 π 介子产生时速度很慢，远低于光速时，它们的平均寿命是 2.6×10^{-8} 秒；当它们产生的速度很快，与光速可比时，其平均寿命明显延长；当 π 介子产生时的速度达到 $v = 0.91c$ 时，测量出它们的平均寿命是 6.24×10^{-8} 秒，是低速时的 2.4 倍。从后一结果，可以由爱因斯坦给出的公式计算 π 介子的本征寿命：

$$\tau_0 = \tau \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 2.58 \times 10^{-8} \text{ 秒} \quad (1-8)$$

这个计算结果与在低速情况下测得的 π 介子的寿命相同。这就是说， π 介子的本征寿命有确定的值，然而当它们相对于实验室以高速运动时，从实验室参照系测量，它们的寿命随它们的速度增加而增加，与爱因斯坦给出的公式计算的结果完全符合。

由于宏观物体的运动速度很难接近光速，直接验证长度缩短的效应很难。然而，通过 π 介子寿命的实验，可以反过来证明长度的缩短效应。因为从 π 介子看来，实验室沿相反方向运动。以 π 介子为参照系，从它产生到衰变，在这段时间实验室相对于它走过的距离是实验室相对于它的速度乘以本征寿命

$$L = v\tau_0 = 0.91c \times \tau_0 = 7.1 \text{ 米} \quad (1-9)$$

从实验室参照系测量 π 介子在其生存期间走过的距离是， π 介子的速度乘以它的寿命

$$L_0 = v\tau = 0.91c \times \tau = 17 \text{ 米} \quad (1-10)$$

上式结果与长度收缩公式计算的结果一致：

$$L = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 17 \times \sqrt{1 - 0.91^2} = 7.05 \text{ 米} \quad (1-11)$$

所以，长度的缩短效应和时间的膨胀效应，是一个事物的两个方面，都反映了时空的特性。这是两个并存的相对论效应，这一个存在，另一个必然存在。

谈到这里，人们自然要问， π 介子的寿命可以随着速度的增加而延长，有机生命和人是否也可以通过这个途径延长寿命呢？从相对论的观点，答案是肯定的。因为这个效应是时空的性质，并没有涉及具体的物体的性质，所以只要运动的速度接近光速，寿命当然会延长。问题在于，宏观物体的速度很难达到那么高的速度，所以这并不是一个现实的问题。

7. 时间顺序的前后

爱因斯坦讲狭义相对论，着重说明的是同时的相对性和时间的相对性。由此自然引伸出一个问题，时间的顺序会不会颠倒。

从洛伦兹变换来分析，对于两个孤立的事件，也就是说，相互之间没有任何关联的两个

事件，不同的参照系观察，时间的次序有可能是相反的。例如，相距遥远的两颗星先后发生爆炸，一个参照系观测结果是甲在先乙在后，另一个参照系可能观测到相反的结果，乙在先甲在后。如果是两个不相关联的事件，不同的参照系观测，有可能时序相同，也有可能时序相反，其结果不与狭义相对论矛盾。

如果两个事件是有因果关系的，从逻辑上说，它们之间的顺序不能颠倒，例如高速火箭升空，总是发射在先，到达某个目的地在后。无论任何参照系测量，这个结论不应改变。然而按照洛伦兹变换，时间是相对的，是什么条件使得时序不会颠倒呢？下面我们来分析一下洛伦兹变换给出的结果。有两个事件 1 和 2，在 K 系看发生于 (x_1, t_1) 和 (x_2, t_2) ，在 K' 系看发生于 (x'_1, t'_1) 和 (x'_2, t'_2) K' 系相对于 K 系以速度 v 沿 x 轴正向运动。若在 K 系 $t_2 > t_1$ ，在 K' 系时序颠倒 $t'_2 < t'_1$ 的条件，可以由洛伦兹变换得到，

$$\frac{v(x_2 - x_1)}{c^2(t_2 - t_1)} > 0 \quad (1-12)$$

令

$$u = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} \quad (1-13)$$

u 代表两个事件相互关联的传递速度。从上式可以看出，出现时序颠倒的条件是 $vu > c^2$ ，这至少要求 $v > c$ 或者 $u > c$ 。然而从因果关系不允许时序颠倒，这就要求 $vu < c^2$ ，为此要求 v 不能大于 c ， u 也不能大于 c 。爱因斯坦正是从不能违背因果关系、有因果关联的两个事件时序不能颠倒得出如下结论：(1) 两个惯性系之间的相对速度不可能大于光速 c ；(2) 事件与事件之间的关联和相互作用的传递速度也不可能大于光速 c ；(3) 因此，光速是一个极限速度。

前面讲过，从洛伦兹变换得到的新的加法定理，不可能通过速度相加超过光速；这里又从因果的逻辑关系得到光速是极限速度。因此，找到超光速事件，就是对狭义相对论的否定，或者更确切说是对狭义相对论的挑战。自从狭义相对论建立以来，就不断有人寻找超光速事件，而且出现过一些报道，说发现了超光速事件。然而，直到今日为止，没有一个超光速事件为科学界所确认。在天文观测中，有些超光速现象，对其机理尚不清楚，专家们正在研究探讨之中，还没作出结论。另外，也有些人从理论上探讨，提出了快子理论。他们认为，存在着超光速的微观粒子，称之为快子，快子具有负能量，出现时间倒流等。然而快子理论现在还不成熟，存在着很多矛盾，而且尚无实验证实。所以，从实验和理论两个方面看，狭义相对论的基础是牢固的，光速是一个极限的速度，有因果关联的事件，时序是不会改变的。

狭义相对论是 20 世纪初创建的，依据的是 20 世纪初已知的事实，而且为以后几十年发现的新事实所证明。这个理论的成功，是有大量事实为根据的，是不能轻易否定的。当然，随着科学技术的发展，一定会发现许许多多我们今天还不知道的事实，还会有新的理论出现，新的理论有可能与狭义相对论的观点不同。但是，无论如何，狭义相对论在科学中的地位是无法否定的。

三、相对论力学和质能关系式

在狭义相对论看来，一个物体的质量，也就是它的惯性，并不是恒定不变的，而是随着