

近代物理基础

JINDAI WULI JICHU

主 编 袁 泉

副主编 李 亮 张云竹



東北大學出版社
Northeastern University Press

近代物理基础

主 编 袁 泉

副主编 李 亮 张云竹

东北大学出版社

· 沈 阳 ·

© 袁 泉 2016

图书在版编目 (CIP) 数据

近代物理基础 / 袁泉主编. — 沈阳 : 东北大学出版社, 2016. 9

ISBN 978-7-5517-1409-9

I. ① 近… II. ① 袁… III. ① 物理学—高等学校—教材 IV. ① O41

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 227143 号

出 版 者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路三号巷 11 号

邮编: 110819

电话: 024-83687331 (市场部) 83680267 (社务室)

传真: 024-83680180 (市场部) 83680265 (社务室)

网址: <http://www.neupress.com>

E-mail: neuph@neupress.com

印 刷 者: 沈阳航空发动机研究所印刷厂

发 行 者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 185mm × 260mm

印 张: 11

字 数: 275 千字

出版时间: 2016 年 9 月第 1 版

印刷时间: 2016 年 9 月第 1 次印刷

策划编辑: 王兆元

责任编辑: 刘乃义

责任校对: 李 佳

封面设计: 刘江旸

责任出版: 唐敏志

ISBN 978-7-5517-1409-9

定 价: 35.00 元

《近代物理基础》编委名单

主 编 袁 泉

副主编 李 亮 张云竹

编 委 金玲玲 麻博远

李 义 敬晓丹

主 审 罗苏宁 韩 铁

前 言

历史进入 20 世纪以后,物理学理论开始伸展到微观高速领域。近代物理学是相对于以牛顿力学、热力学和麦克斯韦电磁学理论为核心的经典物理学而言的。近代物理内容非常丰富,并且还在不断地扩展出新的领域。本教材只对狭义相对论、量子力学的基本概念以及原子、固体、原子核的结构与主要性质做相关的介绍。

近代物理已经全方位渗透到科技领域,成为推动技术进步的主导力量和源泉。近代物理学的发展导致科学的分化和综合的同时,也引起了技术领域的分化和综合,从而形成了目前正蓬勃发展的高技术群:材料技术、信息技术、能源技术、生物技术、空间技术和海洋技术等。本书主要从光电传感技术、粒子加速器技术、激光技术、太阳能电池、真空与薄膜技术和超导技术等方面介绍近代物理理论应用。

本书由辽宁工业大学出版基金资助出版。

本书是在辽宁工业大学多年来使用的《近代物理讲义》基础上,根据原国家教委大学物理课程指导委员会制定的课程基本,由辽宁工业大学物理教研室部分老师编写完成的。在编写过程中,参考了清华大学出版社、高等教育出版社、科学出版

社、化学工业出版社等出版的相关书籍，在此一并表示感谢。

本书可作为高等工科院校和各类成人高等学校工科学生的学习教材。

由于时间仓促，水平有限，书中可能会有一些错误和疏漏，欢迎读者批评指正。

编者

2016 年 5 月

目 录

第一篇 近代物理学基础

第一章 狭义相对论 2

- § 1-1 伽利略变换和经典时空观念 2
- § 1-2 迈克耳孙-莫雷实验 4
- § 1-3 爱因斯坦狭义相对论的基本假设 洛伦兹变换 5
- § 1-4 相对论中的长度、时间和同时性 6
- § 1-5 相对论动力学基础 8

第二章 量子力学 12

- § 2-1 物质的二象性 12
- § 2-2 波函数及其物理意义 15
- § 2-3 薛定谔方程 16
- § 2-4 量子力学中的力学量 18
- § 2-5 海森伯测不准原理 22
- § 2-6 量子力学问题的两个简例 26
- § 2-7 量子力学对氢原子的描述 29
- § 2-8 原子的壳层结构与原子核 35

第三章 固体物理 39

- § 3-1 离子晶体 39
- § 3-2 其他类型的晶体 41
- § 3-3 晶态与非晶态固体 44
- § 3-4 金属自由电子气 45
- § 3-5 固体能带 52
- § 3-6 P 型半导体、N 型半导体、PN 结 57

第二篇 近代物理应用专题

第四章 光电传感技术 63

§ 4-1 传感器的概念 63

§ 4-2 传感器的组成 64

§ 4-3 传感器的分类 65

§ 4-4 传感器的选择程式与应用守则 66

§ 4-5 力学量传感器 69

§ 4-6 光纤传感器 75

第五章 粒子加速器技术 82

§ 5-1 加速器产生的背景 82

§ 5-2 粒子加速器的基本原理 83

§ 5-3 粒子加速器的应用 85

第六章 激光技术 95

§ 6-1 激光器的基本原理 95

§ 6-2 激光器 102

§ 6-3 激光技术的应用 108

§ 6-4 激光技术的发展 112

第七章 太阳能电池技术 114

§ 7-1 太阳能电池的原理 114

§ 7-2 太阳能电池的种类 120

§ 7-3 太阳能电池的发展进程及未来展望 122

第八章 真空与薄膜技术 126

§ 8-1 真空技术 126

§ 8-2 薄膜技术 138

第九章 超导技术	148
§ 9-1 超导体的基本性质	148
§ 9-2 传统超导体的唯象模型	150
§ 9-3 传统超导体的微观机制	152
§ 9-4 超导隧道效应	155
§ 9-5 两类超导体的基本特征	157
§ 9-6 高温超导体	160
§ 9-7 超导材料的应用	162
参考文献	165

第一篇 近代物理学基础

进入 20 世纪以后，物理学开始延伸到微观高速领域。近代物理学，大体上说，是相对于以牛顿力学、热力学和麦克斯韦电磁学理论为核心的经典物理学而言的。近代物理学的研究对象，包括各种聚集态物质的微观结构，原子、原子核、基本粒子等各个层次的内部结构以及它们的相互作用和运动变化的规律等。它的主要理论支柱是相对论和量子力学理论。近代物理学内容非常丰富，并且还在不断地扩展出新的领域，本篇只对狭义相对论、量子力学的基本概念以及原子、固体、原子核的结构与主要性质做简略介绍。

第一章 狭义相对论

相对论是 20 世纪物理学最伟大的成就之一。它标志着物理学的重大发展,使一些基本的物理概念发生了深刻的变革。狭义相对论从运动物体的电动力学出发,提出了新的时空观,建立了高速运动物体的力学规律和电动力学规律,揭示了质量与能量的内在联系。广义相对论从加速参照系与引力场等效的原理出发,提出新的引力理论,还进一步探索了引力场中的时空结构。相对论是许多基础科学以及现代工程技术不可缺少的理论基础。本章只对狭义相对论做简略的介绍。

§ 1-1 伽利略变换和经典时空观念

一、力学的相对性原理

在力学中,牛顿运动定律适用的参照系称为惯性系。一个参照系是不是惯性系,只能通过观察和实验来判断。另外,相对于已知惯性系作为匀速直线运动的任何参照系都是惯性系,牛顿定律对这样的参照系同样适用。也就是说,力学现象对一切惯性系来说,都遵从同样的规律,或者说在研究力学规律时一切惯性系都是等价的,这就是力学的相对性原理。

二、伽利略变换

经典力学中对力学的相对性原理有一个数学表达式,称为伽利略变换。说明如下。

设两个惯性参照系 S 和 S' , 相对做匀速直线运动, 设参考系 S' (比如一节火车车厢) 相对于参考系 S (比如地面上的火车站) 沿共同的 X 、 X' 轴方向做匀速 (速率为 v) 直线运动, 如图 1-1 所示。

设时间 $t=0$ 时, 两坐标系重合, 现在自 S 和 S' 对同一质点 P 的运动进行观测, 并且在任一时刻, P 点的坐标分别为 (x, y, z) 和 (x', y', z') 。根据图 1-1 分析, 显然有

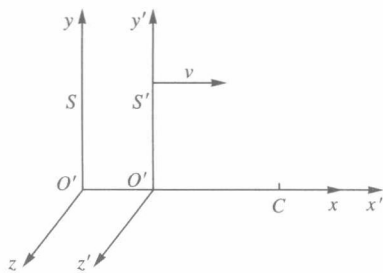


图 1-1 伽利略变换示意图

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

式(1-1)就是按经典力学自 S 和 S' 两参照系观察同一事件的坐标换算关系式, 称为伽利略坐标变换式。在这里要注意特定假设: $t' = t$ 。在经典力学里, 这是一个隐含假设, 并

且总认为它是毫无疑义的。

质点 P 在运动, 将 x, y, z 和 x', y', z' 对时间求导, 可得伽利略速度变换式:

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

式(1-2)和力学中讨论过的相对运动的速度变换公式是完全一致的。将式(1-2)对时间再求导一次, 可得

$$\left. \begin{aligned} a'_x &= a_x \\ a'_y &= a_y \\ a'_z &= a_z \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

写成矢量式, 即

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

式(1-4)表明: 自不同的惯性系所观察到的同一质点的加速度是相同的。这一事实也常说成是: 物体的加速度对伽利略变换是不变的。

如果自 S 和 S' 考查质点 P 的受力情况以及质点运动的经典动力学方程 (牛顿第二定律), 它们是完全相同的。或者说, 牛顿定律 $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$ 对伽利略变换是不变的。所以, 常把伽利略变换下的不变性说成是力学相对性原理在经典力学中的数学表达。但以后将会看到, 这二者是有本质区别的。

三、经典力学的时空观

前已指出, 在经典力学中隐含着 $t' = t$ 这个基本假定。因此, $\Delta t' = \Delta t$, 即在经典力学中, 不论自哪个惯性系来测量时间, 所得结果都是一样的。换句话说就是, 如果各个参照系中用来测量时间的标准相同, 比如都用某一原子的特征单色谱线的振动周期为时间的基本单位, 那么任何事件所经历的时间就有绝对不变的量值, 而与参照系的相对运动无关。

另外, 从 S 系和 S' 系测得某两点间的距离分别为

$$\begin{aligned} \Delta r &= \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2} \\ \Delta r' &= \sqrt{(\Delta x')^2 + (\Delta y')^2 + (\Delta z')^2} \end{aligned}$$

应用伽利略变换, 可知

$$\Delta r' = \Delta r$$

这就是说, 如果各个参照系中用来测量长度的标准相同, 比如都用某一原子的特征单色谱线的波长为长度标准, 那么空间任何两点间的距离也就有绝对不变的量值, 而与参照系的选择或观测者的相对运动无关。

用牛顿的话说: “绝对的真实的数学时间, 就其本质而言, 是永远均匀地流逝着, 与任何外界事物无关。” “绝对空间就其本质而言是与任何外界事物无关的, 它从不运动, 并且永远不变。” 这就是经典力学的时空观, 也称为绝对时空观。按照这种观点, 时间和空间是彼此独立、互不相关, 并且独立于物质和运动之外的某种东西, 这种绝对时空观可以形象地如下比拟: 把空间比作盛有宇宙万物的一个无形的永不运动的框架, 而把时间比作独立的不断流逝着的流水。实际上, 如果没有 $t' = t$ 这一假定, 伽利略变换就不成立, 并且从

$\Delta t' = \Delta t$ 和 $\Delta r' = \Delta r$ 出发就可直接推出伽利略变换式。所以可以说, 绝对时空的假定正是伽利略变换的基本前提。但是应该注意的是, 力学相对性原理却没有绝对时空观这一前提。这就是二者的区别所在, 不能把它们完全等同起来。

按照伽利略变换, 不同参照系的观察者所测得的时间间隔和空间距离都是绝对的不变量; 在经典力学中又把物体的质量看作常量, 即它不随观测者的相对运动而改变。所以时间、长度和质量这三个基本量在经典力学中都与参照系的相对运动无关。

§ 1-2 迈克耳孙-莫雷实验

由于经典力学认为时间和空间都与观测者的相对运动无关, 是绝对不变的, 所以可以设想, 在所有惯性系中一定存在一个与绝对空间相对静止的参照系, 即绝对参照系。但力学的相对性原理指出, 所有的惯性系对力学现象都是等价的, 因此不可能用任何力学的方法来判定不同惯性系中哪个是绝对静止的。那么能不能用其他方法 (比如电磁学方法) 来判定呢?

根据麦克斯韦电磁学理论, 凡是做加速运动的电荷, 必然以电磁波的方式向外辐射能量。电磁波在真空中的传播速度即光速 c 是一常量。有人从经典理论出发认为这个速度 c 就是光在绝对参照系中的速度。又由于当时人们认为, 电磁波是在所谓以太的介质中传播, 所以就把以太看作绝对空间的代表。如果有一惯性系 S' , 相对于绝对空间 (或以太) 沿电磁波传播方向以速度 u 运动, 那么自 S' 观测电磁波的传播, 其速度就应该是 $c' = c - u$ 。因此, 如果从地面一点 (地球是近似的惯性系) 来测量在不同方向上 (比如相互垂直的方向) 传播的光速, 那么由于地球的运动, 沿不同方向测得的光速将有不同的量值。这样, 就可借以判定地球相对于绝对参照系 (绝对空间或以太) 的运动, 从而找出绝对参照系。迈克耳孙-莫雷实验正是按这个思路设计的。

迈克耳孙干涉仪可对光波进行精密测量, 实验装置如图 1-2 所示。这个装置可绕垂直于图 1-2 所示平面的轴线转动, 并保持光程 $G_1M_1 = G_1M_2 = L$ 固定不变。设地球绝对参照系的运动自左向右, 速度为 u 。当装置处于图 1-2 所示的位置时, G_1M_1 与 u 垂直, 于是光束 1 在 G_1, M_1 间来回所经路线也与 u 垂直, 而光束 2 在 G_1, M_2 间来回所经路线则与 u 平行。可以证明, 光束 1 在 G_1, M_1 间来回所需时间 t_1 比光束 2 在 G_1, M_2 间来回所需时间 t_2 稍短。如把整个装置绕垂直于图 1-2 中的平面轴线转 90° , 光束 1, 2 所经路线正好互换, 于是光束 1 所需时间 t_1 就比光束 2 所需时间 t_2 稍长。因而在转动过程中, 就能从望远镜 T 中观察到干涉条纹的移动。经计算可得, 条纹移动数目为

$$\Delta N = 2Lu^2/(\lambda c^2) \quad (1-5)$$

迈克耳孙和莫雷在 1887 年所做的实验中, 使光束来回反射 8 次, 得到总路程 $L \approx 10\text{m}$, 所用光波波长 $\lambda \approx 500\text{nm}$, 再把地球公转速率 $u \approx 3 \times 10^4\text{m/s}$ 和光速 $c \approx 3 \times 10^8\text{m/s}$ 代入式 (1-5), 可得 $\Delta N \approx 0.4$ 。这比用迈克耳孙干涉仪可观察的条纹移动量 (约 0.01) 大得多。原以为按所设计的实验可观察到条纹的移动, 并指望由此判定地球的绝对运动。但出乎意料的是, 他们经过多次反复实验, 都未观察到条纹移动! 这个实验后来经许多人加以改进并反复做过, 都只能得到否定的结果, 也就是始终没有观察到地球相对于以太 (或绝对空间) 运动的效应。

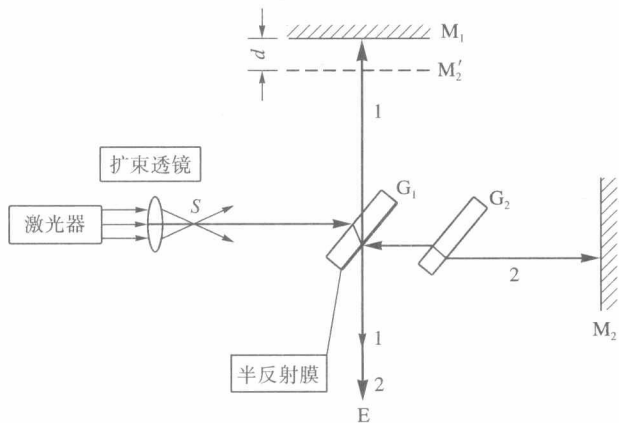


图 1-2 迈克耳孙-莫雷实验

当时许多科学家曾提出不同的假说来解释迈克耳孙-莫雷实验的结果,但很少有人怀疑伽利略变换的正确性,因而他们都失败了。以至 19 世纪末英国物理学家开尔文把这一悬案说成物理学晴朗天空边际的“一朵乌云”。

§ 1-3 爱因斯坦狭义相对论的基本假设 洛伦兹变换

一、爱因斯坦假设

爱因斯坦在 1905 年发表的论文《一朵物体的电动力学》中,肯定了相对性原理的重要地位,以新的时空观指明了与伽利略变换相联系的旧时空观的局限性,并创立了相对论力学和相对论电动力学,这在物理学史上是继牛顿和麦克斯韦之后的又一巨大贡献。

爱因斯坦提出了以下两个基本假设。

(1) 相对性原理:物理学定律在所有的惯性系中都是相同的。也就是说,物理学定律与惯性系的选择无关,所有的惯性系都是等价的。

(2) 光速不变原理:在所有惯性系中,自由空间(真空)中的光速具有相同的量值 c 。也就是说,不管光源与观察者之间的相对运动如何,在任一惯性系中的观察者所观测的真空中的光速都是相等的。

第一个假设肯定了一切物理定律(包括力、电、光等)都应遵从同样的相对性原理,可以看出,它是力学相对性原理的推广。它也间接地指明,不论用什么物理实验方法都不能找到绝对参照系。也就是说,绝对静止的参照系是不存在的。第二个假设与实验结果(包括迈克耳孙-莫雷实验和其他相关的实验)一致,但显然与伽利略变换不相容。这一假设隐含着—个前提:对于电磁波的传播来说,真空是各向同性的。这是与实验一致的,否则,沿不同方向的光速 c 就会有不同的值。爱因斯坦以这两个基本假设为基础,导出了能正确反映物理规律的相对性变换式,在此之前,洛伦兹在承认以太的基础上,也曾提出这一套变换式,故称为洛伦兹-爱因斯坦变换(简称为洛伦兹变换)。

二、洛伦兹变换

早在迈克耳孙-莫雷实验以前,就有物理学家注意到,在伽利略变换下麦克斯韦方程组

的形式不是不变的。即,如果承认伽利略变换的正确性,那么麦克斯韦方程组只能对某一特殊惯性系成立。迈克耳孙-莫雷实验证明了真空中的光速不变,实质上是证明了不存在这种特殊的惯性系,从而突出了光速不变原理与伽利略变换之间的不可调和的矛盾。19世纪末,荷兰物理学家洛伦兹在研究运动媒介中的电动力学时,提出了一套坐标变换公式来代替伽利略变换,称为洛伦兹变换。

对于图 1-1 所示的两个惯性系 S 和 S' , 洛伦兹求出同一事件的两组坐标 (x, y, z) 和 (x', y', z') 之间的关系是

$$\begin{cases} x' = \gamma(x - ut) \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = \gamma\left(t - \frac{u}{c^2}x\right) \end{cases} \quad \text{或者} \quad \begin{cases} x = \gamma(x' + ut') \\ y = y' \\ z = z' \\ t = \gamma\left(t' + \frac{u}{c^2}x'\right) \end{cases} \quad (1-6)$$

式中, $\gamma = 1/\sqrt{1 - u^2/c^2}$ 。

洛伦兹证明了在此变换下麦克斯韦方程组的形式保持不变。1900 年,拉莫尔用此变换成功地解释了迈克耳孙-莫雷实验。但他们仍保留以太或绝对参照系的看法,把 u 看成相对于以太参照系的速度,对洛伦兹变换的解释也与爱因斯坦所做的解释不同。爱因斯坦从两个基本假设出发,认为洛伦兹变换是能正确反映客观实际的变换,并与力、电等一切物理规律相协调;而一个物体相对于以太或绝对参照系的运动是找不出的,这正是爱因斯坦对时空概念的一次革命性突破。

洛伦兹变换式完全可以由爱因斯坦的两个基本假设直接推出,因此可以说,在洛伦兹变换下,各种物理规律的不变性就具体表达了爱因斯坦的相对性原理。

这里要注意的是, t' 是 t 和 x 的函数, t 是 t' 和 x' 的函数,即 t 和 t' 不再是与空间坐标无关的。由此可知,时间的测量,将由于选择的惯性系不同(或观察者的相对运动)而有不同的结果。

对于低速情况, $u \ll c, \beta \rightarrow 0, \gamma \rightarrow 1$, 不难看出

$$\begin{cases} x' = x - ut, & y' = y, & z' = z, & t' = t \\ x = x' + ut, & y = y', & z = z', & t = t' \end{cases}$$

这就是前面讲过的伽利略变换式。因此,伽利略变换是洛伦兹变换在低速下的极限形式。

§ 1-4 相对论中的长度、时间和同时性

本节将从洛伦兹变换出发,讨论长度、时间和同时性等基本概念。从所得结果可以更清楚地认识到,狭义相对论对经典的时空观进行了一次十分深刻的变革。

一、长度收缩

设有两个观察者,从各自的惯性系 S 和 S' 对一刚性棒的长度进行测量。已知这根棒沿 X 和 X' 轴放置,并相对于 S' 系静止不动。设 S' 系中的观察者测得棒两端点的坐标为 x'_1 和 x'_2 , 可知棒长 $L_0 = x'_2 - x'_1$ 。对 S 系中的观察者,则必须在同一时刻 $t = \tau$ 测得该棒两端点的坐标,设分别为 x_1 和 x_2 , 那么棒的长度即为 $L = x_2 - x_1$ 。由洛伦兹坐标变换式,有

$$x'_1 = \gamma(x_1 - u\tau), \quad x'_2 = \gamma(x_2 - u\tau)$$

所以

$$L_0 = x'_2 - x'_1 = \gamma(x_2 - x_1) = \gamma L$$

故

$$L = L_0 / \gamma \quad (1-7)$$

也就是说,与棒有相对运动的观察者测得棒的长度 L , 要比棒相对静止的观察者测得棒的长度 L_0 短一些。

由此可见,长度测量值与被测物体相对于观察者的运动有关。观测者与被测物体相对静止时,长度的测量值最大,称为这个物体的固有长度。观测者与被测物体有相对运动时,长度的测量值等于其固有长度的 $1/\gamma$ 倍,即物体沿运动方向缩短了。这种收缩效应是 1892 年洛伦兹和斐兹杰惹为了解释迈克耳孙-莫雷实验的结果而各自独立地提出的假说。一般也称为洛伦兹-斐兹杰惹收缩。但需指出的是,他们的假说是在承认绝对静止的参照系(以太)的观点下提出的,认为所有物体在相对于以太运动时,在其运动方向上都有此收缩效应。至于在狭义相对论中,则肯定所有的惯性系彼此间都是等价的,不承认有绝对静止的参照系;一个被测物体的长度,在与之相对静止的惯性系中测量到的是它的固有长度,而在其他惯性系中测量时都有收缩效应。由狭义相对论基本假设推导出洛伦兹变换,由洛伦兹变换推论出“长度收缩”这一结论,在新时空观的理论体系上看,这个结论显得自然而又合理。

二、时间膨胀

现在考虑自 S 和 S' 两惯性系观察两个事件的时间间隔 Δt 和 $\Delta t'$ 之间的关系。设一事件在 S' 系中某点 $x' = \xi$ 处发生,用固定在 S' 系中的时钟来量度,这个事件发生于 t'_1 时刻;另一事件也在 $x' = \xi$ 处发生于 t'_2 时刻,两者之间的时间间隔为 $\Delta t' = t'_2 - t'_1$ 。而从固定在 S 系中的时钟来量度时,前一事件在 t_1 时刻发生于 x_1 处,后一事件则在 t_2 时刻发生于 x_2 处,而 $t_1 = \gamma\left(t'_1 + \frac{\beta}{c}\xi\right)$, $t_2 = \gamma\left(t'_2 + \frac{\beta}{c}\xi\right)$, 所以 S 系中对两事件所量度出的时间是

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \gamma(t'_2 - t'_1) = \gamma\Delta t'$$

也就是说,从与事件发生的地点做相对运动的惯性系中所量度出的时间(称为固定时间)相比,要延长一些。用 τ_0 表示固有时间,应有 $\Delta t' = \tau_0$, 所以

$$\Delta t = \gamma\tau_0 \quad (1-8)$$

换句话说,一时钟由一个与它做相对运动的观察者来测量时,就比由与它相对静止的观察者观察时走得慢些。

注意:时间膨胀或时钟进程的延缓,完全来自相对性时空效应,与钟表的具体运转无关。并且不仅对时钟(包括摆的振动周期或晶格振荡的频率等)如此,对一切生长变化的进程(包括生物钟,如心跳的频率等)也如此。

三、同时性

按照牛顿力学,时间是绝对的,因而同时性也是绝对的。这就是说,在同一个惯性系 S 中观察同时发生的事件,在别的惯性系 S' 看来也是同时发生的。但按照相对论,正如长

度和时间不是绝对的一样,同时性也不是绝对的。设自惯性系 S 给出 A, B 两事件分别在 a, b 两点处同时发生, a, b 两点相距 $\Delta x = x_b - x_a \neq 0$, 而两事件发生的时间间隔 $\Delta t = t_B - t_A = 0$, 或 $t_A = t_B$ 。若 S' 系相对于 S 沿 X 轴方向以速度 u 运动, 根据洛伦兹变换, 可得自 S' 系观测到 A, B 两事件发生的时间间隔为

$$\Delta t' = t'_B - t'_A = \frac{\gamma u}{c^2} (x_a - x_b) \neq 0$$

即, 自 S' 系观察, A, B 两事件就不是同时发生的。因为按照洛伦兹变换, t' 不只与 t 有关, 也与空间坐标 x 有关。所以, 凡是自一个惯性系观察到是同时但在不同地点发生的事件, 自另一个惯性系观察就不会是同时发生的。经过简单的分析, 还可以看出, 如果在一个惯性系 S 中既不同时也不同地发生的两事件, 满足 $\Delta t - \frac{u}{c^2}(\Delta x) = 0$ 的条件, 即 Δt 正好等于

$\frac{u}{c^2}(\Delta x)$, 则根据洛伦兹变换可得 $\Delta t' = 0$ 。也就是说, 自以速度 u 做相对运动的另一惯性系 S' 观察, 倒可看到是同时发生的。但是, 在一个惯性系中同时同地发生的事件, 在别的惯性系中一定是同时的。

注意: 在相对论中, 尽管同时性只有相对的意义, 但由于光速是物体运动速度不可逾越的极限, 因而事件的因果顺序决不会因参照系的不同而颠倒。设在 S 系中, t 时刻在 x 处的质点经 Δt 时间到达 $x + \Delta x$ 处。根据洛伦兹变换 $t' = \gamma \left(t - \frac{u}{c^2} x \right)$, 故

$$\Delta t' = \gamma \left(\Delta t - \frac{u}{c^2} \Delta x \right) = \gamma \Delta t \left(1 - \frac{u}{c^2} v \right)$$

这里, v 是质点运动的速度, 所以 $\Delta t'$ 必与 Δt 同号。即有因果联系的事件, 其先后顺序仍然是不可逆的。

§ 1-5 相对论动力学基础

前面讲过, 物体的加速度和绝对力学基本定律 (牛顿第二定律) 在伽利略变换下都是不变的, 伽利略变换只不过是一切物理定律所必须满足的洛伦兹变换在 $u \ll c$ 情况下的近似。因而一个正确的力学定律必满足下面两个前提: (1) 它在洛伦兹变换下是不变的; (2) 在 $u \ll c$ 的极限情况下, 它就还原为绝对力学的形式。

一、相对论中的动量和质量

先看力学中的一个基本物理量——动量。在经典力学中, 物体的动量定义为其质量与速度的乘积: $\mathbf{P} = m\mathbf{v}$, 这里, 质量 m 是不随物体运动状态而改变的恒量。动量守恒定律是经过大量实践检验的一个基本规律, 它在伽利略变换下对一切惯性系都成立。实际计算指出, 在狭义相对论中, 如果动量仍然保留它在经典力学中的定义, 并且质量也是不随物体的运动状态改变的恒量, 那么动量守恒定律在洛伦兹变换下就不能对一切惯性系都成立。

力学中这么重要的一个基本定律, 却不能与相对性原理相容, 说明在相对论中, 或者是动量的经典定义必须修改, 或者是“质量不随运动状态改变”的看法必须放弃。理论分析和观察实验都证明, 可以在形式上仍把动量写作 $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$, 但考虑到质量随物体运动速度