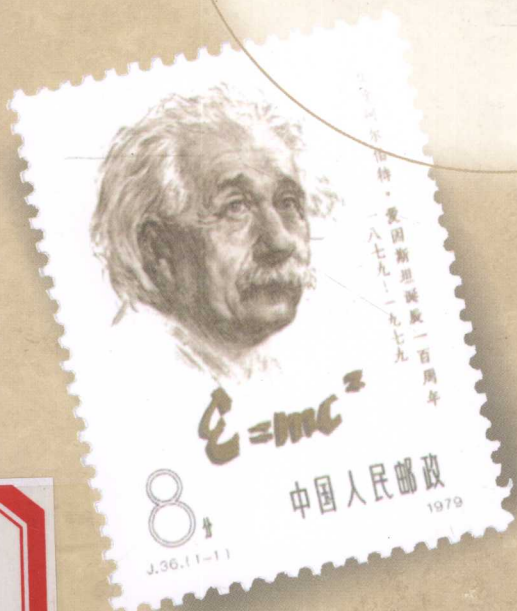


走
进
科
学
殿
堂

刘佑昌 著

相对论 并不神秘



2.1-49
0

清华大学出版社

内 容 简 介

本书通俗地阐述了狭义相对论的基本观点、历史背景和一系列重要结论,并简要介绍了广义相对论的一些常识。

本书适于各个专业的大学生及高中生作为课外读物;也可以作为科普小册子浏览。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

相对论并不神秘 / 刘佑昌著. --北京:清华大学出版社,2012.3

(走进科学殿堂)

ISBN 978-7-302-28138-2

I. ①相… II. ①刘… III. ①相对论—普及读物 IV. ①O412.1-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 029092 号

责任编辑:朱红莲

封面设计:常雪影

责任校对:王淑云

责任印制:张雪娇

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

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

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:148mm×210mm 印 张:3.875 彩 插:1 字 数:78千字

版 次:2012年3月第1版 印 次:2012年3月第1次印刷

印 数:1~3000

定 价:15.00元

产品编号:045328-01

前言

狭义相对论问世以来,到现在已一百多年了。它早就成为近代物理学的理论基础之一,并为人类开创了核能时代;但是,许多人对它的了解还是很不够的。在不少人的心目中,相对论仍然高深莫测。

其实,相对论并不神秘,只要我们在思想上能摆脱旧观念的束缚,用不着什么大学物理、高等数学,也能对相对论的基本面貌获得一些认识。

为了使读者能够比较深入、准确地了解狭义相对论的主要内容及其来龙去脉,我们使用了一点简单的数学运算。这是有别于一般通俗读物的。(对于具有较好数理基础的读者,作者还有另一本书《狭义相对论及其佯谬》。清华大学出版社,2011)

如果跳过小字部分及数学推演,它就更接近于通常的科普小册子。最后关于广义相对论的简要介绍,就是这样处理的。

这本书先是由人民教育出版社出版的(1985年),这次利用重印的机会,修改了个别字句,补充了几个例子。

本书初版编辑人民教育出版社的窦国兴先生及再版编辑清华大学出版社的朱红莲老师为这本小册子增色不少,特此致谢。

刘佑昌

2011年11月

目 录

1	并非不速之客	1
1.1	世俗的时空观	1
1.2	牛顿的矛盾	6
1.3	神秘的以太	11
1.4	狭义相对论的诞生	19
2	时间-空间迷宫	25
2.1	动钟缓慢及动尺收缩	25
2.2	时间与空间的结合	31
2.3	速度的变换	36
2.4	既同时又不同时	40
2.5	航行到未来	46
2.6	前因后果	51
2.7	表观的超光速运动	55
3	新的物理大厦	59
3.1	质量是相对的	59
3.2	$E=mc^2$	64
3.3	能量与动量的结合	71
3.4	$\vec{f} \neq m\vec{a}$	80

3.5	颜色的变化	86
3.6	电量的分布	92
3.7	磁场与电场的统一	96
4	更上一层楼	103
4.1	不是多余的话	103
4.2	“惯性力”之谜	105
4.3	弯曲的时空	109
	参考书目	115

并非不速之客

“山雨欲来风满楼。”物理学中的每一场大变革，都是经过长期孕育的疾风暴雨。为了说明狭义相对论的诞生，还得从世俗的时空观谈起。

1.1 世俗的时空观

任何事物都不能脱开时间、地点而超然存在。所有的物质运动过程，不仅都需要时间，而且都要在空间这个“舞台”上来完成。即使描述一个最简单的自由落体或理想的抛物运动，也离不开空间坐标及时间变量(图 1-1)。因此，有关时间及空间的概念，在物理学中一直是极其根本、极为重要的。

自古以来，人们常常自觉不自觉地把时间及空间的概念绝对化，世代相传，沿袭至今(其所以如此根深蒂固，很重要的原因，是大家根据日常活动中的亲身体验，觉得时间和空间就是这样的)。当我们说，从北京到上海的班机飞行了 1 小时 50 分钟，这个时间不仅对北京机场、上海机场的人来说是这样，对机上的人员来说也是这样。按照牛顿的观点：绝对的、真正的及数学的时间，是自身在那里均匀地流逝

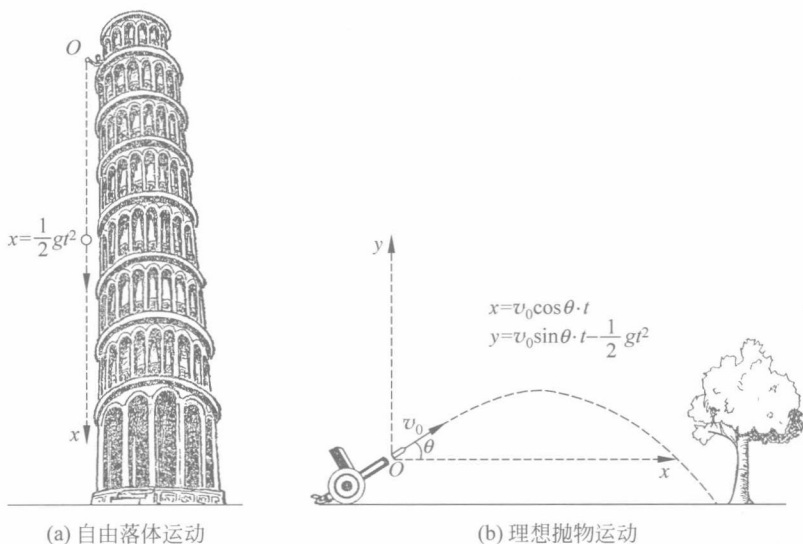


图 1-1 运动的描述

着,跟任何物质的运动无关,也跟观测者的运动状态无关。这叫做**时间的绝对性**。正是根据这种观点,才在所有的参照系里都使用着一个共同的时间变量,“同时”的概念是绝对的,事件发生的时间顺序也是绝对的。同样,某一距离的长度,无论在地面上测量,还是在飞机上测量,一般总认为测量结果是相等的,这就是**长度的绝对性或空间的绝对性**。对时间和空间的这种看法,叫做**绝对时空观**。

如果在地面上、飞机上都标出直角坐标轴,就可以通过它们的坐标之间的变换关系,将绝对时空的概念定量地表达出来。为此,设地面坐标系为 S ,飞机坐标系为 S' ,而 S' 对 S 的运动是沿着 x 轴正向以匀速 v 前进的,如图 1-2 所示。

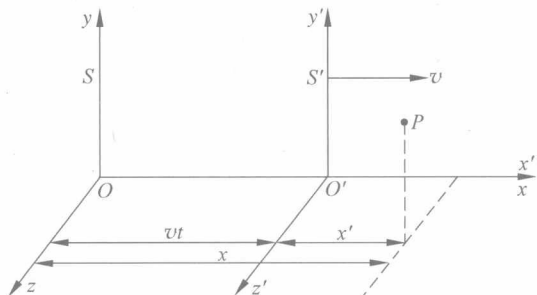


图 1-2 P 点的坐标变换

现在,让我们来研究图中任一点 P 的坐标变换。设 P 点在 S 系里的空间坐标为 (x, y, z) , 在 S' 系里的空间坐标为 (x', y', z') ; 若 $t=0$ 时, S 及 S' 的坐标轴正好一一对应重合, 则应有

$$\left. \begin{aligned} x' &= x - vt \\ y' &= y \\ z' &= z \end{aligned} \right\} \quad (1.1a)$$

或者反过来, 可以将它们写成

$$\left. \begin{aligned} x &= x' - (-v)t' \\ y &= y' \\ z &= z' \end{aligned} \right\} \quad (1.1b)$$

由于时间的绝对性, 其中

$$t' \equiv t \quad (1.1c)$$

式(1.1b)与式(1.1a)之间的对称形式, 反映了 S 与 S' 这两个坐标系之间的平等关系; 对 S' 系来说, S 系是以速度 $(-v)$ 沿着 x' 轴的正向运动的。这一组坐标变换式(1.1), 被命名为伽利略变换。伽利略(Galileo Galilei, 1564—1642)是科学的力学的奠基人, 主要由于他的工作,

实验方法及数学表达法才正式引用到力学中来。变换式(1.1)准确地说明了,时间及长度都是绝对不变量,即总有

$$\left. \begin{aligned} \Delta x' &= \Delta x \\ \Delta y' &= \Delta y \\ \Delta z' &= \Delta z \\ \Delta t' &= \Delta t \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

这里,有一点应该引起注意,就是在长度的测量中,如果被测物体与观测者之间有相对运动,一定要同时测定其端点的位置。只有这样,才能保证物体在运动方向上的长度具有确定的意义。正是在这个规定下,我们才得出了式(1.2)中的第一个等式。

若某个物体在一段短暂的时间 Δt 内,自 (x, y, z) 点运动到 $(x+\Delta x, y+\Delta y, z+\Delta z)$ 点,则它在 S 系里的速度分量为

$$u_x = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

$$u_y = \frac{\Delta y}{\Delta t}$$

$$u_z = \frac{\Delta z}{\Delta t}$$

相应地,它在 S' 系里的速度分量为

$$u'_x = \frac{\Delta x'}{\Delta t'}$$

$$u'_y = \frac{\Delta y'}{\Delta t'}$$

$$u'_z = \frac{\Delta z'}{\Delta t'}$$

因为在式(1.1)中 v 是一个恒量,应有

$$\Delta x' = \Delta x - v\Delta t$$

$$\Delta y' = \Delta y$$

$$\Delta z' = \Delta z$$

$$\Delta t' = \Delta t$$

从而得到

$$\left. \begin{aligned} u'_x &= u_x - v \\ u'_y &= u_y \\ u'_z &= u_z \end{aligned} \right\} \quad (1.3a)$$

或写成矢量形式

$$\vec{u}' = \vec{u} - \vec{v} \quad (1.3b)$$

这里的 \vec{u} 及 \vec{u}' 是同一物体分别在 S 系及 S' 系里的速度, 式 (1.3) 则表明了它们之间的变换关系; 其逆变换式就不写出了。显然, 速度的这一变换公式, 遵守通常矢量合成的平行四边形法则; 这个法则是大家所熟悉的。当船在江中行驶时, 其速度的变换关系如图 1-3 所示。

速度变换式 (1.3) 显示了速度的相对性, 即同一物体在不同的参照系里具有不同的速度。但是, 无论以地面为参照系还是以流水为参照系, 两条船之间的相对速度却仍然是一样的。例如, 设甲船对地的速度为 \vec{u}_1 (对流水则为 \vec{u}'_1), 乙船对地的速度为 \vec{u}_2 (对流水则为 \vec{u}'_2), 由式 (1.3b),

$$\vec{u}'_2 = \vec{u}_2 - \vec{v}$$

$$\vec{u}'_1 = \vec{u}_1 - \vec{v}$$

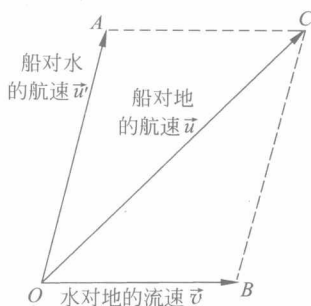


图 1-3 船速的变换

两式相减,就直接得出乙船对甲船的相对速度

$$\vec{u}'_2 - \vec{u}'_1 = \vec{u}_2 - \vec{u}_1$$

这表明了相对速度的绝对性;换句话说,在伽利略变换下,相对速度是一个不变的矢量。根据类似的推理,由式(1.3b)及式(1.1c),不难求得,加速度在这种变换下也是一个不变的矢量,即

$$\begin{aligned} \vec{a} &= \frac{\Delta \vec{u}}{\Delta t} \\ \vec{a}' &= \frac{\Delta \vec{u}'}{\Delta t'} \end{aligned} \quad \rightarrow \quad \vec{a}' = \vec{a} \quad (1.4)$$

总之,伽利略变换概括了几千年来人类对时空及运动的全部经验;不仅在相对论以前的物理学中,它起着根本的作用,即使在现代,人们在日常生活以及极其广泛的工程技术领域里,仍然受这种绝对时空观的支配。

1.2 牛顿的矛盾

在物理理论中,力学是最早成熟的一门学科。牛顿(I. Newton, 1643—1727)在前人工作的基础上,根据自己的研究



图 1-4 牛顿

成果,于 1687 年出版了他的代表作《自然哲学之数学原理》,它标志着第一个完整的力学体系的建立。在这本书中,牛顿选择了若干公理作为整个力学大厦的基石,其中包括了绝对时空的假定;并且将机械运动的基本规律,明确地总结成有名的牛顿三定律。

众所周知,在牛顿力学的理论体系里,其核心正是牛顿的三条运动定律;以此为出发点,经过严密的逻辑推理,可以导出一个又一个的力学定理。这些定理,极有成效地用于刚体、流体、振动、波动等机械运动的各个领域。

但是,作为普遍规律的牛顿定律,并不是在所有参照系里都是一律有效的!通常,在地面参照系里(忽略地球的自转效应),牛顿定律被认为是近似正确的;例如,矗立在道路两旁的楼房,它们所受的合外力为零,对地的加速度也为零。如果我们以行驶中的汽车为参照系,在车中来观察这些楼房,当汽车加速、减速或拐弯时,这些楼房相对汽车的加速度显然不为零,然而按照一般的理解,各个楼房所受外力的总和仍为零,这就与牛顿第二定律或第一定律(惯性定律)严重抵触。从而表明,不是所有的运动物体,都适于被选为运用牛顿定律的参照系。在物理学里,将牛顿定律在其中有效的那些参照系,叫做**惯性系**。

人们早就认为,宇宙万物都好像是处在一个绝对静止的大容器里。牛顿继承了这样一个古朴的思想,以这个无所不包的容器空间为绝对空间,而绝对空间则是一个最基本的惯性系。然而,不仅“绝对空间”不是唯一的惯性系,牛顿自己总结出来的力学规律,也丝毫反映不出这个容器的客观存在,应用动力学的知识,根本无法判定哪个惯性系是绝对静止的。

当火车平稳地匀速直进时,乘客在车内所进行的活动和有关的各种现象,与在地面上的一模一样,杯中的水面平整如镜,抛起的小球仍是直上直下运动的(图 1-5)。特别是,当车窗外还并列有另一列火车,这时,即使你向窗外看

去,也难以判断是哪列火车在动(相对地面)。这种现象,在我国是知道得很早的;东汉郑玄(公元127—200)注的《尚书纬·考灵曜》一书中就有这样的记载,其意为:地常动不止而人不知,譬如人在舟中闭窗而坐,舟行而人不觉。这些情况表明,在匀速直进的车、船中,其力学规律与地面上的完全一样;用物理学的语言来说,就是:相对于某个惯性系(如地面)作惯性运动的参照系(如上述的车、船),它们也都是惯性系,其中的机械运动都服从于牛顿定律。换句话说,牛顿力学对每一个惯性系都是一视同仁的,牛顿定律在所有惯性系里都有着同样的表达形式。



图 1-5 平稳行驶的火车中

首先,惯性定律理所当然地应该在各个惯性系中一律有效,因为惯性系正是由此而定义的。很明显,伽利略变换恰好适应了这一要求,如果图 1-2 中的 S 系是惯性系,则 S' 系一定也是惯性系:当某个粒子在 S 系里作惯性运动时,其速度 \vec{u} 为常矢量(即不随时间变化的矢量),由式(1.3),它在 S' 系里的速度 \vec{u}' 也一定是常矢量,反之亦然。这表明,在伽利略变换下,不会破坏惯性运动的基本特

征；任何一个惯性运动，仍将变换为惯性运动。

其次，在牛顿力学里，质量及力的概念也都是绝对的。牛顿将质量理解为“物质之量”，而物体所含有的物质之量不因其运动状态而改变，似乎是天经地义的。又如在时空的绝对观念中，宏观物体之间的相互作用力，也应该是一个不变量。例如，万有引力与作用双方之间的距离有关、弹性力取决于弹性体的形变，只要知道长度是不变量，就不难推知这些力都应该是绝对的；此外，固体在流体内的相对运动所受到的阻力，也由于体形、横截面积、相对速度和流体物性的绝对性，而是一个确定的量。若以 m 及 \vec{f} 分别表示质量及力，则

$$\left. \begin{aligned} m' &= m \\ \vec{f}' &= \vec{f} \end{aligned} \right\} \quad (1.5)$$

表明了它们的绝对性。由式(1.4)及式(1.5)，立刻可以得出：在所有惯性系里，牛顿第二定律都具有同样的表达式，即

$$\begin{aligned} \vec{f} &= m\vec{a} \\ &\downarrow \\ \vec{f}' &= m'\vec{a}' \end{aligned} \quad (1.6)$$

最后，应该谈一谈牛顿第三定律。两个相离物体之间作用力与反作用力的等值共线、同生同灭等概念，显然在任何一个惯性系里，都可以同样有效；但这些概念完全无视中间物质的存在，似乎力的传递既不需要媒介，也不需要时间。据说，牛顿自己也并不认为这种超距作用的概念是合理的。当然，他的万有引力定律毫不含糊地体现了超距作用观点，似乎彼此远离的星体能够

瞬时地传递它们之间的作用力，一定的位置关系，立即能反映出与之相应的引力作用来。这也许体现了牛顿的某些个性，他习惯于从现象出发，严格地尊重事实，善于归纳、推理，而不喜爱制造假说。

综上所述，作为古典力学基本规律的牛顿定律，确实在所有惯性系里都取同样的表达形式；由此可知，在机械运动的范畴里，没有任何一个惯性系优越于其他惯性系。当然，在具体处理某一个力学问题时，并不排斥人们去挑选一个有利于运算的惯性系作为参照系；例如，通常以地面为参照系是方便的，但这绝不意味着，在地面参照系里，力学规律的表达比在别的惯性系里要更为简单。从根本上说，在所有的惯性系中地面参照系并不处于独特的地位；依据同一道理，恒星参照系也不例外。因此，在牛顿力学中，绝对空间的假定在逻辑上是完全不必要的，我们也无法利用动力学的规律，来论证和检测它是否存在，这使牛顿陷入了一个不自觉的矛盾。

伽利略、牛顿的力学规律对所有惯性系一律有效，这常常被称为伽利略的力学相对性原理。其实，所谓力学相对性原理，它正好说的是力学规律的绝对性，即牛顿力学的基本定律在伽利略变换下是不变的。

尽管牛顿力学中有着很多绝对化了的物理概念，这种局限性却是人类在认识自然的过程中不可避免要出现的，并且在一定范围内，它们是客观世界的极好的近似模写，而力学的相对性原理所贯彻的各惯性系彼此平等的主张，则是物理思想宝库中的珍贵遗产，后来爱因斯坦在相对论中继承并发扬了这一思想。

1.3 神秘的以太

牛顿力学兴起之后,日趋完善,大至天体的运行,小到声波的振动,用它都能得到正确的结果;于是,以机械观来说明所有物理现象的倾向,风靡一时。不仅提出了分子的机械运动模型,用来解释有关冷热的现象,而且在光的波动说得势以后,很自然地将光波类比于声波;声波是靠媒质传播的,既然在地球上能看到遥远的星光,从而认为,宇宙中弥漫着一种无所不在的传光媒质。

这种想象中的宇宙媒质,被人们称为以太(是 Aether 的音译),其含义后来被理解为传播能量的媒介。虽然根据物体的弹性理论,很难协调以太所应具有的一些自相矛盾的属性,如密度极稀而弹性又足够大等,然而,长期以来,人们却认为这个不可思议的以太应该是存在的。

英国物理学家麦克斯韦(J. C. Maxwell, 1831—1879)在 19 世纪 60 年代全面总结了电磁理论,并确认光的辐射不过是电磁扰动的传播,却仍然以为存在着一种电磁以太的宇宙背景。在麦克斯韦的学说里,电磁场依附于电磁以太,电磁场的运动方程——麦克斯韦方程组(它们在电磁学里的地位,相当于经典力学中的牛顿定律),原来只是对以太参照系严格有效;电磁波的传播速率,也只是在以太中才严格地各向同性,即无论向哪个方

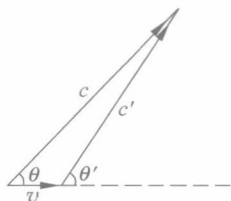


图 1-6 麦克斯韦

向发光,相对以太的光速都是同一个恒定值 c (约为 3×10^8 米/秒)。

根据传统的速度变换法则,光在其他惯性系里的速率,就会是各向异性的。设某惯性系 S' 相对以太的速度为 v , 见图 1-7, 则由式(1.3b), 光线(光能)在 S' 系里的传播速度 c' , 与它在以太中的传播速度 c 之间, 应有以下关系

$$c' = c - v$$



由余弦定理及三角函数关系, 不难写出

$$c^2 = c'^2 + v^2 - 2c'vcos(\pi - \theta') \quad (1.7)$$

$$\tan \theta' = \frac{c \sin \theta}{c \cos \theta - v} \quad (1.8)$$

式(1.7)是 c' 的二次方程, 求解后可得

$$c' = -v \cos \theta' + \sqrt{c^2 - v^2 + v^2 \cos^2 \theta'} \quad (1.9a)$$

这里舍去了不合理的负根。于是

$$\left. \begin{aligned} \theta' = 0 \text{ 时, } & c' = c - v \\ \theta' = \frac{\pi}{2} \text{ 时, } & c' = \sqrt{c^2 - v^2} \\ \theta' = \pi \text{ 时, } & c' = c + v \end{aligned} \right\} \quad (1.9b)$$

不同的 θ' , 对应于不同的光速 c' 。既然 S' 系里的真空光速不再是各向同性的, 其值也不再等于 c , 由此可以推知, 在以太参照系以外的其他惯性系里, 电磁场的基本规律不再能够严格地保持麦克斯韦方程组的表达形式。于是, 在所有的惯性系中, 以太系是一个特殊的惯性系, 只是在这个参照