

## 现代物理学基础的思考之三——《狭义相对论的思考》目录

李学生 (Li Xuesheng)

山东大学副教授, 理论物理教师, 中国管理科学院学术委员会特约研究员, 北京相对论研究联谊会会员, 中国民主同盟盟员 (作者为中国科学院高能物理所研究员)

[xiandaiwulixue@21cn.com](mailto:xiandaiwulixue@21cn.com), [1922538071@qq.com](mailto:1922538071@qq.com)

**摘要 (Abstract):** 物理学是科学的基本学科。本文章分析探讨了现代物理学的重要问题, 广义相对论, 供参考。

[李学生 (Li Xuesheng). 现代物理学基础的思考之三——《狭义相对论的思考》目录. *Academ Arena* 2017;9(14s): 1-115]. (ISSN 1553-992X). <http://www.sciencepub.net/academia>. 1. doi:[10.7537/marsaaj0914s1701](https://doi.org/10.7537/marsaaj0914s1701).

**关键词 (Keywords):** 质点; 电荷; 引力; 电力; 空间; 方程; 量子力学; 广义相对论

## 第一章: 经典物理学的几个问题

- 1、伽利略相对性原理
- 2、惯性的认识
- 3、伽利略变换光速的测量
- 4、场概念的兴起
- 5、以太论的复兴
- 6、光速的测量
- 7、迈克尔逊实验

## 第二章: 洛伦兹变换的思考

- 1、狭义相对论产生的背景
- 2、狭义相对论的产生以及科学界最初的反应
- 3、Lorentz transformation 经典物理推导方法
- 4、同时性的相对性
- 5、Lorentz transformation 的相对论推导
- 6、狭义相对论的时空变换
- 7、狭义相对论中的质量与能量
- 8、速度合成公式的思考
- 9、狭义相对论的意义

## 第三章: 狭义相对论的时空观

- 1、四维时空问题
- 2、狭义相对论中的绝对问题
- 3、**相对论与约定论的关系初探**
- 4、狭义相对论与以太
- 5、狭义相对论的时空变换效应

## 第四章: 狭义相对论的实验验证

- 1、质速关系的验证
- 2、运动物体在运动方向上的收缩效应
- 3、光行差效应的解释
- 4、运动物体的时钟延缓效应
- 5、相对论多普勒公式的验证
- 6、相对性原理的验证
- 7、真空光速不变性原理的验证
- 8、光速与光源速度无关的验证

## 第五章: 时空平权理论

- 1、爱因斯坦的探索性科学假设在科学研究中的重要性

- 2、经典力学中时空对称性问题
- 3、狭义相对论中的时空对称性问题
- 4、广义相对论中的时空对称性问题
- 5、量子力学中的时空对称性问题
- 6、时空平权理论
- 7、时空平权与多普勒效应
- 8、时空平权的相对性

#### 第六章：狭义相对论的困难

- 1、物理学界对于狭义相对论的批判
- 2、狭义相对论天空中“两朵乌云”
- 3、对于光速不变性原理的争论
- 4、对于洛伦兹变换的争论
- 5、Lorentz transformation 的困难
- 6、狭义相对论的局限性

#### 第七章：狭义相对论的哲学观浅议

- 1、物理学家对于狭义相对论发展的思考
- 2、狭义相对论对于哲学发展的影响
- 3、狭义相对论对于现代物理学理论结构的影响
- 4、狭义相对论中相对与绝对问题
- 5、光速不变性原理与唯物辩证法关系的思考
- 6、狭义相对论与唯物辩证法的关系初探

#### 第八章：狭义相对论困难的思考

- 1、狭义相对论效应与加速度之间的关系
- 2、Lorentz transformation 的修正
- 3、狭义相对论效应与广义相对论效应的统一
- 4、爱因斯坦早年的哲学观
- 5、洛伦兹变换是动力学效应
- 6、修正后的洛伦兹变换的实验验证问题
- 7、几个狭义相对论验证实验的重新分析
- 8、同时性的绝对性
- 9、虚速率及其存在下的相对论

### 第一章 经典物理学的几个问题

#### 1、伽利略相对性原理

相对运动概念在应用到自由度很大甚至无限大的系统时就会受到限制。可是只要我们回到那种不可分割的，整体连续的表面，只要我们放弃单个物体位置和运动的参数变化以及为些所必备的坐标系，那么绝对运动和相对运动的对立就被撤消了。对某一宏观体积中质点的热运动来说，相对性的概念就没有什么用途。不过当我们规定系统的自由度不太大，并且可以不间断地记录每一质点的位置和速度，那么相对性的概念还可以保持下来。这样，要是可以把宇宙气体（不去研究里面个别质点的位置和速度）同连续介质组成一体的话，牛顿的绝对空间或许就获得唯理论的意义。当绝对空间具有洛伦兹那种全部充满空间以太的特征的时候，绝对空间也同样会获得唯理论的意义。（尽管已为后来的一系列实验所驳倒）

在物理学中，力学的终极概念得到了因果解释。对物理学来说，力的概念（力场的概念）是个必须加以分析的概念。物理学确定了力的数值，在个别情况下，当质点无摩擦地运动时（即摩擦力可以忽略时）力可以是坐标的函数。这种函数的形式应由引力论、弹性理论、电动力学理论中对引力、弹性力、电力、磁力的研究给出，并且这种研究与力学不同，完全按另一种方式进行，这些力已不再是终极概念，恰恰相反，现代科学的任务正是要用物理的或数学的方法把它们从另外的量推演出来。

划分物理学和力学的界限也就把场方程和运动方程加以区分。或许正如前面所指出的那样，既然忽略了离散存在质点和场的相互作用，所以场方程和运动方程都是线性的。在用抽象的理论认证某个质点的时候在力学上就把这个质点看成是一种纯属被动的实体，而力也就施加在它上面，同时又和这个质点本身无关，这

也正是解决力学问题的前提。在场论中力场被相应地看成所谓被动的一面，看成是不依赖于场的粒子（即场源）的函数。根据力来确定运动，根据力与坐标的关系确定力是牛顿在《自然哲学的数学原理》中所提出的两个问题。在解决第一个问题时，牛顿依据的是他所阐明的运动公理。同时在《原理》中还解决了另一个问题，确定了把力（引力）和坐标联系起来的形式。如所周知，这是古典物理学的出发点。以后物理学的其他部门就是按牛顿的引力场的式样构成的。

在物理学发展的影响下，当力学把标量也包括到自己的基本概念之中的时候，已知力和初始条件就能决定质点位置的牛顿运动方程将要被另一种方程所取代。

就科学思维能力和风格的影响来说只有极少数的科学发现可以同广义坐标方法相提并论。把空间中质点的位置，即古典力学的原始的形象和被当成是多维“空间”的点的系统的位形相对应，从几何的观点来说这是在拉格朗日把四维时空引入科学之后所采取的下一个步骤。当达朗贝尔在《百科全书》【4】的度量一文中写到他的一些“机敏的熟人”把时间看成是第四维时候，他可能就是指拉格朗日和其他一些人。但是，把第四维的概念引入科学还是当拉格朗日在《分析力学》中用四维解析几何的形式阐明古典力学原理之后。也正是由于《分析力学》才把  $n$  维空间的观念引入到科学之中。多维空间的理论由于柯西 (Cochy)、凯尔【5】、普留凯尔 (Pluker)【6】、黎曼 (Reimmsnn)，特别是格拉斯曼 (Grassmaum)【7】之在《广延性的理论》【1】(1844) 中的努力在形式化方面得到了很大发展。这一发展以新的、有力的研究方法丰富了数学的内容，使变革几何学的原理成为可能，同时为相对论，量子力学准备了富有成效的多维几何学的解释。

推动这一发展的首要因素就是拉格朗日把力学系统的状态看成是多维空间的点这一天才的设想和促使数学家继续建立形式化理论的观念，然而，此时不能把物理思想的概念和形式化的理论体系的概念单纯地加以对应。从历史上来说，这种单纯地与形式化的理论体系的概念相对应既是十八世纪后半期和十九世纪前半期形式化理论体系物理学从力学和力学概念的发展中获得解放的重要前题，有时也是重要的方面，而力学概念的发展也刺激了这种解放。

拉格朗日研究了由  $n$  个质点构成的系统。这些质点的位置用  $n$  个因子来描述，每因子又由三个数组成，则位置即被  $3n$  个坐标  $x_1y_1z_1, x_2y_2z_2, \dots, x_ny_nz_n$  来描述。如果通过具有相应下标的  $q_1, q_2, \dots, q_n$  表示上述每个坐标，那么系统的位形就可以用具有  $3n$  个坐标  $q$  的点来代表，或者说用具有  $3n$  个分量的矢量  $q$  来代表。这样，系统从一个位置到另一个位置的变化就可以表示为  $q$  点的位移，或表示为具有分量  $dq_1, dq_2, \dots, dq_n$  的  $3n$  维矢量  $dq$ 。假若系统在三维空间中运动，它的位置的变化可以用  $3n$  维的轨迹来代表，而  $3n$  维轨迹则是  $q$  点位移的结果。

在拉格朗日的力学中，广义坐标不仅可以是质点系的笛卡尔坐标。而且也可以是描绘该系统位形的任何一种参数。对一个受到引力或弹性力作用的质点系统来说，每一时刻作用在系统中各点上的力（因而也就是加速度）由广义坐标所决定。物体的速度不影响加速度，并且当已知系统位形时，速度有可能取不同的值。如果速度可以取不同的数值，那么，即使已知加速度（即力），下一时刻系统的位形也是不确定的。所以为确定系统在未来每一时刻的行为不仅必须给出已知时刻的坐标，而且还要给出速度。有这两种量就可以详尽无遗地描述出系统的状态。

状态的概念是同古典物理学的基本前提紧密相关的，这一点要引起注意。当我们从原始的、直接给出的、不可分割的混乱的图景中区分出个别的物体和运动的时候，我们是把在空间中改变自己位置的物体的一系列自身同一的状态认为是某种过程，这是力学最原始的表象。力学之原始形象则是坐标随时间改变的自身同一的物体。坐标的变化并不能为怀疑运动客体与自身同一提供任何根据。我们完全可以“识别出”在每一个相继时刻的物体。这一力学的基本前提（运动客体的自身同一性）是以坐标的连续变化加以保证的。倘若原则上能够把物体在一个位置和另一位置的间隔上的每一个点都记录下来，那么就可以断言出现在我们面前的是同一个物体。物理客体这种个体性（在上述情况下运动客体的个体性）是由每一个接继的状态同已知状态的单值的依存关系所保证的，也就是说可以由以下这种可能性所保证；即知道物体在某一时刻的状态就可以预见每一个相继时刻的状态（同样是原则上的）。这样，所谓状态这一概念标志若干物理量的综合，而这种综合以单值的形式同每一个相继时刻的，每一个相似的综合联系在一起。根据这种状态的连续性和单值的依存关系就可推出运动的微分方程。当已知初始条件时借助此方程就能绝对准确地预言物体以后的全部运动。在把这种关系运用于物体系统时，拉格朗日就把力学系统的个体性和自身同一性这些具有质的特征的概念，翻译成分析的语言，而这些概念则是由它们和状态之单值的连继的依存关系所保证。引入广义坐标和广义速度（公式）后运动微分方程表现出古典机械论的决定论的观念。

现在我们讨论一下为描述或者说为预见系统后继状态所必须的广义坐标（和广义速度）的数目问题。假若系统由一个质点构成，此时广义坐标和普通坐标一致，即广义坐标数  $f$  等于 3。若系统有两个质点，那么

需要 6 个广义坐标,  $f=6$ , 即第一个质点要三个普通坐标, 第二质点也是三个。若这两个质点彼此是以不变的距离相联系(即有一个约束条件)这时有 5 个广义坐标就足够了。数  $f$  总等于系统自由度。每个质点在三维空间要三个数,  $n$  个质点的自由度是  $3n$  减去  $K$  个约束条件  $f=3n-K$ 。给出与广义坐标数目相同的广义速度, 不仅可以确定位置, 也可以确定系统状态。

借助于广义坐标对任何计算系统都能够求得运动方程。拉格朗日在引入了函数  $L(q, \dot{q}, t)$  (等于封闭系统的动能和势能之差) 之后, 得到了运动方程。后来赫姆霍茨称这个函数为动势。用动势(拉格朗日函数)

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0$$

把运动方程改写为下形式:

所论系统有多少个自由度 ( $f=3n-K$ ), 就有多少个拉格朗日方程。

在引入广义坐标  $q_i$  和广义速度  $\dot{q}_i$  之后, 下一步就是引入广义动量  $p_i$ , 它是拉格朗日函数  $L$  对广义

速度  $\dot{q}_i$  的一阶导数。
$$p_1 = \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_1}, \quad p_2 = \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_2}, \quad \text{等等}$$
 $p_i$  被叫作广义动量是因为在笛卡尔坐标系中 ( $q_1=x, q_2=y, q_3=z$ ) 它与动量在三个坐标轴上的投影一致。然而它被称之为广义动量这是因为例如在极坐标中  $q_1=r, q_2=\phi$ ,  $p_1$  具有动量的量纲, 而  $p_2$  具有动量矩的量纲。

借助于广义动量可以得到替代  $f$  个拉格朗日方程(二阶)的  $2f$  个一阶方程。如果用哈密顿函数  $H=T+U$  代替拉格朗日函数, 这些方程就可以采取极为简单的对称形式。

拉格朗日方程和哈密顿方程在物理学中特别是在电动力学中获得广泛地应用。可是从历史的观点上来看, 物理学在此情况下从力学中所得到的东西正是它向力学所提供的东西。当非力学的参量能够以坐标的身份出现时, 这种被推广后的运动方程的形式就成为物理学发展的历史成果了。

物理学的影响使力学的基本原理相对性原理改变了形式。我们先来看看牛顿运动方程。在它里面作为纯力学量出现的是质点的空间坐标。质点相对于某个坐标系运动, 并且在坐标变换时, 即从一个惯性系过渡到另一个惯性系时, 运动方程是协变的。下面再看具有广义坐标的拉格朗日方程。它可以描述其他非力学的过程。当坐标变换时拉格朗日方程是否还保持协变性呢? 麦克斯韦的电动力学和以后的 Einstein 相对论指出: 如果所论系统是匀速直线运动, 则方程是协变的。这样一来, 相对性原理就推广到非力学的过程, 并且使古典物理这获得了最终的形式。当然古典物理学为此是要付出代价的, 这就是说要放弃不变的空间距离和时间间隔, 而代之以不变的四维间隔。此时相对性原理仍旧是统一宏观物理学和力学的普遍原理。从这种意义上说相对论是世界之古典图景的总结。不过这种情况下, 力学规律是否还能保持原来那种基本的, 作为出发点的, 最普遍规律的地位吗? 虽然一方面不能把物理学归结为力学规律然而另一方面物理学原理又无法同力学规律分割开来。

当谈到区分力学和物理学, 谈到物理学不能归结为力学的特性, 总而言之, 说到它们之间的相互关系的时候, 必须考虑到“力学”的概念和“力学的”概念本身在历史上的变化。这两个词的含意是在变化着的, 并且随着物理思想的改变而改变。力学发展的每一个历史阶段都是以被物理思想所决定的终极概念区别于另一个历史阶段。而这种物理思想总要直接影响到力学的特性。笛卡尔力学的物理前提是空间和物质的同一。牛顿力学的物理前提是作用于自然界所有物体的引力概念。骤然看来在拉格朗日和哈密顿力学中, 似乎缺乏物理前提, 力学只具有四维解析几何的形式化的性质, 但是这只是意味着从物理上解释方程时, 它里面的量可以和被守恒定律所联系的不同的物理量相对应。狭义相对论的力学是同新的物理前提电动力学的概念和规律联系在一起的。

这样, 当我们谈论把这样或那样的物理学原理能够归结或不能够归结为力学的时候, 不仅应该考虑到在物理学中力学概念这样或那样的作用, 还要考虑到物理学概念对力学的影响。单纯地把“非力学的物理”和“力学的物理”加以对比就会忽视了那种相互作用。实际上物理学同力学间的联系是很曲折的, 必须以这种态度来研究相对论物理之力学的和非力学特性的问题。

是否可以把这些概念在历史的所有的变更都归拢在一起进而从整体上对“力学”和物理学的“力学的”



特性加以讨论呢？我们要把这个问题放在同其他问题的联系中加以考察，这就是说最好把全部历史的变更都归拢在一起来讨论相对性原理，或者说讨论适用于伽利略牛顿的古典原理和 Einstein 的狭义，广义相对论的，普遍的相对性概念。伽利略牛顿原理适应于缓慢的惯性运动；狭义相对论适用于可以和电磁振荡传播的速度相比拟的惯性运动；广义相对论适用在引力场中质点或质点系的加速运动。上述情况都是指坐标以这样或那样的方式随时间而变化；都是指某种被个体化的，在每一时刻定域于空间中的物理客体，而此客体在保持自身不变的同时从空间的一个点转移到另一个点。换言之，这里所研究的正是自身同一客体的一个个相继的处所。这个客体能够以任意速度（古典的相对性原理）或以被某个恒定的（狭义相对论）或以引力场所决定的（时空弯曲、广义相对论）的速度通过这些处所。无论取那一种观念只要指明自身同一客体相对它作运动的那个物体，则自身同一客体运动的概念就是有意义的。这些参考物和相应的坐标空间都是平等的，即从一个坐标空间过渡到另一个坐标空间时，某些量要保持不变（相应的变换不变量），也就是说这种过渡并不表现在运动着的系统内部的物理过程的进程之中。这个论题（即能否提所谓位置、速度、加速度的相对性）能够用到哪种坐标变换上面还应当由实验指出，把现已知晓的相对性理论都归拢起来这才是相对性原理的意义所在。

现在我们着手总结力学的概念了。在笛卡尔的力学中，所谓物体的运动是指从物理学上区别于周围的物体运动。当笛卡尔把物体对与其相接触的空间的运动归咎为空间，他这种做法则是力求把物体从环绕它的空间划分出来，又要把二者视为同一。牛顿认为运动的物体有不变的惯性质量，因此他能够不考虑物体的长、宽、高而把物体看成是质点具有一定质量的，不计尺寸大小的粒子。拉格朗日和哈密顿方程可以描述很复杂的客体的运动，它的自身同一性和个体性是以复杂的解析表示的不变性所保证。在相对论力学中所表现的是视为同一质点的属性的极为复杂的关系。但是所有情况，无论是具有静止质量的粒子还是用能量作为视为同一根据的光子，在较为广阔的普遍的意义上来看力学所研究的还是粒子和系统的相对运动。从这种意义说，每一个相对论的坐标表象其意义就是“力学的”表象。

在研究相对论原理之具体的可以互相替代相互补充的变更和力学的具体形式的时候，我们就能对 Einstein 相对论是所谓“力学论”还是“物理论”的问题作出回答了。这个理论是力学的理论；然而这里所谓的力学就是物理概念本身长时间影响的结果。它所研究的决非具体的，狭隘意义的机械运动，而是无比复杂的物理客体的运动。

#### 参考文献：

- 【1】Ф. Клейн Лекции о развитии математики в XIX столетии М-Л, 1937, стр. 209—221.
- 【4】[法]Encyclopedie ou dictionnaire raisonne, t. IV. p. 1010. Paris, 1754[e上有撇].
- 【5】Кель (身世不详)。
- 【6】。Plucker 1801—1878 德国数学家、物理学家。
- 【7】。Grassmann 1809—1877 德国数学家。

## 2、惯性的认识

最早清楚表述惯性定律并把它作为原理加以确定的是笛卡儿。笛卡儿是唯理论哲学家，他试图建立起整个宇宙在内的各种自然现象都能从基本原理中推演出来的体系，惯性定律就是他的体系中的一条基本原理。他在他的《哲学原理》（1644年）一书中把这条基本原理表述为两条定律：一、每一单独的物质微粒将继续保持同一状态，直到与其他微粒相碰被迫改变这一状态为止；二、所有的运动，其本身都是沿直线的。然而笛卡儿没有建立起他试图建立的那种能演绎出各种自然现象的体系，其中许多是错误的，不过他的思想对牛顿的综合产生了一定的影响。

惯性是物理学中最基本的概念之一，也是学习物理学最早遇到的概念之一。这一极为普通和平凡的概念曾经引导许多物理学家深入思考和剖析，促进物理学重大进展，其中蕴涵着深刻的物理思想和丰富的物理学研究方法的教益。惯性一般是指物体不受外力作用时，保持其原有运动状态的属性。人们对于惯性这一认识有赖于惯性定律的建立，而它则依赖于对于力的认识以及区分运动状态和运动状态改变的认识，这一点在人类认识发展史上经历了漫长的岁月。牛顿 1661 年进入剑桥大学学习亚里士多德的运动论，1664 年他从事力学的研究，摆脱了亚里士多德的影响。他继承了伽利略重视实验和逻辑推理的研究方法，他也继承了笛卡儿的研究成果。他深入地研究了碰撞问题、圆周运动以及行星运动等问题，澄清了动量概念和力的概念。1687 年出版著作《自然哲学的数学原理》，以“定义”和“公理，即运动定律”为基础建立起把天上的力学和地上的

力学统一起来的力学体系。惯性定律就是牛顿第一定律，表述为“所有物体始终保持静止或匀速直线运动状态，除非由于作用于它的力迫使它改变这种状态。”惯性定律真正成为力学理论的出发点。根据惯性定律，物体具有保持原有运动状态的属性，这种属性称为惯性。不仅静止的物体具有惯性，运动的物体也具有惯性；物体惯性的大小用其质量大小来衡量。至此，人们对于物体惯性的认识达到第一阶段比较完善的程度。

在经典物理学中，惯性原理是相对性原理的表现形式。惯性的存在是因为场的真实存在，场在宇宙空间中的广泛存在是惯性得以体现的最根本原因。1970年苏联科学家罗斯基进行的实验在  $9 \times 10^{-13}$  以内证明了引力质量和惯性质量严格相等，如果注意到惯性质量与引力质量的严格相等，我们将发现，更准确的提法是，惯性来源于全宇宙物质的万有引力场。为了弄清物体惯性运动的物理实质性原理，不妨让我们针对假定只有 **A**、**B** 两物体存在的宇宙进行分析。

如图 1-2，由于宇宙中只有 **A**、**B** 两物体存在，为了考察 **A** 的惯性和运动，不管 **A**、**B** 两物体之间是否发生相互作用，充当惯性参照系的唯一地只能是 **B** 物体。在这样简单的宇宙中，针对 **A** 物体可以把牛顿第一、第二运动定律分别表述为：1、**A** 相对 **B** 保持静止或匀速直线运动，除非 **B** 对它施加作用力迫使它改变这种状态。2、**A** 相对 **B** 所得加速度的大小与受到 **B** 的作用力成正比，与 **A** 的质量成反比，加速度的方向在 **A**、**B** 的连线上。



图 1-2

我们令距 **B** 物体  $r$  远处的场存在着激烈程度为  $Gm/r^2$  的引力场波动， $G$  为常数， $m$  为 **B** 的质量。（粒子的长期存在不改变其质量等物理内涵，这表明引力场波动并不向外扩散能量。）设 **A** 的有效截面积为  $s$ ，

相对 **B** 以速度  $v$  运动，由于相对运动，属于 **B** 的场在单位时间内流经 **A** 的能流为  $\frac{Gms}{r^2}v$ 。

再以这个能流与能流密度及有效截面积作比，得到速度量纲的物理量  $\frac{\frac{Gms}{r^2}v / \frac{Gms}{r^2}}{\frac{ms}{r^2}}$ 。消去常量  $G$ ，并用大写字母  $V$  表示它，

$$V = \frac{\frac{ms}{r^2}v}{\frac{ms}{r^2}}$$

得到

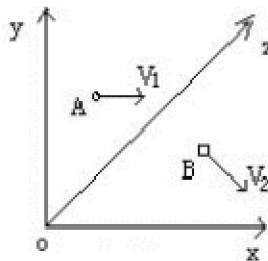


图 1-3

在这种简单的宇宙体系中，由于  $V = v$ （广义相对速度与相对速度恒等）， $\frac{dV}{dt} = \frac{dv}{dt}$ ，所以用  $A$  的广义相对速度代替  $A$  的相对速度分析惯性和运动问题，和原先完全一致，不存在任何分歧。

但当全面考察错综复杂的现实宇宙中其它物质的影响以后，某物体的广义相对速度与它的相对速度之间便存在着一些差异，我们将发现，正是这些差异的存在，直接导致了以往经典时空观的舍弃。

如图 1-3。全面考察全宇宙物质的存在得到

$$V = \frac{\iiint \frac{\rho}{r^2} (v_1 - v_2) d\tau}{\iiint \frac{\rho}{r^2} d\tau}$$

其中  $V$  表示考察物体 ( $A$ ) 的广义相对速度， $v_1$  表示考察物体相对任一参照系的速度（这一参照系可以是惯性参照系，也可以是非惯性参照系）， $v_2$  表示宇宙中某一物体  $\rho d\tau$  相对同一参照系的速度， $r$  表示考察物体与  $\rho d\tau$  的距离，积分范围是全宇宙空间。客观现实中，大多数物质都以星球的形式存在，通常我们可以采用广义相对速度的不连续表达式计算

$$V = \frac{\sum \frac{m_i}{r^2} (v_1 - v_2)}{\sum \frac{m_i}{r^2}}$$

由于参照系之间存在着相对运动，相对速度没有唯一的值，而广义相对速度却具有唯一的值，显然，通常情况下  $V \neq v$ ，用计算机可以计算证明，在地球表面附近，即使考虑地球物质、远距离物质及空气的影响，只要运动物体位移的距离和时间不很大，广义相对速度和相对速度的变化率是非常接近的，即

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} \approx \frac{\Delta v}{\Delta t}, \text{ 或者 } \frac{dV}{dt} \approx \frac{dv}{dt}。 \text{ 所以，如果承认牛顿第二运动定律，即 } F = m \frac{dv}{dt}, \text{ 那么就有 } F \approx m \frac{dV}{dt}。$$

附录：为牛顿第一定律的建立而奋斗过的人们

#### 一、生活经验的总结者----亚里士多德

长期以来，在研究物体运动原因的过程中，人们的经验是：要使一个物体运动，必须推塔或者拉它一下，因此，人们直觉第认为，物体的运动与推、拉等行为相联系，如果不再推、拉，原来运动的物体便会停止下来。根据这类经验，亚里士多德得出结论：必须有力作用在物体上，物体才能运动；没有力的作用，物体就要静止在一个地方。这个由明显的线索得出的错误判断，维持了近两千年，直到三百多年前伽利略的出现。

#### 二、理想实验的践行者----伽利略

伽利略注意到，当一个小球沿斜面向下运动时，它的速度增大；而当小球沿斜面向上运动时，它的速度减小，由此伽利略猜想：当小球沿水平面运动时，它的速度应该不增不减。那么，实际情况中，为什么小球沿水平面运动时，速度会越来越慢呢？原来是由于小球受到摩擦阻力的作用。并由此推断，若没有摩擦阻力，球将永远运动下去。

伽利略为了说明他的思想，设计了一个实验：让小球沿一个斜面从静止状态开始向下运动，小球将“冲”上另一个斜面。如果没有摩擦，小球将上升到原来的高度。减小第二个斜面的倾角，小球在这个斜面上仍将达到同一高度，但这是他要运动的远些。继续减小第二个斜面的倾角，球达到同一高度时会离得更远。于是他想到，若将第二个斜面平放，小球会到达多远的位置呢？结论显然是，球将永远运动下去，却不再需要什么力去推动。也就是说，力不是维持物体运动的原因。当然，我们不能消除一切阻力，也不能把第二个斜面做得无限长，所以，伽利略的实验是个“理想实验”。

#### 三、迈向真理的接力者----笛卡尔

与伽利略同时代的法国科学家笛卡尔也研究了这个问题，他指出：如果运动中的物体没有受到力的作用，它将继续以同一速度沿同一直线运动，既不会停止下来，也不会偏离原来的方向。

#### 四、物理基石的奠定者----牛顿

在伽利略和笛卡尔工作的基础上，在经历了一代人以后，牛顿提出了动力学的一条基本定律：一切物体总保持静止状态或匀速直线运动状态，直到有外力迫使它改变这种状态为止。这就是牛顿第一定律。

牛顿第一定律表明，物体具有保持原来匀速直线运动状态或静止状态的性质，我们把这个性质叫做惯性，因此，牛顿第一定律也叫惯性定律。由于这个定律给出了惯性的概念，所以人们说，它是物理学的基础，是奠定牛顿物理学的基石。

最后需要说明的是，因为不可能把自然界的任何物体完全孤立起来，也就是说，不受力作用的物体是不存在的，所以，牛顿第一定律是利用逻辑思维对事实进行分析的产物，不可能用实验直接验证。

### 3、伽利略变换

科学遵循的原则是，在充分必要的条件下越简单越好。卢瑟福认为“一个好的理论应该连酒吧女郎都能看懂。”

#### 1、惯性系：

力学的发展经牛顿总结成动力学三定律，牛顿三定律及其导出的各定理在伽利略变换下，对所有惯性系都有相同形式。这一表述通常称为力学相对性原理，伽利略变换不同惯性系的时空变换导出基于两个基本假定：一是相对性原理，另一个是时间和尺长在不同惯性系是相同的。

惯性系族：相对作匀速运动的所有惯性系称为惯性系族

设惯性系  $\bar{S}$  相对惯性系  $S$  是同族惯性系，惯性系时空的均匀性决定了同一事件点在惯性系  $S$  与  $\bar{S}$  中对应坐标矢  $\mathbf{r} = (x, y, z, t)$  与  $\bar{\mathbf{r}} = (\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \bar{t})$  满足如下线性关系：

$$\begin{cases} \bar{x} = a_{11}x + a_{12}y + a_{13}z + a_{14}t \\ \bar{y} = a_{21}x + a_{22}y + a_{23}z + a_{24}t \\ \bar{z} = a_{31}x + a_{32}y + a_{33}z + a_{34}t \\ \bar{t} = a_{41}x + a_{42}y + a_{43}z + a_{44}t \end{cases} \quad (1-1)$$

$$\begin{cases} x = a'_{11}\bar{x} + a'_{12}\bar{y} + a'_{13}\bar{z} + a'_{14}\bar{t} \\ y = a'_{21}\bar{x} + a'_{22}\bar{y} + a'_{23}\bar{z} + a'_{24}\bar{t} \\ z = a'_{31}\bar{x} + a'_{32}\bar{y} + a'_{33}\bar{z} + a'_{34}\bar{t} \\ t = a'_{41}\bar{x} + a'_{42}\bar{y} + a'_{43}\bar{z} + a'_{44}\bar{t} \end{cases} \quad (1-2)$$

$$\text{即 } \bar{\mathbf{r}} = \mathbf{A}\mathbf{r}, \quad \mathbf{r} = \mathbf{A}^{-1}\bar{\mathbf{r}}$$

惯性系空间的各向同性要求同一个惯性系在空间转动下不变，也即惯性系的空间是 Euclid 空间，为了适当简化推导过程我们选择  $\bar{t}$  在  $S$  系的空间投影为  $S$  系的  $x$  轴，同样选择  $t$  在  $\bar{S}$  系的空间投影为  $\bar{S}$  系的  $\bar{x}$  轴，各自建立正交性的时空坐标，也即有

$$\mu\mathbf{x} = (\bar{\mathbf{t}} \cdot \mathbf{x})\mathbf{x} + (\bar{\mathbf{t}} \cdot \mathbf{y})\mathbf{y} + (\bar{\mathbf{t}} \cdot \mathbf{z})\mathbf{z} \quad (2-1)$$

$$\mu'\bar{\mathbf{x}} = (\mathbf{t} \cdot \bar{\mathbf{x}})\bar{\mathbf{x}} + (\mathbf{t} \cdot \bar{\mathbf{y}})\bar{\mathbf{y}} + (\mathbf{t} \cdot \bar{\mathbf{z}})\bar{\mathbf{z}} \quad (2-2)$$

在 (2-1) 式两边同时点乘  $\mathbf{y}$  或  $\mathbf{z}$ ，由时空标架的正交性易得

$$\bar{\mathbf{t}} \cdot \mathbf{y} = 0, \quad \bar{\mathbf{t}} \cdot \mathbf{z} = 0$$

$$\text{于是 } a_{42} = 0, \quad a_{43} = 0, \quad a'_{42} = 0, \quad a'_{43} = 0$$

$$\text{同理 } \mathbf{t} \cdot \bar{\mathbf{y}} = 0, \quad \mathbf{t} \cdot \bar{\mathbf{z}} = 0$$

$$a_{24} = 0, \quad a_{34} = 0, \quad a'_{24} = 0, \quad a'_{34} = 0$$

$$\bar{\mathbf{t}} = a_{41}\mathbf{x} + a_{44}\mathbf{t} \quad (3-1)$$

$$\mathbf{t} = a'_{14}\bar{\mathbf{x}} + a'_{44}\bar{\mathbf{t}} \quad (3-2)$$

在 (3-1) 两边点乘  $\bar{\mathbf{y}}$  或  $\bar{\mathbf{z}}$  可得



$$\mathbf{x} \cdot \bar{\mathbf{y}} = 0, \quad \mathbf{x} \cdot \bar{\mathbf{z}} = 0$$

$$\text{即} \quad a_{21} = 0, \quad a_{31} = 0; \quad a'_{21} = 0, \quad a'_{31} = 0$$

在 (3-2) 两边点乘  $\mathbf{y}$  或  $\mathbf{z}$  可得

$$\bar{\mathbf{x}} \cdot \mathbf{y} = 0, \quad \bar{\mathbf{x}} \cdot \mathbf{z} = 0$$

$$a_{12} = 0, \quad a_{13} = 0; \quad a'_{12} = 0, \quad a'_{13} = 0$$

综上即有

$$\bar{x} = a_{11}x + a_{14}t$$

$$\bar{t} = a_{41}x + a_{44}t$$

$$\bar{y} = a_{22}y + a_{23}z$$

$$\bar{z} = a_{32}y + a_{33}z$$

即  $S$  系到  $\bar{S}$  系的线性变换可分解为  $\mathbf{x}, \mathbf{t}$  到  $\bar{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{t}}$  的变换与  $\mathbf{y}, \mathbf{z}$  到  $\bar{\mathbf{y}}, \bar{\mathbf{z}}$  的变换。其中  $\bar{\mathbf{y}}, \bar{\mathbf{z}}$  到  $\mathbf{y}, \mathbf{z}$  的变换是 Euclid 空间的刚性转动，于是可在  $\bar{S}$  系作旋转使  $\mathbf{y}$  与  $\mathbf{z}$  同  $\bar{\mathbf{y}}$  与  $\bar{\mathbf{z}}$  对应平行，即有：

$$\left. \begin{aligned} \bar{x} &= a_{11}x + a_{14}t \\ \bar{y} &= \rho y \\ \bar{z} &= \rho z \\ \bar{t} &= a_{41}x + a_{44}t \end{aligned} \right\} \quad (4-1)$$

对应的有，

$$\left. \begin{aligned} x &= a'_{11}\bar{x} + a'_{14}\bar{t} \\ y &= \rho'\bar{y} \\ z &= \rho'\bar{z} \\ t &= a'_{41}\bar{x} + a'_{44}\bar{t} \end{aligned} \right\} \quad (4-2)$$

$$\text{令} \quad a_{11}a_{44} - a_{14}a_{41} = \lambda$$

$$\text{有} \quad a'_{11} = \frac{a_{44}}{\lambda}, \quad a'_{14} = -\frac{a_{14}}{\lambda}, \quad a'_{41} = -\frac{a_{41}}{\lambda}, \quad a'_{44} = \frac{a_{11}}{\lambda}, \quad \rho\rho' = 1$$

## 2、间隔的定义

$$\text{定义: } S_{12} = [c^2(t_2 - t_1)^2 - (x_2 - x_1)^2 - (y_2 - y_1)^2 - (z_2 - z_1)^2]^{1/2}$$

注：两事件的间隔既不是空间距离，也不是时间间隔，而是两者的某种组合

$$\text{对光讯号联系的两事件易知: } S_{12}^2 = S_{12}'^2 = 0$$

## 3、间隔不变性

考虑两无限接近的事件，则

因为  $ds^2$  和  $ds'^2$  都是长度平方的量纲， $k, k'$  系均是惯性系，是平权的，所以两者之间必定是线形变换。可设：

$$ds = ads' + b$$

对于光讯号联系的两个事件， $ds = ds' = 0 \Rightarrow b = 0$

$$ds = ads'$$

$$k: ds'^2 = c^2 dt'^2 - dx'^2 - dy'^2 - dz'^2$$

$$k: ds'^2 = c^2 dt'^2 - dx'^2 - dy'^2 - dz'^2$$

i) 显然  $a$  不可能是空间和时间的函数，这是因为空间和时间是均匀的，若  $a$  是空间和时间的函数，则在同一坐标系中，同样两个事件之间的间隔将是不确定的。

ii) 因光的速度在空间各个方向一样，故  $a$  与两个参考系之间相对速度的方向无关。

$$\therefore a=a(v)$$

$$\text{另一方面: } ds' = a' ds$$

考虑到  $ds$  和  $ds'$  之间的比例系数与速度方向无关

$$\Rightarrow a = a'$$

$$\therefore a = \pm 1 \quad \xrightarrow{\text{由变换的连续性}} \quad a = 1$$

$$\therefore ds' = ds$$

$$s'^2 = s^2 \quad \text{间隔不变性}$$

常期以来，时间绝对性和杆长绝对性在人们认识上是根深蒂固的，在物体运动速度远小于光速的牛顿力学范围内，实验或观测不会对这些观念提出挑战。如果不是因为在解释与光速有关的实验结果发生困难；如果不是因为电磁场方程不满足伽利略变换下的形式不变，人们是不会轻易放弃这些假定的。

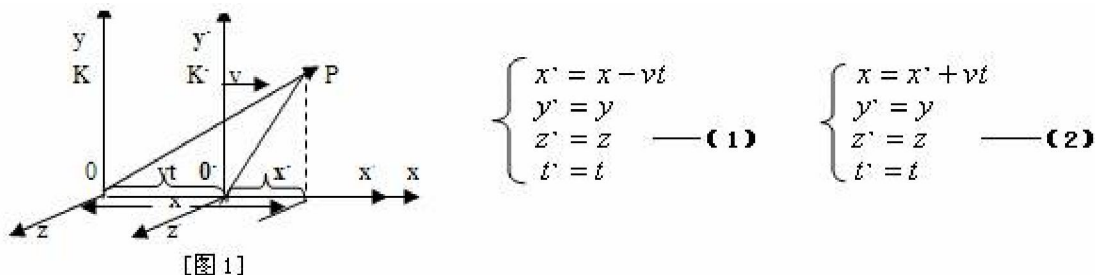
如所周知，伽利略-牛顿力学的基本定律（称为惯性定律）可以表述如下：一物体在离其他物足够远时，一直保持静止状态或保持匀速直线运动状态。这个定律不仅谈到了物体的运动，而且指出了不违反力学原理的、可在力学描述中加以应用的参考物体或坐标系。相对于人眼可见的恒星那样的物体，惯性定律无疑是在相当高的近似程度上能够成立的。现在如果我们使用一个与地球牢固地连接在一起的坐标系，那么，相对于这一坐标系，每一颗恒星在一个天文日当中都要描画一个具有莫大的半径的圆，这个结果与惯性定律的陈述是相反的。因此，如果我们要遵循这个定律，我们就只能参照恒星在其中不作圆周运动的坐标系来考察物体的运动。若一坐标系的运动状态使惯性定律对于该坐标系而言是成立的，该坐标系即称为“伽利略坐标系”。伽利略-牛顿力学诸定律只有对于伽利略坐标系来说才能认为是有效的。（摘自《浅说》第4节、伽利略坐标系的全文）

在物理学中几乎没有比真空中光的传播定律更简单的定律了，光在真空中沿直线以速度  $c=300,000$  公里/秒传播。无论如何我们非常精确地知道，这个速度对于所有各色光线都是一样的。因为如果不是这样，则当一颗恒星为其邻近的黑暗星体所掩食时，其各色光线的最小发射值就会同时被看到。荷兰天文学家德西特根据对双星的观察，也以相似的理由指出，光的传播速度不能依赖于发光物体的运动速度。关于光的传播速度与其“在空间中”的方向有关的假定即就其本身而言也是难以成立的。总之，我们可以假定关于光（在真空中）的“速度= $c$ ”是恒定的这一简单的定律已有充分的理由为学校里的儿童所确信。谁会想到这个简单的定律竟会使思想周密的物理学家陷入智力上的极大的困难呢？让我们来看看这些困难是怎样产生的。当然我们必须参照一个坐标系来描述光的传播过程。我们再次选取我们的路基作为这种参考系。如果沿着路基发出一道光线，根据上面的论述我们可以看到，这道光线的前端将相对于路基以速度  $c$  传播，现在我们假定我们的车厢仍然以速度  $v$  在路轨上行驶，其方向与光线的方向同，不过车厢的速度当然要比光的速度小得多。我们来研究一下这光线相对于车厢的传播速度问题。显然我们在这里可以应用前一节的推论，因为光线在这里就充当了相对于车厢走动的人。人相对于路基的速度  $W$  在这里由光相对于路基的速度  $c$  代替。 $W$  是所求的光相对于车厢的速度。我们得到： $W=c-v$  于是光线相对于车厢的传播速度就出现了小于的情况。…（摘自《浅说》第7节、光的传播定律与相对性原理的表面抵触的第一、二、三段）。

每一个运动着的三维坐标系都有各自独立的一个三维空间度量和一维时间度量，构成四维度量。在同一个坐标系里，能量的读数是连续变化的。在相对运动着的不同坐标系里，各自的四维度量应该是不同的，这也是因为在相对运动着的不同坐标系里，能量的读数是不同的缘故。然而坐标系主要表现为数学的概念，而能量是客观存在的。为了保证坐标系之间能量特征（包括动能和势能的差值等等）的连续性、一致性，坐标系之间的度量必须建立相应的变换关系。

伽里略的时空变换,是这样来认识两个相对运系统中,物质运动变化的时空关系的。在惯性系统中,有两个相对做匀速运动的物理系统 $\Sigma'$ 和 $\Sigma$ 。在 $t=t'=0$ 时,两个系统重合。当 $\Sigma'$ 相对 $\Sigma$ 以速度 $V$ 向 $X$ 方向运动的同时,从原点射出一光信号,光在两个系统中经过时间 $t'$ 和 $t$ 到达同一点 $P$ 。对于光从原点到 $P$ 点这个同一事件,伽利略认为时间是相等的,空间是变化了的,空间的变化用速度迭加来处理。

伽利略时空变换如下:



[图 1]

(1) 式和 (2) 式,就是伽利略时空变换表达式,伽利略变换对于两个空坐标之间的时空关系的表述是正确的;伽利略变换,对于相对运动系统中,物质运动变化的时空关系就不正确了。研究相对运动系统内物质运动变化的规律,必须用相对论的时空变换来处理,才能得到正确的结果。

#### 4、场概念的兴起

自牛顿时代以来最重要的发明:场,用来描写物理现象最重要的不是带电体,也不是粒子,而是带电体之间与粒子之间的空间中的场,这需要很大的科学想象力才能理解。场的概念已被证明是很成功的,由这个概念便产生了描写电磁场的结构和支配电和光现象的麦克斯韦方程。相对论加强了场的概念在物理学中的重要性,但是我们还不能建立一种纯粹是场的物理学。直到目前为止,我们仍然需要认定场与实物两者并存。

康德的认识论指出:人不能认知不合乎自己思维模式的知识,这也就是 Einstein 所说的“现象与理论之间没有逻辑桥梁”。

场开始是作为表述粒子间传递作用力的方式而提出的。为了帮助人们形象地理解电力和磁力现象,在一百多年前,法拉第和麦克斯韦想象出场的概念。此后物理学家们一直认为那些力线本质上是虚构的,只是为帮助人们更好地理解自然定律的一种手段。但时至今日,越来越多的物理学家相信,这些场可能是客观存在的,并具有重大的物理意义。Einstein 根据相对论首先提出:围绕在物体或粒子周围空间的各式各样的场应被认为是一种实在的东西。静止电荷周围的空间存在着一种特殊的物质称为电场。在高压输电线附近存在着环绕电线的磁力线和强大的电场,这样的环形磁力线和电场顺着输电线由发电站延伸到变压器。静电荷周围空间存在的静电场被认为是由不能被探测到但却围绕在电荷周围空间的虚光子构成的,电荷间的相互作用力是因为电荷间相互交换虚光子造成的。

Einstein: 我一生的主要工作:结合对空间、时间和引力的新认识,创立相对论;提出质能等价定律和统一场论(未完成);对量子论发展的贡献。1938年, Einstein: 相对论是从场的问题上兴起的。场是从牛顿时代以来最重要的发明。实物可以看作是场特别强的一些区域,因而,场是唯一的实在【1】。

1954年, Einstein: 我认为非常可能,物理学不能建立在场的概念上。如果是这样,那么,我的全部空中楼阁(包括引力理论在内),甚至连其他现代的物理理论也一样,将荡然无存【2】。1954年, Einstein: 如果以场作为基本概念的客观描述是不可能的话,那么,就得找到一种完全避免连续统(连同空间和时间)的可能性。但是,这样一种理论中可以使用什么样的基本概念,我没有一丁点主见【3】。

参考文献:

- 【1】 Einstein, 英费尔德。物理的进化。上海科学技术出版社, 1962.178~181。
- 【2】 许良英等编译。Einstein 文集第三卷。北京: 商务印书馆, 1979.504。
- 【3】 1954年10月28日 Einstein 致玻姆的信。大自然探索: 1987年第一期。

#### 5、以太论的复兴

机械振动只有在弹性介质中传播才形成机械波，在弹性介质中应用牛顿定律和胡克定律，即可建立机械

波的波动方程，一维横波的波动方程为  $\frac{N}{\rho} \left( \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) = \left( \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \right)$ 。系数  $N/\rho$  为横波的波速的平方，即  $v = \sqrt{N/\rho}$ ，若弹性介质中传播的是纵波，以杨氏模量  $E$  代替切变模量  $N$ ， $\rho$  为介质密度。

由于机械波只能在介质中传播，因此可以建立介质这一特定惯性系，所表述的波动方程只适用于这一特定惯性系，由介质的弹性模量和密度所决定的波速也是相对于这一特定惯性系的，并且波速于波源的运动状况无关。即波速于与波源相对于介质的运动无关。即波速与波源相对于介质的运动无关。

机械波的波动方程和波速这些性质是否也适用于电磁波（包括光波）呢？电磁波有类似于机械波的波动方程，那么，电磁波的波动方程是相对于什么样的参考系建立的？真空中光速近似为  $3 \times 10^8$  m/s, 这传播速度是相对于什么参考系的。

1727 年 James 认为光以恒定速度  $c_0$  在以太媒质中震荡传播，以太是静止的，而地球是运动的，如果以太不被地球拖曳，那么半年后地球绕日运动适相反，应有一偏转角  $\theta'$ 。半年后 James 做了这个观测实验，测得了这个偏转角  $\theta'$ ，说明以太不被地球拖曳，似乎以太就是绝对空间。1861 年，英国物理学家麦克斯韦总结前人的实验规律基础上，推导真空中电磁波的波动方程，其一维形式的真空波动方程为：

$$\frac{1}{\epsilon_0 \mu_0} \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad \text{式中 } E \text{ 是电场强度, } \epsilon_0 \text{ 是真空介电常数, } \mu_0 \text{ 是真空磁导率。以 } C^2 \text{ 代表 } \frac{1}{\epsilon_0 \mu_0},$$

$$C^2 = \frac{1}{\epsilon_0 \mu_0} = 9 \times 10^{16} \text{ m}^2 / \text{s}^2 \quad \text{这 } C \text{ 恰好就是真空中光速。}$$

麦克斯韦 (Maxwell 1855~1862) 于 1862 年提出，光是依“以太介质”传播的电磁波，定名为“光的电磁说”，见图 1。

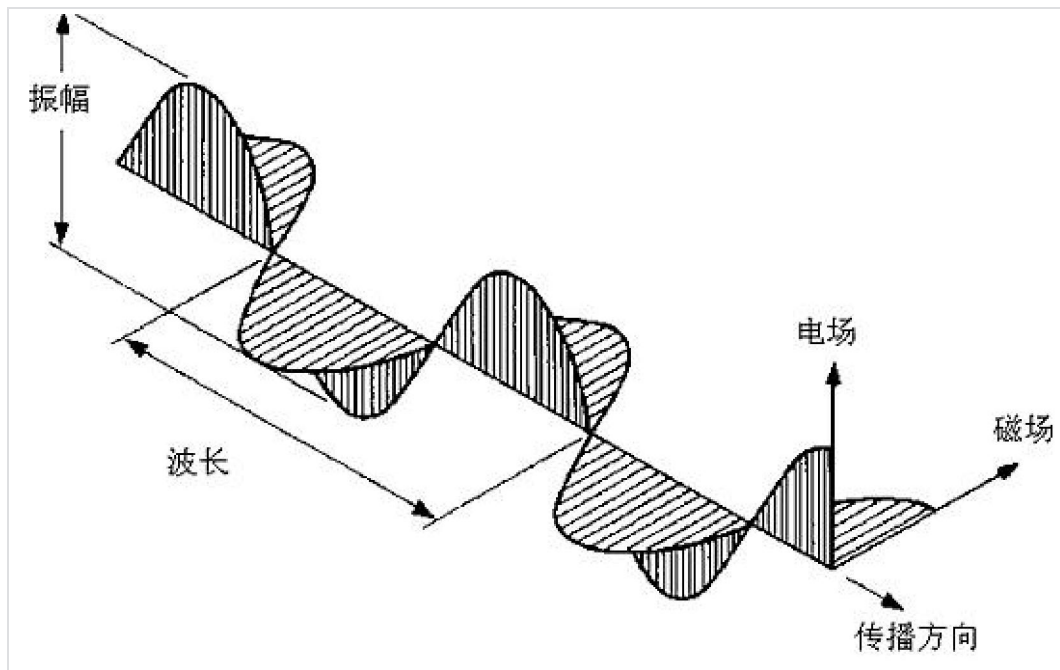


图 1. 麦克斯韦光波的电场和磁场

1887 年，H. 赫兹从实验上证实了电磁波的存在，并将电磁现象与光统一起来。但是电磁波的波动方程是根据麦克斯韦的真空形式，在导出真空电磁波波动方程之始，人们就没有找到合适的参考系，而不像机械波的波动方程导出中需要用到依赖于介质的胡克定律。这是一个既重要，在当时又是使人十分困惑的问题，



而牛顿力学的成功及其在当时物理学所处的支配地位，以及对机械波所采取的合理解释，都促使人们去构思和寻求一个适用于电磁波波动方程的特定惯性系。于是人们假定真空中充满被称为以太（ether）的介质，一维形式的在真空波动方程及真空中光速是在以太这一特定惯性而言的。

由波动力学可知波的传播速度  $u$  为：
$$u = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad \text{或} \quad u = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \text{或} \quad u = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$$
，其中， $G$  为固体的切变模量， $E$  为固体的弹性模量， $K$  为液体或气体的体积模量， $\rho$  为媒质的密度。

总之，不管波是在固体还是在液体中传播，波的传播速度都与媒质模量的二分之一一次方成正比，都与媒

质密度的二分之一一次方成反比。根据麦克斯韦的电磁场理论，光速 
$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}$$
，光速应该是随着介电常数  $\epsilon$  和磁导率  $\mu$  变化的变量。

19 世纪，以太论获得复兴和发展，这首先还是从光学开始的，主要是托马斯·杨和菲涅耳工作的结果。杨用光波的干涉解释了牛顿环，并在实验的启示下，于 1817 年提出光波为横波的新观点，解决了波动说长期不能解释光的偏振现象的困难。以太这一假定是出于以机械波的模式来理解电磁波，可是，由于光速比机械波在介质中的传播速度要大得多，因此，以太就必须有非常大的弹性模量和非常稀薄的质量密度

$$v = \sqrt{\frac{N}{\rho}}$$
（ $v = \sqrt{\frac{N}{\rho}}$ ）而且还必须是透明的等等特征。尽管必须赋予以太这些难以捉摸的属性，但是它处在光速所相对的参考系这一重要概念环节上，而被人们作为不可缺少的概念接受下来了。进一步的问题便是从相对于以太运动的物体上（例如地球）作光速测量，从测量结果与真空中光速数值相比较，以间接证实以太的存在。

菲涅耳用被动说成功地解释了光的衍射现象，他提出的理论方法（现常称为惠更斯-菲涅耳原理）能正确地计算出衍射图样，并能解释光的直线传播现象。菲涅耳又进一步解释了光的双折射，获得很大成功。1823 年，他根据杨的光波为横波的学说，和他自己在 1818 年提出的：透明物质中以太密度与其折射率二次方成正比的假定，在一定的边界条件下，推出关于反射光和折射光振幅的著名公式，它很好地说明了布儒斯特数年前从实验上测得的结果。菲涅耳关于以太的一个重要理论工作是导出光在相对于以太参照系运动的透明物体中的速度公式。1818 年他为了解释阿拉果关于星光折射行为的实验，在杨的想法基础上提出：透明物质中以太的密度与该物质的折射率二次方成正比，他还假定当一个物体相对以太参照系运动时，其内部的以太只是超过真空的那一部分被物体带动（以太部分曳引假说）。利用菲涅耳的理论，很容易就能得到运动物体内光的速度。

19 世纪中期，曾进行了一些实验，以求显示地球相对以太参照系运动所引起的效应，并由此测定地球相对以太参照系的速度，但都得出否定的结果。这些实验结果可从菲涅耳理论得到解释，根据菲涅耳运动媒质中的光速公式，当实验精度只达到一定的量级时，地球相对以太参照系的速度在这些实验中不会表现出来，而当时的实验都未达到此精度。在杨和菲涅耳的工作之后，光的波动说就在物理学中确立了它的地位。随后，以太在电磁学中也获得了地位，这主要是由于法拉第和麦克斯韦的贡献。

在法拉第心目中，作用是逐步传过去的看法有着十分牢固的地位，他引入了力线来描述磁作用和电作用。在他看来，力线是现实的存在，空间被力线充满着，而光和热可能就是力线的横振动。他曾提出用力线来代替以太，并认为物质原子可能就是聚集在某个点状中心附近的力线场。他在 1851 年又写道：“如果接受光以太的存在，那么它可能是力线的荷载物。”但法拉第的观点并未为当时的理论物理学家们所接受。到 19 世纪 60 年代前期，麦克斯韦提出位移电流的概念，并在提出用一组微分方程来描述电磁场的普遍规律，这组方程以后被称为麦克斯韦方程组。根据麦克斯韦方程组，可以推出电磁场的扰动以波的形式传播，以及电磁波在空气中的速度为每秒 31 万公里，这与当时已知的空气中的光速每秒 31.5 万公里在实验误差范围内是一致的。麦克斯韦在指出电磁扰动的传播与光传播的相似之后写道：“光就是产生电磁现象的媒质（指以太）的横振动”。后来，赫兹用实验方法证实了电磁波的存在。光的电磁理论成功地解释了光波的性质，这样以太不仅在电磁学中取得了地位，而且电磁以太同光以太也统一了起来。

麦克斯韦还设想用以太的力学运动来解释电磁现象，他在 1855 年的论文中，把磁感应强度比做以太的速度。后来他接受了汤姆孙（即开尔文）的看法，改成磁场代表转动而电场代表平动。他认为，以太绕磁力线转动形成一个个涡元，在相邻的涡元之间有一层电荷粒子。他并假定，当这些粒子偏离它们的平衡位置即有一位移时，就会对涡元内物质产生一作用力引起涡元的变形，这就代表静电现象。

关于电场同位移有某种对应，并不是完全新的想法，汤姆孙就曾把电场比作以太的位移。另外，法拉第

在更早就提出，当绝缘物质放在电场中时，其中的电荷将发生位移。麦克斯韦与法拉第不同之处在于，他认为不论有无绝缘物质存在，只要有电场就有以太电荷粒子的位移，位移的大小与电场强度成正比。当电荷粒子的位移随时间变化时，将形成电流，这就是他所谓的位移电流。对麦克斯韦来说，位移电流是真实的电流，而现在我们知道，只是其中的一部分(极化电流)才是真实的电流。在这一时期还曾建立了其他一些以太模型，不过以太论也遇到一些问题。首先，若光波为横波，则以太应为有弹性的固体媒质。那么为何天体运行其中会不受阻力呢？有人提出了一种解释：以太可能是一种像蜡或沥青样的塑性物质，对于光那样快的振动，它具有足够的弹性像是固体，而对于像天体那样慢的运动则像流体。另外，弹性媒质中除横波外一般还应有纵波，但实验却表明没有纵光波，如何消除以太的纵波，以及如何得出推导反射强度公式所需要的边界条件是各种以太模型长期争论的难题。

为了适应光学的需要，人们对以太假设一些非常的属性，如 1839 年麦克可拉模型和柯西模型。再有，由于对不同的光频率，折射率也不同，于是曳引系数对于不同频率亦将不同。这样，每种频率的光将不得不有自己的以太等等。以太的这些似乎相互矛盾性质实在是超出了人们的理解能力。19 世纪 90 年代，洛伦兹提出了新的概念，他把物质的电磁性质归之于其中同原子相联系的电子的效应。至于物质中的以太，则同真空中的以太在密度和弹性上都并无区别。他还假定，物体运动时并不带动其中的以太运动。但是，由于物体中的电子随物体运动时，不仅要受到电场的作用力，还要受到磁场的作用力，以及物体运动时其中将出现电介质运动电流，运动物质中的电磁波速度与静止物质中的并不相同。

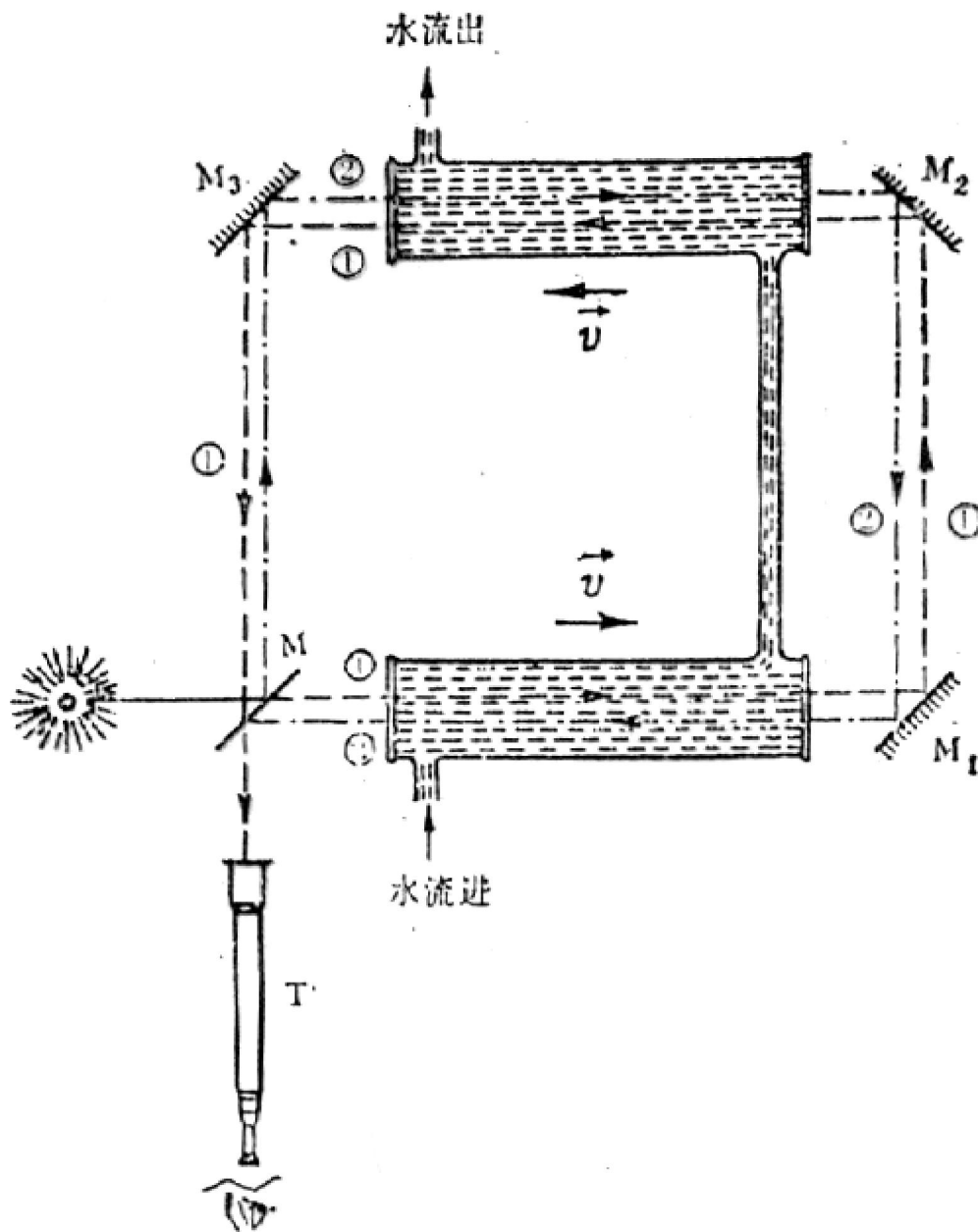
在考虑了上述效应后，洛伦兹同样推出了菲涅耳关于运动物质中的光速公式，而菲涅耳理论所遇到的困难(不同频率的光有不同的以太)已不存在。洛伦兹根据束缚电子的强迫振动，可推出折射率随频率的变化。洛伦兹的上述理论被称为电子论，它获得了很大成功。

1879 年，麦克斯韦提出借助于木星卫星蚀来判明整个太阳系相对于以太运动的思想。太阳和整个太阳系一起在某个方向上运动。在此路径上当木星处于太阳之前的时候由于木星绕太阳旋转需时为地面上的二十年，这样在地面一年期间其位置变化较小。在一年中木星移动了三十度。总之，在其宇宙的运动中是处于太阳的前面。同时，在一年期间地球转了整整一圈，这样，在此一年期间内就像辽密尔所做的那样，能够求得为使光线通过达到地球的距离恰好是地球轨道半径所必须的时间间隔之差。六年之后，木星在其宇宙的轨道中已处于地球的后面，这时就可以确定其卫星蚀的提前或落后。如果太阳系在其宇宙的运动中不拖带以太，那么就可以通过比较第一种情况和第二种情况的量来确定其相对于以太的运动。在第一次观察时，木星和它的卫星是位于太阳之前，这样，光就迎着其宇宙运动传播，并且其速度应是以太的光速加上太阳系相对于以太的速度。在第二次情况下，相对于太阳系的光速应等于上述速度之差。但是，只有当经过六年的天文观测查明木星卫星蚀的推迟有周期性差值时，这些计算才可证明太阳系的绝对运动。事实是天文观测仍未发现这种周期性的变化。这样，观测木星卫星蚀的推迟也没有提供太阳系的绝对运动的任何一种证据。

费涅耳理论曾断言：以太部分地被运动物体所拖曳。费涅耳本人这时就是以被确定的以太结构的概念为出发点的。以太在宇宙空间的密度等于某个恒定的数值。处于物体中以太的密度则是另一种数值。当物体运动时，分布于物体前面的以太进入此物体。并且在它里面获得新的，更高的密度，这种被浓集的以太以另外的速度相对于物体运动。在物体中以太的密度和它的速度之间存在着某个确定的关系。费涅耳把这个关系算出来了。这就是折射系数。换言之，就是真空中的光速和它在物质中的传播速度之比永远等于在物体中以太浓集度的平方根，也就是等于在物体中以太的密度和宇宙中自由以太密度之比的平方根。这样，费涅耳就给出了拖曳系数的力学解释。即此系数相当于以太在物体中的浓集度。

企图发现物体相对于以太运动的牛顿促进了另一种假说，即完全拖曳以太的假说。1845 年，斯托克斯假定以太完全参与物体的运动，其结果就是光学现象的相对原理。在运动的介质中，比如，在地球表面上，光学现象就象在静止的介质中一样以相同的形式发生。为了解释宇宙空间中以太的静止性和在物体中以太的运动，这就使得斯托克斯详细制定了以太的复杂的假说。正如日后证实的那样，这个概念是同力学的基本规律相抵触。与此同时，以太只是部分被运动物体所拖曳的实验也做出来了。

1851 年，菲索设计了一个干涉仪，一对光线通过有水流的管子，一束光迎着水流进行，另一束顺着水流。若是水自己拖曳以太，其结果将是干涉条纹有确定的移动。事实上观察到了某些移动，然而它并没有同完全拖曳的假说相对应。在算出了相应于被观察到的条纹的拖曳系数之后，菲索得到相应于费涅耳拖曳公式的数值。斐索水流实验



以太被水流部分拖拽。

爱因斯坦评价说：“麦克斯韦和他的后继者都没有给以太想出一种机械模型，为麦克斯韦电磁场定律提供一种令人满意的力学解释。这些定律既清楚又简单，而那些力学解释却既笨拙又充满矛盾。”

## 6、光速的测量

光波或电磁波在真空或介质中的传播速度,光速的测定在光学的发展史上具有非常特殊而重要的意义。它不仅推动了光学实验的发展,也打破了光速无限的传统观念;虽然从人们设法测量光速到人们测量出较为精确的光速共经历了三百多年的时间,但在这期间每一点进步都促进了几何光学和物理光学的发展,尤其是在微粒说与波动说的争论中,光速的测定曾给这一场著名的科学争辩提供了非常重要的依据,最终推动了相对论理论的发展。根据现代物理学,所有电磁波,包括可见光,在真空中的速度是常数,即是光速。强相互作用、电磁作用、弱相互作用传播的速度都是光速,根据广义相对论,万有引力传播的速度也是光速,且已于2003年得以证实。

在光速的问题上物理学界曾经产生过争执,开普勒和笛卡尔都认为光的传播不需要时间,是在瞬时进行



的。但伽利略认为光速虽然传播得很快，但却是可以测定的。1607年，伽利略进行了最早的测量光速的实验。伽利略的方法是，让两个人分别站在相距一英里的两座山上，每个人拿一个灯，第一个人先举起灯，当第二个人看到第一个人的灯时立即举起自己的灯，从第一个人举起灯到他看到第二个人的灯的时间间隔就是光传播两英里的时间。但由于光速传播的速度实在是太快了，这种方法根本行不通。但伽利略的实验揭开了人类历史上对光速进行研究的序幕。1676年罗麦发现木星卫星公转的周期不是不变的。当地球在绕日运行的轨道上离开木星时周期略长；当地球接近木星时周期略短。这一事实表明光不是瞬时传播的。

1676年，丹麦天文学家罗麦第一次提出了有效的光速测量方法。他在观测木星的卫星的隐食周期时发现：在一年的不同时期，它们的周期有所不同；在地球处于太阳和木星之间时的周期与太阳处于地球和木星之间时的周期相差十四五天。他认为这种现象是由于光具有速度造成的，而且他还推断出光跨越地球轨道所需要的时间是22分钟。1676年9月，罗麦预言预计11月9日上午5点25分45秒发生的木卫食将推迟10分钟。巴黎天文台的科学家们怀着将信将疑的态度，观测并最终证实了罗麦的预言。罗麦的理论没有马上被法国科学院接受，但得到了著名科学家惠更斯的赞同。惠更斯根据他提出的数据和地球的半径第一次计算出了光的传播速度：214000千米/秒。虽然这个数值与目前测得的最精确的数据相差甚远，但他启发了惠更斯对波动说的研究；更重要的是这个结果的错误不在于方法的错误，只是源于罗麦对光跨越地球的时间的错误推测，现代用罗麦的方法经过各种校正后得出的结果是298000千米/秒，很接近于现代实验室所测定的精确数值。

十八世纪，科学界是沉闷的，光学的发展几乎处于停滞的状态。继布莱德雷之后，经过一个多世纪的酝酿，到了十九世纪中期，才出现了新的科学家和新的方法来测量光速。1849年，法国人菲索第一次在地面上设计实验装置来测定光速。他的方法原理与伽利略的相类似。他将一个点光源放在透镜的焦点处，在透镜与光源之间放一个齿轮，在透镜的另一侧较远处依次放置另一个透镜和一个平面镜，平面镜位于第二个透镜的焦点处。点光源发出的光经过齿轮和透镜后变成平行光，平行光经过第二个透镜后又在平面镜上聚于一点，在平面镜上反射后按原路返回。由于齿轮有齿隙和齿，当光通过齿隙时观察者就可以看到返回的光，当光恰好遇到齿时就会被遮住。从开始到返回的光第一次消失的时间就是光往返一次所用的时间，根据齿轮的转速，这个时间不难求出。通过这种方法，菲索测得的光速是315000千米/秒。由于齿轮有一定的宽度，用这种方法很难精确的测出光速。1850年，法国物理学家傅科改进了菲索的方法，他只用一个透镜、一面旋转的平面镜和一个凹面镜。平行光通过旋转的平面镜汇聚到凹面镜的圆心上，同样用平面镜的转速可以求出时间。傅科用这种方法测出的光速是298000千米/秒。另外傅科还测出了光在水中的传播速度，通过与光在空气中传播速度的比较，他测出了光由空气中射入水中的折射率。这个实验在微粒说已被波动说推翻之后，又一次对微粒说做出了判决，给光的微粒理论带了最后的冲击。

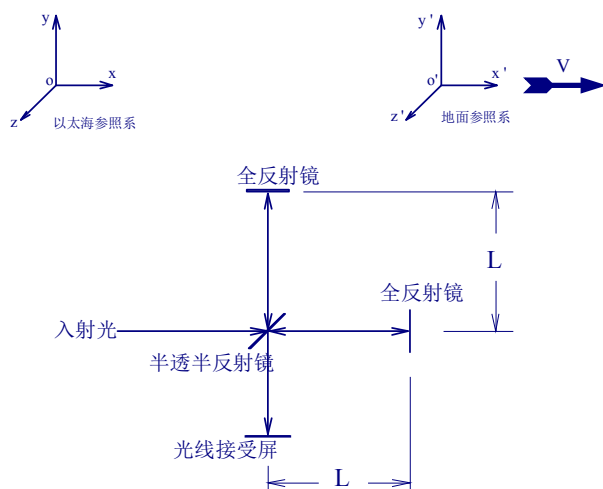


图1. 迈克尔逊干涉光路示意图

1928年，卡娄拉斯和米太斯塔德首先提出利用克尔盒法来测定光速。1951年，贝奇斯传德用这种方法测出的光速是299793千米/秒。光波是电磁波谱中的一小部分，当代人们对电磁波谱中的每一种电磁波都进行了精密的测量。1950年，艾森提出了用空腔共振法来测量光速。这种方法的原理是，微波通过空腔时当它



的频率为某一值时发生共振。根据空腔的长度可以求出共振腔的波长，在把共振腔的波长换算成光在真空中的波长，由波长和频率可计算出光速。当代计算出的最精确的光速都是通过波长和频率求得的。1958年，弗鲁姆求出光速的精确值： $299792.5 \pm 0.1$  千米/秒。1972年，埃文森测得了目前真空中光速的最佳数值： $299792457.4 \pm 0.1$  米/秒。光速的测定在光学的研究历程中有着重要的意义。虽然从人们设法测量光速到人们测量出较为精确的光速共经历了三百多年的时间，但在这期间每一点进步都促进了几何光学和物理光学的发展，尤其是在微粒说与波动说的争论中，光速的测定曾给这一场著名的科学争辩提供了非常重要的依据。

## 7、迈克尔逊实验

(1) 迈克尔逊 1881 年的干涉实验：1881 年，迈克尔逊专门设计了一个被后人命名为“迈克尔逊干涉实验”的光学实验来检验这个假说是否正确。

根据矢量合成法则，如果光线确实是在与绝对空间保持绝对静止状态的“以太”海中以恒定不变的速度进行传播，在相对于“以太”海以速度  $V$  运动的地面参照系中，光线在纵向光路前进的速度等于  $\sqrt{C^2 - V^2}$ ，在横向光路上向右前进的速度为  $C - V$ ，经镜面反射后返回向左前进的速度为  $C + V$ 。这样，两束相干光在纵向光路上与横向光路上走过的时间之差将等于：
$$\Delta T = \frac{2L}{\sqrt{C^2 - V^2}} - \left( \frac{L}{C+V} + \frac{L}{C-V} \right) = \frac{2L}{\sqrt{C^2 - V^2}} - \frac{2LC}{C^2 - V^2} = \frac{2L}{\sqrt{C^2 - V^2}} \left( 1 - \frac{C}{\sqrt{C^2 - V^2}} \right)$$

当人们在水平地面上把迈克尔逊干涉仪转动 90 度时，先前的纵向光路和横向光路正好对调，迈克尔逊干涉仪在转动 90 度的前后两种状态下，两束相干光在互相垂直的光路上走过的时间之差刚好相反，总差值为 2 倍的  $\Delta T$ 。这样，人们从光线接受屏上就应该看到由传播方向互相垂直的两路相干光所形成的干涉条纹将发生移动，但实验的结果是没有发现干涉条纹有任何移动。

(2)、迈克尔逊 1913 年的实验

这个实验采用了如图 1 的装置，光线  $A$  镜时，分为两支。一支是  $A > B > C > D > E > A$ ，另一支是  $A > E > D > C > B > A$ ， $C$  和  $E$  是旋转的镜子， $A$  是一个半透射镜， $B$  和  $D$  是反射镜，按照迈克尔逊的分析，这两支光线的的时间差是

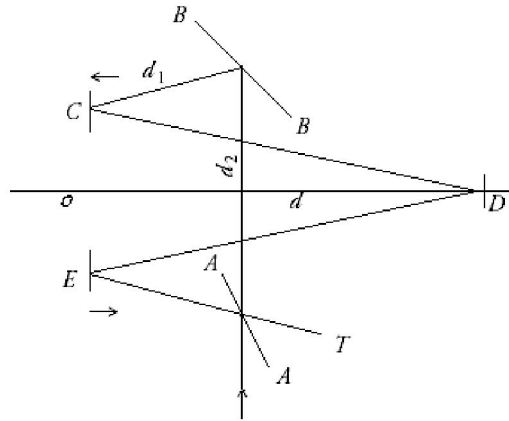


图 1

$$T_1 - T_2 = (4d/\lambda)(2 - r)(v/V) \quad (10)$$

式中各符号的意义：

$V$  未反射前的光速（原文用的符号）；

$v$  旋转反射镜的线速度；

$d$   $oD$  的距离；

$r = 2$  对应弹性碰撞理论；

$r = 1$  对应反射镜为新光源的理论；

$r = 0$  对应光速与源速无关的理论。

他所采用的实验装置， $d = 600$  厘米，旋转镜的中心距

表 2.2 光速与光源运动的无关性实验

研 究 者	方 法	光源速度 (以 $c$ 为单位)	结 果
de Sitter (1913) Zurhellen (1914)	双星观测		$k < 10^{-4}$
Heckmann (1960)	河外星系的较差光行差	$\sim 10^{-1}$	零结果
Tolman (1910)	洛埃干涉仪 (以太阳边缘作为光源)	$\sim 10^{-3}$	零结果
Majorana (1919); Tomaschek (1924)	迈克尔逊干涉仪 (以水银灯、恒星、太阳或月亮等作光源)	$\sim 10^{-1}$ $\sim 10^{-4}$	零结果
Бонч-Бруевич (1960)	相角调制	$\sim 10^{-1}$	$k = 0.02 \pm 0.07$
Beckmann 和 Mandics (1965)	洛埃干涉仪 (运动反射镜作光源)	$1.52 \times 10^{-7}$	$k \leq 0.05$
Kantor (1962)	干涉仪 (其中有运动的玻璃片)	$1.56 \times 10^{-7}$	$k = 0.67$
James 和 Sternberg (1963)	观察垂直通过运动玻璃板的光线产生的偏离		$k \leq 0.025$
Rotz (1963)	三光束干涉仪	$2 \times 10^{-7}$	$k \leq 0.1$
Babcock 和 Bergman (1964)	干涉仪 (其中有运动的玻璃片)	$1.25 \times 10^{-7}$	$k \leq 0.01$
Beckmann 和 Mandics (1964)	干涉仪 (其中有运动的玻璃片)		$k \leq 0.1$
Waddoups 等 (1965)	干涉仪 (其中有运动的云母片)		$k \leq 0.14$
Sadeh (1963)	飞行时间 (符合观测正负电子湮灭产生的两 $\gamma$ 光子)	0.5	$k \leq 0.3$
Alväger 等 (1963, 1964)	飞行时间 (比较 $C^{12}$ 和 $O^{16}$ 的 $\gamma$ 辐射速度)	0.03	$k \leq 0.1$
Phillippas 和 Fox (1964)	飞行时间 (符合观测飞行 $\pi^0$ 介子衰变的两 $\gamma$ 光子)	0.2	$k \leq 0.4$
Alväger 等 (1964, 1966)	飞行时间 (测量飞行 $\pi^0$ 介子衰变的 $\gamma$ 光子的速度)	0.99975	$k \leq 10^{-4}$

注: 表 2.2 中的  $k$  由方程 (2.8) 定义:  $c' = c \pm kv$ .

$l = 26.5$  厘米，碳弧光源。取光平均波长  $\lambda = 0.60\mu$ 。在他的报告中，给出了 1000 转/分条件下的实验数据，列入下表：

	1	2	3	4	5	6	7	
$\Delta$	3.8	3.1	3.2	4.3	3.0	3.93	3.83	3.81 = 考虑权重后的平均值
权重	1	1	1	2	2	3	4	3.76 = 计算位移 ( $v = 0$ )

这里  $\Delta$  是干涉条纹的位移。

根据 (10) 式，得出以下结果

$$r=0 \quad \Delta = 8 \left( dr/\lambda V \right) = 3.76 \text{---} \quad (11)$$

$$r=1 \quad \Delta = 4 \left( dr/\lambda V \right) = 1.88 \text{---} \quad (12)$$

$$r=2 \quad \Delta = 0 \text{-----} \quad (13)$$

因为实验结果和 (11) 式比较接近，所以迈克尔逊认为，该实验证明了光速与源速无关。

在 1903 年，特鲁顿——诺贝利用一个可自由转动的定向充电平板电容器做过检测地球相对以太空间绝对运动速度的实验。人们普遍认为，如果地球有相对“以太”的运动，带有异号电荷两极板电容器就应有趋向于平行运动方向上的转动。

同物质粒子没有任何相互作用的“以太”粒子与绝对空间保持着绝对静止状态的假说本来已经很牵强，原先以为光线是在这种“以太”海中以恒定不变的速度进行传播的设想又遭到了实验的否定，人们只能判定：在宇宙空间并不存在与物质粒子没有任何相互作用的“以太”粒子。

对于这个结论，19 世纪末的物理学家并不是马上都能够接受。Lorentz 在当时就提出了一个物质分子力“收缩假说”，他认为在横向光路上，由于迈克尔逊干涉仪以速度  $V$  相对于“以太”海运动，物体在这个方向上将发生分子力收缩，克尔逊干涉仪的横向臂长将按照  $1 : \sqrt{1-V^2/C^2}$  的比例缩短。于是，两束相干光在纵向光路上与横向光路上走过的时间之差修正为：
$$\Delta T = \frac{2L_{纵}}{\sqrt{C^2-V^2}} - \frac{2L_{横}C}{C^2-V^2} = \frac{2L}{\sqrt{C^2-V^2}} \left( 1 - \frac{C}{\sqrt{C^2-V^2}} \sqrt{1-V^2/C^2} \right) = 0$$

这样，迈克尔逊干涉仪在转动 90 度的过程中，干涉条纹不发生移动的现象似乎就得到了理论上的解释。中国学者证实光速在  $10^{-19}$  精度上无方向差异。扮演无限大速度的角色，就要具备无限大速度的性质，因此有检验真空光速不变的方程【1】

$$c' = c \pm KV \quad (4)$$

其中  $c$  是光源静止时的光速， $c'$  是相对于观察者以速度  $\pm V$  运动的光源发射的光信号的速度， $K$  是由实验确定的参数。 $K=0$  是相对论期望的结果， $K=1$  是发射理论（弹道假说）的情况。

文献【2】收入的 16 例实验结果为：有 3 例  $K=0$ ，其余 13 例  $K$  值在  $10^{-6}$ —0.67 之间，实验并没有真正证实  $K=0$ ，但相对论支持者认为  $K=0$ 。

参考文献：

【1】张元仲，狭义相对论实验基础，北京：科学出版社，1979 年，56。

【2】G.van Bieshroock, 1932, *Astrophys.*, 75, 64.

## 第二章 洛伦兹变换的思考

### 1、狭义相对论产生的背景

19 世纪 80 年代初，当普朗克(M. Planck, 1859~1947)表示决心献身理论物理学时，他的老师、著名的德国实验物理学家约利(P. von Jolly, 1809~1884)规劝他说：“年轻人。你为什么要断送自己的前途呢？要知道，理论物理学已经终结，微分方程已经确立，它的解法已经制定，可供计算的只是个别特殊的情况。可是，把自己的一生献给这一事业，值得吗？”1894 年，赫兹甚至在批评牛顿力学有关基本概念的著作中还坚持认为：“把一切自然现象还原为简单的力学定律是物理学的课题，在这一点上，所有的物理学家都是一致的。”热力学第二定律的不可逆性同牛顿力学的可逆性相对立。虽然热力学第二定律的统计解释表明可以从力学定律

导出热现象的不可逆性，但它引入了与牛顿力学规律的确定性相对立的统计规律；同时统计力学的各态历经假说根本不能归结为力学原理。另外，统计力学中的能量均分定理不能适用于具有无限传播的结论，也同引力的瞬时超距作用相对立。此外，麦克斯韦（1831~1879）的电磁场方程和伽利略（1564~1642）的相对性原理不协调，电磁现象领域中质量和电动力的速度相关也同牛顿力学的质量和力的速度无关相矛盾。

### （一）、洛仑兹的收缩假说

声名卓著的开尔芬十分热衷于构造以太的力学模型，他在 1884 年宣称：“在我没有给一种事物建立起一个力学模型，我是永远也不会满足的。”迈克尔逊—莫雷实验的“零结果”在最初人们并没有因此否定静止以太的存在，反而认为是实验可能失败了，或力图对实验结果作出种种解释。其中最具代表性的理论假说是荷兰物理学家洛仑兹的收缩假说。

#### 1. 洛仑兹(H.A.Lorentz)的贡献

1853 年 7 月生于荷兰。1870 年考入莱顿大学，主攻数学、物理学和天文学，1875 年 12 月获得博士学位，1877 年被乌得勒支大学聘为数学教授，同年莱顿大学授予他荷兰唯一的理论物理学教授席位（24 岁）。1912 年洛仑兹辞去莱顿大学教授职务，去政府部门任高等教育部部长。他创立了电子论，首次把以太和普通物质分开，1895 年提出著名的洛仑兹力公式。他将经典电磁场理论发展到了最后的高度，为相对论的诞生创造了条件。他因其电子论对塞曼效应进行了定量解释，与塞曼分享了 1902 年诺贝尔物理学奖。洛仑兹在世纪之交虽然积极参与了物理学的几个前沿领域，却极力设法修补旧理论，总想在不触犯经典理论框架的前提下把力学和电动力学调节器和起来。但是，1887 年迈克尔逊实验否定了为电磁理论所要求的菲涅耳的静止以太说，使电磁力学的基础受到了冲击。洛仑兹为此而郁郁不乐，他于 1892 年写信给瑞利说：“我现在简直不知道怎样才能摆脱这个矛盾。不过我仍然相信，如果我们不得不抛弃菲涅耳的理论，……我们就根本不会有有一个合适的理论了”。……直到晚年，他还认为以太是具有一定优点的概念。

#### 2. 长度收缩假说的提出

1892 年 11 月洛仑兹发表了《论地球对以太的相对运动》，用长度收缩假说解释了迈克尔逊—莫雷实验。他认为运动物体在其运动方向上的收缩，抵消了地球在以太中运行所造成的光程差，所以观察不到预期的条纹移动。他写到：“我终于想出唯一的方法来调和它与菲涅耳的理论：连接一个固体上的两点连线，如果开始平行于地球运动的方向，当它转过 90°后就保持原来的长度。如果令后一个位置的长度为 L，则前一个位置的长度为  $L(1-\alpha)$ 。”其中  $\alpha=v^2/2c^2$ 。1895 年洛仑兹给出了更精确的长度收缩系数为

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

，洛仑兹一直认为这种收缩是真实的，是由分子运动引起的。

#### 3. 一级近似的解释及地方时

洛仑兹的上述收缩假说只涉及到  $v^2/c^2$  的这种二级近似。1895 年，洛仑兹发表了《运动物体中电磁现象和光现象的理论研究》，提出了地方时概念，他对麦克斯韦方程组施加了一种变换。其中时间 t 变为“当地时间”  $t' = t - (v/c^2)x$ ，电场 E 变换为  $E' = E + v \times B/c$ ，磁场 B 变换为  $B' = B - v \times E/c$ ，结果发现麦克斯韦电磁场方程组的形式不变。由此证明其收缩假说可以准确到  $v/c$  一阶范围。这样就解释了迈克尔逊—莫雷实验。

“当地时间”  $t' = t - (v/c^2)x$ ，指在物体上的测得的时间，它与坐标系的平移速度有关。它表明，好象在运动坐标系上的时钟走慢了。洛仑兹认为地方时只不过是一个数学假设，不具有真实的物理意义，而牛顿力学中的绝对时间才是唯一真实的时间。与此相反，爱因斯坦认为不存在所谓的绝对时间，地方时才是唯一真实的时间。

#### 4. 实验验证的失败

①按照洛仑兹的长度收缩假说，物体的密度在不同的方向上会有所不同，这样光通过它时会产生双折射。1902 年瑞利、1904 年布雷斯先后进行了实验，未发现双折射现象。

②根据洛仑兹理论，若电容器的极板与地球的运动方向成一夹角，当电容器充电时，其极板会受到一转动力的作用，1903 年特劳顿和诺布尔作了实验，结果也是否定的。这些实验都是二阶效应，说明在二阶近似的条件下，也发现不了地球运动对电磁现象的影响，仅用“长度收缩”假说难以说明问题。

### （二）彭加勒的观点

洛仑兹认为，上述变换中的  $t'$ 、 $E'$ 、 $B'$  都不是真实的物理量，只是某种辅助量。另外，一级近似下的解释采用了一种对速度 v 线性相关的变换不变性，而二级近似下的解释，则完全撇开这种不变性，需要再回到伽利略变换，再引进收缩假说。这种人为性和逻辑上的不自洽性，使这套理论显的很不自然。



法国科学家彭加勒批评说：“如果为了解释迈克尔逊—莫雷实验的否定结果，需要引进新的假说，那么每当出现新的实验事实时，同样也发生这种需要。无疑的，对每一个新的实验结果创立一种假说这种做法是不自然的。”洛仑兹接受了这种批评，希望“能够利用某些基本假定，并且不用忽略这种数量级或那种数量级的量，来证明许多电磁作用都完全与系统的运动无关”。彭加勒(J.H.Poincare)①1895 年对洛仑兹的“长度收缩”假说的批评。

②1905 年发表论文《论电子动力学》，给洛仑兹理论以更简洁的形式，并将其时空变换命名为洛仑兹变换。

③1898 年发表论文《时间的测量》，首次提出光速在真空中不变的公设，认为没有这一公设，就无法测量光速；在论文中还讨论了用交换光信号来确定异地同时性的实验方法。

④1899 年彭加勒就认为绝对运动是不存在的，只有相对运动才有意义。

⑤1902 年在出版的《科学与假设》中提出“相对运动原理”：“任何系统的运动应当遵守同样的定律，不管人们把它纳于固定的坐标轴或纳于作直线而匀速运动的坐标轴”。

⑥彭加勒预感到物理学上将有重大突破，他说：“也许我们还要构造一种全新的力学，我们只不过是成功的瞥见了它，在这种力学中，惯性随着速度而增加，光速会变为不可逾越的极限。通常比较简单的力学可能依然是一级近似，因为它对不太大的速度还是正确的，以致于在新动力学中还可以找到旧动力学。”

⑦彭加勒的局限：

遗憾的是，彭加勒最终未能认识到抛弃以太的必要性，没能迈入相对论的殿堂。直到临终，他还对洛仑兹补偿理论的精神实质充满信心。他的相对性原理是作为一个“普遍的自然定律”提出来的，他期待有一种理论能解释或证明它。而狭义相对论中爱因斯坦则把相对性原理提升为公设，其中差别显而易见。

(三) 洛仑兹变换的提出

1904 年，洛仑兹发表了《速度小于光速运动系统中的电磁现象》，提出了决定时空变换的法则，在此基础上，1906 年彭加勒写出了“洛仑兹变换”式：

$$\begin{cases} x' = \beta l(x - vt) \\ y' = ly \\ z' = lz \\ t' = \beta l(t - \frac{v}{c^2}x) \end{cases} \quad \text{式中：} \beta = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$l$  为速度  $v$  的函数。

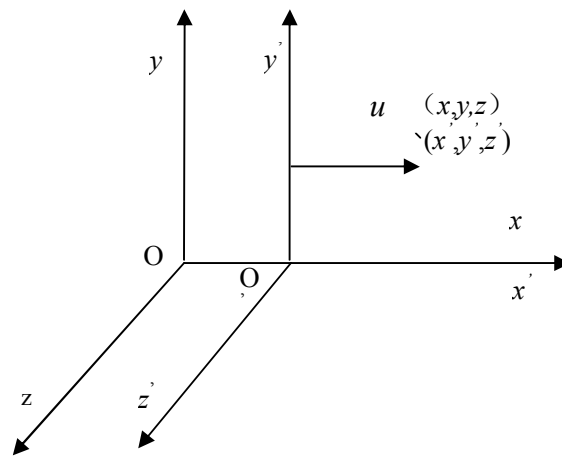


图1 洛伦兹变换

(1) 时空坐标关系为

$$\left\{ \begin{array}{l} x' = \frac{x-ut}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}} \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = \frac{t-\frac{u}{c^2}x}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}} \end{array} \right. \quad (s \text{系} \rightarrow s' \text{系}) \quad , \quad \left\{ \begin{array}{l} x = \frac{x'+ut'}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}} \\ y = y' \\ z = z' \\ t = \frac{t'+\frac{u}{c^2}x'}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}} \end{array} \right. \quad (s' \text{系} \rightarrow s \text{系}) \quad . \quad (1)$$

(2) 速度变换关系为

$$\left\{ \begin{array}{l} v_x' = \frac{v_x - u}{1 - \frac{uv_x}{c^2}} \\ v_y' = \frac{v_y \sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}{1 - \frac{uv_x}{c^2}} \\ v_z' = \frac{v_z \sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}{1 - \frac{uv_x}{c^2}} \end{array} \right. \quad (s \text{系} \rightarrow s' \text{系}) \quad , \quad \left\{ \begin{array}{l} v_x = \frac{v_x' + u}{1 + \frac{uv_x'}{c^2}} \\ v_y = \frac{v_y' \sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}{1 + \frac{uv_x'}{c^2}} \\ v_z = \frac{v_z' \sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}{1 + \frac{uv_x'}{c^2}} \end{array} \right. \quad (s' \text{系} \rightarrow s \text{系})$$

可以说,洛伦兹的长度收缩假说、地方时、洛伦兹变换以及他最早形成的关于物质质量随其运动速度增加的思想,都已包含了狭义相对论的基本内容,为爱因斯坦创立狭义相对论创造了条件。

洛伦兹变换解决了相对作平动的两个参考系之间的坐标及物理量的变换问题。有经典力学可知,平动和转动是物体宏观运动的两种基本运动形式,因此转动也有类似洛伦兹变换的那样的简单变换关系, M.Carmeli 对两大基本理论(洛伦兹变换和刚体转动)及上述问题做了深入的研究,给出这种类似的变换,采用通俗的表述方法,这种变换可表示如下

$$\left\{ \begin{array}{l} ds' = r(ds - \rho\omega dt) \\ \rho' = \rho \\ Z' = Z \\ dt' = r\left(dt - \frac{\rho\omega}{c^2} ds\right) \end{array} \right. , \quad \text{这种变换被称为“洛伦兹变换”。这种变换被称为“旋转洛伦兹变换。”}$$

严格来讲,若  $s'$  系的观角速度是  $\omega$ ,  $s$  系的观测者测量的角速度不再是  $\omega$ ,应当有个小量的修正,但为了讨论简单起忽略这一差别,对于非高速自转的天体是适用的。

### 1、速度的合成

设点  $P$ (圆盘上一点)在  $s'$  中的位矢为  $r$ ,速度为  $u$ ,在  $s$  系中  $P$  点的速度为  $u$ ,由洛伦兹变换可得速度变换公式( $c \neq 1$ )

$$u_x = \frac{u_x' + v}{1 + \frac{vu_x'}{c^2}}, \quad u_y = \frac{u_y' \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}{1 + \frac{vu_x'}{c^2}},$$

在  $s'$  系中质点  $P$  的速度  $u'$  可以表示为:

$$u'_x = -r\omega \sin \theta', \quad u'_y = r\omega \cos \theta'$$

取两参照系的初始时间  $t'_0 = t_0 = 0$ , 利用动参照系和静止参照系中时间间隔的关系应有

$$\theta' = \omega t' = \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} \omega t$$

所以点  $P$  在  $s$  系中的速度分量可以表示为

$$\begin{cases} u_x = \frac{-r\omega \sin \theta' + v}{1 - \frac{r\omega v \sin \theta'}{c^2}} \\ u_y = \frac{r\omega \cos \theta' \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}{1 - \frac{r\omega v \sin \theta'}{c^2}} \end{cases}$$

写成矢量形式为

$$\vec{u} = \frac{-r\omega \sin \theta' + v}{1 - \frac{r\omega v \sin \theta'}{c^2}} \vec{i} + \frac{r\omega \cos \theta' \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}{1 - \frac{r\omega v \sin \theta'}{c^2}} \vec{j}$$

即两坐标系的速度变换公式。

## 2、运动时钟“变慢”和多普勒效应

### (1) 运动时钟的“变慢”

设某光源位于圆盘上的  $P$  点,若光源以自己的原时间间隔  $dt''$  先后发出两个光信号,由旋转洛伦兹变换可知  $s'$  中的观测者测得的时间间隔为

$$dt' = \frac{dt''}{\sqrt{1 - \left(\frac{r\omega}{c}\right)^2}}$$

则  $s$  系中测得的时间间隔为

$$dt = \frac{dt'}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} = \frac{dt''}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} \sqrt{1 - \left(\frac{r\omega}{c}\right)^2}}$$

上式为静止系  $s$  中某光源的时率与  $P$  点光源的时率之间的关系,由此可见运动的时钟“变慢”了,比狭

义相对论中的时间间隔公式多出了一个因子  $\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{r\omega}{c}\right)^2}}$ 。

### (2) 多普勒效应

假设在  $P$  点处有一光源,以时间间隔  $dt''$  先后向  $O$  点发出两个光信号,若圆盘离静止坐标系  $s$  中观察者足够远,则两个光信号到达  $O$  的时间差为

$$\Delta t \approx \frac{\left| d\vec{R} \right| \cos a}{c} + dt = \frac{\left| d\vec{R} \right| \cos a}{c} + \frac{dt''}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2} \sqrt{1-\left(\frac{r\omega}{c}\right)^2}}$$

其中  $a$  为  $t$  时刻光源的位矢与  $x$  轴之间的夹角,  $R$  表示光源对静坐标系原点  $O$  的位矢, 第一项是由光信号传播需要的时间, 第二项是因为(31)式造成的。由洛伦兹变换可知

$$\begin{cases} x = \frac{r \cos \theta' + vt'}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}} \\ y = r \sin \theta' \\ z = z' \\ t = \frac{t' + \frac{vr \cos \theta'}{c^2}}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}} \end{cases}, \begin{cases} dx = \frac{-r \sin \theta' d\theta' + v dt'}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}} \\ dy = r \cos \theta' d\theta' \\ dz = dz' \\ dt = \frac{dt' - \frac{vr \sin \theta' d\theta'}{c^2}}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}} \end{cases}$$

$$\left| d\vec{R} \right| = \left| dx \vec{i} + dy \vec{j} \right| = \left[ \frac{(-r \omega \sin \theta' d\theta' + v dt')^2}{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2} + (r \omega \cos \theta' dt')^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

所以

$$\Delta t = \frac{dt''}{\sqrt{1-\left(\frac{r\omega}{c}\right)^2}} \left\{ \frac{\cos a}{c} \left[ \frac{(-r \omega \sin \theta' + v)^2}{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2} + (r \omega \cos \theta')^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}} \right\}$$

因此

当  $r = 0$  时, 圆盘退化成一点, 有

$$\Delta t = \frac{1 + \frac{v}{c}}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}} dt$$

即狭义相对论中的多普勒效应[5], 结果和经典教材中的结果一致。

### 3、“尺缩”效应

在动坐标系  $s'$  中静止的观测者看来, 旋转面应为“爱因斯坦转盘”, 这可以用旋转洛伦兹设  $P$  点所在圆周的有向线元为  $d\vec{l}'$ , 则

$$d\vec{l}' = \frac{-r \sin \theta' d\theta'}{\sqrt{1-\left(\frac{\omega r}{c}\right)^2}} \vec{i} + \frac{r \cos \theta' d\theta'}{\sqrt{1-\left(\frac{\omega r}{c}\right)^2}} \vec{j}$$



$$\left| d\vec{l}' \right| = \frac{rd\theta'}{\sqrt{1-\left(\frac{\omega r}{c}\right)^2}}$$

所以在  $s'$  系中静止的观测者测得仍为一圆,但周长为

$$C' = \int \left| d\vec{l}' \right| = \frac{r}{\sqrt{1-\left(\frac{\omega r}{c}\right)^2}} \int_0^{2\pi} d\theta' = \frac{c_0}{\sqrt{1-\left(\frac{\omega r}{c}\right)^2}} > C_0$$

周长与直径之比为

$$\frac{c'}{2r} = \frac{c_0}{2r\sqrt{1-\left(\frac{\omega r}{c}\right)^2}} = \frac{\pi}{\sqrt{1-\left(\frac{\omega r}{c}\right)^2}} > \pi$$

$$s' = \int_0^{2\pi} \int_0^r \frac{rd\theta' dr}{\sqrt{1-\left(\frac{\omega r}{c}\right)^2}} = \left[ 1 - \sqrt{1-\left(\frac{\omega r}{c}\right)^2} \right] \frac{2\pi c^2}{\omega^2}$$

面积为

$$s' \approx \pi r^2 \left( 1 + \frac{\omega^2 r^2}{4c^2} \right)$$

当盘边缘速度  $v = \omega r \ll c$  时,展开则有

在静坐标系  $s$  中看,该线元矢量随  $s'$  系沿  $x$  轴方向相对  $s$  系运动时,平行方向会收缩,即有

$$d\vec{l} = \frac{-r \sin \theta' d\theta'}{\sqrt{1-\left(\frac{\omega r}{c}\right)^2} \sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}} \vec{i} + \frac{r \cos \theta' d\theta'}{\sqrt{1-\left(\frac{\omega r}{c}\right)^2}} \vec{j} \quad \left| d\vec{l} \right| = rd\theta' \left\{ \frac{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2 \cos^2 \theta'}{\left[ 1-\left(\frac{\omega r}{c}\right)^2 \right] \left[ 1-\left(\frac{v}{c}\right)^2 \right]} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

则  $s$  系中测得的闭合曲线周长为

$$l = \int \left| d\vec{l} \right| = \frac{r \int_0^{2\pi} \sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2} \cos^2 \theta' d\theta'}{\left\{ \left[ 1-\left(\frac{\omega r}{c}\right)^2 \right] \left[ 1-\left(\frac{v}{c}\right)^2 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}} = \frac{4\pi \text{EllipticE} \left( \frac{V}{C} \right)}{\left\{ \left[ 1-\left(\frac{\omega r}{c}\right)^2 \right] \left[ 1-\left(\frac{v}{c}\right)^2 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}}$$

,其中 EllipticE 函数为第二

$$\text{EllipticE}(x) = \int_0^1 \frac{\sqrt{1-x^2 k^2}}{\sqrt{1-k^2}} dk$$

类完全或不完全椭圆积分,其定义为

,由此可见,静止系中观测的结果为一椭圆。

## 2、狭义相对论的产生以及科学界最初的反应

1905年,年仅26岁的爱因斯坦先生,把一篇题为“论动体的电动力学”的论文署上了他个人的作者名字后,交到了时任德国《物理学杂志》(annalen der physic)编辑的柏林大学物理教授M.普朗克的手里。普朗克其时在病床边是否看懂了爱因斯坦的论文,旁人不得而知。但今天我们知道,普朗克曾将该文请伯尔尼的格鲁涅尔教授审阅,格鲁涅尔看过之后,又请物理学教授福尔斯特审阅。两教授最终审阅的结论是“不知

所云”。【1】洛仑兹的理论是以静止以太为出发点，在保持麦克斯韦方程不变的条件下创立起来的“构造性”理论；而爱因斯坦的狭义相对论是在相对性原理和光速不变原理的基础上创建的“原理性”理论。

据玻恩回忆说：“我在洛仑兹逝世前几年看望他时，他对相对论的怀疑态度没有改变。”据板田昌一讲，洛仑兹面对波粒二象性的新概念，曾绝望地哀叹：“在今天，人们提出了和昨天所说的绝然相反的主张。这样一来，已经没有真理的标准了，也不知道科学是什么了，我真后悔我未能在这些矛盾出现前五年死去。”玻耳兹曼直到1902年还公开宣称：“力学是整个理论物理大厦赖以建立的基础，是所有其他科学分枝赖以产生的根源。”迈克尔逊设计试验的目的是为了证明“以太”的存在，可是事与愿违。为此他非常失望，以至于试验没按原计划完成，而是草草收场。他至死（1931年）还念念不忘“可爱的以太”。J.J.汤姆生在1909年宣称：“以太并不是思辨哲学家异想天开的创造，对我们来说，就象我们呼吸空气一样不可缺少。”A.A.马克西莫夫说：“整个说来，相对论为科学发展所提出的方向却是错误的。”

普朗克是量子论的天才创始人，也是一个具有广泛科学兴趣和敏锐直觉的物理学家，他还是高度评价相对论的内在严整和谐的第一人。他理解到或者说感觉到爱因斯坦的理论将长期决定物理学的研究方向，这些研究将带来不能预先确定的、但对科学和文化的所有领域无疑是重大的成果。普朗克使用了他在科学院院士中无可争议的权威，不只是科学上的，还有道德上的权威，全力赞誉着爱因斯坦。

无论在这儿，还是在那儿，人们根本不理解我的理论，这难道不会对我有一个很愚蠢的印象吗？我认为，发生这种现象是很滑稽和有趣的。我相信，真正吸引他们的是不理解所带来的神秘性；这使他们印象深刻，因为它具有神秘的诱惑力。【2】因为电磁场在这里不再以某些物质的状态的身份出现，它本身就是存在物，它和有重物质是同一类东西，而且它也带有惯性的特征。”“这样一个理论允许一下子预言到迈克耳孙和莫雷的否定结论。”【3】2012年初出版的一本高举宏相大旗的新著《科学巨擘：爱因斯坦》中，作者义愤填膺地说：“无论是‘狭义相对论’还是‘广义相对论’，总有一些反对意见冒出来，还有若干实验公布于世，以证明他的理论是‘错误’的……而这些暗流的来源，又不是孤陋寡闻之士，全是物理学领域的专家。这让诺贝尔奖委员会举棋不定，不敢把奖颁发给爱因斯坦。”

1922年，普特南出版公司出版了哥伦比亚大学天体力学教授查尔斯·普尔所著的《万有引力与相对论》一书，该书对爱因斯坦理论当时的实验依据进行了批评。它提出了重要的意见，并且用商榷的而不是武断的口气说，“相对论也许是正确的，但是，目前的证据尚不完备。”1932年阿瑟·林奇的著作《驳爱因斯坦》虽然根本不是什么严谨的科学论著，但也不是毫无价值。直到后来，仍有许多享有盛名的物理学家持有与爱因斯坦根本不同的观点，英国著名的数学家爱德华·米尔恩的“运动相对论”就是一例。

中国“文革”期间，曾掀起过批判相对论和爱因斯坦的风潮，认为相对论的时空理论“是彻头彻尾的形而上学唯心主义的”、“在物理学中掀起了一股强大的唯心主义逆流”，爱因斯坦本人则被认定为“本世纪以来自然科学领域中最大的资产阶级反动学术权威”。诺贝尔奖委员会拒绝为Einstein的相对论授奖。Einstein同时代的著名科学家Lorentz、彭加勒和卢瑟福等全都不赞成相对论，被Einstein誉为相对论先驱的马赫，竟声明自己与相对论没有关系，“不承认相对论”。大多数物理实验家如拉海利、艾弗斯、沙迪、格兰纽父子、马林诺夫和帕帕斯等也不认同相对论。著名迈克尔逊——莫雷实验的主创人迈克尔逊因自己的实验“引出相对论这一怪物”而饮恨终生；Einstein相对性原理把相对中性的稳定力场情况下低速惯性系中简单力学现象的等价性，引申和推广到一切惯性系和所有物理现象的等价性，进一步扩大了人的认识和客观自然的矛盾。为了这个假设能有立足之地，它假设空间是虚无的真空，还假设了光速不变及光速最大，还假设不同惯性系上的空间和时间可变，……由于这些错误的假设做前提，所以才产生了《狭义相对论》这个“怪物”（迈克尔逊语）。

#### 参考文献

【1】 陈建礼。逝者如斯，而未尝往也——狭义相对论的诞生[G]//科学的丰碑——20世纪重大科技成就纵览。济南：山东科学技术出版社，1998：340。

【2】 John D.Barrow. 作为图标的爱因斯坦 [J] //爱因斯坦与物理百年 (year of physics a celebration in chinese)。北京：北京大学出版社，2005：13。

【3】 A. 爱因斯坦。关于相对性原理和由此得出的结论[G]//爱因斯坦文集（第二卷）。北京：商务印书馆，1977:151。

### 3、Lorentz transformation 经典物理推导方法【1】

方法1: 设空间有两个静止的物体A与B, 它们之间重力的作用力为 $F_1$ , 在 $t$ 刻内A的重力对B做功 $F_1^{ut}$ ;

当 A 有  $v$  速时设 A、B 之间的重力作用为  $F_2$ ，其重力对 B 的初始速度是  $u' + v$ ，设在  $t'$  刻对 B 做了与  $F_1 ut$  等量的功。于是得等式： $F_1 ut = F_2 (u' + v)t'$  (1)

当 A、B 都有  $v$  速时，设它们的重力作用为  $F_3$ ，动 A 在  $t'$  刻对动 B 做功  $F_3 u't'$ ；而当 A 静止而 B 有  $v$  速时，静 A 在  $t''$  刻对动 B 做了与  $F_3 u't'$  等量的功，于是得等式： $F_3 u't' = F_4 (u - v)t''$  (2)

设  $t'' = nt$ ， $\frac{F_4}{F_3} = k_2$ ， $\frac{F_2}{F_1} = k_1$ ， $ut = x$ ， $u't' = x'$ ，代入 (1)、(2)，

可得等式： $x = k_1(x' + vt')$  (3)  $x' = k_2(x - vt)$  (4)

将 (4) 代入 (3)，消去  $x'$ ，整理得： $t' = k_2 \left[ t - \frac{x}{v} \left( 1 - \frac{1}{k_1 k_2} \right) \right]$  (5)

将 (4)、(5) 代入  $x^2 - c^2 t^2 = x'^2 - c^2 t'^2$ ，整理可得三大项：  
 $(c^2 k_2^2 - k_2^2 v^2 - c^2) t^2 + \left[ 2vk_2^2 - \frac{2c^2 k_2^2}{v} \left( 1 - \frac{1}{k_1 k_2} \right) \right] xt + \left[ 1 - k_2^2 + \frac{c^2 k_2^2}{v^2} \left( 1 - \frac{1}{k_1 k_2} \right)^2 \right] x^2 = 0$ ，当  $t^2$ 、 $xt$ 、 $x^2$  的系数均为 0 时，上式成立。

$$k_2 = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

从第一项系数等于 0，可解得  $k_2$  代入第二项系数并等于 0，可解得  $k_1 = k_2$ 。将  $k_1$ 、 $k_2$  代入第三项系数，可验证其为 0。这样就求得了洛伦兹变换。

方法 2、用相对性原理求出变换关系式

S 原点的坐标为

$$\begin{cases} x = 0 (S \text{ 上测}) \\ x' = -vt' (S' \text{ 上测}) \end{cases} \quad \text{即} \quad \begin{cases} x = 0 \\ x' + vt' = 0 \end{cases}$$

$\therefore x$  与  $x' + vt'$  同时为零， $\therefore$  可写成： $x = k(x' + vt')$ 。 $\therefore$  两组时空坐标是对一事件而言的， $\therefore$  它们应有一一对应关系，即要求它们之间为线性变换， $\therefore m=1$ ，即  $x = k(x' + vt')$  (6) 同理： $x' = k'(x + vt)$  (7)

根据相对性原理，对等价的惯性系而言，(6)、(7) 二式除  $v \rightarrow v'$  外，它们应有相同形式，即要求  $k' = k$ ，  
 $\Rightarrow \begin{cases} x = k(x' + vt') \\ x' = k(x + vt) \end{cases}$  (8)

解 (6) 有  $t' = kt + \frac{1 - k^2}{kv} x$  (9)

$$\Rightarrow \begin{cases} x' = k(x - vt) \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = t \end{cases} \quad (10)$$

2、用光速不变原理求  $k=?$

$t = t' = 0$  时，一光信号从原点沿 OX 轴前进，信号到达坐标为：

$$\begin{cases} x = ct \text{ (S系上测)} \\ x' = ct' \text{ (S'系上测)} \end{cases} \quad (c \text{ 不变}) \quad (11)$$

(11)代(8)中

$$\begin{cases} ct = k(ct' + vt') = k(c+v)t' \\ ct' = k(ct - vt) = k(c-v)t \end{cases}$$

上述二式两边相乘有：

$$c^2 tt' = k^2 (c^2 - v^2) tt'$$

$$\Rightarrow k = \sqrt{\frac{c^2}{c^2 - v^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad \left( \beta = \frac{v}{c} \right)$$

k代(10)中，有

$$\begin{cases} x' = \frac{x + vt}{\sqrt{1 - \beta^2}} \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \beta^2}} \end{cases} \quad \text{或} \quad \begin{cases} x' = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \beta^2}} \\ y = y' \\ z = z' \\ t = \frac{t' + \frac{v}{c^2}x'}{\sqrt{1 - \beta^2}} \end{cases} \quad (12)$$

讨论：(1) 时间与空间是相联系的，这与经典情况截然不同。

(2) 因为时空坐标都是实数，所以  $\sqrt{1 - \beta^2} = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$  为实数，要求  $v \leq c$ 。 $v$  代表选为参考系的任意两个物理系统的相对速度。可知，物体的速度上限为  $c$ ， $v > c$  时洛伦兹变换无意义。

(3)  $\frac{v}{c} \ll 1$  时，

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

即洛伦兹变换变为伽利略变换， $v \ll c$  叫做经典极限条件。

方法三：设想有两个惯性坐标系分别叫 S 系、S'系，S'系的原点 O'相对 S 系的原点 O 以速率  $v$  沿 x 轴正方向运动。任意一事件在 S 系、S'系中的时空坐标分别为  $(x, y, z, t)$ 、 $(x', y', z', t')$ 。两惯性系重合时，分别开始计时。若  $x=0$ ，则  $x'+vt'=0$ 。这是变换须满足的一个必要条件，故猜测任意一事件的坐标从 S'系到 S 系的变换为  $x = \gamma(x' + vt')$  (1)

式中引入了常数  $\gamma$ ，命名为洛伦兹因子

(由于这个变换是猜测的，显然需要对其推导出的结论进行实验以验证其正确性)

在此猜测上，引入相对性原理，即不同惯性系的物理方程的形式应相同。故上述事件坐标从 S 系到 S'系的变换为



$$x' = \gamma (x - vt) \quad (2)$$

y 与 y'、z 与 z' 的变换可以直接得出，即

$$y' = y \quad (3)$$

$$z' = z \quad (4)$$

把 (2) 代入 (1)，解 t' 得

$$t' = \gamma t + (1 - \gamma^2)x/v \quad (5)$$

在上面推导的基础上，引入光速不变原理，以寻求  $\gamma$  的取值

设想由重合的原点 O (O') 发出一束沿 x 轴正方向的光，设该光束的波前坐标为 (X, Y, Z, T)、(X', Y', Z', T')。根据光速不变，有

$$X = cT \quad (6)$$

$$X' = cT' \quad (7)$$

(1) (2) 相乘得

$$xx' = \gamma^2 (xx' - xvt + xvt' - v^2 tt') \quad (8)$$

以波前这一事件作为对象，则 (8) 写成

$$XX' = \gamma^2 (XX' - X'VT + XVT' - V^2 TT') \quad (9)$$

(6) (7) 代入 (9)，化简得洛伦兹因子

$$\gamma = [1 - (v/c)^2]^{-1/2} \quad (10)$$

(10) 代入 (5)，化简得

$$t' = \gamma (t - vx/c^2) \quad (11)$$

把 (2)、(3)、(4)、(11) 放在一起，即 S 系到 S' 系的洛伦兹变换

$$x' = \gamma (x - vt),$$

$$y' = y,$$

$$z' = z,$$

$$t' = \gamma (t - vx/c^2) \quad (12)$$

根据相对性原理，由 (12) 得 S' 系到 S 系的洛伦兹变换

$$x = \gamma (x' + vt'), \quad y = y', \quad z = z', \quad t = \gamma (t' + vx'/c^2) \quad (13)$$

下面求洛伦兹变换下的速度变换关系

考虑分别从 S 系和 S' 系观测一质点 P 的运动速度。设在 S 系和 S' 系中分别测得的速度为  $u(j, n, m)$  和  $u'(j', n', m')$

由 (12) 对 t' 求导即得 S 系到 S' 系的洛伦兹速度变换

$$j' = (j - v)/(1 - vj/c^2),$$

$$n' = n / [\gamma (1 - vj/c^2)^{-1}],$$

$$m' = m / [\gamma (1 - vj/c^2)^{-1}] \quad (14)$$

根据相对性原理，由 (14) 得 S' 系到 S 系的洛伦兹速度变换

$$j = (j' + v)/(1 + vj'/c^2),$$

$$n = n' / [\gamma (1 + vj'/c^2)^{-1}],$$

$$m = m' / [\gamma (1 + vj'/c^2)^{-1}] \quad (15)$$

洛伦兹变换结合动量定理和质量守恒定律，可以得出狭义相对论的所有定量结论。这些结论得到实验验证后，也就说明了狭义相对论的正确性

参考文献：

【1】徐行可、张晓、张庆福：《物理学概论（上）》134 页，西南交通大学出版社，1995 年 12 月版。

#### 4、同时性的相对性

经典力学体系中，不需要考虑观测者的观测效应，也不需要任何观测信号，所以也不存在信号延迟问题。这表明经典力学所考虑的是在理想状态下的物理本质关系。在现实生活中，任何物理事件的本质都需要通过对物理现象的观察来反映，这样就必然引入观测者，而观测者本身不能将自己置于整个三维空间中，所以必须借助观测信号来进行观测，由此又必须引入观测信号。这种引入了观测这和观测信号的物理规律，与理想状态下的物理本质规律是不会完全相同的，需要进行一定的关系推演，才能够通过观测者所观测到的物理现象推知符合经典理论的物理本质。“在相对论的第一篇论文发表之前很久，爱因斯坦就已经认识到‘相对性原

理’和‘麦克斯韦电磁理论’是应该坚持的基本原理，他也已认识到这将导致电磁理论与参考系无关，以及由此引起的光速与参考系无关的结论，即所谓‘光速不变性’。也就是说，爱因斯坦已经抓住了‘相对论’的基础。那么他为什么一直没有建立起‘相对论’呢？……他回忆……当时……正被一个问题卡住。这个问题就是‘光速不变性’似乎与力学中的速度叠加法则相矛盾。”<sup>[1]</sup>“在经过了一年时间的研究以后，爱因斯坦终于领悟到，问题正出在人们最不容易怀疑的一个基本思想观念上，即同时性的问题上。”<sup>[2]</sup>“同时的相对性正是爱因斯坦建立狭义相对论时空观的突破点。在经典力学中时间是绝对的，因而同时也是绝对的：在一个惯性系中同时发生的两事件，在所有惯性系中都是同时的。”<sup>[3]</sup>

Einstein 在《狭义相对论的意义》中写道：为了完成时间的定义，可以使用真空中光速恒定的原理。假定在 K 系各处放置同样的時計，相对于 K 保持静止，并按下列安排校准。当某一时計 Um 指向时刻 Tm 时，从这只時計发出光线，在真空中通过距离 Rmn 到時計 Un；当光线遇着時計 Un 的时刻，使時計 Un 对准到时刻 Tn=Tm+Rmn/c。光速恒定原理于是断定这样校准時計不会引起矛盾。设有一个牛顿力学方程在其中有效的坐标系。为了使我们的陈述比较严谨，并且便于将这坐标同以后要引进来的别的坐标系在字面上加以区别，我们叫他“静系”。

如果一个质点相对于这个坐标系是静止的，那末它相对于后者的位置就能够用刚性的量杆按照欧几里得几何的方法来定出，并且能用笛卡儿坐标系来表示。

如果我们要描述一个质点的运动，我们就以时间的函数来给出它的坐标值。现在我们必须记住，这样的数学描述，只有在我们十分清楚的懂得“时间”在这里指的是什么之后才有物理意义。我们应当考虑到：凡是时间在里面起作用的我们的一切判断，总是关于同时的事件的判断。比如我说，“那列火车 7 点钟到达这里”，这大概就是说“我的表的指针指示 7 同火车的到达是同时的事件。”<sup>①</sup>

可能有人认为，用“我的表的短针的位置”来代替“时间”，也许有可能克服由于定义“时间”而带来的一切困难。事实上，如果问题只是在于为这只表所在的地点来定义一种时间，那末这样的一种定义就已经足够了；但是，如果问题是要把发生在不同地点的一系列事件在时间上联系起来，或者说——其结果依然一样——要定义出那些在远离这只表的地点所发生的事件的时间，那末这样的定义就不够了。

当然，我们对于用如下的办法来测定事件的时间也许会感到满意，那就是让观察者同表一起处于坐标的原点上，而当每一个表明时间发生的光信号通过空虚空间达到观察者时，他就把时针位置同光到达的时间对应起来。但是这种对应关系有一个缺点，正如我们从经验中所已知道的那样，他同这个带有表的观察者所在的位置有关。通过下面的考虑，我们得到一种比较切合实际得多的测定法。

如果在空间的 A 点放一钟，那末对于贴近 A 处的事件的时间，A 处的一个观察者能够由找出同这些事件同时出现的时针的位置来加以确定。如果又在空间的 B 点放一只钟——我们还要加一句，“这是一只同放在 A 处的那只完全一样的钟。”——那末，通过在 B 处的观察者，也能够求出贴近 B 处的事件的时间，但是是没有进一步的规定，也能够求出贴近 B 处的事件的时间，但是要没有进一步的规定，就不可能把 A 处的事件同 B 处的事件在时间上进行比较；到此为止，我们只定义了“A 时间”和“B 时间”，但是并没有定义对于 A 和 B 公共的“时间”。只有通过定义，把光从 A 到 B 所需要的“时间”规定等于它从 B 到 A 所需要的“时间”，我们才能够定义 A 和 B 的公共“时间”。设在“A 时间”tA 从 A 发出一道光线射向 B，它在“B 时间”tB 又从 B 被反射向 A，而在“A 时间”t'A 回到 A 处。如果 tB - tA = t'A - tB，那末这两只钟按照定义是同步的。

我们假定，这个同时性的定义是没有矛盾的，并且对于无论多少个点也适用，于是下面两个关系是普遍有效的：

1. 如果在 B 处的钟同在 A 处的钟，那末在 A 处的钟也就同 B 处的钟同步。
2. 如果在 A 处的钟既同 B 处的钟，有同 C 处的钟同步的，那末，B 处的两只钟也是相互同步的。

这样，我们借助于某些（假想的）物理经验，对于静止不同地放的各只钟，规定了什么叫做它们是同步的，从而显然也就获得恶劣“同时”和“时间”的定义。一个事件的“时间”，就是在这事件发生地点静止的一只钟同该事件同时的一种指示，而这只钟是同某一只特定的静止的钟同步的，而且对于一切的时间测定，也都是同这只特定的钟同步的。

根据经验，我们还把下列量值  $2AB / (t'A - tA) = V$ ，当作一个普适常数（光在空虚空间中的速度）。要点是，我们用静止在静止坐标系中的钟来定义时间；由于它从属于静止的坐标系，我们把这样定义的时间叫做“静系时间”。

注：① 这里，我们不去讨论那种隐伏在（近乎）同一地点发生的两个事件的同时性这一概念里的不精确性，这种不精确性同样必须用一种抽象法把他们消除。——原注

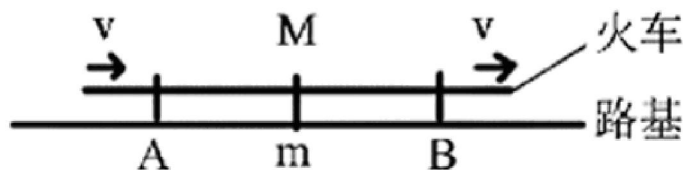
Einstein 认为地方时才是度量物体运动的唯一真实的时间，而洛伦兹却在 1915 年再版的《电子论》中承认了自己的错误：“是我坚持变量  $t$  只能考虑为真实时间的思想和我坚持地方时  $t$  必须只能考虑为一个数学辅助量的思想的结果。”认为地方时只不过是数学的假定或是一种数学辅助量，不具有真实的物理意义。1922 年 12 月 14 日 Einstein 在日本东京演说《我是如何创造相对论的》：“时间这个概念本来是不能给一个绝对的定义的，”《Einstein 文集》：“由此得知，两个隔开的事件的同时性不是一个不变的概念，刚体的大小和时钟的快慢都同它们的运动状态有关。”两个隔开的事件我们不知道是不是完全隔开的，如果完全独立到没有任何关系联系时我们讨论已无任何意义和怎么的都行，因为我们根本无法知道或不知道是不是同时或不同同时和谁也不知道究竟谁不准。测量与被测量肯定是属于一个系统，不存在两个完全隔开的事件，两个隔开的事件不属于相对关系，如果属于一个相对系统这时又违背了相对性原理，既然相对就必然存在相互联系，隔开也还是属于一个系统。Einstein 的相对却是两个毫无关联的组成的一个体系，既然是一个体系那么就必然存在一个相同的物理条件，它们之间也就应该存在必然联系，相对也好绝对也好但都是存在对应联系关系的。所谓的相对性是把它们之间的时间与运动的关系实质分割成孤立毫不相关而造成的，否则就不会发生相对时间事件了。

Einstein 为我们选择了最好的校钟法：“我们必须在这两个钟的距离的中点处摄取这两个钟的电视图，在这个中点上观察它们。如果信号是同时发出的，它们也同时到达中点处。假使从中点上所观察到的两个好钟一直指示着相同的时间，那么它们便能很适宜于来指示距离很远的两点上的时间。”【44】我们可以很清楚地看到这种方法是以前光速各向同性为前提的。Einstein 在 1905 年《论动体的电动力学》一文中建立狭义相对论时，提出了同时的相对性。Einstein 在思想世界中经过一番想象推论之后指出：“我们不能给予同时性这概念以任何绝对的意义；两个事件，从一个坐标系看是同时的，而从另一个相对于这个坐标系运动着的坐标系看来，它们就不能再被认为是同时的事件了。”【5】Einstein 于 1916 年在《狭义与广义相对论浅说》一书中对同时的相对性所作详细阐述的原文和配图【6】：

假设有一列很长的火车，以恒速  $v$  沿着如图标明的方向在轨道上行驶。在这列火车上旅行的人们可以很方便地把火车当作刚性参考物体（坐标系）；他们参照火车来观察一切事件。因而，在铁路线上发生的每一个事件也在火车上某一特定地点发生。而且完全和相对路基所作的同时性定义一样，我们也能相对火车作出同时性的定义。但是，作为一个自然的推论，下述问题就自然产生（参见图一）：

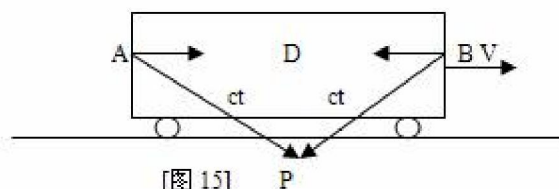
对于铁路路基来说同时的两个事件（例如 A、B 两处雷击），对于火车来说是否也是同时的呢？我们将直接证明，回答必然是否定的。

当我们说 A、B 两处雷击相对于路基而言是同时的，我们的意思是：在发生闪电的 A 处和 B 处所发出的光，在路基 A→B 这段距离的中点  $m$  相遇。但是事件 A 和 B 也对应于火车上的 A 点和 B 点。令  $M$  为在行驶中的火车上 A→B 这段距离的中点。正当雷电闪光发生的时候（从路基上判断），点  $M$  自然与点  $m$  重合，但是点  $M$  以火车的速度  $v$  向图中的右方移动。如果坐在火车上  $M$  处的一个观察者并不具有这个速度，那么他就总是停留在  $m$  点，雷电闪光 A 和 B 所发出的光就同时到达他这里，也就是说正好在他所在的地方相遇。可是实际上（相对于铁路路基来考虑）这个观察者正在朝着来自 B 的光线急速前进，同时他又在来自 A 的光线前方向前进。因此这个观察者将先看见自 B 发出的光线，后看见自 A 发出的光线。所以，把列车当作参考物体的观察者就必然得出这样的结论，即雷电闪光 B 先于雷电闪光 A 发生。这样我们就得出以下的重要结果：对于路基是同时的若干事件，对于火车并不是同时的，反之亦然（同时的相对性）。每一个参考物体（坐标系）都有他本身的特殊的时间；除非我们讲出关于时间的陈述是相对于哪一个参考物体的，否则关于一个事件的时间的陈述就没有意义。



图一 爱因斯坦给出同时的相对性时假设的路基、火车和闪光情况

相对论是研究相对运动系统内物质运动变化规律的时空理论。如果在一个系统内发生两个或两个以上的事件，则事件的先后次序是必须考虑的。由于系统是相对运动着的，从一个系统去观测另一系统中发生的事件，只有用光来传递信息。下面的实验将告诉我们，相对论里同时性只具有相对的意义。



[图 15] P

[图 15] 所示，一列匀速运动的火车，车厢长  $AB$ ，中点为  $D$ ，即  $AD=BD$ ，火车的速度为  $V$ 。某一时刻，火车运行到  $AP=BP$  的位置时， $A$ 、 $B$  两点同时发生闪光，并向  $D$  和  $P$  发出光信号。放在地面上  $P$  点的检测仪，将检测到  $A$ 、 $B$  两点的光同时到达  $P$  点，其结果是：

$$AP = BP = ct \text{ ----- (1)}$$

由于火车向右运动着， $D$  点在向  $B$  方向移动，而光速是恒定的，所以  $D$  点的光检测仪将先接收到  $B$  点传来的光信号，后接收到  $A$  点传来的光信号。其结果是：

$$\rightarrow AD > BD \quad \frac{AD}{c} > \frac{BD}{c} \text{ ----- (2)}$$

(1) 式和 (2) 式表明，在相对运动着的系统中所发生的事件，在其中一个系统中是同时发生的事件，则在另一个系统中该事件的发生就不同时了，所以说相对论的同时性只具有相对的意义。

相对论量子场论和粒子物理的结合，不断推进对微观物质的认识并运用到宇宙学上可以看出，庞加莱是留了一手。庞加莱提出庞加莱猜想的 1904 年时，他只类似说应把惯性相对性原理作为点外空间球或德西特时空球自然界的一个基本原理，要求不仅力学规律，而且真空电磁学的规律，在惯性系的变换下也不变。到 1905 年庞加莱把相对性原理从具有伽利略不变性，再扩展为具有庞加莱不变性的有限而无界的宇宙模型，这类似郭汉英先生称的涉及“真空零点能之类的佯谬”。爱因斯坦假定称它为“点内空间”球或反德西特时空球，那么可以看出，同年爱因斯坦在洛伦兹等人工作的基础上，利用光信号来确定同时性，否定牛顿的绝对时间和绝对空间提出时空观革命的狭义相对论，是配合普朗克、庞加莱抛出的“大量子论”。爱因斯坦认为：“只要时间的绝对性或同时性的绝对性这条公理不知不觉地留在潜意识里，那么任何想要满意地澄清这个悖论的尝试，都注定要失败。如果我们要描述一个质点的运动，我们就以时间的函数来给出它的坐标值。现在我们必须记住，这样的数学描述只有在我们十分清楚地懂得‘时间’在这里指的是什么以后才会有物理意义。我们应当考虑到，凡是时间在里面起作用的我们的一切判断，都是关于同时的事件的判断。比如我们说：那列火车七点钟到达这里，这就是说，我的表指到 7 与火车到达是同时事件。”

参考文献：

- [1] 刘辽、赵峥、田贵花、张靖仪著《黑洞与时间的性质》（北京大学出版社，2008 年 12 月第 1 版，第 228 页）。
- [2] 朱鋈雄著《物理学思想概论》（清华大学出版社，2009 年 5 月第 1 版，第 163 页）。
- [3] 刘辽、费保俊、张允中编著《狭义相对论》（科学出版社，2008 年 7 月第二版，第 27 页）。
- [4] A·Einstein 著《物理学的进化》（上海科学技术出版社，1962 年 3 月第 1 版，132 页）。
- [5] A.Einstein 著《Einstein 文集》第二卷 89 页，商务引书馆 1977.7。
- [6] A.Einstein 著《狭义与广义相对论浅说》，21 页，上海科学技术出版社 1964.8。

## 5、Lorentz transformation 的相对论推导

### (一)、“Lorentz transformation”的推导方法 1

洛伦兹变换反映的是同一研究对象在不同惯性系中运动规律都有相同数学形式。如图 1 所示两坐标系的相对取向，该坐标系的  $x$  轴永远是重合的。在这个情况下，首先只考虑  $x$  轴上发生的事件。任何一个这样的事件，对于坐标系  $K$  是由横坐标  $x$  和时间  $t$  来表示，对于坐标系  $K'$  则由横坐标  $x'$  和时间  $t'$  来表示。当给定  $x$  和  $t$  时，我们要求出  $x'$  和  $t'$ 。



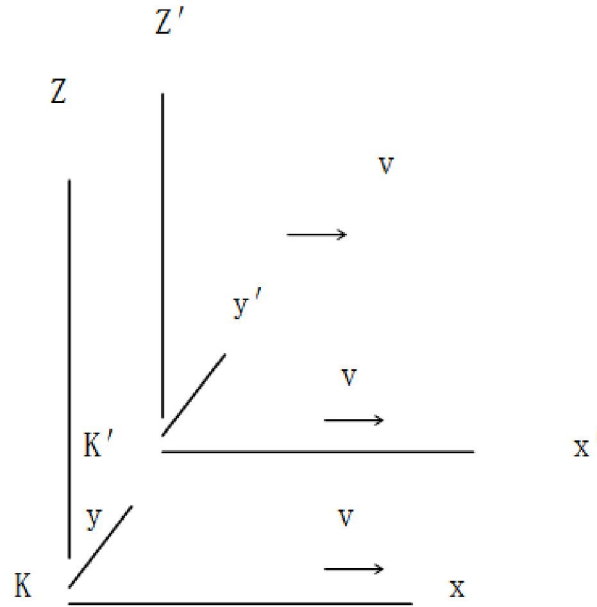


图 1

沿着正  $x$  轴前进的一个光信号按照方程  $x = ct$  或  $x - ct = 0$  (1) 传播。由于同一光信号必须以速度  $c$  相对于  $K'$  传播，因此相对于坐标系  $K'$  的传播将由类似的公式  $x' - ct' = 0$  (2) 表示。满足 (1) 的那些空时点 (事件) 也必须满足 (2)，显然这一点是成立的，主要关系  $(x' - ct') = \lambda (x - ct)$  (3) 一般被满足，其中  $\lambda$  表示一个常数；因为，按照 (3)， $(x - ct)$  等于零时  $(x' - ct')$  就必然也等于零。如果我们对沿着负  $x$  轴传播的光线应用完全相同的考虑，我们就得到条件  $x' + ct' = u (x + ct)$  (4)

方程 (3) 和 (4) 相加 (或相减)，并为方便起见引入常数  $a$  和  $b$  代换常数  $\lambda$  和  $u$ ，令  $a = (\lambda + u)/2$  以及  $b = (\lambda - u)/2$

我们得到方程

$$\left. \begin{aligned} x' &= ax - bct \\ ct' &= act - bx \end{aligned} \right\} (5)$$

因此，若常数  $a$  和  $b$  为已知，我们就得到我们的问题的解。 $a$  和  $b$  可由下述讨论确定。

对于  $K'$  的原点我们永远有  $x' = 0$ ，因此按照 (5) 的第一个方程  $x = bct/a$

如果我们将  $K'$  的原点相对于  $K$  的运动的速度称为  $v$ ，我们就有  $v = bc/a$  (6)

同一量值  $v$  可以从方程式 (5) 得出，只要我们计算  $K'$  的另一点相对于  $K$  的速度，或者计算  $K$  的一点相对于  $K'$  的速度 (指向负  $x$  轴)，总之，我们可以指定  $v$  为两坐标系的相对速度。

还有，根据“相对性原理”，由  $K$  判断的相对于  $K'$  保持静止的单位量杆的长度，必须恰好等于由  $K'$  判断的相对于  $K$  保持静止的单位量杆的长度。为了看一看由  $K$  观察  $x'$  轴上的诸点是什么样子，我们只需要从  $K$  对  $K'$  拍个“快照”；这意味着我们必须引入  $t$  ( $K$  的时间) 的一个特别的值，例如  $t = 0$ 。对于这个  $t$  的值，我们从 (5) 的第一个方程就得到  $x' = ax$ 。

因此，如果在  $K'$  坐标中测量， $x'$  轴上两点相隔的距离为  $\Delta x' = 1$ ，该两点在我们瞬时快照中相隔的距离就是  $\Delta x = 1/a$  (7)

但是如果从  $K'$  ( $t' = 0$ ) 拍快照，而且如果我们从方程 (5) 消去  $t$ ，考虑到表示式 (b)，我们得到

$$x' = a(1 - v^2/c^2)x$$

由此推断，在  $x$  轴上相隔距离 1 (相对于  $K$ ) 的两点，在我们快照上将由距离

$$\Delta x' = a(1 - v^2/c^2) \quad (7a) \text{ 表示。}$$

根据以上所述，这两个快照必须是全等的，因此 (7) 中的  $\Delta x$  必须等于 (7a) 中的  $\Delta x'$ ，这样我们就得到  $a^2 = 1/(1 - v^2/c^2)$  (7b)

方程 (6) 和 (7b) 决定常数  $a$  和  $b$ ，在 (5) 中代入这两个常数的值，就得到了洛仑兹变换的如下基本方程：

$$\left. \begin{aligned} x' &= (x-vt) / \sqrt{(1-v^2/c^2)} \\ t' &= (t-xv/c^2) / \sqrt{(1-v^2/c^2)} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

关于狭义相对论推导 Lorentz transformation 的过程, 如果用纯粹数学来证明, 可以简化为以下内容:

条件一、 $x^2 + y^2 + z^2 = c^2 t^2$ ,  $x'^2 + y'^2 + z'^2 = c^2 t'^2$ , 其中  $c$  为常数。

条件二、 $x' = a_{11}x + a_{12}t$ ,  $t' = a_{21}t + a_{22}x$ , 其中  $a_{11}$ 、 $a_{12}$ 、 $a_{21}$ 、 $a_{22}$  均为常数, 且  $a_{12} = -va_{11}$ ,  $v$  也为常数。

条件三、 $y' = y$ ,  $z' = z$ 。

先求  $a_{11}$ ,  $a_{12}$ ,  $a_{21}$ ,  $a_{22}$  的值。经过简单计算, 可以得到

$$a_{11} = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}, \quad a_{12} = -\frac{v}{\sqrt{1-\beta^2}}, \quad a_{21} = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}, \quad a_{22} = -\frac{\beta x/c}{\sqrt{1-\beta^2}}, \quad \text{其中 } \beta = \frac{v}{c}.$$

再将这四个常数代回条件二, 可以得到 Lorentz transformation

$$x' = \frac{x-vt}{\sqrt{1-\beta^2}}, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = \frac{t-\beta x/c}{\sqrt{1-\beta^2}}.$$

Einstein 根据两个基本假设, 经过纯数学的演算, 不需要添加任何物理学原理, 就能推导出 Lorentz transformation。继而有相对论时空观: 时间、空间随着参照系的改变而改变。因而, 只要两个基本假设成立, 相对论的时空观就是正确的。Einstein 在研究 Lorentz transformation 下动量守恒时, 提出了相对论质量观: 物体的质量随着物体运动状态的改变而改变。也可以说成: 物体的质量随着观察者的不同而不同。在相对论之前, 经典理论认为质量是物体的固有属性, 不随物体运动状态的变化而变化。如今, 相对论又把经典理论中的一个不变量——质量, 演绎成一个可变量。

狭义相对论在推导光学多普勒效应频率变换式, 有关著作给出的一般推导过程中是设

$$\Psi = \frac{A}{r} \exp 2\pi i \nu \left( t - \frac{r}{c} \right), \quad \Psi' = \frac{A'}{r'} \exp 2\pi i \nu' \left( t' - \frac{r'}{c} \right) \quad (11)$$

$$\text{又设 } r = x \cos \theta + y \sin \theta, \quad r' = x' \cos \theta' + y' \sin \theta' \quad (12)$$

将式组 (12) 前一个关系式代入式组 (11) 前一个关系式中的  $\nu \left( t - \frac{r}{c} \right)$ , 得

$$\nu \left( t - \frac{x \cos \theta}{c} - \frac{y \sin \theta}{c} \right) \quad (13)$$

将式组 (12) 后一个关系式和洛伦兹变换中的前三个关系式代入式组 (12) 后一个关系式中的  $\nu' \left( t' - \frac{r'}{c} \right)$ , 得

$$\nu' \left[ \frac{1 + \beta \cos \theta'}{\sqrt{1-\beta^2}} \right] \left[ t - \frac{x}{c} \left( \frac{\beta + \cos \theta'}{1 + \beta \cos \theta'} \right) - \frac{y}{c} \left( \frac{\sqrt{1-\beta^2} \sin \theta'}{1 + \beta \cos \theta'} \right) \right] \quad (14)$$

狭义相对论认为式 (14) 与式 (13) 的各对应项系数应该相等, 因此得出

$$\nu = \nu' \left( \frac{1 + \beta \cos \theta'}{\sqrt{1-\beta^2}} \right), \quad \cos \theta = \frac{\beta + \cos \theta'}{1 + \beta \cos \theta'}, \quad \sin \theta = \frac{\sqrt{1-\beta^2} \sin \theta'}{1 + \beta \cos \theta'} \quad (15)$$

Einstein 在 1905 年《论动体的电动力学》一文中建立狭义相对论时, 从 Lorentz transformation 中推导出了所谓的动钟变慢。我们现在考虑永久放在 R 系的原点 (X=0) 上的一个按秒报时的钟 (此处的 R、r 系如

上图所示)。T = 0 和 T = 1 对应于该钟接连两声滴嗒。对于这两次滴嗒，Lorentz transformation 的第一和第四方程给出  $t = 0$  和  $t = 1/\sqrt{1-u^2/c^2}$

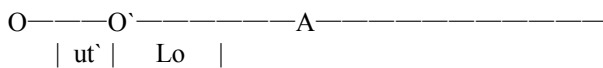
从  $r$  去判断，该钟以速度  $u$  运动；从这个参考物体去判断，该钟两次滴嗒之间所经过的时间不是 1 秒，而是  $1/\sqrt{1-u^2/c^2}$  秒，亦即比 1 秒钟长一些。该钟因运动比静止时走的慢了。速度  $C$  在这里也具有一种不可达到的极限速度的意义。”

必须指出，相对论的动钟变慢效应是相对的，亦即在相对论中如下表述同样成立：

“我们现在考虑永久放在  $r$  系的原点 ( $x=0$ ) 上的一个按秒报时的钟。t=0 和 t=1 对应于该钟接连两声滴嗒。对于这两次滴嗒，Lorentz transformation 的第一和第四方程给出  $T = 0$ ， $T = 1/\sqrt{1-u^2/c^2}$ 。从  $R$  去判断，该钟以速度  $u$  运动；从这个参考物体去判断，该钟两次滴嗒之间所经过的时间不是 1 秒，而是  $1/\sqrt{1-u^2/c^2}$  秒，亦即比 1 秒钟长一些。该钟因运动比静止时走的慢了。速度  $C$  在这里也具有一种不可达到的极限速度的意义。”

### (二)、“Lorentz transformation”的推导方法 2

如图所示：假设  $S'$  系中的  $X'$  轴的正方向的  $Lo$  点发生了事件 A，此时  $S'$  系的时钟读数为  $t'$ ，求在  $S$  系中 A 事件的坐标。



显然，事件 A 在  $S'$  系的坐标为  $Xa'=Lo$ ， $Ta'=t'$

事件 A 在  $S$  系的坐标应该为： $Xa=OAs$ ， $Ta=t$ ， $OAs$  的长度在  $S'$  系发生收缩，因此有：

$$OAs'=k \cdot OAs \quad \dots\dots (1)$$

$$\text{从图中可以看出：} OAs'=OO's'+O'As' \quad \dots\dots (2)$$

在上面的 (1)、(2) 式中， $OAs$  是  $OA$  在  $S$  系中的距离， $OAs'$  是  $OA$  在  $S'$  系中的距离， $OO's'$  是  $OO'$  在  $S'$  系中的距离，等于  $ut'$ ， $O'As'$  是  $O'A$  在  $S'$  系中的距离，等于  $Lo$ ， $k=\sqrt{1-uu/uu}$ 。

因此，由式 (1)、(2) 得： $k \cdot OAs=OO's'+O'As'$ ， $OAs=(Lo+ut')/k \quad \dots\dots (3)$ ，结合事件 A 在  $S'$  系的坐标为  $Xa'=Lo$ ， $Ta'=t'$  和在  $S$  系的坐标  $Xa=OAs$ ，式 (3) 可写为： $Xa=(Xa'+ut)/k$  (这就是  $X$  坐标的洛变换式)，从图中还可以看出： $OAs=O'As+OO's \quad \dots\dots (4)$ ，这里： $OAs$  为  $OA$  在  $S$  系中的距离，等于  $Xa$ ； $O'As$  为  $O'A$  在  $S$  系中的距离，应该等于  $k \cdot O'As'$ ，即  $k \cdot Xa'$ ； $OO's$  为  $OO'$  在  $S$  系中的距离，等于  $ut$ 。因此，式 (4) 可写为： $Xa=k \cdot Xa'+ut \quad \dots\dots (5)$ ，式 (5) 结合上面已经得到的  $Xa$  变换式，可以得到： $k \cdot Xa'+ut=(Xa'+ut)/k$ ，从上式中解出  $t$  得： $t=(t'+uXa'/cc)/k$  (这就是  $t$  坐标的洛变换式)

这也就是说，相对论的动钟变慢效应是相对的，即相对运动的观测者都认为对方的时钟慢于自己的时钟慢。【1】根据 Einstein 的观点，观察到时间膨胀效应必须有两个先决条件：其一，两个惯性系必须有相对运动；其二，在测量中观察者必须用自己参考系中的无数个钟和另一个与自己有相对运动的惯性系内一个固定的钟相比较，才会发现对方钟走慢了。没有这两个条件根本不可能观察到时间膨胀。在狭义相对论中时间膨胀并不意味着钟“真”的走慢了，时间膨胀是在测量过程中发生的。

### (三)、“Lorentz transformation”的推导方法 3

经典的洛伦兹变换指出：我们将求出相对论的变换公式，这些公式恰好是根据那个事件间的间隔不变的要求的。如果我们为了便于以后的叙述利用量  $\tau = ict$ ，那么，正如在 § 1-2 里所看到的二事件间的间隔可以认为是四度空间内的相对应的两个世界点间的距离。因此我们可以说，所要求的变换，必须是使所有在四度空间  $x, y, z, \tau$  内的距离不变的变换。但是这些变换仅仅包括坐标系统的平移与旋转。其中，我们对于坐标轴对自己作平行移动并无兴趣，因为这不是将空间坐标的原点移动一下、并将时间的参考点改变一下而已。所以，所要求的变换，在数学上应当表示为四度坐标系统  $x, y, z, \tau$  的旋转。四度空间内的一切旋转，可以分解为六个分别在六个平面  $xy, yz, zx, x\tau, \tau y, \tau z$  内的旋转（正如在三度空间内的一切旋转可以分解为  $xy, yz, zx$  三个平面内的旋转一样）。其中，前三个旋转仅仅变换空间坐标，它们和通常的空间旋转相当。我们研究在  $x\tau$  平面内的旋转，这时  $y$  与  $z$  坐标是不变的。令  $\psi$  为旋转角，那么，新旧坐标的关系就由以下二式决定：

$$x = x' \cos \psi - \tau' \sin \psi, \quad \tau = x' \sin \psi + \tau' \cos \psi \quad (1)$$

我们现在要找出由一个惯性参考系统  $K$  到另一个惯性参考系统  $K'$  的变换公式， $K'$  以速度  $V$  沿  $X$  轴对  $K$

作相对运动。在这种情况下，显然只有空间坐标  $x$  与时间坐标  $\tau$  发生变化。所以这个变换必须有(1) 式的形式。现在只剩下确定旋转角  $\psi$  的问题，而  $\psi$  又仅与相对速度  $V$  有关。我们来研究参考系统  $K'$  的坐标原点在  $K$  内的运动。这时， $x' = 0$ ，而公式(1)可写成： $x = -\tau' \sin \psi$ ； $\tau = \tau' \cos \psi$ 。

(2)

$$\text{相除可得 } x/\tau = -\tan \psi \quad (3)$$

$$\text{但 } \tau = ict, \text{ 而 } x/t \text{ 显然是 } K' \text{ 对 } K \text{ 的速度 } V. \text{ 因此, } \tan \psi = iV/c \quad (4)$$

$$\text{由之得 } \sin \psi = (iV/c)/(1-V^2/c^2)^{1/2}, \cos \psi = 1/(1-V^2/c^2)^{1/2} \quad (5)$$

$$\text{代入(2), 得: } x = (x' - iV\tau')/(1-V^2/c^2)^{1/2}, y = y', z = z', \quad \tau = (\tau' + iVx'/c)/(1-V^2/c^2)^{1/2} \quad (6)$$

再将  $\tau = ict, \tau' = ict'$  代入，最后得

$$x = (x' + Vt')/(1-V^2/c^2)^{1/2}, y = y', z = z', \quad t = (t' + Vx'/c^2)/(1-V^2/c^2)^{1/2} \quad (7)$$

这就是所要求的变换公式。它们被称为洛伦兹变换式，是今后讨论的基础。【2】

#### 4、Part A. Lorentz 时空中 Lorentz transformation 的推导方法 4

光速独立性导致时间空间不独立，以后以时空这词表示。设两个惯性系  $K, K'$  中坐标  $X=(x_1, x_2, x_3, x_4)(x_4=ict)$ ， $K'$  坐标  $X'=(x'_1, x'_2, x'_3, x'_4)(x'_4=ict')$ 。  $i=\text{Sqrt}(-1)$ ，为方便引进的。 $K'$  在  $K$  中速度为  $v$ 。设  $t=0$  两坐标系原点重合，并且这时位于原点有一点光源发光。由光速独立原理，我们在两个坐标系中都将观察到一个球面波的传播。其波前以光速  $c$  沿径向传播。传播距离平方  $R^2=(ct)^2=x_1^2+x_2^2+x_3^2$  in  $K$  and  $R'^2=(ct')^2=x_1'^2+x_2'^2+x_3'^2$  in  $K'$ 。所以有： $x_1^2+x_2^2+x_3^2-c^2t^2=0$ ， $x_1'^2+x_2'^2+x_3'^2-c^2t'^2=0$ ，这样就知道： $x_1^2+x_2^2+x_3^2-c^2t^2=p(v)\cdot(x_1'^2+x_2'^2+x_3'^2-c^2t'^2)$ ，其中  $p(v)\geq 0$  是一个可能和速度有关的量，表示由于相对运动引起的可能度规变化。但是由于  $K, K'$  两系统对称性，我们必然有  $p^2(v)=1 \Rightarrow p(v)=1$ ，这样我们就知道  $K, K'$  的时空是等度规的。度规相同表示一切几何内蕴量一致。 $x_1^2+x_2^2+x_3^2-c^2t^2=x_1'^2+x_2'^2+x_3'^2-c^2t'^2$  (1)，用内积(就是矢量点乘运算)表示就是： $\langle X, X \rangle = \langle X', X' \rangle$  (2)。普遍的相对性原理就是，寻求坐标变换： $X=F(X'; v)$  (3)。使度规不变性(2)得以满足。  $F$  是一个矢量函数， $v$  是个参数，表示  $K'$  系在  $K$  系中的速度。我们讨论一下它的性质。由于相对论惯性系等价的假设，变换  $F$  必然有唯一的逆变换  $G$ ：

$$X'=G(X; v) \quad (4), \text{ 同时这等价性蕴含下述对称性: } G(X; v)=F(X, -v) \quad (5), (4), (5) \text{ 是很强的条件, 它们限制 } F \text{ 必然是线性变换, (5) 同时也为这线性变换作了更强限制. 线性变换可以用矩阵表示 } X'=X A(v), X=X'A^{-1}(v) \quad (6)$$

$A^{-1}(v)$  表示依赖于速度的逆矩阵。  $A(v)$  是四阶矩阵，有 16 个元素需要确定。

由下列条件： $\langle X, X \rangle = \langle X', X' \rangle$ ； $X' = X A(v)$ ； $X = X'A^{-1}(v)$  及线性代数运算可以证明， $A(v)$  是列正交，行正交的矩阵，这就有 12 个方程，所以还差四个参数待定。

再考虑  $K, K'$  关系：For  $x_1'=x_2'=x_3'=0$ ， $X$  的坐标部分位置是  $vt$ 。这时三个条件，但是同时带进来矩阵  $A(v)$  外的元素  $t$  和  $t'$ 。所以现在这三个条件其实只相当于一个，我们还剩三个元素待定；For  $x_1=x_2=x_3=0$ ， $X'$  的坐标部分为  $-vt'$ 。这有三个条件。这样我们终于唯一确定了矩阵  $A(v)$ 。

以上便是 Lorentz 变换的推导。如果再形式化，并且深刻一些，应该讨论 Lorentz 群。它是  $O(3, 1)$  群。

狭义相对论空间描述：设长度为  $L$  的物体在相对静态场参考空间  $(x_0, y_0, z_0)$  空间以  $u$  速度运动，起点为  $A$ ，终点为  $B$  朝向  $A \rightarrow B$ ，

$$\text{则相对运动场空间为: } x_c = x(x_{0+ct}); \text{ 和 } x_u = x_0 + (c + u)t$$

$$\text{相对速度场, } A \text{ 点为: } u_{xa} = c; B \text{ 点为: } u_{xb} = c + u_x;$$

则在  $x$  轴向上  $A \rightarrow B$  相对运动场空间长度为：(取光的单程计算运动变长)

$$\text{静态 } L_0 = x_b - x_a = c \cdot t_b - c \cdot t_a = c \cdot (t_b - t_a) \text{ 和动态 } L_u = x_{ub} - x_{ua} = (c + u) \cdot (t_b - t_a)$$

$$\text{则运动变长为: } \Delta L = L_u - L_0 = (c + u) \cdot (t_b - t_a) - c \cdot (t_b - t_a) = u \cdot (t_b - t_a) = u \cdot \Delta t$$

$$\text{狭义相对论空间即为: } \Omega_b - \Omega_a = V \left[ x_0 + (c + u_x)t - ct_a, y_0, z_0 \right]$$

Lorentz transformation 就是保持四维伪欧氏象空间度量不变的时空坐标变换，而保持四维伪欧氏象空间度量不变的洛伦兹变换群本是 6 阶李群。

下面是陈叔喧教授的分析：对于参照系设在光源上光子(场质)与场速度一致，但相对光源以速度  $v$  运动的参照系，光子(场质)运动速度或平动能，甚至变换能不变的。而参照系或场平动能的度量少了



一项坐标相对运动引起的动能  $m v^2/2$ ，如果变换能  $h v/2=mc^2/2=m(dv/dt)^2/2$  也不变，那么

$$m(dv'/dt')^2/2=mc^2-hv/2-mv^2/2=mc^2-mc^2/2-mv^2/2=mc^2/2-mv^2/2=mc^2(1-v^2/c^2)/2=m(dv/dt)^2(1-v^2/c^2)/2$$

当  $dt'=dt$ ， $dv'=dv\sqrt{(1-v^2/c^2)}$ ，当  $dv'=dv$ ， $dt'=dt/\sqrt{(1-v^2/c^2)}$ 。此关系等效于相对论的时空关系或洛伦兹变换。表明相对论的时空是场的时空，因此所谓物体的长度在运动方向上收缩，是场描述属性引起的特性。

#### (四)、时空间隔的导出及其普适性分析

考虑惯性系  $S_1$  与其同族的任一惯性系间的洛伦兹变换，相对性原理表明该变换原则上只取决于惯性系间的相对速度，也即变换系数  $\beta$  应为速度  $v$  的函数，

$$\beta = kv$$

下面证明对于同一个惯性系族， $k$  是一个常数，不妨称之为洛伦兹常数。

首先考虑  $x$  轴上的情形，设惯性系  $S_2$ 、 $S_3$  分别相对惯性系  $S_1$  沿  $x$  轴以速度  $v_2$ 、 $v_3$  匀速运动，而惯性系  $S_3$  相对  $S_2$  的速度是  $v_{32}$ ，于是有

$$\begin{cases} x_2 = \gamma_2(v_2 t_1 - x_1) \\ t_2 = \gamma_2(t_1 - k_2 v_2 x_1) \end{cases} \quad (8-1)$$

$$\begin{cases} x_3 = \gamma_3(v_3 t_1 - x_1) \\ t_3 = \gamma_3(t_1 - k_3 v_3 x_1) \end{cases} \quad (8-2)$$

$$\begin{cases} x_3 = \gamma_{32}(v_{32} t_2 - x_2) \\ t_3 = \gamma_{32}(t_2 - k_{32} v_{32} x_2) \end{cases} \quad (8-3)$$

将 (8-1) 代入 (8-3) 得

$$\begin{cases} x_3 = \gamma_2 \gamma_{32} [(v_2 - v_{32}) t_1 - (1 - k_2 v_2 v_{32}) x_1] \\ t_3 = \gamma_2 \gamma_{32} [(1 - k_{32} v_2 v_{32}) t_1 - (k_2 v_2 - k_{32} v_{32}) x_1] \end{cases} \quad (8-4)$$

比较 (8-2) 与 (8-4) 中各项系数可得

$$\gamma_2 \gamma_{32} (1 - k_2 v_2 v_{32}) = \gamma_3 = \gamma_2 \gamma_{32} (1 - k_{32} v_2 v_{32})$$

$$\text{即有 } k_2 = k_{32} \equiv k$$

由惯性系的各向同性不难将结论延拓到任意同族惯性系，注意到洛伦兹常数的量纲是速度倒数的平方，由此不妨定义惯性速率为：

$$v_k = k^{-\frac{1}{2}}$$

惯性速率不变推论：对于同一个惯性系族，一质点在相对其中一个惯性系的运动速率为惯性速率，则该质点相对同族其他惯性系的运动速率也为惯性速率。

对 (7) 作微分可得  $S$  系到  $\bar{S}$  系的速度变换如下：

$$\begin{cases} \bar{u}_x = \frac{v - u_x}{1 - kvu_x} \\ \bar{u}_y = \frac{u_y}{\gamma(1 - kvu_x)} \\ \bar{u}_z = \frac{u_z}{\gamma(1 - kvu_x)} \end{cases} \quad (9)$$

$$\text{若 } u_x^2 + u_y^2 + u_z^2 = v_k^2$$

可设

$$k = \frac{1}{v_k^2}, \quad u_x = v_k \cos \theta$$

$$u_y = v_k \sin \theta \cos \phi, \quad u_z = v_k \sin \theta \sin \phi$$

则有

$$\bar{u}_x^2 + \bar{u}_y^2 + \bar{u}_z^2 = \frac{(v - u_x)^2 + (1 - kv^2)(u_y^2 + u_z^2)}{(1 - kvu_x)^2}$$

$$= \frac{(v - v_k \cos \theta)^2 + (1 - \frac{v^2}{v_k^2})v_k^2 \sin^2 \theta}{(1 - \frac{v \cos \theta}{v_k})^2}$$

$$= \frac{(v - v_k \cos \theta)^2 + (v_k^2 - v^2) \sin^2 \theta}{(v_k - v \cos \theta)^2} v_k^2$$

$$= v_k^2$$

证明了上述推论，可进一步引入四维时空点  $\mathbf{r} = (x, y, z, t)$  到坐标原点的时空间隔函数：

$$s^2 \equiv x^2 + y^2 + z^2 - v_k^2 t^2 = k(x^2 + y^2 + z^2) - t^2$$

时空间隔不变推论：洛伦兹变换保持时空间隔不变。由狭义相对论可知，时间间隔和空间间隔都是相对的，但时间和空间的统一融合体——闵可夫斯基连续空间却是绝对的，它表示为事件的四维时空间隔具有洛伦兹不变性。即

$$dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2 dt^2 = dx'^2 + dy'^2 + dz'^2 - c^2 dt'^2$$

爱因斯坦本人对于这种时空融合的绝对性有过这样的论述：“依照狭义相对论，由空间和时间结合而成的四维连续区，仍保持着绝对性，而依照以前的理论，这种绝对性则分别为空间和时间各自所有。”

参考文献：

- 【1】《狭义与广义相对论浅说》，上海科学技术出版社 1964.8，31 页。  
 【2】《场论》，Л.Л. 朗道、E.M. 栗弗席兹著，任朗、袁炳南译，人民教育出版社 1958 年 8 月第一版，第 14—15 页。

## 6、狭义相对论的时空变换

什么是相对论？研究相对运动系统内，物质运动变化规律的时空理论，就是相对论。根据相对论的定义，建立相对论，必须具备三个基本要素：第一，要有相对运动的系统存在；第二，相对运动系统都要处于动态平衡状态（Einstein 所称的惯性状态）；第三，系统中要有物质（事件）存在。在此三要素的基础上建立起来的时空理论，才是真正的相对论。

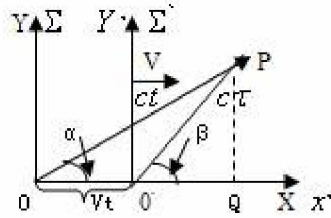
相对论存在于在动态平衡系统之中，没有动态平衡系统，就没有相对论的立足之地。因为，在动态平衡系统中，时空变换才能满足线性迭加规律。惯性力概念是马赫误导的结果。马赫认为：“惯性力在本质上是一种引力”（世界科技英才录——科学思想卷 上海科技教育出版社）。王永久认为：惯性力是一种虚构的力，“这种虚构的力的本质是什么呢？在经典力学和狭义相对论中这是不可理解的”（空间，时间和引力 湖南教育出版社）。

动态平衡原理，是地球上物理学定律成立的必要条件。物体在不受外力作用，或所受合外力作用为零的情况下，能够保持静者恒静，动者恒动，正是物体受动态平衡原理支配的结果。下面我们在动态平衡系统中，来建立物质运动变化规律的时空理论——相对论。在弹性介质中其振动的传播方程不是 Galileo 变换下不变的，只成立于与介质相对静止的参考系中。如果把介质看成“绝对静止系”，利用它即可测量任何惯性系的绝对速度。其次，同一介质之间不是总能保持相对静止的。

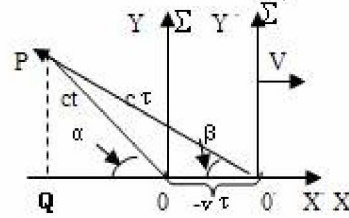
相对性原理告诉我们，在相对做匀速直线运动的系统中，对于同一事件运动变化规律的描述，具有相同形式的数学物理方程。相对性原理，是自然界最基本的物理规律之一。相对性原理，也是宇宙学原理的体现。

什么是相对论的时空变换？在相对运动系统中，测量同一事件的时间和空间之间的关系，就是相对论的时空变换。同一事件是相对论时空变换的核心，时空变换是相对论的核心。

下面采用相对运动的物理参考系，来推导相对论时空变换的普适公式。



[图 2]



[图 3]

[图 2]所示，在地球上，有两个物理系统  $\Sigma$  和  $\Sigma'$ ，设  $\Sigma$  系统为静止系统，系统中用  $t$  记时； $\Sigma'$  系统为运动系统，系统中用  $\tau$  记时。在  $\tau=t=0$  时，两系统重合。当  $\Sigma'$  相对于  $\Sigma$  以速度  $V$  开始向  $X$  方向运动的同时，从原点射出一光信号。光在  $\Sigma$  系统中经过时间  $t$ ，在  $\Sigma'$  系统中经过时间  $\tau$  到达的同一点  $P$ ，系统的各个坐标轴始终保持平行。光从原点出发，在相对运动着的系统中，经过了不同的时间到达了同一终点  $P$ ，它们之间的时空关系是：

$$ct \cos \alpha - vt = c\tau \cos \beta \text{ ----- (A)} ; \quad ct \sin \alpha = c\tau \sin \beta \text{ ----- (B)}$$

将 (A) 和 (B) 两式两边平方后相加得  $c^2 t^2 - 2cvt^2 \cos \alpha + v^2 t^2 = c^2 \tau^2$

$$\frac{\tau}{t} = \sqrt{1 - \frac{2v}{c} \cos \alpha + \frac{v^2}{c^2}}$$

将上式移项整理得： (3)

在[图 2]条件相同的情况下，改变光的传播方向，如[图 3]所示，可得相对论时空变换的新公式：

$$\frac{t}{\tau} = \sqrt{1 - \frac{2v}{c} \cos \beta + \frac{v^2}{c^2}} \text{ ---- (4)}$$

(3) 式和 (4) 式，都是相对论时空变换的一般表达式，它们都将纵向相对论，横向相对论，超光速运动相对论的时空变换都包含在其中，并揭示出了相对论时空的方向特性。

从 (3) 式看相对论时空变换的方向特征：

(1) 当  $\alpha=0$  时，  $\frac{\tau}{t} = 1 - \frac{v}{c}$  (2) 当  $\alpha=\pi$  时，  $\frac{\tau}{t} = 1 + \frac{v}{c}$  这两式是纵向相对论的时空变换公式

(3) 当  $\alpha = \frac{\pi}{2}$  时，  $\frac{\tau}{t} = \sqrt{1 + \frac{v^2}{c^2}}$  (4) 当  $\beta = \frac{\pi}{2}$  时，  $\frac{\tau}{t} = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$  这两式是横向相对论的时空变换公式。

宇宙中的诸多天体，都处于动态平衡状态，在这些天体中，都能建立相对论。没有动态平衡，就没有和谐的宇宙。

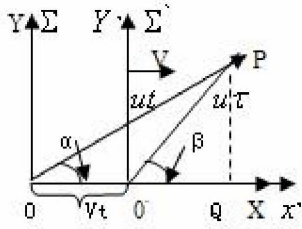
宇宙飞船是一个动态平衡系统。设宇宙飞船为  $\Sigma$  系统，在宇宙飞船中有一个以速度  $v$  匀速运动的  $\Sigma'$  系统。在  $\tau = t = 0$  时， $\Sigma$  与  $\Sigma'$  重合。当  $\Sigma'$  相对于  $\Sigma$  开始运动的同时，从原点射出一颗速度为  $u$  子弹，子弹从原点出发，分别在在不同的系统  $\Sigma'$  和  $\Sigma$  中，经过不同的时间  $\tau$  和  $t$ ，到达同一点  $P$ ，如[图 4]所示。对于这个同一事件，有下列结果：

$$ut \cos \alpha - vt = u\tau \cos \beta \text{ ---- (e)} \quad ut \sin \alpha = u\tau \sin \beta \text{ ----- (f)}$$

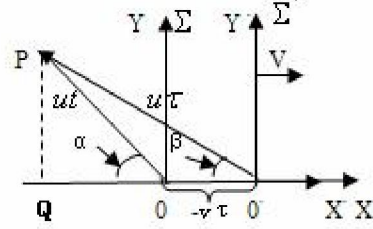
将两式平方后相加：  $u^2 t^2 - 2uv\tau^2 \cos \alpha + v^2 t^2 = u^2 \tau^2$

经移项整理得：

$$\frac{\tau}{t} = \sqrt{1 - \frac{2v}{u} \cos \alpha + \frac{v^2}{u^2}} \text{ ----- (5)}$$



[图 4]



[图 5]

改变光的传播方向，如[图 5]所示，经过同样处理，可得：

$$\frac{t}{\tau} = \sqrt{1 - \frac{2v}{u} \cos \beta + \frac{v^2}{u^2}} \quad \text{----- (6)}$$

(5) 式和 (6) 式，都是在动态平衡系统中，自然建立起来的相对论时空变换公式，它们也充分揭示出了相对论时空的方向特征。由此可见，宇宙中普遍存在着相对论。

洛伦兹变换二维双曲函数表达式：
$$\begin{pmatrix} x \\ ct \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh \phi & \sinh \phi \\ \sinh \phi & \cosh \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x' \\ ct' \end{pmatrix}$$
，其中：
$$\gamma = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$\sinh \phi = \gamma \frac{v}{c}, \cosh \phi = \gamma$$

因为  $\sinh \phi = -i \sin i\phi, \cosh \phi = \cos i\phi$

$$L(\phi) = \begin{pmatrix} \cosh \phi & \sinh \phi \\ \sinh \phi & \cosh \phi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos i\phi & -\sin i\phi \\ -\sin i\phi & \cos i\phi \end{pmatrix}$$

$$M(z) = \frac{az + b}{cz + d}$$

可以证明，洛伦兹变换正是复变函数中的莫比乌斯变换：

在极限理论中，点列的收敛性是核心概念。函数的连续性、导数和积分的定义最终都归结为点列收敛性。点列的收敛性是定义在点与点之间的距离之上的，而且证明收敛性时只用到距离的两条性质，即正定性和三角不等式。所以在分析学中只用这两条性质作为公理定义了距离空间。当然原来的欧氏空间也是距离空间的一个特例。那么定义距离空间的意义在哪里呢？在于可以借用欧氏空间的概念和关系来研究更复杂的函数集合，例如连续函数空间  $C[0,1]$ ，平方可积函数空间  $L_2(0,1)$  等。把这些函数看成点，用这些函数空间中的点列的收敛性，我们就可证明一些微分方程和积分方程的解的存在性和唯一性了。沿着这个方向，分析学定义了众多的函数空间，如赋范线性空间、索贝列夫空间等，它们是解决微分方程和积分方程存在性和唯一性的基本工具。

几何沿另一个方向的发展是研究曲面上的几何问题，如球面上的几何问题，这就是微分几何。主要研究工具是微积分，张量代数及近代发展起来的微分形式等。作为欧氏几何直接推广的黎曼(Riemann)几何，空间中也定义了距离，两点间的长度微元也是坐标微元的正定二次型，只是系数矩阵是坐标函数了。但弯曲空间从局部看来和欧氏空间是相当的，而空间的弯曲程度则由曲率张量来描述。

如果再把距离函数的正定性取消，我们就得到洛伦兹流形。Einstein 用 3+1 维洛伦兹流形来描述物理时空，从逻辑上看，比牛顿的绝对平直时空有两大优势：第一、平直时空是弯曲时空的一个特例，弯曲时空是比平直时空更广的概念，所以在逻辑上更可靠。第二、3+1 维的耦合时空具有 4 元数结构，是一个演化的活流形。其中的场方程相对容易解出，而且场量都是活的，物质具有了灵性。所以著名的前苏联物理学家朗道(Landau)说：广义相对论是最接近上帝的工作。

几何沿着连续性方向的进一步发展就是更为抽象的拓扑学。有些几何对象的特点并不需要具体的距离函数来描述，而只涉及连续变化的等价性，即所谓同胚。如一个球体可通过连续变形变成一个立方体，但不能变成一个环。拓扑直接由衡量远近关系的开集定义，而开集之间只有一些纯粹的逻辑约束，而非数量关系。因此拓扑空间是比度量空间更广的概念，度量空间是拓扑空间的特例，开集可用开球的并集来定义。从逻辑上讲：越抽象的概念，涵盖面越大，结论的适用面越广，但结论越弱，无用的信息越多。

由上面的论述可以看到，数学概念的演化发展是有其内在逻辑的，并非凭空捏造出来的。由此我们可得以下一些重要的启发：（1）好的数学理论都有现实背景，为抽象而抽象、或者很生僻的理论是走不了多远



的，也没多少人感兴趣。（2）大自然是用最精致的数学理论设计的，高深的数学理论都扎根在这些基础之上。（3）就数学定理本身而言，只是阐明了概念之间的一些必然的联系和约束。所以希尔伯特说：以桌子、椅子、啤酒瓶取代几何中的点、线、面并没有什么不可，那只是给一个概念起一个名字的问题，重要的是这些概念之间的约束关系。在现代数学中广泛使用的‘同构’概念，就是希尔伯特思想的具体体现；而对量子物理中常用的‘类比方法’，其有效性的逻辑理由也正在于此。爱因斯坦认为：“绝对静止概念，不仅在力学中，而且在电动力学中也不符合现象的特性。倒是应当认为，凡是对力学方程适用的一切坐标系，对于上述电动力学和光学的定律也一样适用，……我们要把这个猜想（即相对性原理）提升为公设，并且还要引进另一条在表面上看来同它不相容的公设：光在空虚空间里总是以一确定的速度传播着，这速度同发射体的状态无关。”

Einstein 是这样说的：“由于这种方法论上的不确定性，人们将认为这样就会有多种可能同样适用的理论物理学体系，这个看法在理论上无疑是正确的。但是物理学的发展表明，在某一时期里，在所有可想到的解释中，总有一个比其他的一些都高明得多。凡是真正深入研究过这一问题的人，都不会否认唯一决定理论体系的实际上是现象世界”（见《探索的动机》——Einstein 在普朗克生日宴会上的演讲）

$$\begin{aligned}x' &= \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \\y' &= y \\z' &= z \\t' &= \frac{t - vx/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (1)\end{aligned}$$

两个惯性 S 和 S' 之间的洛仑兹变换：

S' 系沿 x 轴正向相对于 S 系以匀速 v 运动。

逆变换：

$$\begin{aligned}x &= \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \\y &= y' \\z &= z' \\t &= \frac{t' + vx'/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (2)\end{aligned}$$

同时的相对性：

$$dt' = \frac{dt - \frac{v}{c^2} dx}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (3)$$

反过来：

$$dt = \frac{dt' + \frac{v}{c^2} dx'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (4)$$

由此可看出，在 S' 系中同时发生的事件，只要不在同一地点，在 S 系中看，这两件事就不同时发生。运动时钟变慢：

$$dt = dt' / \sqrt{1 - v^2/c^2} \quad (5)$$

质能关系：

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (6)$$

相对论还指出，物质的质量和能量之间存在本质联系：

$$E = mc^2 \quad (7)$$

静止质量为  $m_0$  的物体具有能量  $E_0 = m_0c^2$  (8)

由 (7)、(8)，可以算出运动物体的动能：

$$\begin{aligned} T &= mc^2 - m_0c^2 \\ &= m_0c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} - 1 \right) \\ &= \frac{1}{2}m_0v^2 + \frac{3}{8}m_0\frac{v^4}{c^2} + \dots \quad (9) \end{aligned}$$

闵可夫斯基把相对论写成四维时空的形式，从而把时空看成一个整体。

如果令  $x_0 = ct, x_1 = x, x_2 = y, x_3 = z$ ，洛伦兹变换可写为：

$$\begin{pmatrix} x_0' \\ x_1' \\ x_2' \\ x_3' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma & -\beta\gamma & 0 & 0 \\ -\beta\gamma & \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$\text{式中 } \beta = v/c, \gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2} \quad (11)$$

相对论中联系不同惯性系的坐标变换式洛伦兹变换，。在相对论中，矢量被定义为在洛伦兹变换下与坐标一样变的量，即如 (10) 那样变的量。

二阶张量被定义为在洛伦兹变换下按以下规律变化的量： $T' = aTa^{-1}$  (12)

所有的力学量和电学量都可以写成张量，所有的力学规律（除万有引力外）和电磁学规律都可以写成张量方程。所以，除去万有引力定律外，力学规律和电磁学规律都满足洛伦兹变换和相对性原理，都符合相对论。

值得注意的是能量和动量一起可以构成四维动量：

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{pmatrix} \quad (13)$$

四维闵可夫斯基时空的一个点，用  $(t,x,y,z)$  四个坐标表示称为一个事件。三维空间的一个点，由于时间的不断发展，在四维时空中都会描绘出一根线。

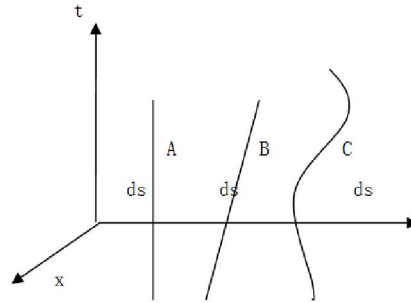
图 1 中 A、B、C 三条世界线，A 描述三维空间中的一个不动点，B 描述一个匀速直线运动的点，C 描述一个变速运动的点。ds 为世界线上两点之间的“距离”。由于不可能画出时空的四个维度，所以没有画出 z 轴坐标描述的那一维空间。

在四维时空中，闵可夫斯基注意到了时间与空间的差异，考虑了光和质点的速度表达式，把四维时空两点之间的“距离”表示为：

$$ds^2 = -c^2dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2 \quad (14)$$

ds 通常称为两点的间隔。由于两点总可以用世界线相连，所以 ds 又可以看成世界线的线元。 $ds^2 = 0$  有

$$v^2 \equiv \frac{dx^2 + dy^2 + dz^2}{dt^2} = c^2 \quad (15)$$



表明从点 1 到点 2 的运动速度正好是光速，这段间隔正好描述光信号的运动，称类空间隔。

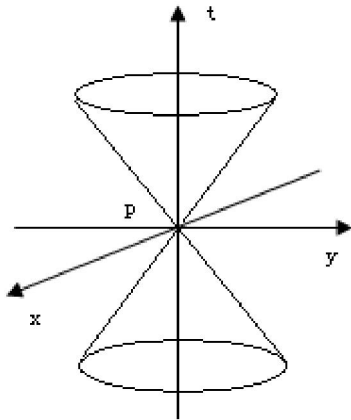
不难看出：

$$ds^2 > 0 \Leftrightarrow v^2 > c^2 \text{ 类空间隔}$$

$$ds^2 = 0 \Leftrightarrow v^2 = c^2 \text{ 类光间隔}$$

图 1 四维时空中的世界线  $ds^2 = 0 \Leftrightarrow v^2 = c^2$  类时间隔

时空中任取一点 p，与 p 的间隔类光的点组成如图 2 所示的锥面，成为 p 点的光锥。



光锥内部的点与 p 点的时间间隔都是类时的，与 p 点以亚光速信号联系。

上半光锥内部点处在 p 点的未来，而下半光锥内部的点处在 p 点的过去。上半光锥上的点也处在 p 点的未来，从 p 点发出的光信号可以到达它们，下半光锥类似。

光锥外部的点与 p 点类空，只有超光速信号才能到达，或从它们到达 p。而相对论认为，光速是信号传递的最大速度，所以光锥外部的点与 p 点没有因果关系。

我们考察在 S 系中静止的一个质点。由于它在 S 系中不动，从空间看，是一个点， $dx=dy=dz=0$ ， (14)

$$\text{约化 } -\frac{ds^2}{c^2} = dt^2 \quad (16)$$

图 2 光锥图  
由此我们定义

$$d\tau = i \frac{ds}{c} \quad (17)$$

为此质点的固有时间。

$$dt = \gamma(dt' + v \frac{dx'}{c^2}) = \gamma(1 + \frac{u_x'v}{c^2})dt'$$

$$\therefore a_x = \frac{du_x}{dt} = \frac{a_x'}{\gamma^3(1 + \frac{u_x'v}{c^2})^3}$$

同理  $a_y = \frac{du_y}{dt} = \frac{a_y'}{\gamma^3(1 + \frac{u_y'v}{c^2})^2} - \frac{a_x' \frac{vu_y'}{c^2}}{\gamma^3(1 + \frac{u_x'v}{c^2})^3}$

$$a_z = \frac{du_z}{dt} = \frac{a_z'}{\gamma^3(1 + \frac{u_z'v}{c^2})^2} - \frac{a_x' \frac{vu_z'}{c^2}}{\gamma^3(1 + \frac{u_x'v}{c^2})^3}$$

代入即得速度变换为

$$\begin{array}{ccc} u_x' = \frac{u_x - v}{1 - \frac{u_x v}{c^2}} & & u_x' = \frac{u_x - v}{1 - \frac{u_x v}{c^2}} \\ u_y' = \frac{u_y \sqrt{1 - v^2/c^2}}{1 - \frac{u_x v}{c^2}} & \xrightarrow{\text{逆变换为 } v \rightarrow -v} & u_y' = \frac{u_y \sqrt{1 - v^2/c^2}}{1 - \frac{u_x v}{c^2}} \\ u_z' = \frac{u_z \sqrt{1 - v^2/c^2}}{1 - \frac{u_x v}{c^2}} & & u_z' = \frac{u_z \sqrt{1 - v^2/c^2}}{1 - \frac{u_x v}{c^2}} \end{array}$$

加速度变换

$$\begin{aligned} du_x &= \frac{du_x'}{1 + \frac{u_x'v}{c^2}} - \frac{u_x' + v}{(1 + \frac{u_x'v}{c^2})^2} \cdot \frac{v}{c^2} \cdot du_x' \\ &= \frac{du_x'}{(1 + \frac{u_x'v}{c^2})^2} [1 + \frac{u_x'v}{c^2} - \frac{u_x'v}{c^2} - \frac{v^2}{c^2}] = \frac{du_x'}{\gamma^2(1 + \frac{u_x'v}{c^2})^2} \end{aligned}$$

## 7、相对论中的质量与动量

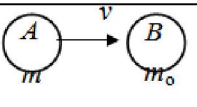
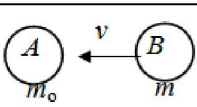
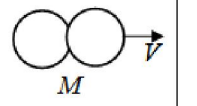
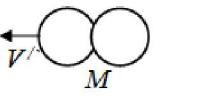


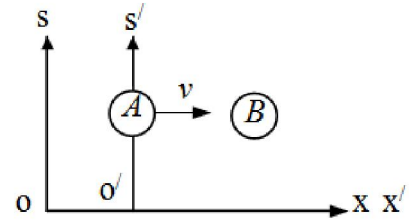
爱因斯坦是第一位明确表述全部物理学的新运动学基础的物理学家，虽然这种新运动学在 Lorentz 的电子论中已经存在了。1905 年，通过他对时空间隔概念的批判性考察，这种运动学出现了。基本相互作用统一物理世界图象的方向是爱因斯坦在创立相对论的过程中开辟的。他在解决牛顿力学和电动力学不协调矛盾中没有因循上述的归一思想，他不企图把力学现象和电磁学现象归结为其中任何之一，而是在一个新的时空构架中把两者统一起来。他的狭义相对论实现了在运动学水平上的两者统一。

相对论质量公式的简单推导：

推导的依据：质量守恒(其实是能量守恒)、动量守恒、洛伦兹速度变换。

设 S 系中有两个相同的球 A、B，其中 B 静止，A 以速度 v 与 B 发生完全非弹性碰撞。

	S	S'
碰前		
碰后		



S 系：质量守恒：  $M = m + m_0$

动量守恒：  $MV = (m + m_0)V = mv \dots \dots \dots (1)$

所以有：  $\frac{m + m_0}{m} = \frac{v}{V} \dots \dots \dots (2)$

S'系：质量守恒：  $M = m + m_0$

动量守恒：  $MV = (m + m_0)V' = -mv \dots \dots \dots (3)$

比较 (1)、(3) 得：  $V' = -V \dots \dots \dots (4)$

由洛伦兹速度变换：

$$V' = \frac{V - v}{1 - \frac{Vv}{c^2}} \quad \therefore V' = -V = \frac{V - v}{1 - \frac{Vv}{c^2}}$$

$$\frac{v}{V} - 1 = 1 - \frac{vV}{c^2} = 1 - \frac{V}{v} \frac{v^2}{c^2}$$

$$\frac{m + m_0}{m} - 1 = 1 - \frac{m}{m + m_0} \frac{v^2}{c^2}$$

将 (2) 代入上式：

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

所以有： 证毕。

爱因斯坦狭义相对论，是建立在所谓的惯性系统中的时空理论。惯性是狭义相对论存在的基础，因为在惯性系统内，做匀速直线运动的物体的数学物理方程，才满足线性迭加规律。Lorentz 在 1904 年已经推导出了电子的纵向质量与横向质量的公式[1]，它们分别是：

$$m_L = m / (1 - v^2/c^2)^{3/2} \quad (1)$$

以及

$$m_T = m / (1 - v^2/c^2)^{1/2} \quad (2)$$

爱因斯坦在他 1905 年的论文《论动体的电动力学》中也推导了电子的“纵”质量和“横”质量（原文中有引号）[2]。《论动体的电动力学》的第 10 节“（缓慢加速的）电子的动力学”中，Einstein 讨论了这个问题。他从运动方程出发，经过洛伦兹—Einstein 坐标变换，得出了一组结果：然后保持“质量×加速度=力”的方程形式，通过比较而导出了电子的纵质量和横质量

$$m_L = \frac{m_0}{\left(\sqrt{1 - v^2/c^2}\right)^3},$$

$$m_T = \frac{m_0}{1 - v^2/c^2}.$$

式中  $m_0$  为物体的静质量。Einstein 所得到的纵质量  $m_L$  随速度变化的关系与洛伦兹的结果相同，可是横向质量公式写成： $m_T = m / (1 - v^2/c^2)$  (3)

公式 (3) 与 Lorentz 的公式 (2) 不同。爱因斯坦在公式 (3) 下面有一段文字说明：

“采用不同的力与加速度的定义，我们自然会得到其它的质量值。这告诉我们，在比较电子运动的各种理论时，必须十分谨慎地进行。”

事实上，爱因斯坦在推导出电子的“纵”质量和“横”质量公式之前，已经明确写出了电子在电磁场中的运动方程式。他当时假定的作用在电子上的力，与 Lorentz 采用的力的定义是不同的。所以，爱因斯坦在 1905 年的论文中的“纵”质量公式 (3) 与 Lorentz 的公式 (2) 不同，在当时是允许的，也是可以理解的。

二十世纪初期，人们对于电子运动的研究是个新兴学科。当时物理学家注意到作用在电子上的力不仅与加速度有关，还与速度有关，这就需要对牛顿的第二定律 ( $F = ma$ ) 的形式进行修改。在这种背景下，物理学家开始尝试性地提出“纵”质量和“横”质量的概念，然后，他们很快认识到这种提法不妥当，就着手从动量的新定义出发，对力的定义作出新的表述。

普朗克在 1906 年著文指出，如果将力表达成动量随时间的变化率，即  $\frac{d}{dt}(mv)$ ，再将动量分解成质量  $m$  乘以速度  $v$ ，则得到相对论质量公式

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

形式上与洛伦兹的横质量相同，Einstein 在后来的论文中采用了这种对质量的新定义。

1909 年，有个叫 Bucherer 的德国物理学家证明了相对论质速关系的那个实验！

爱因斯坦在 1907 年发表了长篇论文：“关于相对性原理和由此得出的结论” [3]，其中第三章是质点（电子）力学，他明确地写出了质点的动量表示式。如果采用现代的符号，质点的动量表示式为：

$$p = mv / (1 - v^2/c^2)^{1/2} \quad (4)$$

爱因斯坦进而把质点动力学方程中的力定义为：

$$F = dp/dt \quad (5)$$

相对论动量表示式 (4) 和力的定义公式 (5) 一直延用到今天。公式 (5) 是牛顿第二定律的推广形式。值得注意的是，爱因斯坦在 1907 年的论文中已经不再提及“纵”质量和“横”质量。

在相对论力学中，动量表示式 (4) 是个非常重要的定义，它是牛顿力学的动量定义的发展。在公式 (4) 中，相对论动量比牛顿力学的动量多了一项因子， $(1 - v^2/c^2)^{-1/2}$ ，后来被称之为  $\gamma$  因子。

在公式 (5) 中，质点受到的力不仅与加速度有关，也与速度有关。从公式 (5)，当质点的速度与加速度的方向平行，以及垂直时，可以作为特例分别推导出质点的“纵”质量和“横”质量。所以，“纵”质量和“横”质量没有普遍性的意义。

$$\text{在相对论中，质点的总能量表示式为：} E = mc^2 / (1 - v^2/c^2)^{1/2} \quad (6)$$

当质点的速度为零时，公式 (6) 退化成著名的质能公式： $E_0 = mc^2$ ，这里  $E_0$  代表静止质点的总能量。注意，爱因斯坦在公式中对质量采用的符号是  $m$ ，等同于牛顿力学中的质量，他很少采用静止质量的提法，也几乎不用符号 ( $m_0$ )。

结合公式(5)和(6),可以得到质点的能量和动量关系式

$$(E/c)^2 - p^2 = m^2 c^2 \quad (7)$$

在公式(7)中,质量  $m$  是一个不变量,它在任何惯性系中都是相同的。现在教科书上,通常把  $m$  称为静止质量。

在教科书和科普读物上,把相对论质量  $M$  (也称为动体质量)写成:

$$M = m / (1 - v^2/c^2)^{1/2} \quad (8)$$

公式(8)常常被称之为质速公式,当质点的速度增加时,质量会随着增大;当质点的速度趋向光速时,质量会增大到无限大。

通过公式(8),相对论动量公式(4)可以简写成  $p = Mv$ ; 相对论能量公式(6)可以简写成  $E = Mc^2$ , 这是引入公式(8)的优点。由(7)、(8),可以算出运动物体的动能:

$$\begin{aligned} T &= mc^2 - m_0 c^2 \\ &= m_0 c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1 \right) \\ &= \frac{1}{2} m_0 v^2 + \frac{3}{8} m_0 \frac{v^4}{c^2} + \dots \end{aligned}$$

第一、四维洛伦兹变换和光速、以及光速不变紧密相连。它可以直接脱胎于电磁学,法国彭加勒是第一个给出该变换的人。该变换固有的适用范围就是四维性质的光电磁。光速不变——它的物理意义就是表述大范围的电磁空间是零曲率的空间。第二、四维洛伦兹变换不能适用于引力方程。洛伦兹变换几乎征服了物理学现有的每一个分支,就是偏偏征服不了引力学。20世纪30年代后随着非线性和分维物理学分支的迅速广泛崛起,洛伦兹变换均被挡在门外。进一步地研究也发现引力空间是最简单的非线性空间——即不等于0的负曲率的空间。这样才划定了洛伦兹变换的适用范围是所有零曲率的空间的物理学分支。

在爱因斯坦之前,惯性质量,即物体对运动的惯性阻抗被认为是一个不可改变的量。这符合牛顿形而上学的机械自然观。1895年,奥斯瓦尔德在吕比克自然科学家大会的报告中还提出质量不变的经典观点。时过不久,1901年实验物理学家在进行高速运动电子的实验时,发现电子的质量随着速度增加而变大。爱因斯坦在他的相对论中也论证了这一事实。

只要是运动物体的速度远低于光速,由于运动所引起的质量增加就不明显。因为在经典力学中,物体很大而运动速度很小,质量的增加往往被忽视。相反,在相对论力学中,质量的增加起着重要作用。在其后的时期中,原子物理学家们在大型实验设备上,加速了基本粒子。这些实践证明爱因斯坦的学说是正确的。

(1) “质量的相对论变换”公式在1906年已明显地包含于 Max Planck 的论文 (Verh.dtsch.phys.Gas.,1906,4:136) 中,但未引起重视;

(2) R.C.Tolman 在1911年的论文 (Phil.Mag.,1911,21:296) 中详细地强调了此“质量的相对论变换”公式; R.C.Tolman 后来在他的书《Relativity Thermodynamics and Cosmology》(Oxford,London,1934,1946,1949,1950)中再次写出了此“质量的相对论变换”公式;

(3) A.Einstein 在1935年的论文“Elementary Derivation of Equivalence of Mass and Energy”(载 Bull.Amer.Math.Soc.,1935,61(4):223-230)中肯定并用到了此“质量的相对论变换”公式。

作为说明,W.Pauli 在其名著《Theory of Relativity》(Pergamon Press,1950)中写道,“质量的相对论变换”公式“现在是看作为质量的。这一质量依赖于速度的表达式是由 Lorentz 基于电子也在运动过程中受到 Lorentz 收缩这一假定,首先专门对电子的质量导出这个公式。……Lorentz 关于质量改变的定律可以从相对论导出,而不必对电子的形状或电荷的分布作任何特殊的假定,这是一大进步。公式(215)对各种质量均适用,所以不必对质量的性质作任何假定。”W.Pauli 在注释中特别提到了 M.Planck 和 R.C.Tolman 的工作。

吴大猷先生在其《相对论》一书中也特别提到了“质量的相对论变换”公式(p90)。吴大猷先生的推导过程与 R.C.Tolman 和 A.Einstein 完全一样。“质量的相对论变换”公式是相对论中的一个重要公式,如果 Einstein 的文章中没有这个公式那倒是奇怪的。1911年至1934的25年间,Einstein 正在从事广义相对论方面的工作,无暇在文章中提到这一公式也不奇怪。

#### 参考文献

[1]. Lorentz H A. Electromagnetic Phenomena in a system moving with any velocity less than that of light. Proc. Sec. Sci., 1904, 6: 809-831. 中译: 相对论原理[M], 科学出版社, 赵志田, 刘一贯译, 1989, 6-30.

[2]. Einstein A. Zur Elektrodynamik bewegter Körper, Ann. Phys., 1905, 17: 891-921。中译：论动体的电动力学[A], 范岱年等译, 爱因斯坦文集[M] 北京：商务印书馆, 1977, 83-115。

[3]. Einstein A. Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik, 1907, 4: 411-462。中译：关于相对性原理和由此得出的结论[A], 范岱年等译, 爱因斯坦文集[M] 北京：商务印书馆, 1977, 150-209。

## 8、速度合成公式的思考

### 1、相对论速度变换

在  $S$ 、 $S'$  系上测某一质点在某一瞬时的速度

$$S \text{ 系上: } \begin{cases} v_x = \frac{dx}{dt} \\ v_y = \frac{dy}{dt} \\ v_z = \frac{dz}{dt} \end{cases}; \quad S' \text{ 系 } \begin{cases} x' = \gamma(x - vt) \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = \gamma(t - \frac{v}{c^2}x) \end{cases}.$$

$$\Rightarrow \begin{cases} dx' = \gamma(dx - vdt) \\ dy' = dy \\ dz' = dz \\ dt' = \gamma(dt - \frac{v}{c^2}dx) \end{cases}$$

$$\begin{cases} v'_x = \frac{dx'}{dt'} = \frac{\gamma(dx - vdt)}{\gamma(dt - \frac{v}{c^2}dx)} = \frac{\frac{dx}{dt} - v}{1 - \frac{v}{c^2} \frac{dx}{dt}} = \frac{v_x - v}{1 - \frac{v}{c^2}v_x} \\ v'_y = \frac{dy'}{dt'} = \frac{dy}{\gamma(dt - \frac{v}{c^2}dx)} = \frac{\frac{dy}{dt}}{\gamma(1 - \frac{v}{c^2} \frac{dx}{dt})} = \frac{v_y}{\gamma(1 - \frac{v}{c^2}v_x)} \\ v'_z = \frac{dz'}{dt'} = \frac{dz}{\gamma(dt - \frac{v}{c^2}dx)} = \frac{\frac{dz}{dt}}{\gamma(1 - \frac{v}{c^2} \frac{dx}{dt})} = \frac{v_z}{\gamma(1 - \frac{v}{c^2}v_x)} \end{cases}$$

$$\text{即 } \begin{cases} v'_x = \frac{v_x - v}{1 - \frac{v}{c^2}v_x} \\ v'_y = \frac{v_y}{\gamma(1 - \frac{v}{c^2}v_x)} \\ v'_z = \frac{v_z}{\gamma(1 - \frac{v}{c^2}v_x)} \end{cases} \text{ 及 } \begin{cases} v_x = \frac{v'_x + v}{1 + \frac{v}{c^2}v'_x} \\ v_y = \frac{v'_y}{\gamma(1 + \frac{v}{c^2}v'_x)} \\ v_z = \frac{v'_z}{\gamma(1 + \frac{v}{c^2}v'_x)} \end{cases} \quad (17-11)$$



讨论:  $\frac{v}{c} \ll 1$  时,  $\gamma \rightarrow 1$

$$\Rightarrow \begin{cases} v'_x = v_x - v \\ v'_y = v_y \\ v'_z = v_z \end{cases} \quad \text{及} \quad \begin{cases} v_x = v'_x + v \\ v_y = v'_y \\ v_z = v'_z \end{cases}$$

洛伦兹变换  $\rightarrow$  伽利略变换。

2、速度合成公式

在以速度  $v$  沿  $K$  系的  $X$  轴运动着的  $k$  系中, 设有一个点依照下面

$$\begin{aligned} \xi &= \omega \tau \\ \eta &= \omega' \tau \\ \zeta &= 0 \end{aligned}$$

此处  $\omega$  和  $\omega'$  都表示常数。

求这个点对于  $K$  系的运动。借助于 §3 中得出的变换方程, 我们把运动方程中来, 我们就得到:

$$x = \frac{\omega + v}{1 + \frac{v\omega}{V^2}} t \quad y = \sqrt{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2} \left(\frac{1}{1 + \frac{v\omega'}{V^2}}\right) \omega' t, \quad z = 0$$

这样, 依照我们的理论, 速度的平行四边形定律只在第一级近似范围内才是有效的。我们令:

$$U^2 = \left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2$$

$$\omega^2 = (\omega_x)^2 + (\omega_y)^2$$

和  $\alpha = \arctan \frac{\omega_y}{\omega_x}$ ; [20]

$\alpha$  因而被看做是  $v$  和  $\omega$  两速度之间的交角。经过简单演算后, 我们得到:

$$U = \frac{\sqrt{(v^2 + \omega^2 + 2v\omega \cos \alpha) - \left(\frac{v\omega \sin \alpha}{V}\right)^2}}{1 + \frac{v\omega \cos \alpha}{V^2}}$$

值得注意的是,  $v$  和  $\omega$  是以对称的形式进入合成速度的式子里的。如果  $\omega$  也取  $X$  轴 ( $\Xi$  轴) 的方向,

$$U = \frac{v + \omega}{1 + \frac{v\omega}{V^2}}$$

那么我们就得到: , 从这个方程得知, 由两个小于  $V$  的速度合成而得的速度总是小于  $V$ 。因为如果我们置

$v = V - k$ ,  $\omega = V - \lambda$ , 此处  $k$  和  $\lambda$  都是正的并且小于  $V$ , 那么:

$$U = V \frac{2V - k - \lambda}{2V - k - \lambda + \frac{k\lambda}{V}} < V$$

进一步还可看出, 光速  $V$  不会因为同一个“小于光速的速度”合成起来而有所改变。在这场合下, 我们得到:

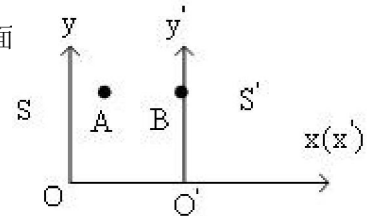


图17-6

(的

$$U = \frac{v + \omega}{1 + \frac{\omega}{V}} = V'$$

当  $U$  和  $\omega$  具有同一方向时, 我们也可以把两个依照 § 3 的变换联合起来, 而得到  $U$  的公式。如果除了在 § 3 中所描述的  $K$  和  $k$  这两个坐标系之外, 我们还引进另一个对  $k$  做平行运动的坐标系  $k'$ , 它的原点以速度  $\omega$  在  $\Xi$  轴上运动着, 那么我们就得到  $x, y, z, t$  这些量同  $k'$  的对应量之间的方程, 它们同那些在 § 3 中所得到的方程的区别, 仅仅在于以

$$\frac{v + \omega}{1 + \frac{v\omega}{V^2}}$$

这个量来代替“ $v$ ”; 由此可知, 这样的一些平行变换——必然地——形成一个群。

洛伦兹变换和爱因斯坦速度相加规建立在平直时空惯性参考系基础上, 而现实世界中纯粹的惯性参考系是不存在的, 在这种意义上狭义相对论应当被看成一种理想状态的理论。一般而言在有引力场存在的情况下, 爱因斯坦速度相加规则仅是一个近似公式。但我们也知道, 现有的关于光速不变的实验和观察都是在地球、太阳系和银河系的弱引力场空间范围内进行的。例如在地球绕太阳转动的轨道上完成的迈克耳逊-雷默干涉实验, 对自转的太阳两边缘发出的光的观察【3】, 对银河系内双星系统的光速的观察【4】, 以及银河系内恒星和河外星系光行差现象的观察等等【5】。所有这些实验和观察都证明, 即使在弱引力场和弱非惯性运动情况下, 光的速度仍然与光源的运动状态无关, 近似地满足爱因斯坦速度相加规则。

假设我们的旧相识, 火车车厢, 在铁轨上以恒定速度  $v$  行驶; 并假设有一个人在车厢里沿着车厢行驶的方向以速度  $w$  从车厢一头走到另一头。那么在这个过程中, 对于路基而言, 这个人向前走得有多快呢? 换句话说, 这个人前进的速度  $W$  有多大呢? 唯一可能的解答似乎可以根据下列考虑而得: 如果这个人站住不动一秒钟, 在这一秒钟里他就相对于路基前进了一段距离  $v$ , 在数值上与车厢的速度相等。但是, 由于他在车厢中向前走, 在这一秒钟里他相对于车厢向前走了一段距离  $w$  也就是相对于路基又多走了一段距离  $w$ , 这段距离在数值上等于这个人在车厢里走动的速度。这样, 在所考虑的这一秒钟里他总共相对于路基走了距离  $W=v+w$ 。我们以后将会看到, 表述了经典力学的速度相加定理的这一结果, 是不能加以支持的; 换句话说, 我们刚才写下的定律实质上是不成立的。但目前我们暂时假定这个定理是正确的。(摘自《浅说》第 6 节、经典力学中所用的速度相加定理的全文)

在狭义相对论中, 两惯性系相对速度  $v$  与  $x_3$  和  $x'_3$  平行

$$\begin{cases} x'_1 = x_1 \\ x'_2 = x_2 \\ x'_3 = x_3 - vt / \sqrt{1 - v^2/c^2} \\ t' = t - (\frac{v}{c^2})x_3 / \sqrt{1 - v^2/c^2} \end{cases} \quad (1)$$

( $x'_1, x'_2, x'_3, t'$ ) 为  $K'$  坐标系的坐标, ( $x_1, x_2, x_3, t$ ) 为  $x_4 = ict'$  坐标系的坐标, 令  $x'_4 = ict'$ ,  $x_4 = ict'$ , 所以变换矩阵为

$$a_{ij} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/\sqrt{1-v^2/c^2} & iv/c/\sqrt{1-v^2/c^2} \\ 0 & 0 & -iv/c/\sqrt{1-v^2/c^2} & 1/\sqrt{1-v^2/c^2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

如果  $x_1, x_2, x_3, x_4 \rightarrow 0$ ;  $x'_1, x'_2, x'_3, x'_4 \rightarrow 0$ , 相对速度  $v$  不变, 那么

$$\begin{cases} dx'_1 = dx_1 \\ dx'_2 = dx_2 \\ dx'_3 = (dx_3 + i\frac{v}{c}dx_4) / \sqrt{1-v^2/c^2} \\ dx'_4 = (dx_4 - i\frac{v}{c}dx_3) / \sqrt{1-v^2/c^2} \end{cases} \quad (3)$$

比较  $(dx'_1{}^2 + dx'_2{}^2 + dx'_3{}^2) - (dx_1{}^2 + dx_2{}^2 + dx_3{}^2)$  与  $dx'_4{}^2 - dx_4{}^2$

$$(dx'_1{}^2 + dx'_2{}^2 + dx'_3{}^2) - (dx_1{}^2 + dx_2{}^2 + dx_3{}^2) = \frac{i^2 \frac{v^2}{c^2} dx_4{}^2 + i \frac{v}{c} dx_4 dx_3 + \frac{v^2}{c^2} dx_3{}^2}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (4)$$

$$dx'_4{}^2 - dx_4{}^2 = - \frac{i^2 \frac{v^2}{c^2} dx_4{}^2 + i \frac{v}{c} dx_3 dx_4 + \frac{v^2}{c^2} dx_3{}^2}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (5)$$

比较后知道 (4) 式 = (5) 式

$$(dx'_1{}^2 + dx'_2{}^2 + dx'_3{}^2) - (dx_1{}^2 + dx_2{}^2 + dx_3{}^2) = -(dx'_4{}^2 - dx_4{}^2) \quad (6)$$

相对论中速度合成公式  $V=(V_1 \pm V_2) \div (1 \pm V_1 V_2 / C^2)$ ，仅适用于同一直线上两个速度的合成。当物体的两个速度不在同一直线时，其合成公式又是怎样的呢？下面探讨一下当两个速度垂直时速度的合成，由于互相垂直的两个速度互不影响，因此可从引力质量角度利用 Lorentz transformation 推导出来。

设物体的引力静止质量为  $m_0$ ，水平速度为  $v_1$ ，垂直速度为  $v_2$ ，合速度为  $v$ ，不妨设先有水平速度  $v_1$ ，此时引力质量为  $m_1$ ，由 Lorentz transformation 得  $m_1 = m_0 \div (1 - v_1^2 \div c^2)^{0.5}$ ， $m_2 = m_1 \div (1 - v_2^2 \div c^2)^{0.5} = m_0 \div (1 - v_1^2 \div c^2 - v_2^2 \div c^2 + v_1^2 v_2^2 \div c^4)^{0.5} = m_0 \div (1 - v_2^2 \div c^2)^{0.5}$ 。∴  $V_2 = v_1^2 + v_2^2 - v_1^2 v_2^2 \div c^2$ ，当  $v_1 \ll c, v_2 \ll c$  时， $v_1^2 v_2^2 \div c^2 \rightarrow 0$ ，此时  $V^2 = v_1^2 + v_2^2$ ，这就是经典力学中正交速度合成公式。

在经典力学中速度合成公式为  $v = (v_1^2 + v_2^2 + 2v_1 v_2 \cos \theta)^{0.5}$ ，在相对论中  $v_1^2 + v_2^2$  变为  $v_1^2 + v_2^2 - v_1^2 v_2^2 \div c^2$ ，可设其合速度公式为  $v = (v_1^2 + v_2^2 - v_1^2 v_2^2 \div c^2 + X \cos \theta)^{0.5}$ ，令  $\theta = 0$ ，解得  $X$ ，代入上式得到合速度的计算公式。当  $v_1 \ll c, v_2 \ll c$  时， $v_1^2 v_2^2 \div c^2 \rightarrow 0$ ，也可以回到经典力学中的速度合成公式，在此从略。这也符合量子力学的对应原理。由于整个宇宙形成的绝对空间不存在运动问题，因此相对论中的速度合成公式，仅适用于有限多个合成，不适用于无限多个。

早在二十世纪初，人们就已经对 Einstein 相对论力学和 Newton 力学的数学结构做了最透彻的研究。其研究后果之一就是要把 Newton 力学与 Galileo 抛物几何空间【1】相对应；把 Einstein 相对论力学与 Minkowski 双曲几何空间【2】相对应；直言之，Galileo 惯性运动变换群确定了 Newton 力学空间为非 Euclid 性质的 Galileo 抛物空间；而 Lorentz 惯性运动变换群确定了 Einstein 相对论力学空间为非 Euclid 性质的 Minkowski 双曲空间。古新妙先生认为：因为牛顿力学意义下的速度与相对论力学意义下的速度并不相同，各自满足不同的加法公式，牛顿速度满足的加法公式是：

$$U' = U + u \quad (1)$$

而相对论速度满足的加法公式是：

$$V' = \frac{V + v}{1 + \frac{V \cdot v}{c^2}} \quad (2)$$

从牛顿速度到相对论速度之间存在如下的映射关系：

$$V' = c \cdot th \frac{U'}{c} \quad V = c \cdot th \frac{U}{c} \quad v = c \cdot th \frac{u}{c} \quad (3)$$

这里的映射关系由双曲正切函数来实现。双曲函数的定义如下：

$$\text{双曲正弦: } shx = \frac{e^x - e^{-x}}{2}, \quad \text{双曲余弦: } chx = \frac{e^x + e^{-x}}{2}, \quad \text{双曲正切: } thx = \frac{shx}{chx}。$$

$$th(x+y) = \frac{thx + thy}{1 + thx \cdot thy}。$$

双曲正切具有下列性质：

从牛顿速度加法公式 (1) 转换到相对论速度加法公式 (2)，是双曲正切的功劳，是**相对论的奥秘**。

参考文献：

【1】Galileo 几何 H. Beek 最小曲面的几何学, Sitzungsber. Leipziger Berliner Math. Ges. 12:14-30, 1913 L. Silberstein, Galileo 时空中的射影几何, Philos. Mag. 10: 1925 Makarova, N., M., Tow-dimensional Noneuclidean Geometry with Parabolic Angle and Dissertation, Leningrad, 1962。

【2】Minkowski 几何 A. Einstein 关于相对性原理和由此得出的结论 Einstein 文集 第二卷 商务印书馆出版, 1977 J. D. Jackson, Classical Electrodynamics. John Wiley & Sons Books Lnc. 1975 Shervatov, V. G., Hyperbolic Functions. Heath, Boston, 1963。

【3】狭义相对论入门, 叶壬葵, 厦门大学出版社, 317, (1988)。

【4】。 P. de Bernardis et al, Nature, 404, 955 (2000). Mermentt C. L., et al, Astrophys. J., Suppl., 148, 1 (2003)。

【5】S. 温伯格, 引力论和宇宙学, 科学出版社, 478 (1984)。

## 9、狭义相对论的意义

对称原理与方向和向量的关系非常密切, 例如根据对称原理把 Maxwell 方程组 20 个方程式写成 4 个方程式, 通过方程式精简化, 才可以把电磁学发展到更基本、更深入的程度。Maxwell 的成就在于将当时所有

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{E} &= \frac{\rho}{\epsilon_0} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{B} &= \mu_0 \mathbf{J} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \end{aligned}$$

已知的电磁知识集中于四个方程中：

Maxwell 方程组的 Lorentz 对称性在于：如果我们进行 Lorentz transformation, 方程组仍然具有

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad \text{rot } \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad \text{①, ②}$$

transformation 以前的形式。在麦克斯韦电磁理论中, 有关系式：

式①是电场变化产生磁场的数学表达。可以看出, 电场变化(原因)可用导数的形式来表达, 磁场强度  $H$ (结果)与电位移导数  $\partial \mathbf{D} / \partial t$  有关。即结果与原因的导数形式有关。式②是磁场变化产生电场的数学表达。可以看出, 磁场变化(原因)可用导数形式表达为  $\partial \mathbf{B} / \partial t$ , 电场强度  $E$ (结果)与磁感应强度  $B$  的导数形式  $\partial \mathbf{B} / \partial t$  有关。即结果与原因的导数形式有关。在数学上简直美得像一个奇迹, 仿佛出自上帝之手！

如果我们再联系法拉第电磁感应定律  $\mathbf{E} = -d\Phi / dt$ , 相对论动力学基本方程  $F = d(mv) / dt$ , 以及导数的含义, 参照前面的结论, 我们就可以给出原因与结果之间的数学关系:  $f_{(\text{结果})} = f'_{(\text{原因})}$ , 通常简化为 因果关系:  $f_{(\text{果})} = f'_{(\text{因})}$ , 有了因果关系:  $f_{(\text{果})} = f'_{(\text{因})}$ , 如果我们知道某个事件发生的原因, 我们就可以求出该原因产生的结果。一位法国物理学家曾经这样评价爱因斯坦: “在我们这一时代的物理学家中, 爱因斯坦将位于最前列。他现在是、将来也还是人类宇宙中最有光辉的巨星之一”, “按照我的看法, 他也许比牛顿更伟大, 因为他对于科学的贡献, 更加深入地进入了人类思想基本要领的结构中。”

居里夫人在 1911 年写的一封信中说: “爱因斯坦先生是我们相知中最富有创造力的人才……我们对他至为敬佩的是他能驾轻就熟地调整自己的思路以适应新出现的概念, 并从中引申出所有可能的结论。……” 霍金, 是当今享有国际盛誉的理论物理学家。在他为迎接新世纪而写的《相对论简史》一文中, 对爱因斯坦的推崇达到了无以复加的地步: “在过去的一百年中, 世界经历了前所未有的变化。其原因不在



于政治，也不在于经济，而在于科学技术——直接源于先进的基础研究的科学技术。没有科学家能比爱因斯坦更代表这种科学的先进性。”

Einstein 是本世纪初物理学革命的巨人。海森伯在谈到 Einstein 的贡献时说，他“有点像艺术领域中的达·芬奇或者贝多芬，Einstein 也站在科学的一个转折点上，而他的著作率先表达出这一变化的开端；因此看来好像是他本人发动了 20 世纪上半期所亲眼目睹的革命。”2005 年 4 月 15 日在北京举行的“世界物理年纪念大会”上，诺贝尔物理学奖获得者、美国纽约大学石溪分校和清华大学教授杨振宁作了首场大会报告。他说：“爱因斯坦是一位孤独的物理学家，他不怕别人对他的批评和不同意，并坚持自己的想法。”“爱因斯坦是 20 世纪最伟大的物理学家，他和牛顿是有史以来人类社会最伟大的物理学家。”“爱因斯坦将对 21 世纪的理论物理产生重要影响。”

沈惠川教授在《我的世界线：相对论》中指出：“Einstein 和相对论成了我的信仰，并成了我自己的一部分。在物理学中，能够永远站得住脚的，除了分析力学（包括 Lagrange 力学，Hamilton 力学和 Birkhoff 系统动力学），热力学外，就是相对论（包括狭义相对论和广义相对论，或称为特殊相对论和一般相对论）。这三门学问可说是物理学中的“铁三角”，是其它物理学科必须遵守的约束条件；是物理中的物理，是物理中的哲学。其余的学问，包括量子力学在内，都是在变化的，不一定全对。……相对论要求一直是我审视其它文章（包括自己文章）的基本标准。相对论要求一直是我审视所有的物理学文章的基本标准。”

相对论是现代物理学的重要基石，普朗克认为相对性原理在物理学界所引起的广度和深度，惟有引入哥白尼世界体系所导致的革命与之媲美。它的建立是 20 世纪自然科学最伟大的发现之一，对物理学、天文学乃至哲学思想都有深远的影响。相对论是科学技术发展到一定阶段的必然产物，是电磁理论合乎逻辑的继续和发展，是物理学各有关分支又一次综合的结果。相对论经迈克耳逊—莫雷实验、洛伦兹及爱因斯坦等人发展而建立。李醒民在评论相对论这座美仑美奂的人类精神的伟大建筑物时这样写道：相对论犹如一座琼楼玉宇，其外部结构之华美雅致，其内藏观念之珍美新奇，都是无与伦比的。相对论的逻辑前提是两条在逻辑上再简单不过的原理，它们却像厄瑞克泰翁庙的优美的女像柱一样，支撑着内涵丰盈的庞大理论体系而毫无重压之感。其建筑风格是高度对称的，从基石到顶盖莫不如此。四维时空连续统显示出精确的贯穿始终的对称性原理，也蕴涵着从日常经验来看决不是显而易见的不变性或协变性。空时对称性规定着其他的对称性：电荷和电流、电场和磁场、能量和动量等的对称性。正如韦尔所言，整个相对论只不过是另一个方面；四维连续统的对称性（不变性）、相对性或齐性首次被爱因斯坦描述出来，相对论处理的正是四维空时连续统的固有对称。在这样高度对称的琼楼玉宇中，又陈放着诸多奇异的观念——四维世界、弯曲时空、广义协变、尺缩钟慢等——从而通过均衡中的奇异显示出更为卓著的美！

### 第三章 狭义相对论的时空观

#### 第一节 四维时空问题

##### （一）“维数”问题

维数是刻画几何图形拓扑性质(拓扑是译音，原意是形势分析，形是指一个图形本身性质，势是指一个图形与其子图形相对的性质)的一种数，物体占有的空间，只与空间这一元(素)有关，物体占有的空间可以用几何图形来描述。通俗地说，它是确定整个图形中各点的位置所需要的坐标(或参数)的个数。

直线上的点由一个坐标确定，故直线的维数为 1。平面上的点由两个坐标确定，故平面的维数为 2。同理日常所指的空间，空间中的点由三个坐标确定，故空间的维数为 3，物体占有的空间，是有限的三维空间。当整个图形为一点时，点的维数假设为 0。在 19 世纪前，几何学仅从事三维或低于三维图形的研究。

19 世纪以来，更高维空间的概念开始被接受。例如，日常的三维空间中点的坐标是  $(x, y, z)$ ，再加上时间坐标  $t$ ，就得到点  $(x, y, z, t)$ ，它们组成的空间就是最简单的四维空间。【7】随着宇宙中客观时间的流逝，物体在坐标系中的位置，不断的发生变化，即物体中各个质点的坐标不断的发生变化，只考虑物体的空间属性，物体就看成几何体。

##### （二）物理学与四维时空

Engles 认为，从宇宙总体上来看，物质运动是一个永远循环的过程，在这个循环过程中，物质的任何一个属性都不会丢失。宇宙的每一循环过程都按照物质固有的规律运行，是物质属性的有秩序的展现过程，循环过程中的物质运动规律是永恒不变的。世界的某些特征永远保持不变。自然定律在空间的每一个方向上以及在任何时刻都相同，这分别等价于在任何物理过程中的总旋总量——角动量——守恒和总能量守恒。这两个量与电磁质量的总体绝对守恒，它们作为守恒量已与整个物理学的上层建筑深深缠结在一起了。因此“无限时间内宇宙的永远重复的连续更替，不过是无限空间内无数宇宙并存的逻辑的补充【3】”，即时间内的宇宙是空间内的宇宙的纵向展开。所以，“物质在它的一切变化中永远是同一的，它的任何一个属性都永远

不会丧失。因此，它虽然在某个时候以铁的必然性毁灭自己在地球上的最美的花朵——思维着的精神，而在另外的某个时候一定又以同样的铁的必然性把它重新产生出来。【3】”物质的每一个循环过程都是其前一循环过程的重复，各个循环过程所包含的信息展现的程序也是相同的，时间是空间的变化，时间经常是用事物变化的方式来定义的。Einstein 指出：“相对论和时间与空间的理论有密切的关系”，在相对论的所有推理过程中，都离不开时间和空间的性质。Einstein 的相对论不仅标志着人类科学思维的一大进步，而且是我们今后相当一个时期科学发展的新的起点，是值得我们进一步思考下去的通向新的辉煌的通道。因为这里讨论的本质是关于时间和空间的理论，这几乎是一切科学的基础。

在刚体中，刚体的空间是由距离不变的质点组成，在几何体中，几何体的空间是由距离不变的几何点组成，在坐标系中，坐标系的空间是由坐标不变的几何点组成，刚体占有的空间、几何体占有的空间是有限空间，有边有界，坐标系定位确定的空间是无限空间，坐标系的几何点之间的距离不变，这些几何点与坐标原点、坐标轴的各点的距离不变，坐标系的几何点相对这坐标系始终静止，坐标不变，坐标系的空间始终相对自己的坐标系静止，坐标系的空间是参考物及坐标系定位确立的空间，参考物是人为选定的，坐标系是人为依据参考物建立的几何图形，坐标系是用坐标描述，质点、假设的其它几何点在这坐标系中位置，也是用于数字化描述物体、物质，假设的刚体、几何体，相对位置的主观意识工具，坐标系只能画在纸上，存在在人的主观意识中，客观上并不存在，坐标系可以建立无数个，描述的是同一个客观存在的宇宙空间，坐标系的空间是主观意识定位确立的空间，在不同的时刻，各个坐标系的相对位置是不同的，在同一时刻，对同一点的位置描述，在不同的坐标系中，这点的坐标是不同的，这就涉及各个坐标系之间的坐标变换。

Einstein 的老师闵可夫斯基在 1908 年德国自然科学家学会的第八十次年会上的报告中宣称的那样：“我们现在讲述的空间和时间的观点，是在实验物理学基础上发展起来的，这就是理论之所以有力的原因，它的意义是革命性的。从此以后，时间和空间退化为虚幻的影子，只有两者结合才能保持独立的存在。”

在经典力学体系下，空间是三维的，时间是事件发生的顺序，也可以将空间的三维与时间一维在数学上组合到一起过程四维的时空系统，这个系统应当是广泛的，时间就是时间维的坐标刻度，同时就是指某些事件具有相同的时间刻度。

根据物理学必须具有普适性，按宇(时)宙(空)中各点同一性和等价性的普遍观点，时空必须具有不变的确定的均匀度量性。因此它是由可直接度量的实3-维空间 $(x^1, x^2, x^3)$ 和不可直接度量的虚(原理二)1-维时间 $x^0=ict$ 构成的具有均匀性，各向同性的4-维欧几里德度规空间： $M^4(g_{\mu\nu} = \{1, 1, 1, 1\}, \mu, \nu = 0, 1, 2, 3)$ ： $x^0=ict, x^1=x, x^2=y, x^3=z, c$ 是真空中光速。对于物理学，在宇宙任意点建立的参考系(坐标系)  $M^4$ 都是互相等价的，平权的；在宇宙任意点上建立的 $M^4$ 中，一切物理定律都有相同的形式。原理(一)给出在宇宙中任一点的 $M^4$ 中，物理定律都具有相同的形式。由此物理定律对宇宙四维时空具有普适性。在这里看到，表示时间维度的坐标还具有独特的形式：虚数单位 $i$ 表示时间的不可直接观测性(原理二)， $c$ 表示时间在以光速流逝。由于它在宇宙中任一点都有这个特性，就称它为普适时间维度，常用符号 $0ictx\tau$ 表示。由天文时和原子时的同步表明， $\tau$ 在 $M^4$ 中是唯一确定的。时间的这个特性在各种文化中都受到了关注。“时光飞逝”，“时间一去不复返”，“逝者如斯夫，不舍昼夜”(中华)，“未来珊珊来迟，现在象箭一样飞逝，过去永远静止不动”(德意志)，“时间对于谁都是奔跑着走的”(英格兰)，……

闵可夫斯基把相对论写成四维时空的形式，从而把时空看成一个整体。

如果令  $x_0 = ct, x_1 = x, x_2 = y, x_3 = z$ ，洛伦兹变换可写为：

$$\begin{pmatrix} x_0' \\ x_1' \\ x_2' \\ x_3' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma & -\beta\gamma & 0 & 0 \\ -\beta\gamma & \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\text{式中 } \beta = v/c, \gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2} \quad (2)$$

相对论中联系不同惯性系的坐标变换式洛伦兹变换，。在相对论中，矢量被定义为在洛伦兹变换下与坐标一样变的量，即如(1)那样变的量。

$$\text{二阶张量被定义为在洛伦兹变换下按以下规律变化的量： } T' = aTa^{-1} \quad (3)$$

所有的力学量和电学量都可以写成张量，所有的力学规律(除万有引力外)和电磁学规律都可以写成张量方程。所以，除去万有引力定律外，力学规律和电磁学规律都满足洛伦兹变换和相对性原理，都符合相对

论。

值得注意的是能量和动量一起可以构成四维动量：

$$P = \begin{pmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{pmatrix} \quad (4)$$

四维闵可夫斯基时空的一个点，用  $(t,x,y,z)$  四个坐标表示称为一个事件。三维空间的一个点，由于时间的不断发展，在四维时空中都会描绘出一根线。

图 1 中 A、B、C 三条世界线，A 描述三维空间中的一个不动点，B 描述一个匀速直线运动的点，C 描述一个变速运动的点。 $ds$  为世界线上两点之间的“距离”。由于不可能画出时空的四个维度，所以没有画出 z 轴坐标描述的那一维空间。

在四维时空中，闵可夫斯基注意到了时间与空间的差异，考虑了光和质点的速度表达式，把四维时空两点之间的“距离”表示为：

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2 \quad (5)$$

$ds$  通常称为两点的间隔。由于两点总可以用世界线相连，所以  $ds$  又可以看成世界线的线元。 $ds^2 = 0$  有

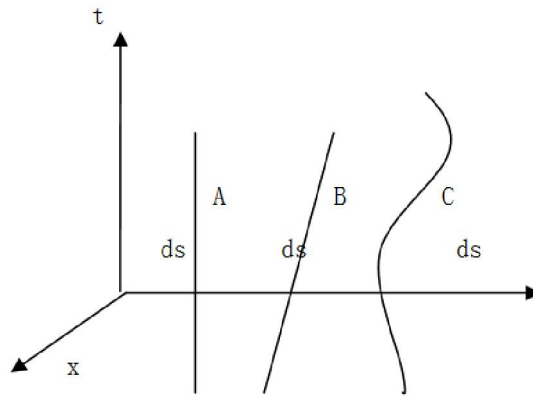


图 1 四维时空中的世界线

$$v^2 \equiv \frac{dx^2 + dy^2 + dz^2}{dt^2} = c^2 \quad (6)$$

表明从点 1 到点 2 的运动速度正好是光速，这段间隔正好描述光信号的运动，称类空间隔。

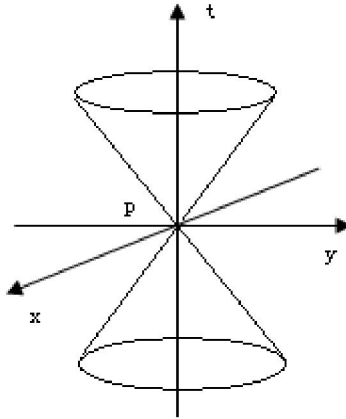
不难看出：

$$ds^2 > 0 \Leftrightarrow v^2 > c^2 \quad \text{类空间隔}$$

$$ds^2 = 0 \Leftrightarrow v^2 = c^2 \quad \text{类光间隔}$$

$$ds^2 < 0 \Leftrightarrow v^2 < c^2 \quad \text{类时间隔}$$

时空中任取一点  $p$ ，与  $p$  的间隔类光的点组成如图 2 所示的锥面，成为  $p$  点的光锥。



光锥内部的点与  $p$  点的时间间隔都是类时的，与  $p$  点以亚光速信号联系。上半光锥内部点处在  $p$  点的未来，而下半光锥内部的点处在  $p$  点的过去。上半光锥上的点也处在  $p$  点的未来，从  $p$  点发出的光信号可以到达它们，下半光锥类似。

光锥外部的点与  $p$  点类空，只有超光速信号才能到达，或从它们到达  $p$ 。而相对论认为，光速是信号传递的最大速度，所以光锥外部的点与  $p$  点没有因果关系。

我们考察在  $S$  系中静止的一个质点。由于它在  $S$  系中不动，从空间看，是一个点， $dx=dy=dz=0$ ，(5) 约化

$$-\frac{ds^2}{c^2} = dt^2 \quad (7)$$

图 2 光锥图

$$d\tau = i \frac{ds}{c} \quad (8)$$

由此我们定义

四维时空是构成真实世界的最低维度，我们的世界恰好是四维，至于高维真实空间，至少现在我们还无法感知。有一个例子，一把尺子在三维空间里（不含时间）转动，其长度不变，但旋转它时，它的各坐标值均发生了变化，且坐标之间是有联系的。四维时空的意义就是时间是第四维坐标，它与空间坐标是有联系的，也就是说时空是统一的，不可分割的整体，它们是一种“此消彼长”的关系。在四维时空里，质量（或能量）实际是四维动量的第四维分量，动量是描述物质运动的量，因此质量与运动状态有关就是理所当然的了。在四维时空里，动量和能量实现了统一，称为能量动量四矢。另外在四维时空里还定义了四维速度，四维加速度，四维力，电磁场方程组的四维形式等。值得一提的是，电磁场方程组的四维形式更加完美，完全统一了电和磁，电场和磁场用一个统一的电磁场张量来描述。四维时空的物理定律比三维定律要完美的多，这说明我们的世界的确是四维的。

他在论述“闵可夫斯基四维空间”（《浅说》）时写道：

“一个人如果不是数学家，当他听到“四维”的事物时，会激发一种象想起神怪事物时所产生的感觉而惊异起来。可是，我们所居住世界是一个四维空时连续区这句话却是再平凡不过的说法”。

“闵可夫斯基简称为“世界”的物理现象的世界，就空一时观而言，自然是四维的。因为物理现象的世界是由各个事件组成的，而每一事件又是由四个数来描述的，这四个数就是三个空间坐标  $x,y,z$  和一个时间坐标——时间量值  $t$ 。具有这个意义的“世界”也是一个连续区，……”

在相对论中，用四维方式来考察这个“世界”是很自然的，因为按照相对论时间已经失去了它的独立性。这已由洛伦兹变换的第四方程表明。

还有，按照这个方程，甚至在两事件相对于  $K$  的时间差  $\Delta t$  等于零的时候，该两事件相对于  $K'$  的时间差  $\Delta t'$  一般也不等于零。

两事件相对于  $K$  的纯粹“空间距离”成为该两事件相对于  $K'$  的“时间距离”。



但是,对于相对论的公式推导具有重要作用的闵可夫斯基的发现并不在此。而是在他所认识到的这样的一个事实,即相对论的四维时空续区在其最主要的形式性质方面与欧几里得几何空间的三维连续区有着明显的关系。

但是,为了使这个关系所应有的重要地位得以表现出来,我们必须引用一个与通常的时间坐标  $t$  成正比的虚量  $i \times ct$  来代替这个通常的时间坐标  $t$ 。

在这种情况下,满足(狭义)相对论要求的自然界定律取这样的数学形式,其中时间坐标的作用与三个空间坐标的作用完全一样。在形式上,这四个坐标就与欧几里得几何学中的三个空间坐标完全相当。甚至不是数学家也必然会清楚地看到,由于补充了此种纯粹形式上的知识,使相对论能为人们明了的程度增进不少”。

在狭义相对论中,长度和时间间隔也变成相对量,运动的尺相对于静止的尺变短,运动的钟相对于静止的钟变慢,光速在狭义相对论中是绝对量,相对于任何惯性参照系光速都是  $c$ 。经典力学和狭义相对论都认为一个惯性参照系可以适用于整个宇宙,或至少一个大的范围。相对于某一个惯性参照系,宇宙中任何范围内的物体运动都遵从惯性定律。实际上,空间化的时间可以与空间一起处理。在时间空间化最为明确显著的近代物理学中,space-time 完全是作为一体的。在 Newton 运动方程中,时间  $t$  如取负值,方程依然可以成立,表明 Newton 力学是时间可反演的;在 Einstein 狭义相对论中,时间的空间化进一步被形式化、完备化,时间、空间成为 space-time:“相对论是一种原理的理论。”与“构造理论”不同,原理理论“应用分析而不是综合的方法。其出发点和基础不是假设的要素,而是经验上观察到的现象的一般性质、一般原理;从这些性质和原理导出这样一些数学公式,使其用于每一自身出现之处。”“原理理论的优点,是它们逻辑上的完善,和它们基础的稳固”。在给定参照系后,参照系自己看来的“时间流速”是固定不变的,改变的是从这个参照系看来的别的物体的内秉时间流速,也就是从你看来的别人自己的时间流逝速度。某个物体的“时间流速”就是这个物体的本征长度在时间方向上的投影,也是一种影子,时空中的物体就是时空坐标系中的一个单位向量箭头,那么很显然,这个单位向量角度不同的话,向量在时间轴上的投影长度也就是不同的了。狭义相对论的本质就是如此简单。由于时空的特殊性,在空间中上述的投影是角度越大影子长度越短,在时空中,这个角度越大,投影的长度却是越长。闵可夫斯基几何与欧几里德几何的本质区别是两个微分几何流形的号差不同,度量不一样(闵可夫斯基流形也叫做赝欧几里德流形,就是除了号差不同,别的都一样)。

因果关系是绝时的,不可颠倒的。狭义相对论通过绝对“间隔”把四维时空划分为两大区域,即“类时间隔”和“类空间隔”。在“类时间隔”区域,事件之间存在着联系,理论证明因果关系是绝时的,不会导致不可知论;在“类空间隔”区域事件之间没有联系,即不存在因果关系,理论分析证明,同时性是相对的。这便出现了甲乙两事件(无联系的两事件)发生的先后次序因观察者所在的参照系的不同而不同。显然,“类空间隔”区域的同时性并不与因果关系相矛盾。

参考文献:

- 【1】林为民编译《图说相对论》,内蒙古人民出版社 2003 年 3 月版 218 页。
- 【2】吴忠超译《果壳中的宇宙》湖南科学技术出版社 2002 年 8 月版 54 页。
- 【3】Engels 著。《自然辩证法》第 23-24 页人民出版社 1971 年版。

## 2、狭义相对论中的绝对问题

爱因斯坦认为:“相对论是一种原理的理论。”与“构造理论”不同。原理理论“应用分析而不是综合的方法。其出发点和基础不是假设的要素。而是经验上观察到的现象的一般性质、一般原理;从这些性质和原理导出这样一些数学公式,使其用于每一自身出现之处。”“原理理论的优点。是它们逻辑上的完善和它们基础的稳固”。虽然所有的物理学都认为地面上的观测者和行驶中的火车上的观测者所测得的同一运动物体的运动速度,动量和动能数值是不同的,但是在经典物理学中人们相信理解一个物象系统可以基于一个统一的时间标准和统一的各种尺度标准。而在相对性理论中,(除了光速的测量是绝对的,与观测者是否在运动无关)包括空间与时间的测量都是相对于观测者的。但是,不仅实验事实推断起来与经典物理相矛盾,而且只有考虑了时间与空间的相对性以后,才能使依据物象来完美构造的物理定律对于所有的观测者来说是不变的,即物理定律的绝对性。的确,如果像时间和长度的经典概念所要求的那样,放弃 Maxwell 电磁场方程的确定形式,那么留给我们的将是一个任意而又复杂的方法系统。比较起来,相对性理论那个方法才是确定的和简单的。所以,相对性理论应当称作绝对论。这个理论的主要点不在于测量数值的相对效应,而在于把物理定律的相对性移去了,反倒强调了物理定律的绝对性,即所谓事物运动规律不依赖于观察者的立场。

根据相对论认为存在所谓的“静止质量”。理由是,根据洛伦茨变换,在四维空间中的不变量是一系列的。



比如，四维时间不变量——就是人们所说的“静止时间”，四维空间不变量——就是人们所说的“静止空间”，四维质量不变量——就是人们所说的“静止质量”，四维动量不变量——就是人们所说的“静止动量”，四维能量不变量——就是人们所说的“静止能量”，四维温度不变量——就是人们所说的“静止温度”，四维作用力不变量——就是人们所说的“静止作用力”，四维功率不变量——就是人们所说的“静止功率”，四维电荷密度不变量——就是人们所说的“静止电荷密度”，四维电流密度不变量——就是人们所说的“静止电力密度”，四维标电势不变量——就是人们所说的“静止标电势”，四维磁矢势不变量——就是人们所说的“静止磁矢势”。四维质量不变量正是电磁质量满足 Lorentz transformation 的直接结果之一。电磁场空间是线性空间，满足 Lorentz transformation 是很自然的。而引力场是非线性空间，不满足 Lorentz transformation 也是很正常的。但我们把引力场在局域内微线性化，就可以找微线性化变换群，二次积分后就可以得到非线性变换群。Einstein 没有找到这个微线性化变换群——所以始终没有能够创立出真正意义上的“广义相对论”来。他是一个失败者，但更是一个领航者——因为他第一个最早指出了创立出真正意义上的“广义相对论”正确的方向。Lorentz transformation 的前提条件是“间隔平方相等”（参见朗道和栗弗席兹合著的《场论》一书）在 20 世纪头二、三十年里，正如后来的 P.A.M.Dirac 所说，“一旦看到了一些用非相对论形式表示的物理学，人们就能把它修改成适合狭义相对论的。这很像是一种游戏。一有机会我就沉溺于此。有时候这个结果使我感到十分有趣，可能为它写出一篇微不足道的论文。”【1】1907 年，Planck 给出了热力学的变分原理，导出了热力学量的 Lorentz 变换关系。在 Planck 的理论中，通过逻辑推理和思辨，并照顾到统计力学中的 Boltzmann 熵公式，指出熵必然是 Lorentz 标量。研究相对运动系统内，物质运动变化规律的时空理论，就是相对论，在相对运动系统中，测量同一事件的时间和空间之间的关系，就是相对论的时空变换。

参考文献：

【1】沈惠川，“狄拉克”，载《世界数学家思想方法》（解恩泽，徐本顺主编），山东教育出版社，1993：pp1357-1401。

### 3、相对论与约定论的关系初探

马赫和迪昂的约定论思想肯定对爱因斯坦或多或少有所启示，但是爱因斯坦的约定论思想主要源于彭加勒，因为彭加勒是约定论的创造者和集大成者，而爱因斯坦在奥林比亚科学院时期就认真研读了彭加勒的《科学与假设》，并与同伴们进行了热烈的讨论。可以说，爱因斯坦对彭加勒的约定论的内涵和精神实质是心领神会的。这就是：数学公理和物理学的基本假设或基本原理既非先验判断，亦非经验事实，它们原来都是约定；约定是我们精神自由活动的产品，但是自由并非任意之谓，它要受实验事实的引导和避免一切矛盾的限制；约定是我们强加于科学的，并未强加于自然界，而且并非整个科学都是约定的，约定只是出于方便，无所谓真假；约定具有巨大的方法论功能，在从未加工的事实过渡到科学事实、从科学事实过渡到定律，尤其是从定律上升到原理时，约定都是不可或缺的。爱因斯坦的基础约定论思想虽然没有彭加勒的约定论那么多的内涵，但是却牢牢地把握了彭加勒约定论的精髓，并对其做了更为明确、更为严密、更为深入的阐释和发展。第一，他表明，从永恒的观点看，彭加勒的约定论是正确的，必须把康德的“先验的”冲淡为“约定的”。第二，他把科学理论分为两大类，即构造性理论和原理理论，约定在后一种理论的逻辑基础和内部结构的建设中扮演关键性的角色（这也是我们称爱因斯坦的约定论为“基础约定论”的原因）。第三，作为原理理论逻辑基础的基本概念和基本原理是自由选择的约定，是“人类精神的自由创造”和“人类理智的自由发明”。第四，形象地把这种自由比喻为猜字谜的自由，明确指出理论筛选的双标尺标准。第五，严格区分了作为纯粹命题集的非解释系统与与感觉经验和实在相联系解释系统，指出真理概念适合与后者。第六，创造性地提出了约定论和理性论的方法论——探索性的演绎法和逻辑简单性原则。另外，爱因斯坦的客观性、可知性、和谐性、统一性、简单性、因果性、协变性等科学信念，实际上属于最深层次的约定，因为无论经验还是理性，都无法证实、证伪或反驳它们。

A. Einstein 提出相对性原理和真空光速不变原理两个公设，在这两个公设的基础上以用数学方法证明了 Lorentz transformation 并赋予其更广泛的涵义，又进一步推导出在物体运动接近光速时长度收缩、时间膨胀、物体的质量增大等一系列崭新的结论，提出了时空相对性理论。首先由于 Lorentz transformation 实际上出现在相对论之前，而 Lorentz 本人认为由该变换推出的“尺缩”是真实的，有一个关于动杆佯谬实际上就是针对这个意义上的 Lorentz transformation 的。而 Einstein 自己推导的 Lorentz transformation，只是与 Lorentz 本人的变换具有相同的形式，而没有继承其意义，按照 Einstein 的意思，“尺缩”不是真实发生的。

当这篇论文发表后，人们并不知道伟大的相对论已经与它同时诞生，Einstein 自己也只是为了解决动体的电动力学问题而发表了这篇论文，并没把它命名为“相对论”。此后的 6 年时间里，Einstein 一直把他这

篇论文中关于时间、空间相对性的论述简称为“相对性原理”(Relativitätsprinzip),并未当做一种“理论”(theory)来提升。1911年1月16日,Einstein在瑞士苏黎世自然科学会上作了一个题为“相对论”(Die Relativitätstheorie)的报告,发表在《苏黎世自然研究会季刊》56卷第1~14页上,这才正式完整地提出了“相对论”这一全新的理论,并把《论动体的电动力学》一文作为“相对论”的开山之作,故1905年也被迫承认成了“相对论”的诞生年。传统的惯性系是建立在一无所有的绝对的空间假设之上。这样一个惯性系是虚拟的,他不对应任何具体的物理实在。Einstein的相对论并没有改变传统惯性系的本质。相对论改变的是人们的空间观念和时间观念。相对论在处理传统的惯性系理论与现代物理学实验之间的矛盾的做法是:保留传统惯性系的基本观点和看法,通过改变空间和时间的定义以调和两者之间的矛盾。Einstein推广了相对性原理,提出狭义相对论的相对性原理,即不但要求在不同惯性参照系中力学规律具有同样形式,而且其他物理规律也应如此。在狭义相对论中,不同惯性系的空间和时间之间遵从洛伦兹变换。根据这种变换,同时性不再是绝对的,相对于某一参照系为同时发生的两个事件,相对于另一参照系可能并不同时发生。

据霍耳顿研究,在爱因斯坦的狭义相对论论文中,既有大胆的假设和虚构的成分(这是理性论思想的体现),也有明显的经验论和操作论的成分。而且,马赫的思维方式对爱因斯坦的影响也十分明显,它显著地表现在两个相互关联的方面。第一,爱因斯坦在他的论文开始就坚持,只有对各种概念,尤其是对时间和空间概念的意义进行认识论的分析,才能理解物理学的基本问题。第二,爱因斯坦认为各种感觉,也就是各种“事件”所提供的东西等同于实在,而不是把实在放在感觉经验之外或感觉经验之后的位置上。论文一开头,对测量和对空间、时间概念的工具论的(因而也就是感觉论的或经验论的)观点就极其明显。关于同时性的定义,更是操作式的定义,这直接启发P.W.布里奇曼于20年代创立了操作论哲学。爱因斯坦引入的“事件”一词,在论文中屡屡出现,这个概念与马赫的“要素”概念几乎是完全吻合的。在爱因斯坦看来,就像一个事件的时间只有通过感觉经验(也就是用置于同一地点的时钟作原则上允许的测量)和我们的意识联系起来才有意义一样,一个事件的地点或空间坐标也只有通过作原则上允许的测量(就是把米尺在同一时间放在该处)进入我们的感觉经验时才有意义。这种工具论的或操作论的定义,体现了马赫关于物理学中的任何陈述都必须表述可观测量之间的关系的要求(这是实证论的要求)。这种强烈的经验论色彩,使爱因斯坦论文中的其他哲学内容相形之下黯然失色。难怪那些自命为马赫哲学继承者的人,即新实证论的维也纳学派,热情地接受了爱因斯坦的著作。它为这个学派早期的成长,在哲学上提供了极大的帮助。

尽管怀疑的经验论在爱因斯坦早期的哲学思想中是相当明显的,而且在他的科学探索中也发挥了相当大的作用,但这毕竟不是他的哲学思想的完整画面。否则,就很难解释狭义相对论的创立和他早期的其他科学贡献。事实上,在爱因斯坦早期哲学思想中,也有理性论、实在论和约定论的成分。怀疑的经验论是破旧的锐利武器,理性论的实在论是立新的坚实基础,经验约定论是构筑理论框架的有力工具。它们各司其职、各显其能、珠联璧合、相得益彰,引导爱因斯坦谱写出“思想领域中最高的音乐神韵”。

#### 4、狭义相对论与以太

相对论的建立来源于经典物理内部力学图景和电磁图景的冲突:在本体论上表现为粒子纲领与场论纲领的冲突,在方法论上体现为在惯性系变换中,麦克斯韦方程与伽利略相对性原理不协调。这种冲突集中体现在对所谓“以太”的理解上。洛伦兹电子理论保持了物理学基础中实物和以太的二元论,将以太视为类似于绝对空间的参照系,麦克斯韦方程只对常驻“以太”参照系才成立。如果确实如此,那么在相对“以太”参照系运动的实验参照系(比方说:地球),光沿不同方向就应以不同的速度传播。为了测出地球相对以太参照系的运动,实验精度必须达到很高的量级。到19世纪80年代,迈克尔孙和莫雷所作的实验第一次达到了这个精度,但得到的结果仍然是否定的,即地球相对以太不运动。此后其他的一些实验亦得到同样的结果,于是以太进一步失去了作为绝对参照系的性质。这一结果使得相对性原理得到普遍承认,并被推广到整个物理学领域。可是,所有的检验“以太风”的实验都无一例外地否定了上述推断,其中最有名的是迈克尔孙—莫雷实验,证明了相对于任何惯性系,光沿不同方向以相同的速度传播,这显然是对以太假说的沉重打击。这是导致经典物理发生严重危机的经验问题,它与黑体辐射问题一起,被开尔文称为是“悬浮在热和光动力理论天空的十九世纪的乌云”。我国著名相对论物理学家胡宁(中科院理论物理研究所研究员、北京大学教授,中科院院士)在一篇纪念Einstein诞辰一百周年的文章中写到:“迈克尔孙设计了测量地面在以太中的运动速度的实验,实验结果发现这个速度完全测不到,后来洛伦兹和斐兹杰惹根据以太论说明了为什么测量不出地面相对以太的速度。原因很简单:当仪器相对以太运动时,由于电磁作用的改变,沿着运动方向上的长度收缩了,长度的缩短恰好使得仪器相对于以太得速度不可能在干涉仪上显示出来。如果一个人真正理解了以太模型下的电磁规律,他就不会建议用迈克尔孙干涉仪来测量地面相对于以太的速度。总之,在迈克尔孙实验结果和以太模型之间没有出现任何矛盾。”胡宁在《狭义相对论实验基础》一书的序言中也指出:“初次学习狭义相



对论的人，往往误认为迈克尔逊实验或“真空光速不变性”是狭义相对论的实验基础。但是，在相对论出现以前，斐兹杰惹和索末菲已经在以太论的基础上对迈克尔逊实验的结果给出了解释。因此，迈克尔逊实验的零结果既可以用以太论来解释，也可以用相对论来解释，也就是说，它既不否定真空光速不变，也不肯定真空光速不变。所以，企图用迈克尔逊类型的实验来进一步更准确地验证真空光速不变将是没有意义的。（摘自张元仲《狭义相对论实验基础》北京：科学出版社，1979）

洛伦兹为了在承认光速与参照系无关的条件下，拯救以太假设，便抛弃了空间间隔和时间间隔与参照系无关的绝对观念。在他看来，常驻以太参照系是基本参照系，在这个参照系中，时间是均匀流逝的，空间是均匀的，各向同性的。任何实际参照系都相对于这个基本参照系运动着。它们具有下列性质：空间沿该参照系运动方向收缩，时钟速率变慢，具体变化公式就是引入收缩假设和地方时间概念： $l=l_0(1-v^2/c^2)^{1/2}$ ， $T=T_0/(1-v^2/c^2)^{1/2}$ ，式中  $c$  为光速， $v$  为运动参照系的速度； $l_0$  和  $l$  为沿实用参照系运动方向放置的尺分别在以太参照系和实用参照系中所测得的长度； $T_0$  与  $T$  为这两个参照系中分别测得的某两个事件之间的时间间隔。根据上面两式，可以导出任一事件在这两个参照系中的时空坐标之间的变换公式——洛伦兹变换。这个结论与光速同参照系无关的实验结果相一致。如果要求质点力学定律相对于洛伦兹变换也不变，则牛顿动力学方程就非加以修改不可，这就是后来 Einstein 从一个全新的观念出发完成的工作。洛伦兹以太论可以解释所有可观察的实验事实，这一点 Einstein 也是一直承认和肯定的。Einstein 在《狭义与广义相对论浅说》一书中写道：“对于所有这些事实和实验的结果，除了迈克尔逊——莫雷实验以外，洛伦兹根据下述假定都作出了解释。这个假定就是以太不参与与有重物体的运动，以太各个部分相互之间完全没有相对运动。这样以太看来好像就体现一个绝对静止的空间。但是洛伦兹的研究工作还取得了更多的成就。洛伦兹证明了，迈克尔逊——莫雷实验所取得的结果至少与以太处于静止状态的学说并不矛盾。”（摘自 Einstein《狭义与广义相对论浅说》上海科学技术出版社[M]，1964.114）。但是，在洛伦兹理论中，以太除了荷载电磁振动之外，不再有任何其他的运动和变化，这样它几乎已退化为某种抽象的标志。除了作为电磁波的荷载物和绝对参照系，它已失去了所有其他具体生动的物理性质，这就又为它的衰落创造了条件。

菲兹杰惹几乎与洛伦兹一起从迈克尔逊-莫雷实验中提出了收缩假说，彭加勒则从同一个实验中得出相对性原理：我们没有任何方法区分静止还是匀速运动。新的相对性原理从根本上取消以太风，以及发现地球相对于以太的绝对速度的可能性。彭加勒在 1898 年《时间的测量》一文中，首先提出了光速在真空中不变的假设，认为这个公设从来也不能直接用经验来验证，它在利用光信号来定时的过程中具有约定的性质。到 1905 年，彭加勒详细讨论了利用光信号使异地时钟同步的问题，认为时间概念应该用测量来定义。这位相对论的先驱者，还预言了与以上两个原理协调一致的新力学的世界图像：光速成为不可逾越的极限速率；惯性随速度增加；原来的力学作为一级近似包容在新力学中，等等。彭加勒在物理学危机面前，致力于建立与洛伦兹电子论一致的理论。在对相对论的贡献上，提出普遍原理的是彭加勒，提供数学表达式的却是洛伦兹。但彭加勒与洛伦兹一样承认存在以太和以太参照系，认为与洛伦兹理论一致的以太假说将对相对性原理与真空光速不变原理给出进一步的解释。

洛伦兹等人拯救“以太”的方案生动地告诉人们，一个行将崩溃的原理或假说，可以怎样通过引入保护性的补充假说而保存下来。事实上，迄今为止，它还没有被任何实验证伪。然而，洛伦兹的方案中却包含着“真实”的长度，时间间隔与速度这样一些基本物理量，可是，这些基本力学量却是不可测量的。这就使人们怀疑洛伦兹以太论的真正价值。

二十世纪初，Einstein 面对所有一切探测“以太风”的实验都失败的事实，认为“引入光以太”本来就是“多余的”，这样空间就又回到了一无所有的“空虚”状态。可是这样的认定在当时就不能自圆其说。面对空间能够传播电磁波的事实，Einstein 又认为空间“具有一种发送电磁波的性能”，是“物理空间”；以太论的消失始于 Einstein 的相对论于 1905 年发表之后。“相对论假设一经引入，把以太看作实物的概念就要从物理理论中排除出去。”“当光的电磁理论取代了光的固体弹性理论以后，以太这一机械的概念实际上已变成多余的障碍物了。”在 Einstein 看来，以太假设完全是多余的，人们只要从两条对物理过程与定律进行限制的限定性原理出发，就可以实现力学与电磁学概念体系的统一，这就是：（1）真空光速不变原理；

（2）物理学定律与惯性系的选择无关。第一条原理跟洛伦兹的出发点是一样的，第二条原理就是狭义相对性原理，它取代了洛伦兹的以太假设。Einstein 摒弃这一假设，不只是由于以太的不可观测性，主要是由于他早年的物理经验，培植了他的一种直觉观念，即电磁学定律独立于具体的惯性系。当他年仅十六岁时，就思考过这样的问题：如果一个观察者，以光速追逐一列光，他会看到何种情况呢？对这个问题的回答，似乎是：这列光看起来就像是空间固定振荡的电磁场。但是，不论从实验观察，还是从麦克斯韦理论，似乎都不会得出这一结论。对这一悖论的长期斟酌，最后，Einstein 确信：一束光，在追逐的观察者看来和相对于地

球静止的观察者看来是一样的。于是，在他看来，狭义相对性原理毋庸置疑。现在的问题是：在牛顿时空框架里，真空光速不变性与狭义相对性原理是互不相容的。然而，如果把任意两个惯性系之间坐标变换由伽利略变换形式，换成洛伦兹变换形式；同时，对牛顿力学进行改造，使得改造后的动力学定律相对于洛伦兹变换保持不变。那么，这两条原理就相容了。这样，狭义相对性原理就可以表述为：一切物理学定律相对于洛伦兹变换保持不变。爱因斯坦曾经讲过：“在我看来，洛伦兹关于静态以太的基本假定是不能完全令人信服的，因为它所得出的对于迈克尔逊-莫雷实验的解释，我觉得是不自然的。”

狭义相对论不同于洛伦兹—彭加勒理论的关键是：

(1) 承认“同时性”，“长度”，“时间间隔”等的操作性质，并且考虑到物理信号传播的有限性，在此基础上使“同时性”等概念相对化。同时性的相对化是指：在一个惯性系中处于不同空间位置同时发生的两个事件，在另一个惯性系看来是不同时发生的两个事件。这是对常识和经典物理的同时性观念的彻底革命，在 Einstein 以前没有一位科学家和哲学家认识到同时性的相对性，尽管在神话和传说中已经有天上人间时间流逝不同的推测，在洛伦兹和彭加勒的理论中也出现了不同参照系时间流逝不同的科学论断。Einstein 理论中尺度和时间单位在不同惯性系中的变化，不再涉及有关物质结构和以太运动关系的特殊假说，而被视为洛伦兹坐标变换的内在要求；力学和电动力学是平权一致的，不存在何者优先的问题；以太被视为无用的假说，即使引入到理论中，也不过是与物质运动分布有关的时空度规的另一种说法，代表真空不是虚空而已，不能赋予它类似质点运动的机械或电磁属性。

(2) 引入闵可夫斯基四维时空的新表述，将时间处理为与三个空间坐标垂直的第四维，四维时空间隔定义为  $ds^2=c^2dt^2-dx^2-dy^2-dz^2$ ，这是在各惯性系中不变的量；还出现了其他与四维时空间隔有关的相对论不变量，空间与时间，动量与能量，电场与磁场等形成了有机的统一体，并且推导出物体总能量 E 与质量 m 的关系式  $E=mc^2$ 。这代表着相对论引入了新的自然秩序理想，闵氏时空表述是狭义相对论中类似欧几里德几何的先验自然几何和数学理想，是狭义相对论中最基本的图像推理模型。当然，在彭加勒和 Einstein 看来，闵氏时空的先验结构不是真正先验的，而是与真空光速不变原理有关的操作约定的结果。

Einstein 反对把相对论教条化为某种封闭的体系，认为相对论不过是某种启发性原理，它本身不过是关于固体，时钟和光信号的陈述。人们接受了电磁场本身就是物质存在的一种形式的概念，而场可以在真空中以波的形式传播。量子力学的建立更加强了这种观点，因为人们发现，物质的原子以及组成它们的电子、质子和中子等粒子的运动也具有波的性质。波动性已成为物质运动的基本属性的一个方面，那种仅仅把波动理解为某种媒介物质的力学振动的狭隘观点已完全被冲破。

## 5、狭义相对论的时空变换效应

我们经验所能及的唯一空间，是用尺度上二刻度间的距离所规定的长度标准来测量的，唯一时间是用天文现象所规定的时钟来测量的。如果我们的标准也发生了菲茨杰拉德收缩这样的变化，这种变化是我们觉察不到的，因为我们和这些标准一道前进，也发生相同变化，但是，以不同方式运动的观察者却是可以觉察到这种变化的。所以时间与空间，不是绝对的，而只是与观察者相对的。这样，可知由于时间与空间的性质，相对于任何观察者，光总是以所测得的相同的速度进行。长度、质量与时间并非绝对的数量。它们真正的物理数值，就是由测量所表示的。它们对双方不一样这一事实说明，它们的意义只能相对于某一观测者而规定。绝对长度、绝对空间、绝对时间或甚至时间流动的观念都是形而上学的概念，远远超过观测或实验所表示或证明的。相对论摆脱了绝对时间。这些充分表现了狭义相对论引起了时空观发生重大的变革。狭义相对论揭示了时间和空间的内在联系，并且告诉人们对时空的测量是依赖于参考系的选择的。

中科院朱重远研究员的观点，狭义相对论在理论上很难找到突破口。用美国 UAH 研究员张先生的话：

“如果狭义相对论在数学上、理论上有问题，那狭义相对论当时就不会被世界物理界公认，当时 Einstein 还是个小人物”。倪光炯说过，“不同时的”光学畸变，抵消了必须“同时”观测的洛伦兹收缩，……………没有绝对的收缩，这才是相对论。

1、从静系到另一个相对于它做匀速移动的坐标系的坐标和时间的变换理论：

“尺缩钟慢”是一种几何效应，物体本身是怎样就是怎样的。相对论说的主要是不同坐标系中测量物理量的变换规则。牛顿认为惯性系之间的“变换是相等的”，这只是一个假设。实验证明很多物理量在不同坐标系中，测量结果是不同的。设在“静止的”空间中有两个坐标系，每一个都是由三条从一点发出并且互相垂直的刚性物质直线所组成。设想这两个坐标系的 X 轴是叠合在一起的，而它们的 Y 轴和 Z 轴则各自互相平行着②（注：②本文中用大写的拉丁字母 XYZ 和希腊字母  $\Xi$  HZ 分别表示这两个坐标系 (K 系和 k 系) 的轴，而用相应的小写拉丁字母 x, y, z 和小写的希腊字母  $\xi, \eta, \zeta$  分别表示它们的坐标值——译者注。）设每一系都备有一根刚性量杆和若干只钟，而且这两根量杆和两坐标系的所有的钟彼此都是完全

相同的。

现在对其中一个坐标系 (k) 的原点，在朝着另一个静止的坐标系 (K) 的 x 增加方向上给一个 (恒定) 速度 v，设想这个速度也传给了坐标轴、有关的量杆，以及那些钟。因此，对于静系 K 的每一时间 t，都有动系轴的一定位置同它相对应，由于对称的缘故，我们有权假定 k 的运动可以是这样的：在时间 t (这个“t”始终是表示静系的时间)，动系的轴是同静系的轴相平行的。

我们现在设想空间不仅是从静系 K 用静止的量杆来量度，而且也可从动系 k 用一根同它一道运动的量杆来量，由此分别得到坐标又 x, y, z 和  $\xi, \eta, \zeta$ 。再借助于放在静系中的静止的钟，用 §1 中所讲的光信号方法，来测定一切安置有钟的各个点的静系时间 t；同样，对于一切安置有同动系相对静止的钟的点，它们的动系时间  $\tau$  也是用 §1 中所讲的两点间的光信号方法来测定，而在这些点上都放着后一种 (对动系静止) 的钟。

对于完全地确定静系中一个事件的位置和时间的每一组值 x, y, z, t，对应有一组值  $\xi, \eta, \zeta, \tau$ ，它们确定了那一事件对于坐标系 k 的关系，现在要解决的问题是求出联系这些量的方程组。

首先，这些方程显然应当都是线性的，因为我们认为空间和时间是具有均匀性的。

如果我们置  $x' = x - vt$ ，那么显然，对于一个在 k 系中静止的点，就必定有一组同时间无关的值  $x', y, z$ 。我们先把  $\tau$  定义为  $x', y, z$  和 t 的函数。为此目的，我们必须用方程来表明  $\tau$  不是别的，而只不过是 k 系中已经依照 §1 中所规定的规则同步化了的静止钟的全部数据。

从 k 系的原点在时间  $\tau$ 。发射一道光线，沿着 X 轴射向  $x'$ ，在  $\tau_1$  时从那里反射回坐标系的原点，而

$$\frac{\tau_0 + \tau_2}{2} = \tau_1$$

在  $\tau_2$  时到达；由此必定有下列关系：或者，当我们引进函数  $\tau$  的自变数，并且应用在静系中的真空光速不变的原理：

$$\frac{1}{2}(\tau(0,0,0,t) + \tau[0,0,0,(t + \frac{x'}{V-v} + \frac{x'}{V+v})]) =$$

$$\tau(x',0,0,t + \frac{x'}{V-v})$$

如果我们选取  $x'$  为无限小，那么，

$$\frac{1}{2}(\frac{1}{V-v} + \frac{1}{V+v}) \frac{\partial \tau}{\partial t} = \frac{\partial \tau}{\partial x'} + \frac{1}{V-v} \frac{\partial \tau}{\partial t}$$

$$\frac{\partial \tau}{\partial x'} + \frac{v}{V^2 - v^2} \frac{\partial \tau}{\partial t} = 0$$

或者：

应当指出，我们可以不选坐标原点，而选任何别的点作为光线的出发点，因此刚才所得到的方程对于  $x', y, z$  的一切数值都该是有效的。

做类似的考察——用在 H 轴和 Z 轴上——并且注意到，从静系看来，光沿着这些轴传播的速度始终是  $\sqrt{V^2 - v^2}$ ，这就得到：

$$\frac{\partial \tau}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial \tau}{\partial z} = 0$$

$$\tau = a(t - \frac{v}{V^2 - v^2} x')$$

由于  $\tau$  是线性函数，从这些方程得到：此处 a 暂时还是一个未知函数  $\Phi(v)$ ，并且为了简便起见，假定在 k 的原点，当  $\tau = 0$  时， $t = 0$ 。

借助于这一结果，就不难确定  $\xi, \eta, \zeta$  这些量，用方程来表示的话，光 (像真空光速不变原理和相对性原理所共同要求的) 在动系中量度起来也是以速度 V 在传播的。对于在时间  $\tau = 0$  向  $\xi$  增加的方向

$$\xi = aV(t - \frac{vx'}{V^2 - v^2})$$

发射出去的一道光线，其方程是： $\xi = V\tau$ ，或者：

$$\frac{x'}{V-v} = t$$

但在静系中量度，这道光线以速度 (V-v) 相对于 k 的原点运动着，因此得到：



$$\xi = \frac{aV^2 x'}{V^2 - v^2}$$

如果我们以  $t$  的这个值代入关于  $\xi$  的方程中，我们就得到：

$$\eta = V \tau = aV \left( t - \frac{vx'}{V^2 - v^2} \right)$$

用类似的办法，考查沿着另外两根轴走的光线，我们就求得：

$$\text{处： } \frac{y}{\sqrt{V^2 - v^2}} = t, \quad x' = 0, \quad \eta = a \frac{V}{\sqrt{V^2 - v^2}} y, \quad \zeta = a \frac{V}{\sqrt{V^2 - v^2}} z, \quad \text{和}$$

$$\text{因此： } \tau = \Phi(v) \beta \left( t - \frac{vx}{V^2} \right), \quad \xi = \Phi(v) \beta (x - vt),$$

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2}}$$

$\eta = \Phi(v) y$ ， $\zeta = \Phi(v) z$ ，此处：，而  $\Phi$  暂时仍是  $v$  的一个未知函数。如果对于动系的初始位置和  $\tau$  的零点不作任何假定，那么这些方程的右边都有一个附加常数。

我们现在应当证明，任何光线在动系量度起来都是以速度  $V$  传播的，就像我们所假定的在静系中的情况那样。因为我们还未曾证明真空光速不变原理同相对性原理是相容的。

在  $t = \tau = 0$  时，这两坐标系共有个原点，设从这原点发射出一个球面波，在  $K$  系里以速度  $V$  传播着。如果  $(x, y, z)$  是这个波刚到达的一点，那么  $x^2 + y^2 + z^2 = V^2 t^2$ ，借助我们的变换方程来变换这个方程，经过简单的演算后，我们得到： $\xi^2 + \eta^2 + \zeta^2 = V^2 \tau^2$ ，由此，在动系中看来，所考查的这个波仍然是一个具有传播速度  $V$  的球面波。这表明我们的两条基本原理是彼此相容的。

在已推演得的变换方程中，还留下一个  $v$  的未知函数  $\Phi$ ，这是我们现在所要确定的。

为此目的，我们引进第三个坐标系  $K'$ ，它相对于  $k$  系做这样一种平行于  $\Xi$  轴的移动，使它的坐标原点在  $\Xi$  轴上以速度  $-v$  运动着。设在  $t=0$  时，所有这三个坐标原点都重合在一起，而当  $t=Z=y=z=0$  时，设  $K'$  系的时间  $t'$  为零。我们把在  $K'$  系量得的坐标叫做  $x', y', z'$ ，通过两次运用我们的变换方程，我们就得到：

$$t' = \Phi(-v) \beta(-v) \left( \tau + \frac{v\xi}{V^2} \right) = \Phi(v) \Phi(-v) t,$$

$$x' = \Phi(-v) \beta(-v) (\xi + v\tau) = \Phi(v) \Phi(-v) x,$$

$$y' = \Phi(-v) \eta = \Phi(v) \Phi(-v) y, \quad z' = \Phi(-v) \zeta = \Phi(v) \Phi(-v) z,$$

由于  $x', y', z'$  之间的关系中不含有时间  $t$ ，所以  $K$  同  $K'$  这两个坐标系是相对静止的，而且，从  $K$  到  $K'$  的变换显然也必定是恒等变换。因此： $\Phi(v) \Phi(-v) = 1$ 。

我们现在来探究  $\Phi(v)$  的意义。我们注意  $k$  系中  $H$  轴上在  $\xi=0, \eta=0, \zeta=0$  和  $\xi=L, \eta=0, \zeta=0$  之间的这一段。这一段的  $H$  轴，是一根对于  $K$  系以速度  $v$  作垂直于它自己的轴运动着的杆。它的

两端在  $K$  中的坐标是： $x_1 = vt, y_1 = \frac{L}{\Phi(v)}, z_1 = 1$  和  $x_2 = vt, y_2 = 0, z_2 = 0$ 。因此，在  $K$  中所量得的这杆的长度是  $L/\{\Phi(v)\}$ ；这就给出了函数  $\Phi$  的意义。由于对称的缘故，一根相对于自己的轴作垂直运动的杆，在静系中量得的它的长度，显然必定只同运动的速度有关，而同运动的方向和指向无关。因此，如果  $v$  同  $-v$  对调，在静系中量得的动杆的长度应当不变。由此推得：

$$\frac{L}{\Phi(v)} = \frac{L}{\Phi(-v)}, \quad \text{或者： } \Phi(v) = \Phi(-v),$$

从这个关系和前面得出的另一关系，就必

$$\tau = \beta \left( t - \frac{vx}{V^2} \right), \quad \xi = \beta (x - vt),$$

然得到  $\Phi(v) = 1$ ，因此，已经得到的变换方程就变为：

$$\eta = y, \quad \zeta = z,$$

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2}}$$

此处

## 2. 关于运动刚体和运动时钟所得方程的物理意义

我们观察一个半径为  $R$  的刚性球①（注：①即在静止时看来是球形的物体。），它相对于动系  $k$  是静止的，它的中心在  $k$  坐标原点上。这个球以速度  $v$  相对于  $K$  系运动着，它的球面的方程是： $\xi^2 + \eta^2 + \zeta^2 = R^2$ 。

$$\frac{x^2}{\sqrt{1 - (\frac{v}{V})^2}} + y^2 + z^2 = R^2$$

用  $x, y, z$  来表示，在  $t=0$  时，这个球面的方程是：

一个在静止状态量起来的刚体，在运动状态——从静系看来——则具有旋转椭球的形状了，这个椭球的轴是

$$R \sqrt{1 - \frac{v^2}{V^2}}, R, R。$$

这样看来，球（因而也可以是无论什么形状的刚体）的  $Y$  方向和  $Z$  方向的长度不因运动而改变，而

$X$  方向的长度则好像以  $1: \sqrt{1 - \frac{v^2}{V^2}}$  的比率缩短了， $v$  愈大，缩短得就愈厉害。对于  $v = V$ ，一切运动着的物体——从“静”系看来——都缩成扁平的了。对于大于光速的速度，我们的讨论就变得毫无意义了；此外，在以后的讨论中，我们会发现，光速在我们的物理理论中扮演着无限大速度的角色。

很显然，从匀速运动着的坐标系看来，同样的结果也适用于静止在“静”系中的物体。

进一步，我们设想有若干只钟，当它们同静系相对静止时，它们能够指示时间  $t$ ；而当它们同动系相对静止时，就能够指示时间  $\tau$ ，现在我们把其中一只钟放到  $k$  的坐标原点上，并且校准它，使它指示时间  $\tau$ 。从静系看来，这只钟走得快慢怎样呢？

在同这只钟的位置有关的量  $x, t$  和  $\tau$  之间，显然下列方程

$$\tau = \frac{1}{\sqrt{1 - (\frac{v}{V})^2}} (t - \frac{vx}{V^2})$$

和  $x = vt$  成立，

$$\tau = t \sqrt{1 - (\frac{v}{V})^2} = t - t(1 - \sqrt{1 - (\frac{v}{V})^2})$$

因此，由此得知，这只钟所指示的时间（在静

系中看来）每秒钟要慢  $1 - \sqrt{1 - (\frac{v}{V})^2}$  秒，或者一略去第 4 级和更高级的（小）量——要慢  $\frac{1}{2} (\frac{v}{V})^2$  秒。

从这里产生了如下的奇特后果。如果在  $K$  系的  $A$  点和  $B$  点上各有一只静系看来是同步运行的静止的钟，并且使  $A$  处的钟以速度  $v$  沿着  $AB$  连线向  $B$  运动，那么当它到达  $B$  时，这两只钟不再是同步的了，从  $A$  向  $B$  运动的钟要比另一只留在  $B$  处的钟落后  $\frac{1}{2} t (\frac{v}{V})^2$  秒 [ 不计第 4 级和更高级的（小）量 ]， $t$  是这只钟从  $A$  到  $B$  所花费的时间。

我们立即可见，当钟从  $A$  到  $B$  是沿着一条任意的折线运动时，上面这结果仍然成立，甚至当  $A$  和  $B$  这两点重合在一起时，也还是如此。

如果我们假定，对于折线证明的结果，对于连续曲线也是有效的，那么我们就得到这样的命题：如果  $A$  处有两只同步的钟，其中一只以恒定速度沿一条闭合曲线运动，经历了  $t$  秒后回到  $A$ ，那么，比起那只在  $A$

处始终未动的钟来，这只钟在它到达  $A$  时，要慢  $\frac{1}{2} t (\frac{v}{V})^2$  秒。由此，我们可以断定：在赤道上的摆轮钟，比起放在两极的另一只在性能上完全一样的钟来，在别的条件都相同的情况下，它要走得慢些，不过所差的量非常之小。

附录：新华网消息：据阿根廷《21世纪趋势》周刊网站5月8日报道，霍金确定了可以进行时空旅行的方式。英国著名物理学家斯蒂芬·霍金日前在英国《每日邮报》上发表文章称，时光之旅在理论上是可行的，人类可以打开回到过去的大门和通向未来的捷径。

霍金在文章中提出了三种理论上可行的时空旅行方式。

为了实现时光旅行，霍金首先建议人们接纳时间作为第四维的观念。他举了一个非常简单的例子：当人们驾驶汽车时，向前直行和向后倒车是第一维，向左或向右转弯是第二维，在山路上爬坡和下坡是第三维，那么时间就是第四维。我们怎样才能找到在第四维前行或后退的路径呢？

方法一：虫洞

在科幻电影中，奇形怪状的时间机器借助巨大的能量打开一条穿越时光的隧道，时光旅行者勇敢地走进隧道，去无法确定的时间和地点进行冒险……霍金表示，现实的操作可能并非如此，但这种想法其实并不疯狂。对于物理学家来说，时光隧道也许就是虫洞。霍金说，虫洞就在我们周围，只是小到肉眼无法看见。宇宙万物都会出现小孔或裂缝，这种基本规律同样适用于时间。时间也有细微的裂缝和空隙，比分子、原子还要小的空隙被称作“量子泡沫”，而虫洞就存在于“量子泡沫”中。

有朝一日，人类也许能够捕获某一个虫洞，将它放大到足以使人类甚至宇宙飞船从中穿过。

但霍金警告说，不要利用时间机器回到过去，因为这将导致违反基本的因果论。

方法二：黑洞

霍金在文章中说，时间就像是一条河流，在不同的地段会有不同的流速，而这正是实现通往未来之旅的关键。根据爱因斯坦的理论，时间在有些地方会过得更慢，而在另一些地方会过得更快。当飞船在太空中加速时，对飞船的宇航员来说，时间的流逝速度会有所放慢。

比整个银河系还要重的超大黑洞可以更为明显地降低时间流逝的速度。霍金说，这种超大黑洞就像是一部天然的时间机器。如果一艘宇宙飞船进入超大黑洞，并按照地球指挥中心的要求完成了16分钟绕轨道一周的飞行，而对于宇航员来说，时间只过去了8分钟。如果他们在超大黑洞内执行5年任务，返回地球时会发现已过去了10年。

这种时光旅行方式的问题在于，接近超大黑洞的危险太大。

方法三：以接近光速的速度飞行

霍金指出，另一种方法是设法达到比避免被黑洞吸入所需速度更快的速度。如果能够建造出速度接近光速的宇宙飞船，那么宇宙飞船必然会因为不能违反光速最快的法则，而致使舱内的时间放慢。宇航员以这种方式飞行一个星期，地球上的时间就过去了100年，从而实现通往未来之旅。

## 第四章 狭义相对论的验证

### 1、质速关系的验证

牛顿力学由于不能解释微观世界诸多实验，推动了量子力学的建立。相对论“并不是起源于思辨；它的创立完全是要想使物理理论尽可能适应于观测到的事实。”“同空间、时间和运动有关的观念，决不能认为是随意的，而只能认为是由观测到的事实所决定的。”【1】由于Einstein深信相对论在逻辑上的完整性，即相对论的逻辑前提的“自然性”和“简单性”，因而他在提出相对论时，就对自己的理论满怀信心。

1881年，约瑟夫·汤姆孙在发展它自己的麦克斯韦理论的时候发现，让带电体运动比不带电体更困难。他同样注意到“运动中”物体的质量会增加一个常量，便电场中表现为他们似乎在机械质量的基础上增加了一个“电磁质量”。换句话说，根据汤姆孙说法，电磁能和一特定质量相对应，这和电磁场的自感形式类似。汤姆孙的这一成果后来由斐兹杰惹和赫维赛德（1888年），以及乔治·弗雷德里克·查尔斯·塞尔（1896年，1897年）继续推进和完善。用今天的数学符号，他们给出的电磁质量可以用公式描述，其中是电磁质量，也是电磁能。赫维赛德和塞尔还发现物体质量的增长并非一个常量，而是与其速度相关。塞尔于是注意到物体的速度是不可能超过光速，因为在光速下物体的质量会变成无穷大，因此需要施以无穷大的能量才能使其超过光速。同样对于洛伦兹来说（1899年），整合汤姆孙所发现的质量与速度相关变得非常重要。前者注意到，质量不仅仅和速度有关，还和与之对应的方向有关。他提出了后来马克斯·亚伯拉罕所说的“纵向质量”与“横向质量”，其中的横向质量正是后来狭义相对论中的质量。1900年，威廉·维恩在汤姆孙、赫维赛德以及塞尔工作成果的基础上，假设“整个”质量都是来自于电磁力的。这是一种基于所有自然界的力都是源自于电磁力的假设（“电磁世界观”）。维恩指出，如果假设引力也是一种电磁效应，那么电磁能、惯性质量和引力质量之间必然存在某种比例关系，而庞加莱在1900年发表的论文则发现了另一种将质量和能量结合在一起的方式，他发现电磁能表现为一个质量密度的虚拟流体（即），并为此定义了一个虚拟的电磁动量。然而，此时他遇到了一个后来被爱因斯坦于1905年完整诠释的辐射悖论。

1902年至1904年,支持电磁世界观的马克斯·亚伯拉罕,通过推导电磁质量的表达式,迅速的给出了关于考夫曼实验结果的解释。根据这些概念,亚伯拉罕提出了“电磁动量”概念。和庞加莱1900年所提出的概念类似,亚伯拉罕认为这不是一个虚拟场,而是一个“真实的”物理实体。并且亚伯拉罕还注意到洛仑兹与1899年所发现的质量与方向有关的现象,并分别命名为“纵向质量”与“横向质量”。和洛仑兹不同的是,亚伯拉罕并没有将收缩假设整合到他的理论当中。因此后者所描述的质量和洛仑兹所说的质量是有差别的。基于前面这些关于电磁质量的工作成果,弗里德里希·哈泽内尔提出物体的部分质量(他成为表面质量),可以看作是在一个腔体内跳动的辐射。这个“表面”质量和温度有关(因为高于环境温度的物体会发出辐射),并且和它的能量成正比。哈泽内尔指出,只有发出辐射的物体,也就是温度高于0K的物体能维持这种能量-表面质量的关系。最初他给出的表面质量公式为,但后来亚伯拉罕和哈泽内尔在1905年将计算结果修改成,也就是和静止物体的电磁质量相同的值。

用量热法验证质速关系的实验方法,是美国麻省理工学院的贝托齐在1964年提出【2】,并在麻省理工学院物理系的核科学实验室实施的。该实验用直线加速器加速电子,然后测量电子的运动速度,以及电子撞击到铝盘产生的热量,证明相对论的质速关系成立。贝托齐当年用理论值为0.5MeV, 1.0MeV, 1.5MeV, 4.5MeV, 15MeV的五种能量的电子,并测量了它们的速度,在实验报告中给出1.5MeV和4.5MeV两种电子能量的实际测量值,但没有给出15MeV电子能量的实际测量值。

爱因斯坦为了证明他的相对论,1908年提出电磁介质的电磁感应实验方案。1913年,威尔逊完成这个实验(张元仲著《狭义相对论实验基础》)。介质是石蜡做的空心圆柱体,在石蜡内放入许多小钢球。空心柱体内外两侧各有金属外壳形成柱体电容器。跟两金属板滑动接触的两个电刷,串联一个电流计静止在实验室中。

使电容器绕对称轴旋转,外加磁场 $\vec{H}$ 的方向与转轴平行。当使外加磁场方向相反时,电流计上出现电流。

在斯坦福德(Stanford)直线加速器中心(SLAC)的电子直线加速器中,电子沿一根三公里长的真空管飞行,被电磁场反复加速。每加速一次,电子的速度都增加一点,但随着电子速率越来越接近光速,所增加的速率越来越少,加速越来越困难。这直接验证了相对论的速度叠加法则。这个加速器可把电子加速到20GeV。当把电子加速到10GeV时,电子速度达到 $(1-0.13 \times 10^{-8})c$ ,即只比光速小0.39m/s。增加到20GeV时,电子的运动速度达到比光速小0.10m/s。在以这个速度随电子运动的参考系中,三公里长的加速器缩短到只有七八厘米”【3】。

最近欧洲建成的大型强子加速器,质子的能量已经达到 $Mc^2$ (M代表质子的质量)的4000倍。如果用牛顿力学的能量公式 $Mv^2/2$ ,那末质子的速度v应当接近于光速c的90倍。可是测量到的v仍小于但非常接近于光速,与相对论符合。这个加速器以及已建成的许多高能粒子加速器都是按相对论的公式设计而制造。

由于电子的质量与其电荷相比,比值非常小。所以它很容易被加速到很高的速率。例如在真空管的两个电极之间加100v的电压,从阴极飞出的电子(设从静止出发),将以 $6 \times 10^6$ 米/秒的速率到达阳极:  $qU =$

$$\frac{1}{2}mv^2, \therefore v = \sqrt{\frac{2qU}{m}} = \sqrt{\frac{2 \times 100 \times 1.6 \times 10^{-19}}{9.1 \times 10^{-31}}} = 5.92 \times 10^6 \text{ 米/秒}$$

在这种情况下,牛顿定律成立。我们可以把速率的平方表为与电压的正比关系:  $v^2 = \frac{2qU}{m} \propto U$ , 其图像如图1所示

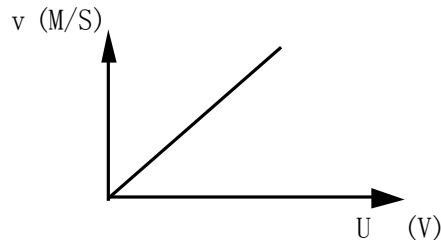


图 1



但把电子放在加速电压为几百万伏的情况下,用上述方法对电子速率的平方的计算结果,却与实验测量值产生了很大的偏差。实验采用范德格喇夫起电机使电子获得 1.5 兆电子伏特的能量,然后注入直线加速器,最终获得 15 兆电子伏特的能量,通过测量电子的飞行时间和路程可以计算出电子的速度。实验数据如下表所示:

动能 (Mev)	飞行时间 ( $10^{-8}$ s)	电子速率 ( $10^8$ m/s)	电子速率平方 [ $10^{16}$ (m/s) $^2$ ]
0.5	3.23	2.60	6.8
1.0	3.08	2.73	7.5
1.5	2.92	2.88	8.3
4.5	2.84	2.96	8.8
15	2.80	$\approx 3$	$\approx 9$

绘制成速率平方与电压的图像如图 2 所示为:

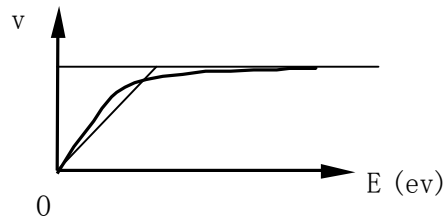


图 2

实验结果表明:

① 被加速电子的速率有个上限,  $\sim 3 \times 10^8$  米/秒。

$$\frac{2qU}{m}$$

② 电子的动能  $E_k=qU$  是真实的,但  $v^2$  达不到预期值,  $v^2 = \frac{2qU}{m}$ ,把此式变化一下可表为  $mv^2 = 2qU$ 。只能是  $m$  的值在一定的范围内随速率的增大而增大。这显然和牛顿力学的理论相违背。

由于物体加速是受到的合外力的作用,此时物体引力质量增加,加速度减小。惯性是物体保持运动状态的原因,不但保持原来的速度状态,而且能使物体受到一定力的作用下加速度逐渐减小。在平动过程中,引力质量的惯性是阻碍速度的增加;在转动过程中惯性阻碍角速度的增加。

参考文献:

【1】《关于相对论》, 1921 年。

【2】Willian Bertozzi, American Journal of Physics, Vol. 32, Issue 7, pp. 551-555, July 1964.

【3】王正行著,《近代物理学》[M], 北京大学出版社, 1995: p.30—31。

## 2、运动物体在运动方向上的收缩效应

1905 年,德国实验物理学家考夫曼(W. Kaufmann)完成了关于高速电子( $\beta$ 射线)的质量与速度相依关系的实验,他于 1906 年宣布,他的实验数据支持亚伯拉罕(M.Abraham)和布赫尔(A. H.Bucherer)的刚性球电子论,而同洛伦兹和 Einstein 的基本结论(电子在运动方向的直径会随速度的增加而收缩)不相容。当时,早在 1902 年就明确提出了相对性原理的彭加勒马上动摇起来,认为该原理并不具有我们先前赋予它的那样重要的价值(他在 1904 年把相对性原理作为物理学的六大基本原理之一)。洛伦兹更是十分悲观失望,他在 1906 年 3 月 8 日给彭加勒的信中说:“不幸,我的电子扁缩的假设同考夫曼的新结果发生了矛盾,于是我必须放弃它。因此,我已到了山穷水尽的地步。在我看来,不可能建立起一种要求平移对电学和光学现象完全不产生影响的理论。”

面对考夫曼的实验否定, Einstein 并不以为然。他在 1907 年发表的长篇论文中表示,考夫曼的实验数据同相对论的“这种系统的偏离,究竟是由于没有考虑到的误差,还是由于相对论的基础不符合事实,这个问



题只有在有了多方面的观测资料以后，才能足够可靠地解决。”他进一步指出，亚伯拉罕和布赫尔的理论“在很大程度上是由于偶然碰巧与实验结果相符，因为他们关于运动电子质量的基本假设不是从总结了大量现象的理论体系得出来的。”事实果然不出 Einstein 的预料，1916 年，两位法国物理学家指出考夫曼的实验装置是有毛病的。

最新理论中认为时间是一种高频振动，振动与物体的自身速度是有关的，也就是说在光速不变的前提下会得到运动使得时间变慢的结论，此时的相对速度实际上是相对于物体所在的空的速度。

### 3、光行差效应的解释

#### (1) 光行差效应提出

1725 年，英国天文学家布莱德雷发现了恒星的“光行差”现象，以意外的方式证实了罗麦的理论。刚开始时，他无法解释这一现象，直到 1728 年，他在坐船时受到风向与船航向的相对关系的启发，认识到光的传播速度与地球公转共同引起了“光行差”的现象。他用地球公转的速度与光速的比例估算出了太阳光到达地球需要 8 分 13 秒。这个数值较罗麦法测定的要精确一些。莱德雷测定值证明了罗麦有关光速有限性的说法。光速的测定，成了十七世纪以来所展开的关于光的本性的争论的重要依据。但是，由于受当时实验环境的局限，科学家们只能以天文方法测定光在真空中的传播速度，还不能解决光受传播介质影响的问题，所以关于这一问题的争论始终悬而未决。

在地球上用望远镜观测遥远的任意一颗恒星，发现在地球轨道的不同位置上，我们用以观察的望远镜方向在一年内有周期性的变化。

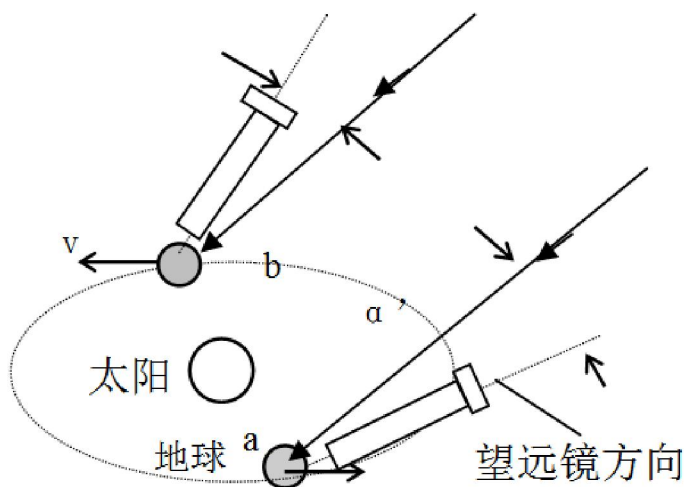


图 1

假如星光射来的方向固定，如图 1 所示，则当地球在位置 a 时，望远镜需朝下偏一个角度  $\alpha'$ ；当地球在位置 b 时，望远镜需朝上偏一个角度  $\alpha$ 。如果 a、b 位置使星光与望远镜方向组成的平面都与地球轨道平面垂直，则  $\alpha = \alpha'$ 。在一般位置上， $\alpha$  角的大小要变化。这在观测上表现为一颗恒星一年内在天球上画出一个很小的椭圆形轨迹，这就是光行差现象。

如图 2 所示，设恒星发出的光以速度  $c$  垂直与地球的轨道平面，则望远镜必须倾斜一个  $\alpha$  角，以保证进入望远镜筒口的光经过  $\Delta t$  时间后到达筒底，被我们的眼睛看到，而不至于被筒壁挡掉。从图上可以看出：

$$tg\alpha = \frac{v\Delta t}{c\Delta t} = \frac{v}{c}$$

在实际观测中，这个最大的  $\alpha$  角约等于  $10^{-4}$  弧度，刚好等于地球绕太阳的轨道运动速度除以光速。

#### 2、实验结果

科学家们认为“以太”和绝对空间参考系是对应的，光相对“以太”的速度是恒定的  $c$ 。所以人们不得不接受这样的图画：太阳系就是对应于以太静止的参考系，地球在这个以太海洋中以 30 公里/秒的速度运动，

完全没有带动以太光行差现象首先由 J.Bradley 于 1727 年报道的。

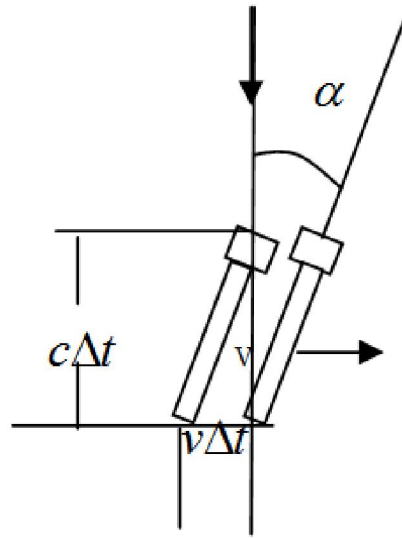
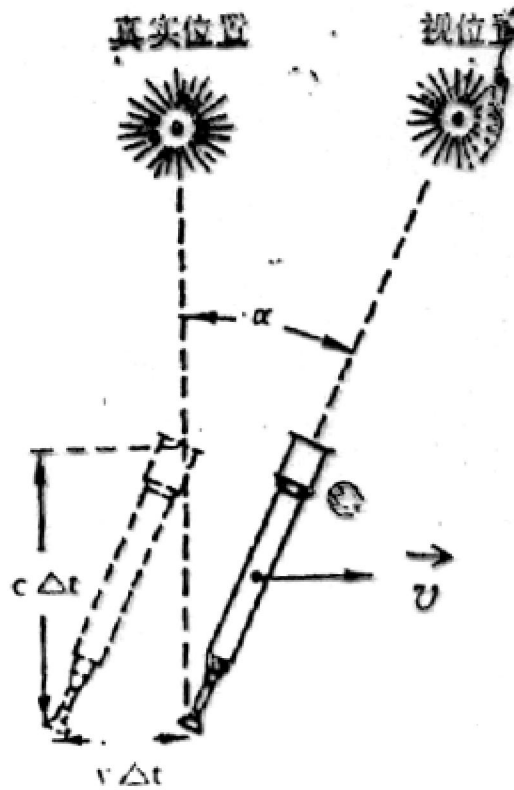


图 2



如图：[布喇德雷光行差现象](1728)

- a)地球相对与该恒星静止。
- b)地球相对与该恒星与恒速率运动。

$$\alpha: \text{光行差角} \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{v}{c} \Rightarrow \alpha = 20.5''$$

C) 太阳相对于以太是静止的

布喇德雷对天龙座  $\gamma$  星进行了一年的观测得到的结论是：以太相对于恒星静止。或者说：以太完全不被地球所拖拽。

迈克尔逊—莫雷实验各次结果

观测者	年份	l	$\delta$ 计算	$\delta$ 观测 (上限)	比值
迈克尔逊	1881	1.2	0.04	0.02	2
迈克尔逊—莫雷	1887	11.0	0.4	0.01	40
莫雷—米勒	1902—1904	32.2	1.13	0.015	80
米勒	1921	32.2	1.12	0.08	15
米勒	1924	32.2	1.12	0.03	40
米勒 (太阳光)	1924	32.2	1.12	0.014	80
托马歇克 (恒星光)	1924	8.6	0.3	0.02	15
米勒	1925—1926	32	1.12	0.08	15
肯尼迪	1926	2.0	0.07	0.002	35
伊林沃斯	1927	2.0	0.07	0.0004	175
皮卡尔、斯塔埃尔	1927	2.8	0.13	0.006	20
迈克尔逊等人	1929	25.9	0.9	0.01	90
约斯	1930	21.0	0.75	0.002	375
塞达罗姆、汤斯	1958				4500

摘自 Rev.Mod.phys.27167(1995)

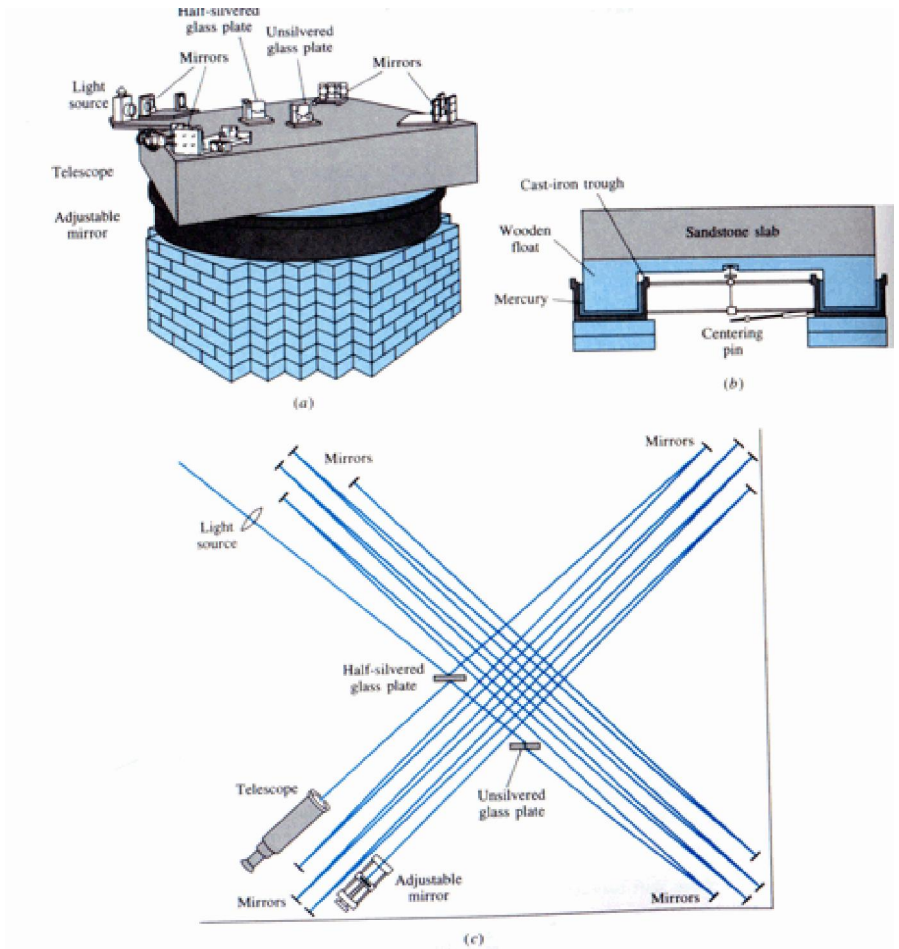
也可用  $\beta = (c_m/c_e)^2 - 1$  来检验,  $c_m$  允许物质的极限速度。

1887. miche lson - morley.  $|\beta| < 10^{-4}$   $c_e$ : 电磁波速度  $c_e$

1930

1980. 华盛顿大学

1980. 通过研究水银同位素的能级的各向同性  $\Rightarrow \beta < 10^{-21}$



3、Einstein 对于光行差现象的解释

Einstein 在《相对论的意义》中写道：“没有别的理论曾经满意地解释光行差的事实”。这就是说，光行差的解释，是带有检验性质的。[英]W.G.V. 罗瑟在《相对论导论》中，用洛伦兹变换  $(1-v^2/c^2)^{1/2}$  得出

光行差：
$$\Delta\alpha_1 = -\frac{v}{c} \sin \alpha$$
 六个月后，
$$\Delta\alpha_1 = \frac{v}{c} \sin \alpha$$
 本文采用类似罗瑟方法将  $(1+v^2/c^2)^{1/2}$  处理得到光

行差：
$$\Delta\alpha_2 = -\frac{v}{c} \sin \alpha$$
 ----- (5)，六个月后 
$$\Delta\alpha_2 = \frac{v}{c} \sin \alpha$$
 ----- (6)，当恒星处在头顶上时， $\alpha = 90^\circ$ ，

$\Delta\alpha = 10^{-4}$  弧度 = 20.5z 弧秒，这与天体测量数据相符合。1958 年，有人改进了迈克耳孙-莫雷实验，得到了“以太风”小于地球轨道速度的 1 / 1000 的结论。后来利用穆斯堡尔效应，测得“以太风”的速度为 1.6±2.8 米 / 秒，远远小于期望值(30 公里 / 秒)。这既是对狭义相对论的验证，也证明根本不存在 19 世纪的作为电磁场载体的以太。

4、运动物体的时钟延缓效应

从宇宙线的探测到高能加速器以及对撞机的应用，几乎高能物理实验的各个方面都要涉及狭义相对论效应，可是随着加速能量的不断提高，现在已经确认在小到约为一个质子半径百分之一的距离内，没有观测到狭义相对论的破坏。有人进行了静止光子质量的实验及光速测定的实验，还有人进行了大量有关运动介质的电动力学实验和直接检验尺缩钟慢的相对论效应实验，甚至有人用高速喷气飞机上的原子钟验证运动时钟变慢的效应。所有这些实验都表明，无论在微观尺度还是在宏观尺度，还没有发现狭义相对论有破坏的迹象。

“我们并不知道  $\mu$  子为何会衰变，或者它的内部机理是什么，不过我们确实知道它的行为符合相对性原理。” 【1】1938 年，Ives 和 Stilwell 率先测量了氢原子精细光谱，证明了运动会导致时间变慢。

1955年 chamberlam 等人测量了动量为 1.19Gev/e 的  $\pi$  介子和反质子走过 40 英尺的距离所用的时间, 测得  $\pi$  介子的飞行时间是  $(38 \times 10^{-9})$  秒, 反质子的飞行时间是  $(51 \times 10^{-9})$  秒, 如果用狭义相对论的动量公式  $=1.19\text{Gev}/c$ , 算出速度  $v$ , 那么相应的飞行时间  $(40 \text{ 英尺}/v)$  与实验测量的相符合。

1971 年哈弗勒与基廷发现向东飞行时, 铯钟比地球上的钟慢  $59 \times 10^{-9}\text{s}$ , 向西飞行的钟快了  $273 \times 10^{-9}\text{s}$ 。

参考文献:

【1】《费曼讲物理——相对论》，湖南科技出版社，2004 年，63 页。

附录 1:

科学家称 Einstein 相对论百年后终获确证 2007-11-12 08:53:30 中国新闻网媒体称, Einstein 的相对论获得实证。

中新网 11 月 12 日电 香港《文汇报》报道, 伟大科学家 Einstein 早于上世纪发表的“时间相对论”, 一班国际科学家要 100 多年后的昨天才终于确证。据悉, 1905 年, Einstein 订立著名的时间相对论, 指一件对象相对于另一对象移动的速度, 会使时间加快或减慢。根据这个假设, 一个移动中的时钟秒针应比一个静止平放的时钟秒针跳动得快, 这现象称为“时间稀释”。报道称, 国际科学家昨天发表报告指出, 他们利用分子加速器把原子打成两条光束, 绕圈而行, 模拟理论中较快的时钟, 然后用高精密度的激光光谱测量时间, 发现光束相较外界的确慢了一些。实验与 Einstein 的理论“完全吻合”。

#### 5、相对论性多普勒公式的验证

美国大学物理教科书编者 R.Resnick 先生给出的如下评述: 在经典力学中, 运动影响测量也不是一个奇怪的概念。例如, 由测量得到的声音或者光波的频率与声源或者光源相对于观测者的相对运动有关。这一现象称为 Doppler 效应, 他是每一个人都熟悉的现象 (比如汽车从身边驶过那个机声声调的变化)。

Einstein 在 1905 年建立狭义相对论的《论动体的电动力学》【1】一文中, 得出了光学多普勒效应的频率变换式。当光源靠近观察者, 频率变快为兰移; 当光源远离观察者, 频率变慢为红移; 当光源作横向运动时, 频率也变快为兰移:  $M/M'=\gamma$ 。国外一些专著【2】, 得出一致的结果。

Einstein 在 1952 年《狭义与广义相对论浅说》【3】一书中讲解动钟变慢时, 给出了运动钟的时率变慢公式:  $M/M'=1/\gamma$ 。与光源作横向运动时频率变快相比, 此二者都是讲频率变化, 从公式表达上看似乎有矛盾。但从后面的分析看, 二者都可从光波的洛仑兹变换求得, 二者都是正确的。国内一些专著, 例如刘辽, 费保俊, 张允中编著的《狭义相对论》文献【4】。在讨论光学多普勒效应频率变换时, 与 Einstein [1]给出的公式相比, 当光源作横向运动时, 得出了不同的结果: 文献[1]为兰移  $M/M'=\gamma$ , 文献【4】为红移  $M/M'=1/\gamma$ 。这是因为文献[4]的频率变化公式中用  $\theta$  角作变量, 而文献【1】是用  $\theta'$  角作变量。不能由此判断何对何错, 二者均为正确的, 并且反映出不同的物理意义。

学界大多数人都承认, 1994 年 R.Grieser 等人所做的实验 (Grieser et al, 1994), 证明“相对论性多普勒公式是正确的”【5】。该实验使用电子在锂离子中有 3 个能级的特点, 采用频率可调的激光束轰击静止的锂离子, 使得不太稳定的第 3 能级上的电子数目增多; 最终在第 3 能级上的电子自动跃迁回第 2 能级时将发出荧光。由于这种荧光的光谱线频率是已知的, 实验在测出锂离子以  $0.064c$  的速度运动时所发出荧光的频率, 两相比较即可以得出最后的结论。

时钟变慢直接导致相对论性的多普勒频移。当光源同观察者之间有相对运动时, 观察者测到的光波频率将同光源静止时的光频有差别, 这种差别称为多普勒频移。经典理论也预言了多普勒频移, 但狭义相对论的预言同经典理论的预言不同。这两种预言之间的差别是由运动时钟的速率不同于静止时钟的速率造成的, 也就是时钟变慢效应造成的。一个特例是横向情况, 即观察者运动的方向同光线垂直。按照经典理论, 没有频移; 按狭义相对论, 则有频移, 称为横向多普勒频移, 它已为许多实验所证实。

参考文献:

【1】爱因斯坦, 《论动体的电动力学》, 1905 年, 《爱因斯坦文集》, 第二卷, 商务印书馆, 1977 年 3 月, 103 页。

【2】G. Stephenson, C.W.Kilmister, <SPECIAL RELATIVITY FOR PHYSICISTS>§21, Longmans, Green and Co. 1960.

【3】爱因斯坦, 《狭义与广义相对论浅说》, 上海科学技术出版社 1964 年 8 月, 31 页。

【4】刘辽等, 《狭义相对论》(第二版), 科学出版社, 2008 年。

【5】马青平著 相对论逻辑自治性探疑 上海科学技术文献出版社 2004 年。



## 6、相对性原理的检验——特鲁顿—诺伯尔实验

朗道在他的《场论》写到：“所有自然规律在所有惯性系中都一样，换句话说，表达自然规律的方程式对于从一个惯性系到另一惯性系的左边、时间变换是不变的。这就是说，描述自然界某个定律的方程式，若用不同惯性参照系的坐标和时间来表述，具有一样的形式。”

特鲁顿—诺伯尔实验最初是用来测定地球的绝对速度的，实验以失败告终。如图，一根绝缘杆两头各有一个金属球 **A** 或 **B**，球 **A** 和球 **B** 大小相同且带等量异种电荷  $q$  和  $-q$ ，二球相距为  $r$ 。绝缘杆用悬丝悬挂。设电荷随地球运动，绝对速度为  $v$ ， $v$  的方向与杆的方向成  $\theta$  角。两个运动电荷除去相互的库仑力之外，还有磁场力的作用。

设从 **A** 球到 **B** 球为  $r$  的正方向。**A** 球上电荷在 **B** 球处产生的电场强度为  $E_B$ ，磁感应强度为  $B_B$ ，**B**

$$E_B = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^3} r, \quad B_B = \frac{\mu_0 q}{4\pi r^3} (v \times r)$$

球受到 **A** 球的作用力  $F_B$ 。则

$$F_B = -qE_B - qv \times B_B = -\frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 r^3} r - \frac{\mu_0 q^2}{4\pi r^3} v \times (v \times r)$$

$$= -\frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 r^3} r - \frac{\mu_0 q^2}{4\pi r^3} [(v \cdot r)v - v^2 r] \quad (1)$$

同理，可求得 **A** 球受到 **B** 球的作用力  $F_A$ ，

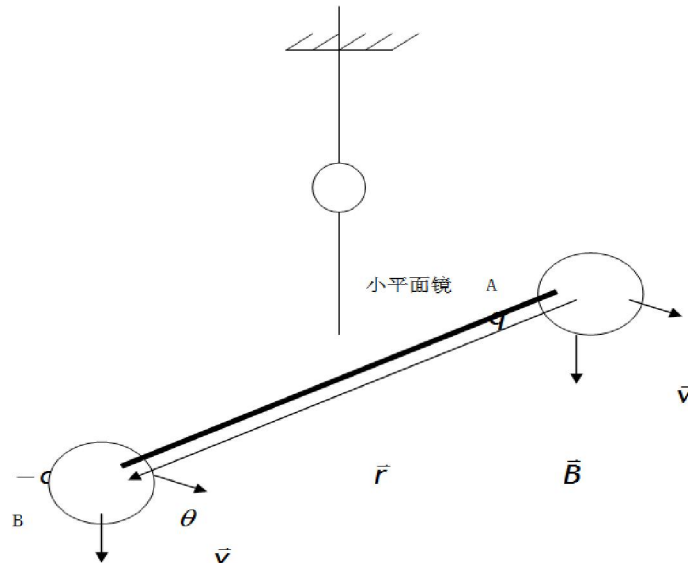
$$E_A = \frac{-q}{4\pi\epsilon_0 r^3} (-r) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^3} r$$

$$B_A = \frac{\mu_0 (-q)}{4\pi r^3} [v \times (-r)] = \frac{\mu_0 q}{4\pi r^3} (v \times r)$$

$$F_A = qE_A + qv \times B_A = \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 r^3} r + \frac{\mu_0 q^2}{4\pi r^3} v \times (v \times r)$$

$$= \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 r^3} r + \frac{\mu_0 q^2}{4\pi r^3} [(v \cdot r)v - v^2 r] \quad (2)$$

$$= \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 r^3} r + \frac{\mu_0 q^2}{4\pi r^3} [(v \cdot r)v - v^2 r] \quad (2)$$



特鲁顿—诺伯尔实验

由于在(1)、(2)式的中括号内有 $-\nu(\nu \cdot r), \nu(\nu \cdot r)$ 项,因此,力 $F_{-q}, F_{+q}$ 对悬线有力矩,力矩大小

$$M = r \times F_B = \frac{\mu_0 q^2}{8\pi r^3} (\nu \cdot r)(r \times \nu)$$

为:

$$M = \frac{\mu_0 q^2}{8\pi r} \nu^2 \sin 2\theta$$

, 当 $\nu \neq 0, \sin 2\theta \neq 0$ 时,杆应转动。但实验结果是无论杆的起如位置如何,杆都没有发生转动。实验者得出即使用电磁学实验也无法测得地球的绝对速度,说明电磁运动也遵守相对性原理。

## 7、真空光速不变性原理的验证

Faraday 1852: 假如我们承认了光媒介以太的存在,那么这种媒介也可能是磁作用力的平台,因为在传播辐射之外应别有用途。Maxwell 1865: 光是一种电磁波,它在真空中以常数速度 $c=1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$ 。Lorentz 1895: 存在不被运动物体拖曳的静止以太,光在其中以常数速度 $c$ 传播。Poincare 1898: “他(即测光速者)以假定光速为常数开始,特别地,假定它的速度是各向相同的。这是这样的一个假设,即离开了它测量光速的尝试便无法进行。这一假设逻辑上永远也无法由实验直接验证,但是它却可以被实验证否——前提是不同的实验导致了不一致的结果。我们应该庆幸这种矛盾尚未发生,而那些轻微的不一致即便出现了,也可以得到轻松的解释。Abraham 1904: “电磁理论解决了光的绝对运动问题,它表明,光将沿着各个方向以相同的速度 $c$ 向前传播。”

1905年,爱因斯坦发表相对论强调,“谈论绝对空间是没有意义的,地球自转引起力学上的差别是微小的,按照麦克斯韦电动力学,当磁铁运动时在空间产生了感应电场,于是线圈中有了电流;而当线圈运动时在空间没有产生感应电场,可是线圈中照样有电流,可见空间本不该对称(号称相对性原理);James 实验表明相对于以太的运动可测,而Michelson-Morley实验表明相对于以太的运动不可测,我们可以假设光速不变(号称光速不变原理)”。

根据相对论,任何物质的运动速度都不可能超过 $c$ ,即光在真空中的速度。但是,这一理论并没有阻止物理学家在近20年的时间里去有关超光速光脉冲的实验,尽管光的极端再成形或吸收等复杂问题常常使得对这些实验的解释显得模棱两可。现在,这一在原子铯蒸气室中演示的超光速光传播实验看起来就要比以前的实验明确多了:在入射激光脉冲的波峰进入蒸气室的入口面之前,一束激光脉冲的波峰离开了该蒸气室的出口面。结果先于原因应当是不可能的,这里的解释也许应当是,实际上并没有出现超过光速的信号,而是该原子体系的电磁响应给人产生了这样一种印象。

科学家研究表明信息传输速率不可能超过光速:美国东部时间2005年10月15日(北京时间10月16日)消息,10月16日,美国杜克大学丹尼尔-高希尔等人将在《自然》发表研究文章。他们进行了设计最完美的实验,希望用比光速更快的速度传输信息,结果失败了,从而也提示Einstein的速度极限理论无懈可击。在过去的几年里,科学家采用量子作用、特制镜片、和充满钾蒸汽的腔室进行“超光速”实验,结果表明,比光速更快的观念并不合适宜。

[美]D.哈里德 R.瑞斯尼克著的《物理学》第二卷第二册中,引录了从1675年法国天文学家罗麦开始,到1956年瑞典的艾奇止,281年中光速测定的结果,其值为 $C = 2.99 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。中国计量科学院赵克功和倪育才,在《物理》1979年4期上,发表的《光速测定现状》更具有代表性。世界各国用先进激光测量仪,测得的光速值均在 $299792460 \text{ m/s}$ 左右,光速为一恒定值。关于光速与光源状态无关的论证,张元仲在《狭义相对论实验基础》中,引录了从1913年到1966年间,世界各国科学家实验结果表明,光的传播速度的确与光源的状态无关。英国《卫报》2005年4月11日消息,Einstein发表他的狭义相对论一个世纪了,11日,天文学家们聚集在英国华威大学举行2005物理学会议,在纪念这一科学巨匠的同时,科学家们也提出一个惊人论点:Einstein的狭义相对论建立的基础,Einstein的众多理论中不变的准绳——光速可能正在变慢,因此Einstein狭义相对论可能不成立了。剑桥大学天文学院的迈克尔·墨菲教授说:“我们将在这里宣布一些惊人的发现。这些发现暗示出宇宙间存在一种关于光和物质相互作用的更基本的理论,而狭义相对论作为它的基础实际上是错误的。”Einstein认为光的速度是恒定不变的,而这一前提支撑了他的许多伟大的理论包括狭义相对论,同时也是现代物理学的根基,但是墨菲却认为光的速度不是恒定不变的,他说:“事实证明,狭义相对论可能非常接近真理,但是它错过了一些东西,而这些东西可能就是通向一个全新的宇宙和一套新的基本原理的门把手。”在研究过程中,墨菲的科研小组并没有直接测定出光速的改变,而是分析了来自遥远恒星的光。这些光到达地球需要经过数十亿年的时间,因此科学家们可以观测到光传播的早期,

宇宙的基本原理是怎样起作用的。天文学家们通过夏威夷的凯克望远镜观测发现在光传播到地球的过程中，某一波段的光被吸收的情况发生了改变。如果精细结构恒量随着时间发生变化，那么光速也可能发生了变化，也就是说，Einstein 可能错了。目前，墨菲领导的科研小组仍在分析来自 143 颗恒星的光的观测结果。不过，也有许多天文学家对墨菲的这种理论提出了质疑，因为他们使用其他望远镜观测到的结论是光的传播速度并没有发生改变。

人们曾经猜想，是否存在着违背 Einstein 相对论的超光速，并且可以采用这些超光速技术，以比光速更快的速度传输信息。最为著名的超光速实验，鉴用了含有著名“异常色散”原理的气体腔室。当将一束重叠光波所组成的脉冲，照射穿过该腔室时，腔室内的气体使光波漂移，从而使得光脉冲的速度看起来比光速还快。高希尔等在所进行的实验中，就是采用了这种超光速实验腔室，其腔室充满的是钾蒸汽。结果初看起来，好像是光脉冲的传播时间比光速快了大约 270 亿分之一秒。但是，当高希尔等通过改变光脉冲振幅，从而加载 1 或 0 的数据信息，以快于光速的速度传输信息时，则加载信息所修饰的光脉冲，通过钾蒸汽腔室的传播速度比光速要慢。而且，即使光脉冲本身以比光速更快的速度通过腔室时，结果也是如此。高希尔认为，既能接收到更快的光子，也得不到那些光子中所包含的信息，其结论与相对论是一致的多伦多大学物理学家阿普拉尔姆-斯坦贝格认为该实验是美妙的。但是，尽管主流科学家相信不可能用超光速信号来传输信息，但任何实验都可能有微小的误差，从而造成允许超光速传输信息的可能性结果。尽管本实验并不见得能使固执己见者完全信服，但高希尔等确实做了一个可以想像得到的最好实验。吕锦华先生认为：所谓看到的比传输光更快的光脉冲，并非是“被加速”的传输光的光脉冲，而是钾蒸汽在度作用下发的光脉冲，所以，它超前于传输光的光脉冲，但它不包含传输信息。包含传输信息的光脉冲实际上并没被加速，仍按相光速传播。因而，信息传输没有能“超光速”。

## 8、光速与光源速度无关的验证

### (一)、双星现象：

在离我们地球遥远的星际空间里，存在着一种被称为双星的天体系统，它由两个恒星 A 和 B 组成，相互绕着它们的质心 O 转动，对其中每一颗星来说，都在做近似圆周运动，如图 1-1 所示。

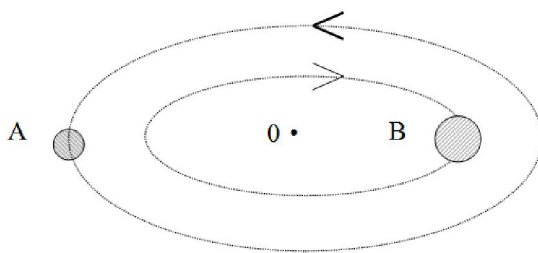


图 1-1

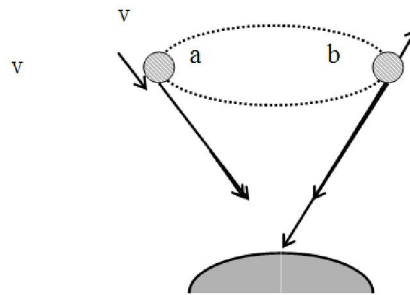


图 1-2

现在观察 A 星（图 1-2），当它在位置 a 时，是朝我们地球而来；在 b 时，离我们而去。如果 A 星的轨道速度为  $V$ ，并且假设光传播时带有光源的速度，那么，在地球上测到的 A 星在 a 点发出的光相对于地球的速度为  $C+V$ ，而 A 星在 b 点发出的光相对于地球的速度为  $C-V$ 。

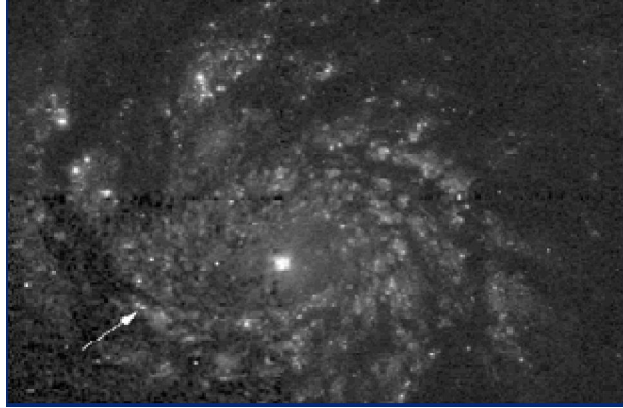
可见，在 a 点发出的光将比在 b 点发出的光跑得快。就算  $V$  不太大（比  $C$  小得多），但因 A 星离我们很远，因此，总可以假定 A 星在 b 点发出的光到达我们的眼睛时，它从 b 点经过一段时间（半周期）运动到 a 点时所发出的光也赶到了，我们将同时在 a、b 位置上看到有两颗 A 星。

假如在某一时刻在两个不同的地方看到同一颗星，这就是所谓“魅星”。一般情况下不一定同一颗 A 星在轨道两端出现，但只要光速依赖于光源速度，则我们预期总能看到“魅星”出现，并且会观察到双星轨道有明显的畸变。事实上，天文观察到的双星系统都很正常，从未看到过“魅星”，这表明图 1-2 中 A 星在 a 和 b 点发出的光相对地球的速度是一样的。所以根据观察，人们断定光速与光源的速度无关。

### (2) 脉冲星的周期

脉冲星是上个世纪六十年代后期发现的一种天体（天文学四大发现之一），到目前位置人类已经发现了 1500 多颗脉冲星。所谓的脉冲星就是中子星，由于它的高速旋转，使它的高能电磁辐射周期性地扫过地球，因此有“宇宙灯塔”之称。

在超新星爆发的中心物质，坍塌形成的中子星时，由于物质的强烈收缩而引起的加速自转，使直径一般都在 20 千米上下的中子星（质量一般都为 1.35 个太阳左右），自转周期以秒、毫秒计。而且周期的稳定性，就是人类精确的计时器也无法与之相比，如毫秒脉冲星的周期“变化”，竟然达到小于每 10 亿年减少一秒的程度。就是我们称之为“周期有明显变化率”的蟹状星云脉冲星（每秒自转 30 周），也达到每亿年减少一秒的精度。我们知道地球（相对太阳）的轨道速度约为 30 千米/秒，在相隔半年时，其轨道速度变化达到约 60 千米/秒，这可是光速的万分之二!!! 假如光速与观测者的运动有关，那么我们能得到所有脉冲星，在一年四季里，都具有的“恒定不变”周期吗？我国古代超新星爆炸记录，同样可说明真空光速不变。



Vii)真空光速不变原理仍然是个未经完全证实的假定；

### A . D . 1 0 5 4 年超新星爆炸 作为光速不变原理的佐证

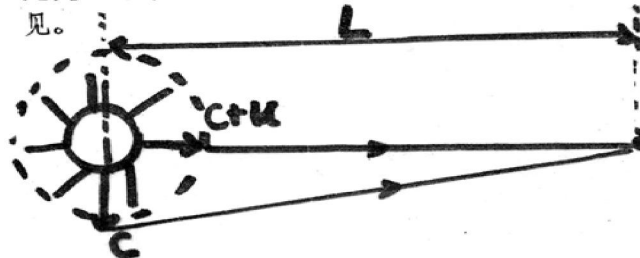
《宋会要》：嘉祐元年三月，司天监言：“客星没，客去之兆也。初，至和元年五月，晨出东方，守天关，昼见如太白，芒角四出，色赤白，凡见二十三日。”

方位：金牛座ζ星附近；

颜色：赤白；

星等：白天看有金星那么亮（视星等达 - 5<sup>m</sup>）

光变：开始 2 3 天白天可见，2 2 个月后肉眼已不可见。



$$L = 5000 \text{ 光年}$$

$$V = 1500 \text{ 千米每秒}$$

$$t' - t = L/C - L/(C+V) = 7.87 \times 10^8 \text{ 秒} \\ = 24.9 \text{ 年}$$

$$23 \text{ 天} \ll 24.9 \text{ 年}$$



### 3、河外星系与恒星的校差光行差

由于地球有环绕太阳的公转速度  $v = 29.75$  公里/秒，按照光行差角的公式，可求出光行差角的最大值为  $\alpha = 20''.47$ 。对各种恒星进行观测，所得到的光行差角都与  $20''.47$  相符合。如果光速与光源速度有关，则  $\alpha = \tan^{-1} v/c$ ，也应与光源速度有关，即  $\alpha$  不再是常数。考虑到河外星系有很大的退行速度，有人认为，如果光速与源速有关，则应观察到  $\alpha$  值的变化，但观察结果不能发现这个变化【1】【2】。因此，这个现象被认为是光速与源速无关的证明。

### 4、Saden, Alväger 等人的实验【3】【4】【5】

这些实验采用了新的实验手段。例如： $\pi$  介子蜕变成  $\gamma$  光子，其相对于观察者（或仪器）的速度仍为  $c$ ，即与  $\pi$  介子的运动速度无关。这类实验被看作为光速与源速无关的新验证。

### 5、Tolman 实验【6】

1910 年 Tolman 使用洛埃镜观测过太阳光线，认为如果入射光是  $c \pm v$ ，而反射光是  $c$ ，将要观察到两套条纹之间的相对位移，但这种相对位移没有观察到，因此，得到的结论是，反射镜不能作为新光源，因而入射光速与源速运动速度无关。

### 6、Beckmann 和 Madics【7】

该实验和 Tolman 实验基本相同，但实验条件较严格，采用单色光，实验安排时避免采用窄缝，以排除窄缝起次光源的疑问（见图 2）。

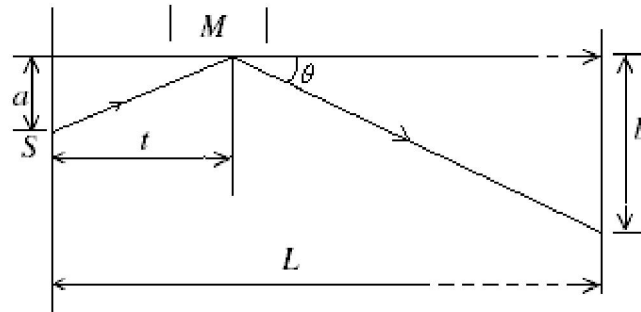


图 2

实验者假定反射光为  $c$ ，略去小量后得到

$$\Delta = [2\beta L / \lambda] [b / (a + b)] \text{-----(16)}$$

因为激光波长  $\lambda = 6328 \text{ \AA}$ ； $L = 400$  厘米； $\beta = 1.528 \times 10^{-7}$ ， $(a/b) = 10^{-4}$ ，求得  $\Delta = 1.92$  条纹移动。

因为实验装置可观测到 0.1 条纹位移，但是实验结果是零。因此实验者认为该实验证明了反射光与反射镜的运动速度无关。

### 7、Ciadea【8】

该实验将两个激光器安装在可转动台上相应的两边，激光器  $L_1$  的光束经过反射镜  $M_1$  反射后，通过半透射镜  $M_2$ ，然后与激光器  $L_2$  的光束会合。将装置转动时，没有发现差频的周期改变，该装置被看作为精度很高的单项实验（见图 3）。

### 8、最新的进展：

1964 年在西欧核子中心 (CERN) 利用高能质子 ( $19.2 \text{ GeV}$ ) 打靶，产生的中性介子  $\pi^0$ ，具有速度  $V_s = 0.99975c$ ， $\pi^0$  立即 ( $\tau_0 = 0.8 \times 10^{-16} \text{ s}$ ) 衰变为光子 ( $6 \text{ GeV}$ )，光子从产生靶处飞到光子探测器路程达  $80 \text{ m}$ ，记录  $\pi^0$  产生和到达光子探测器时间为  $\Delta t \sim 267 \text{ ns}$ 。结果表明，由  $V_s = 0.99975c$  的光源 ( $\pi^0$ ) 发射的光的速度还是  $c$ 。这是实验室规模第一次精确证明真空光速不变。日前，美国圣克劳德州立大学 (St. Cloud State University) 王汝勇和美国导航学会 (Institute of Navigation) 主席 Ronald Hatch 在美国导航学会 58 届年会撰文指出，可以利用 GPS 提供的大实验室进行真空光速不变原理的判决实验：让两架相距几百公里的飞机向同一方向，以相同的速度在两个 GPS 卫星的连线上飞行。两架飞机上的钟不用事先对准，他们各自记录 GPS 信号到达的时间并计算出它们的差别。这个差别就是 GPS 电磁波从一架飞机到另一架飞机所需的时间。而比较所需的时间是否与飞机的飞行速度有关就能确定光速是否与观测者相对于地球的运动有关，因此这个判决实验将首次检验对相对于地球运动的观测者来说，光速是否是不变的。他们还指出：不论飞机的飞行速度

和 GPS 技术已足够用来鉴别光速是变还是不变的，而且根据现有成熟的 GPS 理论可以预计这个实验会出现不同的飞行速度会得出不同的结果，即真空光速不变原理将被证伪。这个实验不论有重大的理论意义，而且有巨大的实际意义。迄今为止，物理学家都认为在一个封闭系统中速度是不可能被直接测量的。因此惯性导航系统用的是加速度计，速度是由对加速度的积分来得到的。如果通过实验证明不同速度的观测者得到的光速是不同的，那么反过来就能利用光速的不同来测量者的速度，而这将是导航领域的一次革命。它对不能接收到 GPS 信号的系统，如水下的潜艇则更为重要，为此，王汝勇已设计了速度计，并申请了专利。（笔者认为实验可能出现与预期相反的效果）

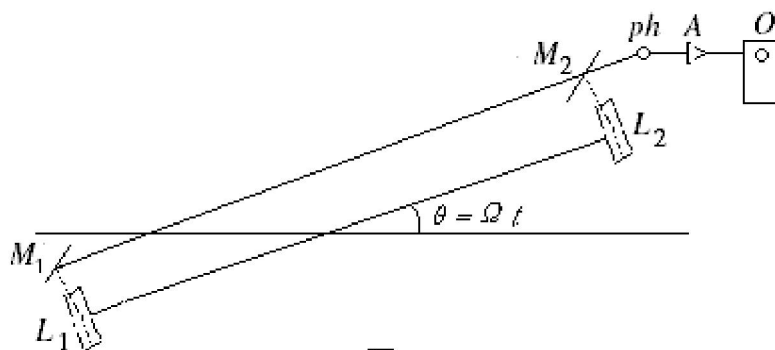


图 3

参考文献:

- 【1】 G.van Biesbroeck,1932,*Astrophys.*,75,64.
- 【2】 O.Heckmann,1960,Ann.D.*Astrophys.*,23,410.
- 【3】 R.Cialdea,1972,*Lett.Nuovo Cimento*,4 Ser.,2.821.
- 【4】 O.Sadeh,1963,*Phys.Rev.Lett.*,10,271.
- 【5】 T.Alvåges et al.,1963,*Nature*,197,1191. 1964,*Arkiv Fysik*, 26,209.
- 【6】 R.C.Tolman,1910,*Phys.Rev.*,31,33.
- 【7】 W.Kantor.1972,Nuovo Cimento,Ser.,2,9B,69
- 【8】 P.Beckmann and P.Mandics,1964,*Radio Sci.*,68D,1265

## 第五章 时空平权理论

### 第一节 爱因斯坦的探索性科学假设在科学研究中的重要性

早在古希腊时代，著名的哲学家、形式逻辑的创始人亚里士多德就提出了归纳和演绎这两种逻辑方法，并认为演绎推理的价值高于归纳推理。而古希腊名声最大的数学家欧几里得，在《几何原本》中把几何学系统化了，这部流传千古的名著就是逻辑演绎法的典范。

牛顿在建立他的力学理论体系时虽然运用了归纳法，但其集大成著作《原理》的叙述方法却采用的是演绎法。

爱因斯坦认为，物理理论分为“构造理论”和“原理理论”。按照他的观点，原理理论“应用分析而不是综合的方法。其出发点和基础不是假设的要素，而是经验上观察到的现象的一般性质、一般原理；从这些性质和原理导出这样一些数学公式，使其用于每一自身出现之处。”“原理理论的优点，是它们逻辑上的完善，和它们基础的稳固。在爱因斯坦看来，“相对论是一种原理的理论。爱因斯坦的探索性的演绎法绝不是这种古老的演绎法的简单照搬。他根据自己的科学研究实践，顺应当时理论科学发展的潮流，对演绎法作了重大发展，赋予了新的内容。也许是为了强调他的演绎法与传统的演绎法不同，他在“演绎法”前面加上了限制性的定语——“探索性的”，这个定语也恰当地表明了他的演绎法的主要特征。与传统的演绎法相比，爱因斯坦的探索性的演绎法是颇有特色的。这主要表现在以下三个方面。

第一，明确地阐述了科学理论体系的结构，恰当地指明了思维同经验的联系问题，充分肯定了约定在建造理论体系时的重要作用。爱因斯坦把科学理论体系分为两大部分，其一是作为理论的基础的基本概念和基本原理，其二是由此推导出的具体结论。在爱因斯坦看来，那些不能在逻辑上进一步简化的基本概念和基本假设，是理论体系的根本部分，是整个理论体系的公理基础或逻辑前提。它们实际上“都是一些自由选择的

约定”；它们“不能从经验中抽取出来，而必须自由地发明出来”。谈到思维同经验的联系问题时，爱因斯坦说：直接经验  $\epsilon$  是已知的，A 是假设或公理，由它们可以通过逻辑道路推导出各个个别的结论 S；S 然后可以与  $\epsilon$  联系起来(用实验验证)。从心理状态方面来说，A 是以  $\epsilon$  为基础的。但是在 A 和  $\epsilon$  之间不存在任何必然的逻辑联系，而只有通过非逻辑的方法——“思维的自由创造”(或约定)——才能找到理论体系的基础 A。爱因斯坦明确指出：“物理学构成一种处在不断进化过程中的思想的逻辑体系。它的基础可以说是不能用归纳法从经验中提取出来的。而只能靠自由发明来得到。这种体系的根据(真理内容)在于导出的命题可由感觉经验来证实，而感觉经验对这基础的关系，只能直觉地去领悟。进化是循着不断增加逻辑基础简单性的方向前进的。为了要进一步接近这个目标，我们必须听从这样的事实：逻辑基础愈来愈远离经验事实，而且我们从根本基础通向那些同感觉经验相联系的导出命题的思想路线，也不断地变得愈来愈艰难、愈来愈漫长了。”

第二，大胆地提出了“概念是思维的自由创造”、“范畴是自由的约定”的命题，详细地阐述了从感觉经验到基本概念和基本原理的非逻辑途径。爱因斯坦指出，象马赫和奥斯特瓦尔德这样的具有勇敢精神和敏锐本能的学者，也因为哲学上的偏见而妨碍他们对事实做出正确的解释(指他们反对原子论)。这种偏见——至今还没有灭绝——就在于相信毋须自由的构造概念，事实本身能够而且应该为我们提供科学知识。这种误解之所以可能，是因为人们不容易认识到，经过验证和长期使用而显得似乎同经验材料直接相联系的那些概念，其实都是自由选择出来的。爱因斯坦认为，物理学家的最高使命就是要得到那些普遍的基本定律，由此世界体系就能用单纯的演绎法建立起来。要通向这些定律，并没有逻辑的道路，只有通过那种以对经验的共鸣的理解为依据的直觉，才能得到这些定律。”为了从经验材料中得到基本原理。除了通过“以对经验的共鸣的理解为依据的直觉”外，爱因斯坦还指出可以通过“假设”、“猜测”、“大胆思辨”、“创造性的想像”、“灵感”、“幻想”、“思维的自由创造”、“理智的自由发明”、“自由选择的约定”等等。不管方法如何变化，它们都有一个共同点，即基本概念和基本原理只能通过非逻辑的途径自由创造出来。这样一来，基本概念和基本原理对于感觉经验而言在逻辑上是独立的。爱因斯坦认为二者的关系并不像肉汤同肉的关系，而倒有点像衣帽间牌子上的号码同大衣的关系。也正由于如此，从感觉经验得到基本概念和原理就是一项十分艰巨的工作，这也是探索性的演绎法的关键一步。因此，爱因斯坦要求人们“对于承担这种劳动的理论家，不应当吹毛求疵地说他是‘异想天开’；相反，应当允许他有权去自由发挥他的幻想，因为除此以外就没有别的道路可以达到目的。他的幻想并不是无聊的白日做梦，而是为求得逻辑上最简单的可能性及其结论的探索。”关于爱因斯坦所说的“概念是思维的自由创造”和“范畴是自由的约定”，其中的“自由”并非任意之谓，即不是随心所欲的杜撰。爱因斯坦认为，基本概念和基本原理的选择自由是一种特殊的自由。它完全不同作家写小说时的自由，它倒多少有点像一个人在猜一个设计得很巧妙的字谜时的那种自由。他固然可以猜想以无论什么字作为谜底，但是只有一个字才真正完全解决了这个字谜。显然，爱因斯坦所谓的“自由”，主要是指建立基本概念和基本原理时思维方式的自由、它们的表达方式的自由以及概括程度高低的自由，一般说来，它们包含的客观实在的内容则不能是任意的。这就是作为反映客观实在的人类理智结晶的科学之客观性和主观性的统一。诚如爱因斯坦所说：“科学作为一种现存的和完成的东西，是人们所知道的最客观的，同人无关的东西。但是，科学作为一种尚在制定中的东西，作为一种被追求的目的，却同人类其他一切事业一样，是主观的，受心理状态制约的。”

第三，明确地把“内在的完备”作为评判理论体系的合法性和正确性的标准之一。在爱因斯坦看来，探索性的演绎法就是在实验事实的引导下，通过思维的自由创造，发明出公理基础，然后以此为出发点，通过逻辑演绎导出各个具体结论，从而构成完整的理论体系。但是，评判这个理论体系的合法性和正确性的标准是什么呢？爱因斯坦晚年在“自述”中对这个问题作了纲领性的回答。他认为，第一个标准是“外部的证实”，也就是说，理论不应当同经验事实相矛盾。这个要求初看起来似乎十分明显，但应用起来却非常伤脑筋。因为人们常常，甚至总是可以用人为的补充假设来使理论同事实相适应，从而坚持一种普遍的理论基础。但是，无论如何，这种观点所涉及的是用现成的经验事实采证实理论基础。这个标准是众所周知的，也是经常运用的。有趣的是爱因斯坦提出的第二个标准——“内在的完备”。它涉及的不是理论同观察材料的关系问题，而是关于理论本身的前提，关于人们可以简单地、但比较含糊地称之为前提(基本概念和基本原理)的“自然性”或者“逻辑简单性”。也就是说，这些不能在逻辑上进一步简化的元素要尽可能简单，并且在数目上尽可能少，同时不至于放弃对任何经验内容的适当表示。这个观点从来都在选择和评价各种理论时起着重大的作用，但是确切地把它表达出来却有很大困难。这里的问题不单是一种列举逻辑上独立的前提问题(如果这种列举是毫不含糊地可能的话)，而是一种在不可通约的质之间作相互权衡的问题。其次，在几种基础同样“简单”的理论中，那种对理论体系的可能性质限制最严格的理论(即含有最确定论点的理论)被认为是比较优越的。理论的“内在的完备”还表现在：从逻辑的观点来看，如果一种理论并不是从那些等价的和以类似



方式构造起来的理论中任意选出的,那么我们就给予这种理论以较高的评价。爱因斯坦看到了“内在的完备”这一标准不容忽视、不可替代的特殊作用。他指出,当基本概念和基本原理距离直接可观察的东西愈来愈远,以致用事实来验证理论的含义就变得愈来愈困难和更费时日的时候,“内在的完备”标准对于理论的选择和评价就一定会起更大的作用。他还指出,只要数学上暂时还存在着难以克服的困难,而不能确立这个理论的经验内涵:逻辑的简单性就是衡量这个理论的价值唯一准则,即使是一个当然还不充分的准则。爱因斯坦的“内在完备”标准在某种程度上是不可言传的,但是它在像爱因斯坦这样的具有“以对经验的共鸣的理解为依据的直觉”的人的手中,却能够有效地加以运用,而且预言家们在判断理论的内在完备时,它们之间的意见往往是一致的。在爱因斯坦创立狭义相对论和广义相对论的过程中,充分地体现了探索性的演绎法的这三个特色。前面我们已简单地涉及到这一点,这里我们只谈谈爱因斯坦从“内在的完备”这一标准的角度是如何对自己理论进行评价的。1906年,当德国实验物理学家宣称,他在1905年完成的关于高速电子( $\beta$ 射线)质量和速度关系的数据支持亚伯拉罕和布赫尔的“刚性球”电子论,而同洛伦兹-爱因斯坦的理论(电子在运动方向的直径会随速度的增加而收缩)不相容,彭加勒立即发生了动摇,认为相对性原理不再具有我们先前赋予它的那种重要的价值。洛伦兹表现得更是十分悲观,他在1906年3月8日致彭加勒的信中说:“不幸的是,我的电子扁缩假设同考夫曼的新结果发生了矛盾,因此我必须放弃它,我已到了山穷水尽的地步。在我看来,似乎不可能建立起一种要求平移对电学和光学现象完全不产生影响的理论。”爱因斯坦的态度则截然相反,他对自己的理论的“内在的完备”抱有信心。他在1907年发表的长篇论文中指出:考夫曼的实验结果同狭义相对论的“这种系统的偏离,究竟是由于没有考虑到的误差,还是由于相对论的基础不符合事实,这个问题只有在有了多方面的观测资料以后,才能足够可靠地解决。”他认为“刚性球”电子论在“很大程度上是由于偶然碰巧与实验结果相符,因为它们关于运动电子质量的基本假设不是从总结了大量现象的理论体系得出来的。”正由于狭义相对论的理论前提的简单性大,它涉及的事物的种类多,它的应用范围广,它给人的印象深,所以爱因斯坦才对自己的理论坚信不疑,要知道当时还没有确凿的实验事实证实这种具有思辨性的理论。谈到广义相对论的“内在的完备”,爱因斯坦说:“这理论主要吸引人的地方在于逻辑上的完整性。从它推出的许多结论中,只要有一个被证明是错误的,它就必须被抛弃,要对它进行修改而不摧毁其整个结构,那似乎是不可能的。”他甚至说过这样的话:当1919年的日蚀观测证明了他关于光线弯曲的推论时,他一点也不惊奇。要是这件事没有发生,他倒会是非常惊讶的。探索性的演绎法是爱因斯坦的主导哲学思想——唯物论的唯理论——的一个重要组成部分。可贵的是,爱因斯坦在这里并没有排斥或漠视经验归纳法在科学中的地位。一方面,他认为纯粹思维可以把握实在;另一方面,又认为从来也没有一种理论是靠纯粹思辨发现的,他对构造性的理论也给予了较高的评价。爱因斯坦敢于正视矛盾的两极,在唯理论和经验论之间保持了一种微妙的、恰如其分的平衡,这正是他的高明之处。他提出的探索性的演绎法,只是强调“要大胆思辨,不要经验堆积”罢了,这是理论科学在20世纪发展的必然趋势,爱因斯坦则是率先表达了这一时代要求。

## 2、经典力学中的时空对称性问题

一切物理现象都发生在时空之中,时空的对称性必然会影响物理现象的特性,因此在研究物理理论时,往往要研究时空的对称性。牛顿力学的方程是关于时间反演不变的,也就是说在牛顿的宇宙中,一切动力学过程都是可逆的,因此无法找出一个标度时间向前演化的物理量。量纲不仅规范了物理量的物理意义,而且包含了不同物理量之间的关联性,隐含着客观存在着的物理规律。

Galileo 相对论指出,不存在“静止状态的”绝对意义,所以“在不同时间的空间的同一点”是没有任何意义的。在18世纪末年,达兰贝尔(J.L.d'Alembert)和拉格朗日(J.-L.Lagrange)等在他们的著作中,提出了把时间想象为第四个纬度的建议。例如拉格朗日写到:“这样以来,我们就可以把力学看成是一种四维几何学,而把分析力学看成是解析几何的一种推广。”文献【1】在‘引论’中就预先指出,对于牛顿力学的背景时空,即伽利略时空,有着下述对称性:

(N1),所有的空间点都是平权的,所有的瞬时也都是平权的;

(N2),所有的空间方向都是平权的;

(N3),所有作相对匀速直线运动的惯性参照系都是平权的。

从时空角度上看,“实数是空间的数量关系,纯虚数是时间的数量关系,复数则是时空的数量关系”。在普利高津看来,在近代科学的经典——牛顿力学中,时间作为一个描述运动的参数,是反演对称的,把时间换为空间有相同的结果,这意味未来和过去看来没有实质性的区别。

天气预报主要是通过对大尺度空间(水平和垂直)气象条件的探测,来预报未来的天气情况。如果预报未来的时间越长,就要求对空间探测的尺度越大。可以说:对时间尺度的预报,依赖于对空间尺度的了解。



考古学家就是通过对地层的研究来推断以前的历史情况。地层越深，可推断出该年代就越久远。上述是 space-time 平权理论的实际应用，用公式表示： $\int_0^x f(x)dx = -K \int_0^t \varphi(t)dt$ ，上式的物理意义是：对某一物质而言，若其空间量有了变化（如体积变化），那么该物质必然会产生某一过程；反之，若某一物质产生了某一过程，其结果必然存在空间量的变化。时和空在变换中它们之积是个不变量，时空是不均匀的，但时空却应该是连续的，物体的运动速度、质量、动量和能量也应该是连续的。数学中几何概型的计算时，当几何测度为时间和长度时运算是是一致的，时间用长度表示，也是时空平权的反应。你问某人从巴尔的摩到华盛顿有多远，得到的回答可能是“45 分钟”：你问的是距离，但回答却是时间。如果你遵守交通规则，即不会有意外情况打乱交通，而在速度有限的情况下，这两个概念是可以联系在一起的。在宇宙中，距离和时间通过永远恒定的光速联系在一起。

参考文献：

- 【1】 福克。1965,“空间、时间和引力的理论”，周培源等译，科学出版社，北京。

### 3、狭义相对论中的时空对称性问题

Weinberg 在他的著名著作《引力论与宇宙论》一书中用了专门一章，标题为“对称空间”，来讨论时空的对称性。爱因斯坦说过一句话：“过去、现在和将来之间的区别只不过是一种幻觉。”时间不能完全脱离和独立于空间，必须和空间结合在一起形成所谓的时空的客体。

对称与李群在物理学中有许多应用，在物理学中的应用在极大刺激了群论的发展。对称可以在物理学中从多个层面上观察到，例如在牛顿力学中，包括万有引力定律在内的许多定律都在平移，旋转和反射下保持不变；狭义相对论的一个重要特征就是空间与时间的观念是对称的。

对称性在现代科学中的中心地位，从狄拉克对爱因斯坦的评价也可看出，他在 1982 年询问杨振宁，什么是爱因斯坦对物理学最重要的贡献？杨振宁回答说：“1916 年的广义相对论。”狄拉克说：“那是重要的，但不如他引入的时空对称的概念那么重要。”对狄拉克这个与众不同的观点，杨振宁事后评论说：“狄拉克的意思是，尽管广义相对论是异常深刻的和有独创性的，但是空间和时间的对称对以后的发展有更大的影响。的确，与人类的原始感受如此抵触的时空对称，今天已与物理学的基本观念紧密地结合在一起了。”庞加莱的“回归论”：“任何孤立体系在一个足够大的时间间隔内，将回到它的初始状态。时间不是对称的，甚至可能是循环的。”

在相对论中，时间和空间坐标没有真正的差别，犹如任何两个空间坐标没有真正的差别一样。譬如可以选择一族新的坐标，使得第一个空间坐标是旧的第一和第二空间坐标的组合。例如测量地球上一点位置不用在伦敦皮卡迪里圆环以北和以西的里数，而是用在它的东北和西北的里数（1 英里=1.609 公里）。类似地，人们在相对论中可以用新的时间坐标，它是旧的时间（以秒作单位）加上往北离开皮卡迪里的距离（以光秒为单位）。将一个事件的四坐标作为在所谓的时空的四维空间中指定其位置的手段经常是有助的。

对于狭义相对论的背景时空，即洛伦兹时空，则有着下述对称性：

(S1)，所有的时空点都是平权的；(S2)，所有的时空方向都是平权的。

这里所谓‘平权’是指“物理影响相同，没有谁表现特别”。这里的伽利略时空和洛伦兹时空都是 1+3 维时空，1 维是时间，3 维是空间。洛伦兹时空中的时空点是 4 维时空点，时空方向是 4 维矢量方向。所有的时空方向都是平权的对称性包含着所有的空间方向都是平权的对称性和所有作相对匀速直线运动的惯性参照系都是平权的对称性。

伽利略时空的对称性对应着伽利略坐标变换，这个变换具有 10 个参数（其中 N1 对称性 4 个，N2 对称性 3 个，N3 对称性 3 个）；在此变换下，牛顿力学的规律保持不变。洛伦兹时空的对称性对应着洛伦兹坐标变换，这个变换也具有 10 个参数（其中 S1 对称性 4 个，S2 对称性 6 个）；在此变换下，狭义相对论的物理规律保持不变。空间是相对时间的空间，时间是相对空间的时间，统一在速度这个概念上。

狭义相对论是四维时空的数学框架，其本质和牛顿的三维绝对对空间加一维时间相同。它只是对客观物理时间和空间的理论抽象，仅仅是一种数学合理化的抽象，是研究工作所利用的工具。Einstein 在狭义相对论中的论断：“将自然界定律表示成四维时空连续区域里的定律，则采取的形式是逻辑上最满意的。”【1】1908 年闵可夫斯基在科隆的演讲中说：“我想展现在你们面前的关于空间和时间的看法是从实验物理学土壤中萌芽的，而这正是他们力量之所在，他们是彻底的。从今以后，单独的空间和单独的时间都注定如同阴影般消失，只有他们的某种联合能维持一种独立的实在。”【2】这一新见解为狭义相对论的形成和广义相对论的发展提供了场地和线索，米是通过秒来定义的。

Einstein 把三维的空间和一维的时间合并到一起,在笛卡儿坐标基础上,四维时空坐标创立了。狭义相对论揭示了作为物质存在形式的空间和时间在本质上的统一性,space-time 不能截然分开而是统一的整体,但是没有指明时间与空间的本质。不同时刻的三维 Euclid 空间被分开,把这些空间合并在一起构成了完整的四维 space-time 图。在狭义或广义相对论的情形下,时间应当是同时性空间或类空表面。在空间——时间中进行匀速直线运动的粒子历史是一条直线——世界线。不变的不是时间间隔和空间间隔,而是 space-time 线元长度,即 $\Delta s = \Delta s'$ ,其中 $\Delta s^2 = \Delta l^2 - \Delta c^2 \Delta t^2$ , $\Delta s'^2 = \Delta l'^2 - \Delta c^2 \Delta t'^2$ 。前人借用这个概念,把“真空光速不变的原理”表述成“ $dS=0$ ”,即“由真空光速不变的原理,我们可以断定,假如两个事件的间隔在某一个坐标系内为零,那么,它在所有其他系统内均为零”【3】。前辈通过对“时空”、“运动”进行分析与观察,把真空光速不变的原理( $dS=0$ )推广到了  $dS$  为非零值的情形:“我们得到一个很重要的结论:两个事件的间隔在所有的惯性参考系统里都是一样的,即当由一个惯性参考系统变换到任何另一个惯性参考系统时,它是不变的。这种不变式也就是真空光速不变的数学表示”【4】——这就是“时空间隔的不变性”。

Minkowsk 指出:“我要向你们提出的空间时间观念是在实验物理学的土壤上产生出来的……从此,单独的空间和单独的时间注定要消退得只剩下一些影子,只有两者的一种联合才会保持为一项独立的实在。Minkowsk 空间里时间纬度取虚值,反映了时间和空间的本质差别,因此洛伦兹变换的不变量不是“椭圆型”(空间坐标的平方和时间坐标的平方符号相同)而是“双曲型”(空间坐标的平方和时间坐标的平方符号不同)的,由此产生了光锥内外及光锥前后几个互相不能靠洛伦兹变换到达的区域。

参考文献:

- 【1】林为民编译《图说相对论》,内蒙古人民出版社 2003 年 3 月版 218 页。
- 【2】[英]约翰·格里宾著、黄磷译《大宇宙百科全书》,海南出版社 2001 年 8 月版 276 页)。
- 【3】见《场论》L12-13, P6。
- 【4】见《场论》L21-23, P7。

#### 4、 广义相对论中时空对称性

对于广义相对论,由于引力场使得时空弯曲,在全时空中彼此作相对匀速直线运动的惯性参照系是不存在的(在时空的局部范围内可以存在匀速直线运动,也可以存在局部惯性参照系)。由于这个原因,广义相对论中的时空的对称性,一般要低于伽利略时空的对称性和低于洛伦兹时空的对称性,即其所对应的保持规律不变的坐标变换之参数要减少。在广义相对论中,时空的对称性往往随所研究的具体问题而异。在经典广义相对论的实时 space-time 中,因为时间只沿着一位观察者的历史增加,不象空间那样可以沿着历史增加或减少,时间和空间方向可以区分开来;在广义相对论中,对称性由洛伦兹群(或庞卡莱群)所支配。

一般认为,以广义相对论为理论基础的宇宙学中的时空对称性是【1】:

(C1),所有的空间点都是平权的; (C2),所有的空间方向都是平权的。

为什么说所有的空间点都是平权的?如果空间之内点与点不是平权的,则在空间某些部分,物质会堆积得很多,而在另外一些部分,物质则分布得很少,这不符合天文观察。

天文观测的事实表明:大尺度空间内星系或星系团的分布以及射电源的计数,大体上是均匀的,而微波背景辐射的分布,均匀程度更高。为什么说所有的空间方向都是平权的?如果空间之内各个方向彼此不是平权的,会引发什么现象呢?整个宇宙绕轴旋转就是一个例子,在这种情况下,旋转轴就是一个特殊方向,它跟其它方向不是平权的。Godel 曾研究过旋转的宇宙,得出了在这种宇宙中,测地线可能相交的推论。这意味着,从‘现在’可以返回到‘过去’,从‘现在’也可以提前到达‘将来’;这将对因果律造成极大的紊乱。旋转宇宙的问题还有不少,虽然在引力理论和宇宙学中,旋转宇宙也可以作为一个课题来进行研究,但由于它本身的缺点和问题,多数学者并不采纳这种宇宙。比较(C1)、(C2)和(N1)、(N2),可以看出,以广义相对论为理论基础的宇宙学中的时空对称性同牛顿力学背景时空的对称性都认为所有的空间点都是平权的和所有的空间方向都是平权的。这就是,在一定条件下,可以用牛顿力学来研究宇宙学的理论根源。比较(C1)和(N1),还可以看出,在以广义相对论为理论基础的宇宙学中的时空中,缺乏所有的瞬时也都是平权的对称性,正是由于这种缺乏,使得宇宙时空出现弯曲,必须用广义相对论来进行研究。对称性(C1)说明宇宙空间是均匀的,对称性(C2)说明宇宙空间是各向同性的,这就是宇宙学原理。显然,宇宙学原理并不是毫无根据的人为假定,它是宇宙对称性的合理推论。

广义相对论具有宇宙因子项重力场方程的普遍形式  $R_{uv} - 0.5g_{uv}R + g_{uv} = -kT_{uv}$ , 式中  $R_{uv}$  是二阶曲率张量;  $g_{uv}$  是度规张量; 而  $T_{uv}$  是物质的能量—动量张量;  $k$  为常数,可由泊松方程求得,  $\lambda$  为宇宙因子,等式的左边是描述空间几何性质的几何量,而右边是物质张量。该式把物质和 space-time 紧密联系在一起,表明空间

——时间的几何性质与物质的分布及其运动密切相关，物质的分布和运动决定四维空间的曲率，而这个弯曲空间又决定物质的运动状态。广义相对论进一步揭示空间与时间的统一性，指出空间和时间不可能离开物质而独立存在，空间的结构与性质取决于物质的分布，因此时间与空间相结合的 space-time 才是物理实在，时间与空间分别是 space-time 的投影。时间不过是纵向的空间，空间则是横向的时间；空间是静止的时间，时间是运动着的空间，二者实为一体的东西。在物理学中，在任何惯性参考系中观察任意两个事件，其时间的先后次序都具有绝对的意义，space-time 中任意两点间的内禀距离只能是一个旅行者从一点到另一点所花费的固有时间。对于绝对时间与绝对空间而言，事物在空间上的分布规律是其在时间上分布规律的反映，例如宇宙间天体系统的空间分布是其时间演化层次的横向分布，现在空间上的宇宙是历史上宇宙的一个缩影。

现代标准宇宙学理论建立在爱因斯坦引力场方程和罗伯逊—沃克度规的基础上，按宇宙学原理，物质分布均匀和各向同性时，宇宙时空具有最大的对称性。而具有最大对称性的时空结构由罗伯逊—沃克度规描述，其形式为：

$$ds^2 = c^2 dt^2 - R^2(t) \left( \frac{d\bar{r}^2}{1 - \kappa \bar{r}^2} + \bar{r}^2 d\theta^2 + \bar{r}^2 \sin^2 \theta d\varphi^2 \right) \quad 【2】$$

式中  $R(t)$  是尺度因子， $\kappa$  是曲率常数， $\bar{r}$  是共动坐标。如果尺度因子  $R(t)$  不随时间而变，表示的是膨胀速度为零的静态空间。由于  $g_{00} = 1$ ，罗伯逊—沃克度规表示的时空可以定义统一的时间。事实上罗伯逊—沃克度规中不显含质量，它代表的仅是一种几何性的四维时空框架。物质存在对时空结构的影响是通过爱因斯坦引力场方程引入的。因此我们即可以用罗伯逊—沃克度规来表示运动学意义上的，没有物质和引力场存在的纯几何的时空结构。也可以用它来表示有物质和引力场存在时的，动力学意义上的时空结构。

天文观测的事实表明：大尺度空间内星系或星系团的分布以及射电源的计数，大体上是均匀的，而微波背景辐射的分布，均匀程度更高。为什么说所有的空间方向都是平权的？如果空间之内各个方向彼此不是平权的，会引发什么现象呢？整个宇宙绕轴旋转就是一个例子，在这种情况下，旋转轴就是一个特殊方向，它跟其它方向不是平权的。Godel 曾研究过旋转的宇宙，得出了在这种宇宙中，测地线可能相交的推论。这意味着，从‘现在’可以返回到‘过去’，从‘现在’也可以提前到达‘将来’；这将对因果律造成极大的紊乱。旋转宇宙的问题还有不少，本博文不打算讨论这个问题。只是指出，虽然在引力理论和宇宙学中，旋转宇宙也可以作为一个课题来进行研究，但由于它本身的缺点和问题，多数学者并不采纳这种宇宙。

比较(C1)、(C2)和(N1)、(N2)，可以看出，以广义相对论为理论基础的宇宙学中的时空对称性同牛顿力学背景时空的对称性都认为所有的空间点都是平权的和所有的空间方向都是平权的。这就是，在一定条件下，可以用牛顿力学来研究宇宙学的理论根源。比较(C1)和(N1)，还可以看出，在以广义相对论为理论基础的宇宙学中的时空中，缺乏所有的瞬时也都是平权的对称性，正是由于这种缺乏，使得宇宙时空出现弯曲，必须用广义相对论来进行研究。对称性(C1)说明宇宙空间是均匀的，对称性(C2)说明宇宙空间是各向同性的，这就是宇宙学原理。显然，宇宙学原理并不是毫无根据的人为假定，它是宇宙对称性的合理推论。

#### 参考文献

- 【1】 Weinberg S. 1972, “Gravitation and Cosmology”, Wiley, New York.  
 【2】 刘辽, 赵铮, 广义相对论, 高等教育出版社, 37, 308, 326 (2004)。

#### 5、量子力学中的时空对称性

在量子力学虚时间方向和空间方向一样，可以增加或减少，经常使用“将时间变为空间”的问题，在任何情况下，我们利用虚的时间和Euclid空间——时间可以认为仅仅是一个计算实空间——时间的答案的数学手段（或技巧），在计算机技术中也存在这个问题。对于我们的量子边界，我们需要四维空间——而不是四维space-time——中的一个三维表面。因而Stephen Hawking和James Hartle提出：在量子宇宙学格局中，通常的时间概念不再适用，它变成了又一维的空间。空间的几何学可以用来作为时间的量度。在量子宇宙学中，时间是宇宙中的物质成分及其位形的构成物。在微观理论中，特别是基本粒子理论中常取自然单位制，其中把时间与空间的量纲取得相同，并把质量量纲取为space-time量纲的倒数，从而只剩下一个量纲，至于单位的大小，则取得使  $c=1$  和约化普朗克常数等于1，至于具体取什么单位，则无统一规定，在基本粒子理论中通常是取得使  $\mu$  介子的质量数值为1。倪光炯教授在量子力学基础上，根据空间—时间反演等价于正反粒子变换这一基本对称性，导出狭义相对论的质能关系式和洛伦兹变换。从而说明高速粒子质量增大和运动钟变慢等相对论运动学效应有其普适的内禀动力学本质。



由 space-time 量的差别产生的效应,总可以通过时间量的差别来完成。反之由时间量的差别产生的效应,总可以通过空间量的差别来达到。比如,光的干涉实验,当只允许单个光子通过时(此 space-time 间量小),短时间暴光,则在底片上只产生几个光斑,不能形成干涉图样。若长时间暴光(时间量存在了差别),则在底片上可产生干涉图样。如果不增加时间,只是允许大量光子(空间量存在差别)同时通过小空,那么短时间暴光,也得到了光的干涉图样。后面我们可以看到量子力学中时空平权主要是电磁质量在引力空间——度量空间中运动

## 6、时空平权理论

爱因斯坦认为:“如果一个想法在一开始不是荒谬的,那它就是没有希望的。在我看来,现在有许多人-甚至包括科学家-似乎都只是见树不见林。关于历史与哲学背景的知识,可以提供给那些大部份正受到当代偏颇(偏向某一方面,有失公允)观念所左右的科学家们一种不随波逐流的独立性。这种由哲学的洞察力所创造的独立性,依我来看,正是一个工匠或专家,与一个真正的真理追寻者之间,最大的区别。”法朗士讲:“最难得的是勇气,是思想的勇气。”

在物理学里,自然单位制(natural units)是一种建立于基础物理常数的计量单位制度。例如电荷的自然单位是单位电荷  $e$ 、速度的自然单位是光速  $c$ ,都是基础物理常数。纯自然单位制必定会在其定义中,将某些基础物理常数归一化,即将这些常数的数值规定为整数 1。

自然单位制的主要目标,是将出现于物理定律的代数表达式精致地简化,或者,将一些描述基本粒子属性的物理量归一化。物理学者认为这些物理量应该相当常定。但是,任何物理实验必需操作与完成于物理宇宙内部,所以,很难找到比物理常数更常定的物理量。假设某物理常数是单位制的基本单位或衍生单位,则不能用这单位制来测量这物理常数的数值变化,所以通常只能研究无量纲的物理常数的数值变化,否则必需另外选择一种单位制来研究这物理常数的数值变化,而这另外选择的单位制不能以这物理常数为基本单位或衍生单位<sup>[1]</sup>。自然单位制之所谓“自然”,是因为其定义乃基于自然属性,而不是基于人为操作,普朗克单位制时常会被直接地指称为自然单位制。事实上,很多种单位制都可以称为自然单位制,普朗克单位制只不过是学术界熟知的一种自然单位制。普朗克单位制可以被视为一种独特的单位制,因为这单位制不是基于任何物质或粒子的属性,而是纯粹从自由空间的属性推导出来的。如同其它种单位制,任何自然单位制的基本单位,必会包括长度、质量、时间、温度与电荷的定义与数值。有些物理学者不认为温度是物理常数,因为温度表达为粒子的能量每自由度,这可以以能量(或质量、长度、时间)来表达。虽然如此,几乎每一种自然单位制都会将玻尔兹曼常量归一化:  $k_B = 1$ 。这可以简单地视为一种温度定义方法。物理量纲自牛顿力学确立以来,只有不断地充实、发展,而从未修正、动摇过,因为它是物理科学的科学核心,是其框架和灵魂!普朗克长度  $L_{PL} = (hG/2\pi C^3)^{1/2}$ , 普朗克时间  $t_{PL} = (hG/2\pi C^5)^{1/2}$ , 普朗克质量  $M_{PL} = (hC/2\pi G)^{1/2}$ ,最早是从物理量纲导出的!

在国际单位制内,电量是用一种特别的基本量纲来计量。但在自然单位制内,电量则是以质量、长度、时间的机械单位来表达。这与厘米-克-秒制雷同。

自然单位制又可分为两类,“有理化单位制”与“非理化单位制”。在有理化单位制内,例如,洛伦兹-赫维赛德单位制(Lorentz-Heaviside units),麦克斯韦方程组里没有因子  $4\pi$ ,但是,库仑定律和毕奥-萨伐尔定律的方程里,都含有因子  $4\pi$ ;而在非理化单位制内,例如,高斯单位制,则完全相反,麦克斯韦方程组里含有因子  $4\pi$ ,但是,库仑定律和毕奥-萨伐尔定律的方程里,都没有因子  $4\pi$ 。

自然单位制最常见的定义法是规定某物理常数的数值为 1。例如,很多自然单位制会定义光速  $c = 1$ 。假设速度  $v$  是光速的一半,则从方程  $v = c/2$  与  $c = 1$ ,可以得到方程  $v = 1/2$ 。这方程的含意为,采用自然单位制,测量得到的速度  $v$  的数值为  $1/2$ ,或速度  $v$  是自然单位制的单位速度的一半。方程  $c = 1$  可以被代入任意方程。例如爱因斯坦方程  $E = mc^2$  可以重写为采用自然单位制的  $E = m$ 。这方程的意思为,粒子的静能量,采用自然单位制的能量单位,等于粒子的静质量,采用自然单位制的质量单位。

与国际单位制或其它单位制比较,自然单位制有优点,也有缺点: 1、简化方程:借着规定基础物理常数为 1,含有这些常数的方程会显得更为简洁,大多时候会更容易了解。例如,在狭义相对论里,能量与动量的关系式  $E^2 = p^2c^2 + m^2c^4$  似乎相当冗长,而  $E^2 = p^2 + m^2$  显得简单多了。2、物理诠释:自然单位制已经自动具备了量纲分析功能。例如,在普朗克单位制的定义中,已经囊括了量子力学和广义相对论的一些性质。大约在普朗克长度的尺度,量子引力效应绝非凑巧地会开始变得重要。同样地,在设计原子单位制时,已经考虑到电子的质量与电量。因此,描述氢原子电子轨域的玻尔半径理所当然地成为原子单位制的长度单位。

3、不需原器:“原器”(prototype)是一种用来定义单位的真实物体,例如国际千克原器(International Prototype Kilogram)是一块存放于法国国际计量局的铂铱合金圆柱体,其质量定义为 1 公斤。依赖原器有很多缺点:



不可能实际复制出完全一样的原器，真实物体会遭受腐蚀损坏，核对质量必需亲自到法国跑一趟。自然单位制不需要参照到原器，自然就不会被这些缺点拖累。4、计量精密度较低：当初设计国际单位制时，一个主要目标是能够适用于精密测量。例如，因为这跃迁频率可以用原子钟科技来精密复制，时间单位秒是使用铯原子的原子跃迁频率来定义。自然单位制通常不是基于可以在实验室精密复制的物理量。所以，自然单位制的基本单位所具有的精密位数会低于国际单位制。例如，普朗克单位制所使用的重力常数  $G$ ，在实验室里只能测量至 4 个有效数字。5、意义过于笼统：设想采用普朗克单位制的方程  $a = 10^{10}$ 。假若  $a$  代表长度，则这方程的含意是  $a = 1.6 \times 10^{-25} m$ ；可是假若  $a$  代表质量，则这方程的含意是  $a = 220 kg$ 。所以，假若变量  $a$  缺乏明确定义，则这方程很有可能被误解。明显不同地，采用国际单位制，对于方程  $a = 10^{10}$ ，假若  $a$  代表长度，则这方程的含意是  $a = 10^{10} m$ ；假若  $a$  代表质量，则这方程的含意是  $a = 10^{10} kg$ 。从另一个角度来看，物理学者有时候会故意利用到这笼统性质。这时，自然单位制显得特别有用。例如，在狭义相对论里，时间与空间的关系非常密切，假若，能够不区分某变量所代表的是时间还是空间，或者，使用同一个矢量变量就可以一起代表时间与空间，这添加的功能会带给理论学者很大的便利。

注意到在任何单位系统内，为了不致造成定义冲突，只有一小部分的基础物理常数可以被归一化。例如，电子质量  $m_e$  与质子质量  $m_p$  不能都被归一化。

基础物理常数	符号	量纲
光速	$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$	$L T^{-1}$
磁常数	$\mu_0 = \frac{1}{\epsilon_0 c^2}$	$Q^{-2} M L$
电常数	$\epsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 c^2}$	$Q^2 M^{-1} L^{-3} T^2$
库仑常数	$k_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = \frac{\mu_0 c^2}{4\pi}$	$Q^{-2} M L^3 T^{-2}$
自由空间阻抗 (impedance of free space)	$Z_0 = \mu_0 c = \frac{1}{\epsilon_0 c}$	$Q^{-2} M L^2 T^{-1}$
重力常数	$G$	$M^{-1} L^3 T^{-2}$
约化普朗克常数	$\hbar = \frac{h}{2\pi}$	$M L^2 T^{-1}$
玻尔兹曼常量	$k_B$	$M L^2 T^{-2} \Theta^{-1}$
基本电荷	$e$	$Q$
电子质量	$m_e$	$M$
质子质量	$m_p$	$M$

只有具有量纲的物理常数才可以被选为基本单位，才可以被归一化。无量纲的物理常数的数值不会因为单位系统的不同而改变。例如，精细结构常数  $\alpha$  不具有量纲：

$$\alpha \equiv \frac{e^2}{\hbar c (4\pi\epsilon_0)} = \frac{1}{137.035999679} = 7.2973525376 \cdot 10^{-3}$$

由于  $\alpha$  的数值不等于 1，自然单位制绝不能将  $\alpha$  的表达式内的四个物理常数  $e$ 、 $\hbar$ 、 $c$ 、 $\epsilon_0$  都归一化。最多只能将其中三个物理常数归一化。剩下的物理常数的数值必需规定为能够使得

$$\alpha = \frac{1}{137.035999679}$$

普朗克单位制是一种独特的自然单位制，因为普朗克单位制不是以任何原器、物体、或甚至基本粒子定义。普朗克单位制只以物理定律的基本结构参数为归一化对向。 $c$ 、 $G$  涉及广义相对论的时空结构。 $\hbar$  捕捉了，在量子力学里，能量与频率之间的关系。这些细节使得普朗克单位制特别有用与常见于量子引力理论或弦理论的研究。

有些学者认为普朗克单位制比其它自然单位制更为自然。例如，有些其它自然单位制使用电子质量为基本单位。但是电子只是许多种已知具有质量的基本粒子之一。这些粒子的质量都不一样。在基础物理学里，并没有任何绝对因素，促使选择电子质量为基本单位，而不选择其它粒子质量。

几何化单位制 (geometrized unit system) 不是一种完全定义或唯一的单位制。在这单位制内，只规定光速与重力常数为 1。这留出足够空间来规定其它常数，像玻尔兹曼常量或库仑常数： $k_B = 1$ 、 $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 1$ 。

有人认为尽管相对论中空间和时间是密不可分的，space-time 的类时性或类空性还是绝对的，但是事件具有虚值时间坐标的空间——时间称为 Euclid 型的，在 Euclid space-time 图中，时间方向与空间方向没有不同之处，空间与时间是一个问题的两个方面。Minkowski 方程反映了 space-time 平权问题，他认为：“这种对称性在数学上可以用意义很深刻的神秘形式反映相对论的本质 (Minkowski 称为绝对世界的标准)。”

设光速  $c=bm/s$ ，由于光从 A 点到 B 点走 1s 与走  $bm$  是一样的，因此若令光速为 1，则得  $1s=bm$ ，场的运动速度为 1。时间用空间的变化来测量，空间用时间的变化来测量。光年既是时间单位，也是长度单位。宏观世界里物体的运动速度很小，仍可用 m/s 表示。这样便将国际基本物理量缩减为 6 个。若将光速定为 1，则物体的速度称为物体的相对速度，速度是物体在相对 space-time 中空间与时间的比值。我们称之为 space-time 的平权理论，它是 space-time 对称的绝对性的表现形式。根据 space-time 平权理论，四维 space-time 也可以称为四维空间或者四维时间。 $ds^2 = -c^2 dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2$  本身就反应了时空平权理论。

明可夫斯基 (Minkowski) 于 1908 年指出，时间与空间的变化互相补偿，因此，这两者的结合，就是在这新世界里对于所有的观测者也都是是一样的。我们惯于想象的空间，有长、宽、高三维，而明可夫斯基指示，我们必须把时间看做是“时空结合体”里的第四维，一秒钟相当于 186,000 英里，即光在这时间内所行的距离。狭义相对论的本质就是时空平权，爱因斯坦从实证哲学的观点得出狭义相对论的主要成果经常遭到人们的非议原因在此，他本人也曾经说过相对论的基础必将会得到深化。

笔者认为  $C=1$  不仅仅是自然单位制的必然，而且进一步表明 Minkowski 方程的正确性，相对论与量子力学以及基本粒子理论都说明了 space-time 平权理论的正确。空间和时间本身就是一个数学定义的问题，将两者合并为一个量，整个物理学描述体系将发生改变。闵可夫斯基坐标系中  $ct$  轴也可以用  $t$  轴表示，在宏观物体的运动中可以用  $vt$  轴表示。在数学的几何模型中时间、长度可以视为等价的几何度量，也反映了时空平权的问题。在精密自然科学中，一次冒险也不作，便不会有真正的创新。

人们根据相对论认为空间与时间等价把国际基本物理量减少 1 个，这早在 20 世纪中就这样规定了，是用稳定铯原子波长来定义长度的，世界各地的各种非铯和铯原子钟都要和巴黎的铯原子钟来校对时间长度（即完成空间长度校对）。因为在相对论时空下，空间是时间的函数，从物理学讲它们的自由度是一，其中一个变量完全可以替代另一个变量。唯物辩证法认为时间是指物质运动和发展过程中先后的顺序和持续性，空间是指物质存在的广延性、伸张性，是物体之间的排列角度与排列顺序，分别是一维、三维的，具有一定的时代局限性。

有人认为光速等于 1 是自然单位制的结果，没有深刻的含义，这不由得想起了爱因斯坦当年认识到惯性质量与引力质量的相等是必然的结果，进而建立了广义相对论。类似的实例还有很多，例如虽然在那个决定命运的 1900 年，普朗克鼓起了最大的勇气做出了量子的革命性假设，但随后他便为这个离经叛道的思想而深深困扰。在黑体问题上，普朗克孤注一掷想要得到一个积极的结果，但最后导出的能量不连续性的图象却使得他大为吃惊和犹豫，变得畏缩不前起来。如果能量是量子化的，那么麦克斯韦的理论便首当其冲站在应当受置疑的地位，这在普朗克看来是不可思议，不可想象的。事实上，普朗克从来不把这当做一个问题，在他看来，量子的假设并不是一个物理真实，而纯粹是一个为了方便而引入的假设而已。普朗克压根也没有想到，自己的理论在历史上将会有着多么大的意义，当后来的一系列事件把这个意义逐渐揭露给他看时，他简直都不敢相信自己的眼睛，并为此惶恐不安。一直要到 1915 年当玻尔模型取得了空前的成功后，才在普朗克的脑海中扭转过来。

## 7、时空平权与多普勒效应

著名的哲学家维特根斯坦说：“创造新概念的思维劳作是痛苦的。”利用时空对称性可以判断某些理论是否可行。例如，宇宙学原理常受到非难，若放弃宇宙学原理，仅用广义相对论来研究宇宙又很困难；那就用牛顿力学来研究吧。可是，放弃宇宙学原理就相当于否定所有的空间点都是平权的和所有的空间方向都是平权的；使用牛顿力学，又相当于肯定所有的空间点都是平权的和所有的空间方向都是平权的；这岂不是自相矛盾？这样建立的理论必然要导致不自洽。

观测者与波源之间有相对运动时，观测者测得的波频率与波源发出的波频率不同的现象。这一普遍物理现象是奥地利物理学家 J.C. 多普勒在 1842 年首先发现的。多普勒效应引起的频率变化称为多普勒频移。多普勒频移的大小与媒质、波源和观测者运动的速度有关。

经典多普勒效应在静止的媒质中，如观测者不动，而波源以匀速  $v_s$  沿与观测者的连线，向观测者运动，观测者测得的波频率为  $f^D = f c_s / (c_s - v_s)$ ，式中  $c_s$  是媒质中波传播的速度， $f$  是波源发出的波的频率。这个公式指出，测得的波频率  $f^D$  与源的波频率  $f$  不同。多普勒频移为  $\Delta f = f^D - f = f v_s / (c_s - v_s)$ ，即测得的波频率大于源的波频率。如波源沿与观测者连线相反的方向运动时， $v_s$  为负，即测得的波频率小于源的波频率。如果波源不动，观测者，沿与波源连线以匀速  $v_r$  向波源运动，测得的波频率为  $f^D = f (c_s + v_r) / c_s$ ，多普勒频移为： $\Delta f = f^D - f = f v_r / c_s$ ，测得的波频率也大于源的波频率。如观测者，沿与波源连线相反的方向运动时， $v_r$  为负，测得的波频率小于源的波频率。

当媒质、波源和观测者都在运动时，测得的波频率为  $f^D = f (c_s + v_M + v_r) / (c_s + v_M - v_s)$ ，式中  $v_M$  为媒质沿波源指向观测者的方向运动速度。如果波源或观测者的运动速度不沿着两者的连线方向，则上面各式中的  $v_s$  和  $v_r$  分别表示波源和观测者的速度在连线上的投影。

相对论性多普勒效应：在各向同性媒质中，无论什么参照系，电磁波（包括光波）都以确定的波速  $c$  传播， $c$  是真空中光速除以媒质的折射率（见狭义相对论）。因此它与声波的多普勒效应（属于经典的）有所不同。主要有以下三个方面。

① 对声波，源运动引起的多普勒频移一般与观测者以同样速度运动引起的频移不同；而对电磁波，多普勒频移仅与两者相对运动速度有关，而不论是源还是观测者在运动。

一个电磁波辐射源  $S$  以速度  $v$  相对观测者  $O$  沿与连线  $SO$  成  $\theta$  角的方向运动，观测者测得的频率为  $f^D = f \sqrt{[1 - (v/c)^2] / [1 - v \cos \theta / c]}$  式中  $f$  是源的波频率。

② 当波源和观测者运动的方向与两者之间的连线成直角时，声波没有多普勒频移；对于电磁波，由公式可知，是存在多普勒频移的。

③ 与声波不同，电磁波在媒质中传播时，观测到的波频率不受媒质运动的影响。

日常生活中容易观察到的多普勒效应如鸣着汽笛的火车快速驶过时，路旁的人所听到汽笛的声调，由低变高，然后又由高变低。又例如用光谱仪观测行星的光谱时，因行星与地球间的相对运动，可以看到行星的谱线，因多普勒效应而产生的频移。

多普勒效应有很多应用，如利用多普勒效应制成的流量计，可以测量人体内血管中血液的流速或工矿企业管道中污水或有悬浮物的液体的流速。还可以用多普勒效应测量人造卫星运行的速度和高度等。

笔者认为“多普勒效应”的本质就是时空平权的表现形式（距离的增加相当于时间的延长）：静止的观察者所接收到的发自运动光源的光频率  $\gamma$  与该光的固有频率  $\gamma_0$  的关系如下：①当光源的速度与观察方向之

间的夹角为 90 度时（横向多普勒效应）： $r = r_0 \sqrt{1 - \beta^2}$ ，“狭义相对论”理论认为此效应起因于运动光源的振动周期比静止光源增大。②当光源的速度与观察方向之间的夹角为 0 度（相互远离）或 180 度（相互

接近）时：第一种情况（红移）： $r = r_0 \sqrt{\frac{1 - \beta}{1 + \beta}}$  第二种情况（紫移）： $r = r_0 \sqrt{\frac{1 + \beta}{1 - \beta}}$ 。

## 8、space-time 平权的相对性

根据狭义相对论时间空间是不等价的，相对论只是揭示了时空是一个整体，时间和空间有联系。Einstein 的狭义相对论虽然把空间和时间统一起来，但是没有抹杀空间和时间的差别。对于四维 space-time，尽管 space-time 间隔的度规方程是按照空间度规为标准的，但符号的正负不定，是可变的，所以叫做符号不定的度规。狭义相对论的 space-time 就是符号不定的度规的 space-time。史蒂芬·霍金在《果壳中的宇宙》中说道：“我应该说，对于相信额外的维，我本人一直犹豫不决。但是，对于我这样的一名实证主义者而言，‘额外维的确存在吗？’的问题是没有意义的。人们最多只能问：具有额外维的数学模型能很好地描述宇宙吗？我们还没有不用额外维便无法解释的观测。然而，我们在日内瓦的大型强子对撞机存在观察到它们的可能性。



但是，使包括我在内的许多人信服的，必须认真地接受具有额外维的理由是，在这些模型之间存在一种所谓对偶性的意外的关系之网。”【1】

时间与空间既是对称的，又是不对称的，这是 space-time 对称性的相对性的表现形式。  
 $ds^2 = -c^2 dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2$  本身也反映了时空平权的相对性的问题，时间与空间并不完全对称，符号不同。遗传和变异分别是 space-time 对称的绝对性与相对性的表现形式。构成我们世界的 4 维不是完全对称的。我们都知道时间维和空间维是不一样的，时间只能不断向前，而空间上我们可以向任何一个方向运动。如果它们是完全对称的，我们就可以马上写下我们世界的距离公式： $d^2 = x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2$ 。但因为这种不对称性，我们好象不能这么写。考察所有已知的物理实验的结论和事实，似乎暗示我们正确的距离公式应该是： $d^2 = x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 - x_4^2$ 。在理性上完全无法解释为什么我们必须生活在一个 4 维不完全对称的世界中。在现实物理学中，时间与空间是两个完全不同概念的物理度量。如果我们用其中一个量替代另一个量，则从数学角度讲函数关系没有了，函数也就不存在了，从物理学角度讲没有了时间也就不存在空间的概念，同样，没有空间也无所谓时间了，所以它们是不能相互替代的。《自然杂志》19 卷 4 期的‘探索物理学难题的科学意义’的 9 7 个悬而未决的难题：9。为什么时间具有方向性？10。宇宙时是不均匀时间流吗？

参考文献：

【1】 吴忠超译〈果壳中的宇宙〉湖南科学技术出版社 2002 年 8 月版 54 页。

### 9、质能方程的 space-time 平权理论的推导

根据功的原理  $E=W=Fs=mas$ ，令  $E=1J$ ， $m=1kg$ ， $s=1m$ ， $a=1m/s^2$ ，得  $1J=1kg \times 1m/s^2 \times 1m=1kg \times m^2/s^2=1/b^2kg$ ，所以  $1kg=b^2J$ ，其中  $1(s)=b(m)$ ，即  $E=mc^2$ ，Einstein 的质能方程成立。质能方程的推导简化了，各种简化的形态是科学本身的基础，并且表现为认识过程得以实现的必要条件。质能方程也可以从单位换算中得到，能量的单位也可以用 kg 表示能量是 space-time 与实物粒子的相互作用，Einstein 的质能方程反映了 space-time 平权问题，揭示了 space-time 结构对物质的作用，与物质自身的性质无关，惯性质量在这里仅仅起比例常数的作用。

根据 space-time 平权理论可知，引力质量不仅意味着能量，同时意味着动量。假设一物体的引力质量为  $m$ ，那么它的引力动量应当为  $mc$ ，即  $P=mc$ ，不妨称之为引力动量方程，把静止物体的引力能量与引力动量称为绝对引力能量与绝对引力动量，它们都是数量。在物理学中所讲的引力能量与引力动量应当分别为它们的相对空间与相对时间形式。由于引力能量反映了引力质量的相对空间存在形式，相对空间各向同性，因此引力能量是数量。由于引力动量反映了引力质量的相对时间存在形式，相对时间各向异性，因此引力动量是向量。

质能方程的本质就是时空平权理论的反应，时空平权是狭义相对论理论的核心，这也说明了闵科夫斯基四维时空观点的正确。

## 第六章 狭义相对论的困难

### 1、物理学界对于狭义相对论的批判

相对论和量子力学的提出，是 20 世纪物理学的两个划时代的里程碑，相对论和量子力学理论以前所未有的深度改变了人们的世界观，然而由于它们的基本概念与人们日常生活经验如此不同，诞生伊始至今，对于相对论和量子力学原理的诠释存在持续不断的争论。由于理论的发展和认知理念的进步都应该遵从循序渐进的规律，而爱因斯坦却实现了一次大的跨越，在公众消化和接受他这些全新观念的过程中，出现一些偏差完全都是可以理解的。相对论和量子力学是近代物理学的两大理论支柱，它们的提出推动了人类科学技术的迅猛发展，可以预料再今后相当长的一段时间内，这两种理论还将会处于统治地位并得到进一步发展。但相对论提出后的近 100 年，一直受到不少人的反对，其中包括一些著名物理学家。但一种科学理论遭到如此多人的反对在科学史上还是少见的，托勒密的地心说尽管是一个错误的理论，但在当时它还是符合人们的直觉经验的，在逻辑上还是自恰的，用托勒密的地心说进行一些历法计算还是相当准确的。这个学说在统治人们一千多年的漫长历史过程当中，绝大部分人还是认同的，这说明托勒密的地心说具有可理解性。那么相对论为什么得到如此多人的反对呢？

(1) 英国国家实验室时间频率部主任艾森博士“物理学家对相对论的态度普遍是并不理解它，但它既获公认想必不会错。必须承认我过去也这样。”。

(2) 1972 年，英国伦敦大学科学史和科学哲学名誉教授 H. 丁格尔，他作为在学术界宣教相对论



的顶尖级的权威人物，自从在 1959 年突然意识到狭义相对论存在致命问题，便义无反顾地挺身而出进行反戈一击，与经他先前长期授道所造就的相对论痴迷者和“铁杆拥相者”麦克瑞 (McCrea) 进行了旷日持久的笔战，在论争无果的无奈情况下，最终发表了他的反相大著《科学在岔路口上 (Science at the Crossroads)》，向世人公开表明了他的反相观点，以及他对以爱因斯坦相对论为突出标志的理论物理学被扭曲的现状及其发展前景的愤慨与忧伤之情。

(3) 大多数物理实验学家如拉海利、艾弗斯、沙迪、格兰纽父子、马林诺夫和帕帕斯等都不认同相对论。

(4) 国际著名科学家、诺贝尔物理学奖折桂者阿耳文痛斥相对论“不过一小摆设”，“抹煞了科学与伪科学之间的界线”。

(5) 得克萨斯大学终身荣誉物理学教授伯纳斯称相对论是“一场灾难”，“是改变盲目迷信相对论的时候了！”

(6) 著名理论物理学家卢鹤绂院士耄耋之年冲破重重阻力，向世界推出“向 Einstein 挑战”的檄文后留有遗言：“一般编辑部不敢登这篇文章，他们迷信 Einstein，怕人家说他们不懂物理学。”卢鹤绂格物研究所所长，加拿大福特贸易公司总裁卢永亮于 2004 年 6 月 11 日在北京相对论研究联谊会首届年会上的讲话《挑战爱因斯坦相对论的前前后后》中指出，卢鹤绂院士在研究中发现爱因斯坦相对论有许多不足之处。

(7) 原国务委员、国家科委主任、全国政协副主席、中国工程院院长宋健大胆质疑 Einstein，呼唤青年科学家敢于创新：“整整 100 年前，Einstein 在他发表的那篇震惊世界科学界的关于狭义相对论的论文中，曾经提出过一句名言：不可能存在任何大于光速的运动。当今的科学界将此称为光障。然而，宋健说，这个外推至今并没有任何直接试验的证明。近年来航天技术的发展，已经促使科学家们细察和反思：为什么飞船不能超过光速呢？”【1】相对论将参考系作为整个物理学描述体系“基准”的这个“基准”建立在真空光速不变这个普通的物理学事实之上。在相对论的词典里，空间和时间只具有相对的意义，而真空光速不变则具有绝对的意义。真空光速不变是整个物理学描述体系的基准。当时，Kretschmann 对 Einstein 数学游戏的批评是：“普遍协变的假设对物理定律的物理内容没有提出什么主张，而只不过是关于它们的数学表述的一些意见而已。”Einstein 是和这个见解完全一样的。……“由于等效原理，引力只能唯一地通过  $g_{ik}$  来描述，而后者——( $g_{ik}$ ) 不是无关于物质而给定的，它们本身就是场方程所决定的。”(W·泡利著《相对论》第 202 页) Einstein 在 1922 年就真空光速不变原理写道：“相对论常遭指责，说它未加论证就把光的传播放在中心理论的地位，以光的传播定律作为时间概念的基础。然而情形大致如下：为丁赋予时间概念以物理意义，需要某种能建立不同地点之间的关系的过成。为这样的时间定义，究竟选择哪一种过成是无关重要的。可是为了理论只选用那种已有某些肯定解的过成是有好处的。由于麦克斯韦与洛伦兹的研究之赐，和任何其他考虑的过成相比，我们对于光在真空中的传播是了解得更清楚的”。

(8) 英国赫尔大学梅利·达宁-戴维斯教授指出当今物理学权威们固守于相对论的一般性理论，对于向狭义相对论提出的论据充分的科学异议，不是依科学的论据予以封杀，而是通过将 Einstein 教条地崇拜成越来越宗教化的偶像的方式予以封杀。著名理论物理学家韦斯雷博士说的对：“相对论时代已告终结”。

(9) 英国国家实验室时间频率部主任艾森博士：“物理学家对相对论的态度普遍是：并不理解它，但它既然获得公认想必不会错。必须承认直至近年我也一直这样。”他经过钻研，终于发现相对论“是自相矛盾漏洞百出的”。

(10) 著名的物理学家康特(W.Kantor)剖析了 60 多个相对论“实验验证”的第一手资料后认为：全都基于错误的方法或无效的逻辑。

(11) 毛泽东于 1974 年与李政道谈话时表示，他完全不能理解对称在物理学中会被捧到如此高的地位。毛泽东也反对相对论，还曾经成立过一个反相研究小组。

(12) 著名理论物理学家卢鹤绂院士耄耋之年冲破重重阻力，向世界推出“向 Einstein 挑战”的檄文后留有遗言：“一般编辑部不敢登这篇文章，他们迷信 Einstein，怕人家说他们不懂物理学。”

(13) 中国科学院力学研究所郑铨研究员从 1961 年就反对狭义相对论，自费出版多部反相对论专著。

(14) 航天工业部高级工程师，国际相对论问题专家许少知发表文章说：必须重新评价“相对论”。文中详细列举了反对相对论的种种理由。

(15) 1995 年，在美国匹兹堡世界应用物理大会上，5 千多位与会者的热门话题不是什么新发现或新发明，而是“物理学还有没有发展的前景？”1997 年在德国科隆物理学研讨会惊呼：“物理学正处在宛如开普勒三大定律拯救天文学之前夜”！1998 年在圣彼得堡由俄罗斯科学院等主办的自然科学基本问题国际学术会上，300 多与会者取得共识：当代科学基础理论问题严重，相对论漏洞百出……。

(16) 中国科学院物理所郭汉英研究员说过：“相对论体系存在有待验证的假定，基本原理不够完善，相互之间存在不协调；理论和时空观念都有需要改进之处。物理学并不是一个已完成的逻辑体系。相反，它每时每刻都存在一些观念上的巨大混乱。科学发展的历史正预示着，一场新的变革正在酝酿，并且迟早会到来，物理学正面临新的挑战、酝酿新的突破。”

(17) M.F.Maqie 前美国科学协会主席马吉认为：按照相对论的说法，时间和空间是由速度决定的，但速度又需要由时间和空间来确定，这里还存在着一个逻辑循环的毛病。我相信，现在没有任何一个活人真的会断言，他能够想象出时间是速度的函数。也没有一个活人愿意下这样的赌注：他坚持自己的“现在”是另一个人的“将来”，或是其他人的“过去”。

(18) 前苏联物理学家季米里亚捷夫说过：从物理学的观点来看，相对论理论至少也是健全的理智不能立即接受的。从 Einstein 中得出的符合实际的全部结论，能够而且常常成功地借助其他理论用简单得多的方法得到，而且这些理论丝毫不包含任何不可理解的东西，与 Einstein 理论所提出的要求也毫无相似之处。

(19) 象丁格那样相对论的反叛者越来越多，批评相对论的国际学术活动更是高潮迭起频繁有加；自然哲学联盟、非正统哲学联盟和物理促进协会等“非正统”学术团体一个个相继问世；批评相对论的学术期刊如 Galilean Electrodynamics, Apeiron, Hadronical Journals 和 Physics Essays 等犹如雨后春笋，批评相对论的学术论文专著势如潮涌。国际学术组织自然哲学联盟每年都在北美召开多次“向当代物理学和宇宙学挑战”学术报告会或研讨会。张元仲教授说：“他的几个推论是不能同时应用的，只能是-----也可以等价的用。”俄科学院等主办的批评相对论的国际学术会已连续举行了 6 届，一届比一届规模更大、更隆重……正如美国著名《能源》和《伽利略电动力学》杂志主编贝克曼(P.Becmann)教授所总结的：“从加拿大到南非，从欧洲到澳大利亚，从圣彼得堡到北京……相对论在‘空前成功’了近 90 年后仍遭到如此广泛的抵制”，声势之大为历史所未见。1971 年在 London 出版了《An introduction to the theory of relativity》一书，作者 W.Rosser【3】在书中多次说：“我们并没有声称狭义相对论是绝对正确的；在将来任何时候，它很可能又被某一个与实验结果符合得更好的新理论所代替”。2004 年 R.Bluhm【4】论述了“Lorentz 对称性的破缺”；而 A.Kostelecky【5】介绍说，科学家们仍在努力搜寻各种背离相对论的实例，即使是微小的偏离。也有激烈挑战的，例如英国理论物理学家 J.Magueijo【6】曾提出光速可变（VSL）理论。其实，几十年来批评相对论的大有人在，其中有一些是国际知名的物理学家【2, 7, 8, 9, 10】。

狭义相对论不能对径向多普勒效应做出合理的解释。多普勒现象是：光源远离观察者时光谱红移，迎向时则蓝移。相对速度愈大频移愈甚。**笔者认为径向多普勒效应可以从时空平权理论来解释，光源远离观察者时光谱红移——距离增大，相当于时间减缓，因此频率减少。**

(20)中国科学院高能物理研究所前所长、《高能物理与核物理》杂志总编郑志鹏研究员明确指出:对于相对论研究,应该允许有不同意见,让不同意见的人发表看法。我们提倡'百花齐放,百家争鸣'的方针,摆事实,讲道理,不抓辫子,不扣帽子,不打棍子,不进行人身攻击,这才是正确的态度。什么事情都应该讲究创新,那能够一成不变。对于相对论研究,也应该这样。只要拿出事实来,用实验来证明,有科学的依据,我们就应该承认。对于相对论不能说'不'字,这才是不正常的。

(21)《2010 年自然科学根本问题国际大会》主席安巴斯米尔诺夫教授的闭幕词有中肯的概括：麦克斯韦尔方程组具有伽利略变换的协变性，而对于爱因斯坦错误推导出的洛伦茨变换则不能保持协变；因此我们不需要洛伦茨变换。许多企图直接证明时间缩短和空间收缩的实验都得出否定的结果。必须建立全新的理论。爱因斯坦相对论带给物理学的最大损害之一是，许多物理学家用相应的数学概念混淆空间和时间。闵可夫斯基的人为的四维时空即将烟消云散。现代物理学的基础已经破碎，它的大厦正在垮塌。现代物理学正处于危机之中。这个危机比一百年前的危机还要严重。

论争百年的爱因斯坦相对论的正误问题，让一代代物理学界、哲学界以及非专职学术领域的莘莘学子为之呕心沥血而又茫然若失——无论是主流学派还是非主流学派人士都深受困扰而又难以释然，这种不即不离、难分难解的局面和学术纷争硝烟弥漫的景象随着网络时代光临全球，这方面的论争与较量更趋白热化……之所以如此，其原因就正如爱因斯坦本人早在 1921 年接受一家荷兰报纸记者采访时所说的：“无论在这儿，还是在那儿，人们根本不理解我的理论，这难道不会对我有一个很愚蠢的印象吗？我相信，真正吸引他们的是不理解所带来的神秘性；这使他们印象深刻，因为它具有神秘的诱惑力。”【11】

#### 参考文献:

- 【1】孔晓宁。天赋人贵——聆听宋健院士一席谈。人民日报海外版,2005 年 01 月 12 日,第二版。  
 【2】Davies P, et.al. Cosmology: black holes constrain varying constants[J]. Nature, 2002, 418: 602-603.  
 【3】Rose W G V. An introduction to the theory of relativity[M]. London: Butterworths, 1971; 中译本: 岳曾元、

关德相译, 相对论导论。北京: 科学出版社, 1980。

【4】Bluhm R. Breaking Lorentz symmetry[J]. Physics World, 2004, 17 (3) : 41~46.

【5】Kostelecky A. The search for relativity violations[J]. Scientific American, 2004, (9): 74~83; 中译: 武晓岚译, 找相对论的碴。科学, 2004, (11) : 67~75。

【6】Magueijo J. Faster than the speed of light[M]. Perseus Publishing, 2003. 中译本: 郭兆林译, 比光速还快[M]. 台北: 大块文化出版公司, 2004。

【7】Dingle H. The case against Special Relativity[J]. Nature, 1967, 216: 119~122.

【8】Dingle H. Science at the crossroads[M]. London: M. Bryan & O'Keefe, 1972.

【9】Essen L. The error in the special theory of relativity[J]. Nature, 1969, 217: 19.

【10】Essen L. The special theory of relativity, a critical analysis[M]. Oxford: Oxford Univ. Press, 1971.

【11】John D. Barrow. 作为图标的爱因斯坦【J】//爱因斯坦与物理百年(year of physics a celebration in chinese)。北京: 北京大学出版社, 2005: 13。

## 2、狭义相对论天空的“两朵乌云”

爱因斯坦把物理理论分为“构造理论”和“原理理论”。他认为: 原理理论“应用分析而不是综合的方法。其出发点和基础不是假设的要素, 而是经验上观察到的现象的一般性质、一般原理; 从这些性质和原理导出这样一些数学公式, 使其用于每一自身出现之处。”“原理理论的优点, 是它们逻辑上的完善, 和它们基础的稳固。”“相对论是一种原理的理论。”(《时间、空间和引力》)但是, 相对论体系其实却包含着许多重要的“假设要素”。

狭义相对论天空存在着“两朵乌云”, 这是Einstein发现的: 第一朵乌云——在狭义相对论中, Einstein采用了“欧氏几何对于确定绝对刚体的空间位置是正确的”这个假设, 并采用了惯性系和惯性定律, 从而给出力学相对性原理。因此在力学相对原理的推论中起着基本作用的是绝对刚体的概念。欧几里得几何学公理之一: 几何图形、几何体可以在空间中移动, 但是它们的形状和大小是绝对不变的。这意味着, 几何图形、几何体具有刚性, 几何图形、几何体内任意两点的距离始终保持不变, 几何图形、几何体内各点相对静止。Einstein认识到运动体系具有时空特征, 使物理学的发展更进一步, 可惜他的思想受“绝对刚体的概念”的制约, 以至发生判断性的失误, 即若以运动体系为参考系, 则该体系原有的时空特征将消失得无影无踪——相对性假说。这个重大的失误把“运动质点具有时空特征”的概念推到非心非物的唯心主义泥塘中, 因而所得的结论也是个真实与表观的混血儿; 也正是这个失误使得近代物理学自相对论及量子力学后进展十分迟缓。1923年, Einstein提交哥德堡北欧自然科学家会议的报告中曾经指出, “在力学相对性原理的推论中起着基本作用的是绝对刚体的概念”; 并且他还意识到, “把全部的物理研究建立在绝对刚体的概念上, 然后又用基本的物理学定律在原子论上再建立刚体的概念, 而基本的物理学定律又是用绝对刚体的概念建立起来的, 这在逻辑上是不正确的。我们之所以指出这种方法论上的缺欠, 是因为这种缺欠也同样存在于我在这里所概述的相对论中”; 同时他也承认, “由于我们还没有充分认识大自然的基本规律, 以致不能够提出一个更为完善的方法来解脱我们的困境”。

1923年, Einstein提交哥德堡北欧自然科学家会议的报告中又意识到这种做法有着缺欠, 而且这个缺欠存在于整个相对论中。是的, 把全部的物理学研究建立在绝对刚体的概念上, 然后又用基本的物理定律在原子论上再重新建立刚体的概念, 而基本的物理定律又是用刚体的概念建立起来的, 这在逻辑上是不正确的。同时他也承认, “由于我们还没有充分认识大自然的基本规律, 以致不能够提出一个更为完善的方法来解脱我们的困境”。可惜的是, 一直到他去世也没有找到解脱这个困境的办法。这个问题就这样挂起来了, 而且一挂就是近百年。爱因斯坦沿用了牛顿力学关于“刚性量杆”服从欧氏几何的假定。这是一个非常重要的“假设要素”, 相对性原理就包含着这个“假设要素”。我们知道, 几何源于测量。我们还知道, 在几何公理体系下, 只要把欧氏几何的第五公设稍加改动, 我们就有另外两种与之几乎完全平权的几何: 罗巴切夫斯基几何与黎曼几何。对于这两种几何, 同样可以引入进行测量的“刚性量杆”。只不过, “刚性量杆”的长度与坐标距离之间的关系不再是欧氏关系, 而是相应的非欧关系而已。这样, 选取欧氏“刚性量杆”, 而不是罗氏或者黎氏“刚性量杆”就是一种“假设的要素”。其实, 高斯和罗巴切夫斯基都曾经做过大尺度的测量或者天文观测, 以求得到大尺度的三角形内角之和是否为180度, 也就是说, 是满足欧氏几何还是非欧几何。只不过, 在一定精度下, 他们的结果仍然是180度。然而, 在原则上, 这个“假设要素”的真伪, 是可以由实验或者观测加以判断的。

第二朵乌云——在狭义相对论中, 任何事物都随观察者的不同而不同。它还包含下面两层意思: 一个是每个观察者都只承认自己的结论正确, 其他观察者的结论不正确; 另一个是所有观察者都对。想在两个观察



者中决定谁是正确的，既没有经验上的方法，也没有理论上的方法。这就是相对论的相对性。很明显，这个观点与经典天体力学中的观念相矛盾。

“Einstein 自从量子力学革新了物理学中的思想方法以后，到他逝世为止，一直想要保持经典天体力学中的观念，即一个系统的客观物理状态必须跟观察它的方式完全无关。虽然 Einstein 坦白地承认，他对这方面达成一个完整的解答的希望到目前为止尚远未满足，而且他还没有证明这一观点的可能性，他认为这是一个有待解决的问题。（W.泡利的《相对论》补注 23）” 不排除相对论与其它学科的认识存在严重矛盾的情况。也许在过去我们过多地在相对论中自言自语，缺乏与其它学科认识的比较研究。或者说相对论的革命并不彻底普遍，在相对论中推翻了的观念在其他学科中依然成立，这必然导致矛盾冲突。

### 3、对于光速不变性原理的争论

在相对论中最难理解的莫过于真空光速不变原理了，其实这一原理是正确的：只要将那个运动的坐标系不要看成绝对坐标系，而是一种运动着的物质系统，光进入该系统后，由于光子与该物质系统内的某种更为细腻的物质——真空量子相互作用，使得光依然以光速运动，也就是说光子与它产生相互作用的邻域真空是一个不变量，这就是真空光速不变原理（请参考：广义相对论引论，王仁川，合肥：中国科学技术大学出版社，1996年）。

有人总结说：20 世纪初物理学上空的“两朵乌云”，不仅未消，如今反倒平添了许多。A.Einstein 与波尔（N.Bohr）关于量子力学那场辩论给人们留下了深刻的印象，A.Einstein 对量子力学的主要指责是其关于物质规律的描述是不完备的，可是当我们考察狭义相对论时（以下简称相对论），会产生一种与 A.Einstein 当年看待量子力学时相似的感觉，即相对论存在有某种过多地人为任意性，而并非大自然的本来面目。具体而言，这是指 A.Einstein 本人也不得不承认的“相对论常遭指责，说它未加论证就把光的传播放在中心理论的地位，以光的传播定律作为时间概念的基础”；另外还指他也意识到的光的传播定律与相对性原理的抵触。

在爱因斯坦的光速不变原理中，包含了另外一个重要的“假设要素”：单程光速不变。有关“以太漂移”以及光速测量的所有实验的分析表明，作为“经验上观察到的现象的一般性质、一般原理”而言，不包含重要假定的原理应该是“空间闭合回路的平均光速不变”，或者“往返平均光速不变”。其实，要测量“单程光速”，必须把在起点和终点的钟事先对好；然而，用什么来对钟呢？如果不采用其他假定，就只能用光讯号。但是，要测量的就是单程光速，于是这就陷入逻辑循环。爱因斯坦当然非常清楚这一点。如何解决呢？他认为，必须采取“约定”。其实，“约定”就是一种基于实验，而又高于实验的“假定”。有没有实验可以验证这个“假定”的真伪呢？至少到目前还没有！除了上述这两个重要的“假设要素”之外，狭义相对论中还存在其他“假设要素”。和牛顿力学一样，狭义相对论的基础也是惯性系和惯性运动的存在。无论在洛伦兹-彭加勒的理论中，还是在爱因斯坦狭义相对论中，都无法解决惯性运动和惯性系的起源。在理论上，这正是爱因斯坦突破狭义相对论，发展广义相对论的重要原因之一。物理理论必须在其建立的过程中，在所需要的一系列循序渐进的推理过程中处处都应该符合逻辑，反向推演的过程也应该处处能合理解释。即使这样，这也不能保证这个理论的正确，还必须经过实验的验证。

有人认为：在狭义相对论中光速只是作为传递信号的速度出现的，没有用到光的任何特殊性质。如果将传递信号的速度由光速改为声速，将基本假设中的真空光速不变原理改为声速不变原理：在彼此相对作匀速直线运动的任一惯性参照系中，所测得的某一特定状态的物质中的声速都是相等的。将公式推导过程中的光信号改为声信号，光速改为声速，那么就会得出任何物体的速度不能大于声速的结论，这种荒谬是十分明显的。子弹的运动速度超过声速、飞机的速度可以超过声速。正常情况下，人可以用眼睛通过光线来研究和了解世界，而盲人和蝙蝠则依赖声波来研究和了解世界。如果狭义相对论是正确的话，那么盲人和蝙蝠就会得出任何物体的速度不会大于声速的结论。其实这种观点是错误的，原因如下：1、只有光不需要依靠介质来传播，能在真空中传播的只有光，而声音的传播严重地依赖介质，在星际空间（它还并非是真空中！），声音无法传播！从而，对于星空的观测和探测，只能依靠光！2、通常光速远高于声速，光的频率远高于声音，作为测量信号，其测量精度、分辨率远高于声音；3、光速的稳定性也远胜声音：光在空气中的传播速度与在星际空间的传播速度几乎是一样的；而声音在空气中的传播速度受气压、湿度和温度的影响。4、人是陆生生物，在陆空中光传播远而快，衰减小，声音则相反。故人体发展的光探测器——眼睛，其灵敏度、分辨率远高于声探测器——耳朵：通过光，眼视可以正确判别颜色、方位、远近、大小，物体的种类、性质、状态，甚至判别其运动速度；而通过声音，耳听仅能大致判别声源的方位、远近，物体的种类、性质。作为物理测量，人类选用光而不是声音是必然的。通过望远镜和粒子探测器、光电探测器，人类在不断探测广阔的宇宙空间奥秘；通过显微镜、粒子探测器、云雾室、胶片摄影，人类在不断探测微观世界的奥秘，不用光，而用声音，行吗？！用文字保存、传播人类的文明（包括科学），远距离（包括星际）传输信息，不用光，



而用声音，行吗？！甚至生命体内部的信息传递和控制依赖的也是电磁信息（神经电脉冲和化学信息），而非声信息！盲人的听觉比视力正常的人的听觉是要强，但绝不会有蝙蝠那么好！在光线充足的场合，盲人从声信息获得的信息绝对不会比视力正常的人从视觉获得的光信息那么丰富，这就是为什么盲人总希望自己有一双正常的眼睛来观察世界！

Einstein 认为应该假设每一个空间点都有一个时钟，但这仍与真空光速不变原理相互矛盾。作出保持真空光速不变的同时面是不可能的，因此相对论的真空光速不变退缩到局域。相对论的弯曲时空并不能通过曲线坐标反映出来，因此每一点有一个时钟，仍然不能表示相对论的四维弯曲时空。相对论没有自恰的时空，广义相对论用的坐标系还是经典坐标系，即用一个时钟表示时间，而且没有 Lorentz 时空变换的坐标系。著名物理学家康特（W. Kantor）剖析 60 多个实验的第一手资料后有结论：全都基于无效的逻辑或错误的方法。

光速问题的争论还将无休止纠缠下去，如不过好三道坎：（一）、电动力学问题与光行差、多普勒效应等一类“纯观察”现象不同，属动力学，因而是无法用狭义相对论来解决的。因此，电动力学的所有实验都不可作为这一“原理”的“验证依据”。史实表明，“质速关系”和“质能关系”等早已在 1905 年前出现；（二）、迈克尔逊-莫雷（1887）实验只是否定以太论并证实：在光源所在的参照系中光速各向同性总为  $c$ ，但不能证实相对于一切惯性系都各向同性总为  $c$ ；（三）、德·西特关于光速与源速无关的著名双星观察论据，有严重的逻辑漏洞，是不可为据的。甚至连大多数的相对论支持者都承认迄今尚未实验观察到 Lorentz 收缩：“一涉及广延体就出问题……相对论性静力学、热力学、流体力学，至今尚未建立令人满意的理论框架。”由于相对论是在假设真空光速不变，从 space-time 关系出发推出运动物体相对性效应的，而引起真空光速不变的真正原因却没有交待。这种从“关系”到“事物”的理论隐藏着严重的缺陷。人们围绕这“真空光速不变”“Lorentz transformation”展开了激烈的争论。

**笔者认为光速不变性原理不可能在狭义相对论框架内解决，前面笔者提出了光速不变性原理有一定的实验基础，后面笔者将分析正是引力的传播速度是定值  $c$ ，才决定了光速是  $c$ 。**

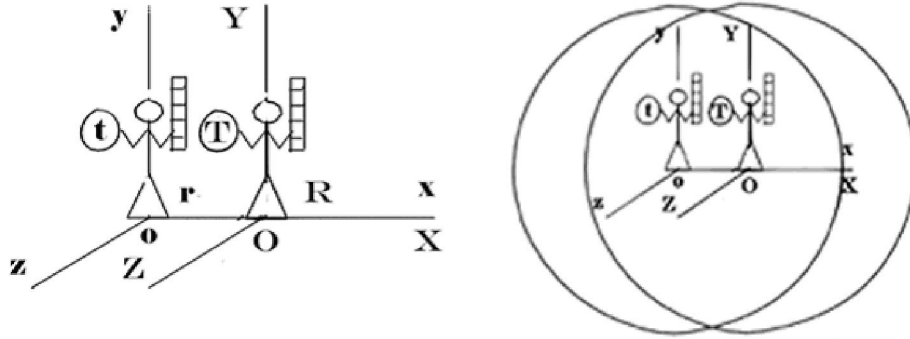
相对论认为，光速和源速无关，和测量光速者的运动速度无关，这要求光速必须是无穷大，也许正因为如此，爱氏坦言“光速在我们的物理理论中扮演着无限大速度的角色”【2】1905 年，Einstein 在德国《物理学纪事》杂志上发表《论动体的电动力学》论文，提出了狭义相对论。狭义相对论是以两个前提假设为基础提出来的。“以下的讨论将以相对性原理和真空光速不变原理为依据。这两条原理我们定义如下：①物理体系的状态基以变化的定律，同这些状态的变化是以两个彼此作相对匀速运动的坐标系中的哪一个为参考，是无关的。②任一条光线在“静止的”坐标系中都以确定的速度  $V$  运动，不管这条光线是由静止的还是由运动着的物体发射出来的。【3】电磁波在真空中的传播速度等于电量的电磁单位与静电单位的比值。

Einstein 真空光速不变原理的原话是：“诸如此类的例子，以及企图证实地球相对于‘光介质’运动的实验的失败，引起了这样一种猜想：绝对静止这个概念，不仅在力学中，而且在电动力学中也不符合现象的特征。倒是应当认为，凡是对力学方程适用的一切坐标系，对于上述电动力学和光学的规律也一样适用。我们要把这个猜想提升为公设，而且还要引进另一条在表面上看来同它不相容的公设：光在空虚空间里总是以一定的速度  $c$  传播着，这速度同发射体的运动状态无关。由这两条公设，根据静止物体的麦克斯韦理论，就足以得到一个简单而又不自相矛盾的运动物体电动力学。”

Einstein 提出的真空光速不变有两种假设，一种是假设光波在空间中的传播速度与光源运动状态无关；另一种假设是光波相对观测者的传播速度与观测者运动状态无关。这两种假设紧密相连，接受前一种假设，就必须承认后一种假设，反对后一种假设，也就必须否认前一种假设。

Einstein 的狭义相对论作为出发点的基本前提是：静止状态与恒速运动状态并不能由这个系统或那个系统的观测者用任何电磁学或者力学的实验进行区分。狭义相对论的内容可以归结为一句话：一切自然定律必定受到这样的限制，使它们对于 Lorentz transformation 都是协变的。在狭义相对论中，Einstein 还给出了真空光速不变假定的如下数学形式：设有相对作匀速直线运动的两个运动参照系  $r$ 、 $R$ （以下简称为  $r$ 、 $R$  系、参见图二）， $r$ 、 $R$  系分别由直角坐标系  $oxyz$  和  $OXYZ$  构成，两个直角坐标系的  $x$ 、 $X$  轴重合， $y$ 、 $Y$  轴和  $z$ 、 $Z$  轴均平行， $r$ 、 $R$  系在  $x$ 、 $X$  轴方向以一定的速度匀速远离，在两个坐标系原点  $o$ 、 $O$  分别有持时钟和量尺的观测者， $r$ 、 $R$  系的观测者使用自己的时钟和量尺测得的  $r$ 、 $R$  系远离速度均为  $u$ 。

在上述情况下，Einstein 继续假定，在两个坐标系原点  $o$ 、 $O$  重合， $r$ 、 $R$  系观测者所持时钟时间  $t = T = 0$  时，在  $r$  系原点  $o$  处有一个点光源发出了一个球面光波，这个球面光波以光速膨胀为球形。在球面光波膨胀过程中， $r$ 、 $R$  系的观测者各自使用自己的时钟和量尺测量球面光波的膨胀运动。



图二 爱因斯坦给出光速不变假定的情况

在这种情况下，r 系观测者测得的球面光波运动情况是：球面光波以光速 C 膨胀为球形，在球面光波膨胀过程中，球面光波的球心始终是 r 系的原点 o 点。在 r 系观测者所持时钟显示的时间为 t，r 系观测者使用量尺测得的球面光波任一点坐标为 x、y、z 的情况下，r 系观测者使用时钟和量尺测得的球面光波膨胀运动可以表述为如下数学方程

$$x^2 + y^2 + z^2 = C^2 t^2$$

与此相应，R 系观测者测得的球面光波运动情况是：球面光波以光速 C 膨胀为球形，在球面光波膨胀过程中，球面光波的球心始终在 R 系原点 O 点。在 R 系观测者所持时钟显示的时间为 T，R 系观测者使用量尺测得的球面光波任一点坐标为 X、Y、Z 的情况下，R 系观测者使用时钟和量尺测得的球面光波膨胀运动可以表述为如下数学方程

$$X^2 + Y^2 + Z^2 = C^2 T^2$$

以上两个数学方程就是真空光速不变假定的数学形式。

在给出了上述真空光速不变假定的数学形式之后，以之为基础，Einstein 推理出了 Lorentz 变换，也就是 r、R 系的坐标变换关系和时间变换关系：

$$\begin{aligned} X &= \gamma(x - ut) \\ Y &= y \\ Z &= z \end{aligned}$$

$$T = \gamma \left( t - \frac{ux}{C^2} \right)$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{C^2}}}$$

Einstein 对 Lorentz 变换给出的解释是：对于一个点物理事件，在 r 系研究者使用本系时钟和量尺测得的物理事件的坐标和时间为 (x, y, z, t) 的情况下，R 系研究者使用本系时钟和量尺测得的物理事件的坐标和时间为 (X, Y, Z, T)，(x, y, z, t) 和 (X, Y, Z, T) 的量值关系由上述 Lorentz 变换给出。

厄瓦耳(Ewald1912)和俄辛(Oseen1915)的消光定理(Extinction theorem)认为：一个从真空中的以光速 c 传播的入射电磁波进入色散媒质内，那么它的场就被感生偶子场的一部分所抵消(从宏观角度上看也就是被电极化强度 P 的一部分抵消的。且被另一个波所代替，这个波以表征媒质的相速度传播，入射波因干涉而消失，数学分析得知对这个过程是在有限的一段距离上发生的，由于真空波和媒质波有着不同的相速度，两者经过这段距离之后就会有明显的位相差，当频率为  $\omega$  时，相位差是  $\Delta \phi = \omega(n-1)x/c$  式中 n 为折射率，x 为这个距离。这里请你们要注意的是，入射波是干涉消失的，而不是吸收，所以，在这里我们讨论的是相位！因为计算难度和相对复杂性，在这里我们给出一些数据：对于 n 约为 1.5 的玻璃和波长为 650nm 的可见光得出的消光定理距离约为  $2 \cdot 10^{-7} \text{m}$ ；对于空气中的 1MeV 的  $\gamma$  射线消光定理距离约为 0.73m；而可见在星际空间传播时的消光定理距离则长达 2 光年左右。从上面的各种情况下的消光定理距离可以看出，不管光离开其光源时速率多大，由于媒质的介入，一个新的扰动来替代他，这个扰动的频率与光原光频率相同，但却以媒

质的特征相速度来传播。这时，对媒质的光学性质进行修正以后，相对于媒质静止的观测者测得的光速都将等这种媒质中的光速，使得源的运动和光相对于源的速率无关。这样就使得关于 Einstein 第二个设定的所有早期实验和许多近代实验的验证全部因为消光定理而失效。1964 年，瑞士日内瓦的欧洲联合核子研究中心，高能中性  $\pi$  介子衰变中产生的 6KMeV 光子，测量 80M 路上的飞行时间来确定这里光子的速率， $\pi$  介子是用 19.2KMeV 的质子轰击铍靶产生的，他们的速率是  $0.99975C$ ，这个速率是由同一事件的带电  $\pi$  介子速率推算而来的，利用射束的 r-f 结构来计时。得出源速相当快、甚至接近光速时发出的光子速率依然是  $C$ ，实验误差在  $1.3 \times 10^{-4}$  左右。实验是把以速度  $v$  运动的氢离子做为运动光源，通过观测运动氢离子沿与  $v$  成  $a$  角方向和沿  $180^\circ+a$  角方向上辐射电磁波的波长，则可知道这两背向传播电磁波波长的乘积与观测角  $a$  之间的关系，实验若证实两波长的乘积与观测角  $a$  变化有关，则可肯定真空光速不变假设成立。相反，若实验证实两波长的乘积是与观测角  $a$  的改变无关，实验结果就应看做是支持  $c = c(1-(k_0 \times u/c)^2)^{1/2}$  式成立的证据。

1938 年，Ires—Stuwell 所做的氢极隧射线实验与上述实验有区别，他是把沿  $180^\circ+a$  角方向传播的光线用反射镜反射  $180^\circ$  后，在同一侧同时观测两电磁波的波长。如果真空光速不变假设成立，应观测到两波长的平均值与氢离子静止时辐射电磁波的波长之比等于  $1+v^2/2c^2$ 。如果  $c = ck_0 \times u$  式成立，应观测到两波长的平均值与氢离子静止时辐射电磁波的波长之比应等于  $1+v^2/2c^2-v^2 \sin 2a/4c^2$ 。Ires—Stuwell 所做的实验是观测角  $a$  约为  $7^\circ$  时的结果，对于此角度而言，实验结果也并非与  $1+v^2/2c^2-v^2 \sin 2a/4c^2$  相矛盾。因此，必须在  $v$  一定时验证两波长的平均值与  $a$  之间的关系，而不是在  $a$  较小时验证两波长的平均值与  $v$  之间的关系。否则，就不能说真空光速不变假设已被实验所证实。“各种检验真空光速不变性的实验都只证明了回路光速的不变性，并没有证明光速的不变性。”【1】由于几乎所有实验都包含光的往返，由于存在着抵消，不能消除光速方向上的差异。按经典理论我们可以说光在不同密度介质中传播速度不同，但是这个不同绝对不是光的传播速度改变了，而是光的传播方向改变了，使光在原来传播方向上的分速度改变了。

#### 参考文献:

【1】张元仲 著《狭义相对论实验基础》（科学出版社，1979 年 9 月第一版，第 19~20 页）。时至今日仍然未见有证实真空光速不变的实验报道。

【2】[美] 约翰·施塔赫尔编，Einstein 奇迹年，范岱年等译，上海：上海科技教育出版社，2001，106—107。

【3】德国《物理学纪事》1905 年第 4 系列第 17 卷第 895—921 页，参见蔡怀新等编译《Einstein 论著选编》，上海人民出版社，1973 年。

#### 4、对于 Lorentz transformation 的争论

爱因斯坦所说：每个重大进展都带来了新问题，揭露了更深的问题。对于物理学发展起奠基作用的伟大理论，我们有这深厚的情结，如牛顿的引力定律，爱因斯坦的相对论，然而随着理论的发展，物理理论危机也不断涌现，甚至有不少过去认为正确的理论，成为需要重新考虑的问题。如库恩所说，危机是新理论出现的前提条件。我们需要发挥创造性来建立新的理论。科学是一本写不完的书。

众所周知，狭义相对论仅仅从真空光速不变原理与相对性原理出发。展开了狭义相对论的空间时间变换、相对论力学（核心是质速关系与质能关系）、相对论电动力学，其最重要的不变性是 Lorentz 变换下的不变性。此不变性贯串于狭义相对论的始终，使狭义相对论成为高度协调一致的优美的物理理论。然而，事有一利者必有一弊，数理逻辑的 Gödel 第一不完全性定理告诉人们，一个包含初等数论和一阶逻辑的形式系统  $P$  如果一致，则  $P$  一定是不完全的，一定至少存在一个不可证明的命题  $A$ ， $A$  与  $\neg A$  在  $P$  中都不可证明。由于狭义相对论自始至终坚持 Lorentz 变换下的不变性，按照 Gödel 定理，它必不完备，其中至少存在一个命题  $A$ ， $A$  与  $\neg A$  在其中不可证明。

倪光炯在《近代物理》中指出：“声波在空气中的传播速度，不管发声体的运动状态如何，这个声速在静止的空气中朝各个方向传播的速度都是 330m/s。当我们站在静止的空气中，声源朝着我们运动时，声调变尖，即声波频率升高；而当声源离开我们运动时，声调变得低沉，即声波频率降低。这种现象叫做多普勒效应。但是，不论哪一种情形，声波的传播速度  $w$  是一样的。如果换一种布置，声源静止在空气中，而我们自己朝着（或离开）声源以速度  $v$  运动，听到的声音变尖（或低沉），这时的多普勒效应一样，但是我们测量相对于我们的声速却变了，前一种情况是  $w+v$ ，后一种情况是  $w-v$ ”。

由于光速对所有惯性系不变的要求，描述惯性系（1+3）伪欧氏空间是 Minkowski 空间，惯性系之间的 space-time transformation，即 Minkowski 空间中的 space-time 坐标变换只能是 Lorentz transformation。如果考虑两空间的 space-time 原点不重合，则它们之间是 Poincare transformation。虽然相对论成功地解释了一些物



体高速运动现象,但是它所推出的相对性效应的关系式却是一个发散型函数,在运用到物理实验过程中却总是出问题。例如,在确定高速运动粒子能量时,总会遇到能量发散的困难,以后虽然用重新定义静止质量的办法,通过“重整化”避免了危机,但这种数学形式上的弥补,只是掩盖了表面矛盾,物理实验中的真实矛盾并没有解决,如:量子色动力学(QCD)理论预言,在极端相对论性的原子核碰撞中会产生高温高密夸克-胶子等离子体(QGP),众多国家花大力投入了实验探索。最近却发现理论和实验研究中“还存在着诸多不确定因素”。QGP 是否存在还是个问题。狭义相对论中相对性的原理虽然可以确定两个惯性参照系的地位是等同的,也可以确定任何一个惯性参照系都可以作为时间测量的标准,但是从这一任意的标准参照系去进行实际观测另一个惯性参照系的时间,我们没有任何的理由确定这两个参照系中的时间单位一秒就是确定的恒值,而没有差异。

**笔者认为后面通过把引力质量和电磁质量区分开来,可以成功地解决这个矛盾,电磁质量不满足笔者认为 Lorentz transformation。**

相对论性重离子碰撞实验中出现的种种困难,最终归结为:“碰撞中发生了 Lorentz 收缩吗?”“如何检验?”70 年代提出“惯性约束”,用强激光引发微热核聚变。20 多年过去,最近的实验结果是:现有最佳装置的中子产出额远远低于理论估计值。问题竟是:“熵不守恒时相对论性流体力学方程”究竟应该取什么形式?【1】

根据洛伦兹变换运动的长度在运动物体方向上收缩是指四维物体的是收缩,迈克尔逊的光干涉实验已经证实了这一点。不要推广它的适用范围的原因:第一、四维洛伦兹变换和光速、以及真空光速不变紧密相连。它可以直接脱胎于电磁学,法国彭加勒是第一个给出该变换的人。真空光速不变——它的物理意义就是表述大范围的电磁空间是零曲率的空间。第二、四维洛伦兹变换不能适用于引力方程。洛伦兹变换几乎征服了物理学现有的每一个分支,就是偏偏征服不了引力学。20 世纪 30 年代后随着非线性和分维物理学分支的迅速广泛崛起,洛伦兹变换均被挡在门外。进一步地研究也发现引力空间是最简单的非线性空间——即不等于 0 的负曲率的空间。这样才划定了洛伦兹变换的适用范围是所有零曲率的空间的物理学分支。

中国科学院理论物理研究所的郭汉英教授认为:“对于这些惯性坐标系而言,没有自身优越的速度、时间没有方向性等等。对于我们的实验室而言,只要根本不管引力和宇宙学效应,Minkowski 时空和 Poincaré 不变性就是相对论性物理学的理论和实验分析的框架。所有实验,只要不涉及引力和宇宙学,与此符合得非常好。”“然而,如果在这个实验室中又要进行与引力效应有关的实验、进行天文观测或者进行与宇宙背景有相互作用的实验——而且恰恰就是要测量这些相互作用的效应,那么,这类实验室中的观测者就同样会发现:河外星系红移表明宇宙在膨胀,而宇宙膨胀给出了时间箭头;微波背景辐射大体上可以代表宇宙背景空间的性质,不过要扣除我们的实验室相对于微波背景辐射的漂移。对于这类与宇观效应相关的实验和观测的结果的分析必定表明: Einstein 的狭义相对性原理对于这类效应不再成立;时间反演和时间平移不变性不再存在。”

**笔者后面将要分析大爆炸理论是错误的,微波背景辐射需要重新分析,这样该矛盾就迎刃而解了。**

参考文献:

【1】庄一龙。《世界上严肃的科学家冷眼看待相对论》。

## 5、Lorentz transformation 的困难

《自然杂志》19 卷 4 期的‘探索物理学难题的科学意义’的 97 个悬而未决的难题: 5.1。双生子佯谬能否解决? 5.2。穿洞佯谬能否解决? 5.3。滑落佯谬能否解决? 5.4。柔绳佯谬能否解决? 5.5。直角杠杆佯谬能否解决? 5.6。静止长度上限佯谬能否解决? 5.7。运动物体视在形象佯谬能否解决? 5.8。长度缩短的应力效应佯谬能否解决?

中国科技大学物理学教授沈惠川认为:“在讨论狭义相对论问题时,不能有加速度,否则就要用广义相对论来处理。de Broglie 早在 1924 年他的博士论文中就已说过,在相对论问题中犯傻的人中,有许多就是将广义相对论中的问题与狭义相对论问题搅合在一起,而浑然不觉的。例如,双生子悖论问题中,就涉及到加速度(吴大猷等前辈早就讨论过这个问题)。再如,有人老是说在地球的这个地方测得的光速,与在地球的那个地方测得的光速不同,诸如此类;殊不知,建立在地球上的所有坐标系都不是惯性系,都是有加速度的,都不在狭义相对论讨论的范围之内!”在科学史上,没有一个理论会象相对论那样产生那么多的“佯谬”,如 twins paradox、柔绳佯谬、直角杠杆佯谬、艾伦菲斯特(Ehrenfest)佯谬、哥德尔(Gödel)佯谬等。【3】量子色动力学(QCD)理论预言,在极端相对论性的原子核碰撞中会产生高温高密夸克-胶子等离子体(QGP),众多国家花大力投入了实验探索。最近却发现理论和实验研究中“还存在着诸多不确定因素”。QGP 是否存在还是个问题。相对论性重离子碰撞实验中出现的种种困难,最终归结为:“碰撞中发生了洛伦兹收缩吗?”



“如何检验？”70年代提出“惯性约束”，用强激光引发微热核聚变。20多年过去，最近的实验结果是：现有最佳装置的中子产出额远远低于理论估计值。问题竟是：“熵不守恒时相对论性流体力学方程”究竟应该取什么形式？拟用超导超级对撞机“模拟宇宙大爆炸的时空和物质状态”，为的是“验证”由相对论衍生出来的宇宙爆炸理论。花几百亿美元巨资猜的这个谜还是离不开相对论。直接观察时钟速率变慢的实验是在1971年海弗尔和凯汀用原子钟完成的。他们把铯原子钟放在飞机上，分别向东和向西绕地球飞行一周后，返回地面与一直静止在地面上的原子钟比较读数，发现向东飞行的原子钟慢了59毫微秒，向西飞行的原子钟快了273毫微秒。在这个实验中，飞机上的原子钟，在飞机飞行过程中处在地球上空的不同高度，即处于不同的引力势。因此，原子钟的速率变慢的数值包含着地球引力势差引起的引力红移效应。把这种引力效应扣除之后，这个实验的结果与狭义相对论的时间膨胀预言符合，精确度接近10%。（摘自自然杂志1979年2卷2期76页作者张元仲）

1. 双生子佯谬 在1911年4月波隆哲学大会上，法国物理学家P.朗之万用双生子实验对狭义相对论的时间膨胀效应提出了质疑，设想的实验是这样的：一对双胞胎，一个留在地球上，另一个乘坐火箭到太空旅行。飞行速度接近光速，在太空旅行的双胞胎回到地球时只不过两岁，而他的兄弟早已死去了，因为地球上已经过了200年了。这就是著名的twins paradox。《自然》杂志就把它列为97个至今悬而未决的物理学难题。二带同种电荷的小球，因静电斥力和万有引力而达到力平衡，二小球同时高速运动旁观者认为：二小球高速运动，质量增加，引力变大，距离必然拉近。二小球认为：二小球相对静止，质量不变，引力不变，距离必然不变。

根据狭义相对论，对同一个物理过程，在与其相对静止参照系中测量的时间最短，而在与其有相对运动的参照系中测得的时间将比在物理过程本身进行的参照系内测得的时间（原时）长。那么对于A留地球，B乘坐宇宙飞船出去再回来这个过程，在A看来，在B出去再回来这个过程，他所经历的时间应该比B经历的时间长；而对B来说，在和A分离到再见的过程，他经历的时间应该比A长，这时就无法区分到底谁更年轻。但我们需要注意的是，A、B在整个过程中并不都处于相同地位的参照系中，相对于整个宇宙，地球的加速度是比较小的，这里我们忽略这个加速度的影响，而B从地球到离开，到在回来，需要经过加速离开地球，以一加速度调头返回地球，到达地球后减速见到A，B处于一个非惯性参照系中，具有加速度，这个是可以真正地“延长”时间的，而A则始终处于地球，一个近似的惯性系中，所以当B返回地球后，B应该比A年轻。或者另外地说，B能够感觉到自己速度的变化，但A感觉不到。可是根据广义相对论的基本原理，物理规律对于任何参考系都成立，对于A而言B不是惯性系，对于B而言A不是惯性系，仍然有矛盾。有人利用广义相对论解释twins paradox，因为在引力场中时钟延缓（加速运动的物体可以产生引力场）；也有人按照Minkowski三角形不等式解释“twins paradox”。1959年James Terrell在《物理评论》杂志上发表论文，指出尺缩效应的形象是人们观测物体上各点对观察者参考系同一时刻的位置构成的形象，常称为“测量形象”。【1】“若他们始终不离开自己的惯性系，这是‘一去不复返’的相对运动。他们从分手开始便‘永别了’。因此，到底哪个年轻是无法比较的，也就无从考察，得不到任何确切结论。”【5】人教1979年出版的《物理学导论》（美国人：F.J.Bueche著）P126中的一段关于时间相对论效应的示例：“半人马座 $\alpha$ 星是距离我们太阳系最近的恒星，距离是 $4.3 \times 10^{16} \text{m}$ ，光速 $c = 3 \times 10^8 \text{m/s}$ ，所以光从地球到达该星的时间是 $1.43 \times 10^8 \text{s}$ 。也就是4.5光年，往返一次就是9光年，当宇宙飞船以 $0.999c$ 往返该星时，所需要的时间多长？”书中说“按照地球时钟计算，往返一次需要9年。飞船上的时钟似乎走得慢些，相对论因子是 $\sqrt{1-0.999^2} \approx 0.045$ 。因此飞船上的时钟把9年指示为约0.4年，所以对于宇航员来说往返仅需要0.4年，约5个月”因此得出“宇航员有一个孪生兄弟留在地球上，在上述旅行过程中，地球上的孪生兄弟大了9岁，而宇航员在往返旅程中只渡过了5个月。”这就是兄弟佯谬。四川大学物理与技术学院的博士生导师吕教授告诉记者，相对论是建立在大量实验基础上的，理论上谁都可说它对或错，但它对错的关键是，能否找到一个自然现象或一个实验和它矛盾，如果能找到，可以顺着这个方向研究下去，如果找不到，仅从理论上论证它对或错意义不大。

2. 飞船佯谬【6】：贝尔(Bell)的飞船佯谬说的是，两个飞船用一根弦紧拉着。起飞前两飞船上都备有校准了的钟和发动机的操作程序。两飞船同时起飞，并各自按同样的操作程序加速减速。现在的问题是，弦会不会被拉断？也就是说飞船之间的距离是否变化？

3. 梯子佯谬【7】：梯子佯谬也叫杆仓佯谬或车库佯谬。它说的是一个梯子平躺着快速穿过一个比它的静止长度还短的车库。在车库看来，运动的梯子长度收缩，所以有一段时间梯子完全在车库内，可以将梯子关在车库里。而在梯子看来，车库在运动。本来车库就短些，再加上长度收缩，车库的长度就更短了，所以车库不能包容梯子，没有时间可以关门来关梯子。这显然是一对矛盾。

4. 转碟佯谬【8】：埃能菲斯特(Ehrenfest)的转碟佯谬说的是，一个以角速度 $\omega$ 绕轴旋转的碟子，碟子的

静止半径为 $R_0$ ，旋转的半径为 $R$ 。因为半径与运动方向垂直，长度不收缩，所以 $R = R_0$ 。另一方面，碟子边缘的运动速度为 $v = R\omega$ ，由于长度收缩，所以周长应为 $2\pi R = 2\pi R_0(1-v^2)^{0.5}$ 。由此可得 $R < R_0$ ，这与 $R = R_0$ 显然矛盾。

根据相对论的质速关系，实物粒子的全部引力质量随速度的变化而变化，但是在可变的引力质量中又存在着粒子的固有引力质量(或静止引力质量)，如何解释两者之间的物理机制呢？虽然 Lorentz transformation 矩阵不包括引力质量，

$$\text{Lorentz} = \begin{pmatrix} \Gamma & -\beta_1\Gamma & -\beta_2\Gamma & -\beta_3\Gamma \\ -\beta_1\Gamma & 1+A\beta_1\beta_1 & A\beta_1\beta_2 & A\beta_1\beta_3 \\ -\beta_2\Gamma & A\beta_2\beta_1 & 1+A\beta_2\beta_2 & A\beta_2\beta_3 \\ -\beta_3\Gamma & A\beta_3\beta_1 & A\beta_3\beta_2 & 1+A\beta_3\beta_3 \end{pmatrix}$$

式中  $A = (\Gamma - 1) / \beta^2$ ， $\beta_1 = v_1/c$ ， $\beta_2 = v_2/c$ ， $\beta_3 = v_3/c$ ， $\Gamma = (1 - \beta^2)^{-0.5}$ 。当运动速度沿 X 轴时，就化为普通形式。速度引起的引力质量的增加是狭义相对论效应，但是时钟延缓与长度缩短也是狭义相对论效应。

瞬时固有系，是瞬间与质点保持相对静止的惯性系，如果质点的速度不断改变，瞬时固有系也不断替换，它与其质点永远保持相对静止的固有系之间，没有相对速度只有相对加速度。根据狭义相对论在一个质点的瞬时固有系中观察一个质点的运动，不存在狭义相对论效应。笔者认为狭义相对论效应应当为瞬时效应，对于速度不是累积效应。根据场的 space-time 本质的观点，引力质量、时间、空间的狭义相对论效应是同一的。孪生子佯谬的一种版本已被围绕地球在相反方向上飞行的两台精确的钟表的实验所验证。当它们重新相遇时，向东飞行的钟表流逝的时间稍微短一些。【4】

太空站在太空停留了 15 年。按狭义与广义相对论的叠加结果太空钟会有明显的走时误差。为何没有人对太空站的时钟问题大事炒作呢？假设在一个惯性参照系中测量一个物体的长度，物体由静止开始加速，直到  $c/2$ ，然后匀速运动一段距离后开始减速，直到静止。根据 Lorentz transformation，物体的长度开始与最后应该相等。可是运动物体的长度缩短，由于物体一直在运动，因此物体最后的长度应该最短，这显然存在着矛盾。在狭义相对论中，物理规律在不同的惯性参照系中是一样的，但物理量在不同的参照系中可能不一样，例如运动物体在其运动方向上的长度将比其静止长度小，可以说是观测效应，因为从测量的含义上去理解，这的确是因为光速不为无穷大（而且任何信息传播速度不得超过光速）的原因，但这也是本质规律，是因为从前面一句话可以看出，这是必然会得出的结论，是规律性的。当开始由静止做加速运动，当速度达到  $0.99c$  时开始加速到静止，开始和最后的长度是相等的，因为根据上面的话，运动方向上的动长是和运动相关的，只有它运动，它运动方向的动长才会比静止长度小，如果它运动又静止了，那么它的长度就是静长，当然和原来的相等。设想一个物体先从静止做加速运动然后做减速运动到静止，在这整个过程中，其运动方向的长度应该是先变小，到速度最大时运动方向动长最小，然后又逐渐变大，最后恢复到静止时长度。时间变换也符合洛伦兹变换，为什么现代物理学的实验证明（譬如  $\mu$  子绕地运行）具有累积效应？或许有人认为狭义相对论适用于匀速运动，加速运动应当利用广义相对论解释，可是为何利用原子钟绕地球高速运动（加速运动）时钟减缓，寿命的延长，说明狭义相对论的正确？在长度测量实验中，每时每刻都有速度，长度应当缩短，为何必须用广义相对论呢？因此在  $\mu$  子和介子实验中， $\mu$  子和介子作加速的圆周运动，实验证实作这样运动的  $\mu$  子和介子的平均寿命大于静止  $\mu$  子和介子的平均寿命，并不能说明狭义相对论的正确。如果一个微观粒子作匀速圆周运动，其寿命在延长，但是长度不变，这一点可以用实验验证。直到 1959 年，特雷尔(j.Terrell)在一篇文章中指出：不对！Lorentz 收缩是看不到的。原因很简单：同一时刻从运动物体各点发出的光一般不能同时到达观测者的瞳孔；反之，同时到达瞳孔的光一般也不是同时发出来的。【2】实际上质子碰撞等实验表明运动粒子是全方位膨胀的。

一个航天飞船以  $4/5$  光速从左向右掠过地球。一束光脉冲从座舱的一端发射出并在另一端被反射回来。在地球上的和在航天飞船上的人分别对光进行观察。因为航天飞船的运动，他们在光返回的旅行距离上意见不同。因为按照 Einstein 关于对所有自由运动的观察者光速相同的假设，他们在光花费多少时间飞行上的意见也应该不同。

“潜水艇悖论”指的是这样一种理论假想情况：首先假设一艘完全浸没在海里的潜水艇，相对于海水静止时能不升不降地正好保持平衡，然后在假设它在与海面平行的方向上以接近光速行进。基于物体的长度在

运动方向上收缩的相对论效应，在海面上相对于海水静止的船上的观察者看来，潜水艇本身会收缩，密度会变大，并最终下沉。但潜水艇上的船员们看到的却是飞速向后的海水在收缩，密度在变大，他们会认为：由于海水密度变大后产生浮力变大，潜水艇将上浮。按照相对论，两种互相矛盾的结论都没有错。1989年美国的物理学家萨普利假设海底在特定的参考系中会加速上升，根据广义相对论 space-time 效应而扭曲变形，最终与潜水艇接触，结果看上去是下沉了。最近巴西的物理学家认为，在不同的参考系下，相对于海水静止的观察者与潜水艇员所出的重力场并不相同。他通过严密的数学推理发现，从潜水艇员的角度来看，潜艇以接近光速运动的过程中受到的有效重力，实际上也比潜艇相对于海水静止时大，超过海水密度变大而产生的福利，最终导致潜艇下沉。

真正的主流物理学界是如何看待相对论的，现任国际引力与相对论天体物理学会主席的 C. M. Will 是其代表。C. M. Will 对相对论的基本原理都用怀疑的态度去与实验比较进行检验，光速变不变、是否各向同性、Lorentz 不变性破缺有多大等等都在研究之列。主流物理学界关心和讨论的内容是实验结果，就是 C. M. Will 这样的理论物理学家最终关心的是理论与实验是否相符。现在几乎没有人会在引力与相对论天体物理学会议上讨论相对论的哲学意义，更没有人用哲学来论证相对论。在上世纪 20、30 年代国际上有一些相对论的哲学意义的讨论，在 21 世纪难道我们又要去重复吗？相对论的真空光速不变原理是在伽利略时空中定义和测量的，相对性原理是在 Lorentz 时空中定义和应用的。相对论内含两套不相容时空，使得多数的反相和保相辩论集中于将 Lorentz 坐标变换应用到上具体问题上。由于两套时空都是相对论不可缺少的，在每一个具体问题中两套时空的不同组合就有不同结论。两套时空本来就是矛盾的，组合到具体问题中总能使结论变得荒唐或佯谬，也总可以组合得避开荒唐或佯谬。

参考文献：

- 【1】赵凯华，罗蔚茵。新概念物理教程——力学。北京：高等教育出版社，1995。
- 【2】杨福家等译。维克多·韦斯科夫。二十世纪物理学家。北京：科学出版社，1979。
- 【3】庄一龙。《世界上严肃的科学家冷眼看待相对论》。
- 【4】史蒂芬·霍金著 吴忠超译。《果壳中的宇宙》湖南科学技术出版社 2002 年 2 月。
- 【5】李文博。狭义相对论导引[M]。哈尔滨：东北林业大学出版社，1986.6.3。
- 【6】Wikipedia contributors, *Bell's spaceship paradox*, Wikipedia, The Free Encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Bell%27s\\_spaceship\\_paradox&oldid=268420612](http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Bell%27s_spaceship_paradox&oldid=268420612).
- 【7】Wikipedia contributors, *Ladder paradox*, Wikipedia, The Free Encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Ladder\\_paradox&oldid=267021929](http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Ladder_paradox&oldid=267021929) (Feb 2009).
- 【8】Wikipedia contributors, *Ehrenfest paradox*, Wikipedia, The Free Encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Ehrenfest\\_paradox&oldid=260129764](http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Ehrenfest_paradox&oldid=260129764) (Feb 2009).

## 6、狭义相对论的局限性

狭义相对论存在两个问题：

1. 沿用了牛顿理论中的惯性参考系的概念——狭义相对论的理论中所提及的惯性参考系的概念，仍然是牛顿理论中的惯性参考系的概念，它并没有解释或取代在牛顿理论中起作用的，作为绝对空间代表的惯性系。但为什么这类参照系在自然界形成特殊的一类，并充当无加速度的判据（而且一切物理定律在其中有最简形式），这和以前一样仍是一个谜。这个难题在狭义相对论的理论中没有得到解释。爱因斯坦所指出：“从理论观点来看，狭义相对论还不能完全令人满意，因为狭义相对论所讲的相对性原理偏爱于匀速运动。从物理学观点来看，不可给匀速运动以绝对的意义。如果这是正确的话，那么就产生了这样的问题：这种讲法是不是也应当扩充到非匀速运动上去呢？已经弄明白，如果人们以这种扩充了的意义来提出相对性原理，那么就得到相对论的一种无歧义的推广。人们由此得到了包括动力学的广义引力论。可是在目前，我们还没有一系列必要的事实，可用来检验我们提出这样假定的原理是否得当。惯性原理的弱点在于它含有循环的论证：如果一个质点离开其他物体足够遥远，它就作没有加速度的运动；而我们却又只能根据它运动时没有加速度的事实才知道它离其他物体足够遥远。”（《相对论的意义》）

2. 狭义相对论的理论框架中没有涉及时空与物质分布之间的关系——在狭义相对论的时空理论中，没有涉及时空与物质分布之间的关系，换句话说，在这个时空理论中，不同质量的物体对时空的影响是平权的。因而就时空的几何特性而言，狭义相对论的闵可夫斯基四维时空，仍然保留了牛顿三维时空的欧几里德的特性，仍然是平直空间。在闵可夫斯基四维时空中使用四维的笛卡尔坐标系，被称为赝欧几里德空间。在这个空间中，短程线（光线通过的路径）仍然是直线。但近代科学观测的结果发现，光线在大质量天体附近的路径，是弯曲



的。这类事实表明,时空的几何性质是和时空中的物体的质量分布有关的。

爱因斯坦说,狭义相对论只是逻辑发展的第一步。因为它虽然取得很大成功,但仍然存在一些局限性:

1、狭义相对论无法正确描述引力现象;1946年,《自述》:“当我力图在狭义相对论的框子里把引力表示出来的时候,我才完全明白,狭义相对论不过是必然发展过程的第一步。……这就使我相信,在狭义相对论的框子里,是不可能有人满意的引力理论的。”2、狭义相对论无法解释:为何惯性质量等于引力质量

由于牛顿万有引力定律给狭义相对论提出了困难,即任何空间位置的任何物体都要受到力的作用,因此在整个宇宙中不存在惯性观测者。爱因斯坦为了解决这一问题又提出了广义相对论。关于广义相对论的起源:

“... that the basic demand of the special theory of relativity (invariance of the laws under Lorentz-transformations) is too narrow, i.e. that an invariance of the laws must be postulated also relative to non-linear transformations of the coordinates in the four-dimensional continuum. This happened in 1908.”

除了上面的两个问题外,狭义相对论效应在广义相对论里才可以得到圆满的解释,爱因斯坦当年从同时性的相对性,从观察效应出发得出狭义相对论效应,是爱因斯坦实证哲学观的体现。

Einstein 倾向于用实证的方法来建立和验证其理论,他曾说过:“相对论并不是起源于思辨,它的创建完全由于想要使物理理论尽可能适应于观察到的事实,……要放弃某些迄今被认为是基本的同空间,时间和运动有关的观念,决不可认为是随意的,而只能认为是由观察到的事实所决定的【1】。”相对论理论的基础便是一个 Einstein 称之为光信号方法的理想实验【2】。

Einstein 曾说过:“相对论理论主要吸引人的地方在于逻辑上的完备性。从它推出的许多结论中,只要有一个被证明是错误的,它就必须被抛弃;要对它进行修改而不摧毁其整个结构,那似乎是不可能的【3】。”

马赫对于形而上学对立性意识的批判,极大地影响了新一代,他反对孤立存在的绝对性事物,而使之成为物理学革命的先声。经典物理学的理论基础是形而上学对立性哲学唯物主义,它那分割的、片面的思想意识越来越不适应科学的发展。那种以为绝对和相对、无限和有限,共性和个性都是分割的,孤立的存在,可以有绝对空间和绝对时间,可以有无限空间和无限力场的观点,越来越显出它的荒谬。马赫虽没能从哲学上说明辩证范畴的对应同一关系,但他本能的意识到,在实践中观察不到的、无法验证的东西都是错的,马赫原理讲物质运动同周围事物联系在一起,由普遍共性来决定,他把共性放入个性来考察二者关系。

Einstein 曾受到 Mach 哲学观的影响,物理量的可测量性在论证为建立现代物理学的世界图景而使用的概念的合法性时成为一个主要问题,首先起源于狭义相对论,狭义相对论的创立便是 Einstein 实证哲学观的体现。关于狭义相对论的“尺缩效应”、“时间膨胀”等情况是观测效应还是真实发生的在狭义相对论中,每个观测者都是正确,也就是说观测效应就是真实发生的。任何一种事情是否真实发生了,只能取决于观测者。通过对于观察问题的深入分析,相对论注定要揭露一切经典物理学概念的主观性质,在一种特殊的高度上接近了自然描述中的统一性和因果性这一经典思想。当我们考虑相对论中今天在某种意义上可以认为是可靠部份的那部分科学知识的时候,我们可以看到在这个理论中起主导作用的两个方面:第一,这个理论整个发展过程是依据这样一个问题:自然界中是否存在物理学上特别优越的运动状态(物理学相对性问题);第二,概念和判断只有当它们同观察到的事实相比较而无分歧时才是可接受的(要求概念和判断是有意义的)。这个认识论的先决条件是根本性的。

任何观察最终都要将依赖于客体和观察工具在空间和时间中的重合,从而任何观察都是可以独立于观察者的参考系来加以定义的。在相对论的连续四维 space-time 中,不能用量尺和时钟来定义 Einstein——Riemann 度规关系。通过广义相对论, Einstein 在放弃绝对时间和绝对空间的一切想法方面使我们的世界图景得到了一种超过任何以前的梦想的统一性和协调性,这种理论提供了关于普通语言的一致性及适用范围的有益的教益。不管现象超出经典物理解释的范围多么远,对于现象的说明必须用经典术语表示出来。任何一个观察者都可以在自己的观念构架中遇到任何另一个观察者在自己的构架中如何描述经验。每一个观察者都可能保留空间和时间之间的截然区分,并且可能考察任一其他观察者在他的参考系中将如何借助于普通语言来描述经验和标示经验。Galileo 的纲领,即把物理现象的描述建立在可测定的量的基础上的纲领,曾经给整理越来越大的经验领域提供了坚实的基础。用不同的互相排斥的实验装置得到的资料,可以显示没有前例的对立性,从而初看起来这些资料甚至显得是矛盾的。在空间和时间中排列次序的任何企图,都会导致因果链条的一次中断,因为它是和一种本质上的动量交换及能量交换联系着的,这种交换发生于个体和用来进行观察的测量尺杆和时钟之间;而恰好这种交换就是不能被考虑在内的,如果测量仪器要完成它们的使命的话。因此 Bohr 认为,相对论提醒我们想到一切物理现象的主观性,这是一种本质地依赖于观察者运动的性质。【4】1872年, Mach 提出“物体并没有绝对加速度,只有相对遥远星系的加速度, Mach 思想的可取之处是在于不能抽象脱离物质去谈论参考系是惯性系或非惯性系。这一思想在广义相对论中得到了应用。科学哲学不能以此为基础,科学哲学的根基必须是也只能是逻辑自洽的理性的实在论。霍金指出:“对于一名理论物理学家



而言，把理论视作一种模型的实证主义方法，是理解宇宙的仅有手段。

当然，以此种意义断定的几何命题的“真实性”，是仅仅以不大完整的经验为基础的。目下，我们暂先认定几何命题的“真实性”。然后我们在后一阶段（在论述广义相对论时）将会看到，这种“真实性”是有限的，那时我们将讨论这种有限性范围的大小。（摘自《浅说》第1节几何命题的物理意义中的最后一段）

力学的目的在于描述物体在空间中的位置如何随“时间”而改变。如果我未经认真思考、不如详细的解释就来表述上述的力学的目的，我的良心会承担违背力求清楚明确的神圣精神的严重过失。让我们来揭示这些过失。这里。“位置”和“空间”应如何理解是不清楚的。……（摘自《浅说》第3节经典力学中的空间和时间中的第一段与第二段第一句）。作为科学家，实证精神和理性精神珠联璧合地渗透在爱因斯坦的科学工作中。他把实验视为检验理论的最终标准和发明基本概念、基本假设的启示，把理性视为开启宇宙秘密的钥匙，认为纯粹思维能够把握实在，倡导大胆思辨而不是堆积经验。寻求一个明确体系的认识论者，一旦他要力求贯彻这样的体系，他就会倾向于按照他的体系的意义来解释科学的思想内容，同时排斥那些不适合于他的体系的东西。然而，科学家对认识论体系的追求却没有可能走得那么远。他感激地接受认识论的概念分析；但是，经验事实给他规定的外部条件，不容许他在构造他的概念世界时过分拘泥于一种认识论体系。因而，从一个有体系的认识论者看来，他必定像一个肆无忌惮的机会主义者：就他力求描述一个独立于知觉作用以外的世界而论，他像一个实在论者；就他把概念和理论看成是人的精神的自由发明（不能从经验所给定的东西中逻辑地推导出来）而论，他像一个唯心论者；就他认为他的概念和理论只有在它们对感觉经验之间的关系提供逻辑表示的限度内才能站得住脚而论，他像一个实证论者；就他认为逻辑简单性的观点是他的研究工作所不可缺少的一个有效工具而论，他甚至还是一个柏拉图主义者或者毕达哥拉斯主义者。

参考文献:

- 【1】Einstein, 《Einstein 文集—关于相对论》第二卷，商务印书馆。范岱年 赵中立 许良英编译。
- 【2】Einstein, 《Einstein 文集—论动体的电动力学》第二卷，商务印书馆。范岱年 赵中立 许良英编译。
- 【3】Einstein, 《Einstein 文集—什么是相对论》第一卷，商务印书馆。范岱年 赵中立 许良英编译。
- 【4】[丹麦] N.Bohr 著 戈革 译。《尼耳斯·玻尔哲学文选》商务印书馆 1999 年。

## 第七章 狭义相对论的哲学观浅议

### 第一节 物理学家对于狭义相对论发展的思考

这个世界曾经陷入深深的黑暗中，正是牛顿“给了我们光明！”但不久就等到了撒旦的报复，来了个爱因斯坦——使一切又回到从前。\_\_\_\_\_A·玻恩、A·爱丁顿

物理过程是客观存在的，人类在黑暗中探索，凭着不完整的感觉——实验观测到的现象、数据材料等，引出新的观念，找出新的规律，说明已有的结果和预言新的现象。这些由实验启发而得出的“基本规律”，是客观世界真实过程的近似描述，肯定有适用的范围。它所用的观念和处理问题的方式，也会深深打下发现者自身的烙印。他们的正确发现使人类对客观世界的认识前进了一大步，他们的某些错误和不足也会引导人们走入歧途。作为学习和研究的态度，对任何理论，即使是被认为最“成功”、最完美的理论，在学习与研究时不要为其成功所迷惑，透过表面现象需看到它的不足和局限，自始至终保持清醒的头脑，为更新观念和理论留下创造和接受的空间。尽管我们寻求的理论美是由简洁的基本原理赋予它那种和谐性，但一个理论并不单是从一组预先设定的原理就能用数学推导出来的。有些原理是在过程中产生的，有时来的很恰当，带来了我们希望的那种和谐性。物理学是研究物质的最简单运动规律的科学，其最终目的是：找到物质运动、变化与相互作用的内在联系，以最少的假设，通过分析、推理解释所有相关实验结果，预言新的实验现象。

中国科技大学物理学教授沈惠川认为：“在讨论狭义相对论问题时，不能有加速度，否则就要用广义相对论来处理。de Broglie 早在 1924 年他的博士论文中就已说过，在相对论问题中犯傻的人中，有许多就是将广义相对论中的问题与狭义相对论问题搅合在一起，而浑然不觉的。例如，双生子悖论问题中，就涉及到加速度（吴大猷等前辈早就讨论过这个问题）。再如，有人老是说在地球的这个地方测得的光速，与在地球的那个地方测得的光速不同，诸如此类；殊不知，建立在地球上的所有坐标系都不是惯性系，都是有加速度的，都不在狭义相对论讨论的范围之内！”

著名物理学家、中国科学院理论物理研究所郭汉英研究员认为：“不过，有几个问题不妨探讨一下。一提到的双生子悖论，一定涉及加速运动。有人问我，爱因斯坦认为惯性力与引力等效。于是，一有加速运动，就有惯性力，后者就等效于引力。那么，狭义相对论能不能描述加速运动？留给人们思考吧。目前物理学对宇宙的了解，包括猜想只有 4%，而完全不知的竟占到了 70%。知识还有一个副产品——权威与偏见。

相对论体系存在有待验证的假定，基本原理不够完善，相互之间存在不协调；理论和时空观念都有需要改进之处。这个伟大体系同样不是一个完成了的理论体系。相对论体系其实包含着许多重要的假设要素。今天，宇观尺度上的观测数据分析结果，对相对论体系提出了严重挑战。”

爱因斯坦讲：“相对论时空观的巨大成就，并没有穷尽、也不可能终结人类时空观的发展。相对论仅仅是产生新时空观的新起点。科学是对真理的追求和探索，但不是宣示绝对真理或终结真理。相对论时空观是科学的，但相对论不可能是绝对的真理。只有僵死的哲学教条才宣示有绝对真理，但那已不是真正的哲学，也不是真正的科学。在历史的长河中，任何理论都是相对真理。”宋健认为：“整个科学史表明，一种概念或科学假设从来不会是一开始就完美无缺，总有后人去继承它、发展它或修正它。一百多年来，直到今天仍有很多人对于狭义相对论（SR）和广义相对论（GR）作进一步的讨论和进行大规模的实验，甚至提出不同的意见。这是正常现象，是科学技术得以兴旺发达的必由之路。我们并不是否定 Einstein；但任何一个科学理论都有其适用范围，不可能主宰一切。在科学研究中，如果思想不解放，就不可能创新。美国三个科学院组织的‘21世纪委员会’提交过一个报告，其中说‘Einstein的理论并不是最终真理’，意思是说‘关于相对论研究仍然是 open 的！’董光壁先生说，当 A.Einstein 在世时，许多物理学家常以批评其理论祝贺他的生日，A.Einstein 都一一回答；他认为，会上的几位报告人是“以质疑和发展表示对 A.Einstein 的尊敬”。

## 2、狭义相对论对于哲学发展的影响

Einstein 不仅是一位伟大的科学家，也是一位伟大的哲学探索者，他为后人留下了卷帙浩繁的科学著作和哲学社会学著作，将以伟大的物理学家和当代著名的哲学家而载入史册。爱因斯坦指出：狭义相对论的成就可以表征如下：它一般地指出了普适常数  $C$ （光速）在自然规律中所起的作用，并且表明以时间作为一方，空间坐标作为另一方，两者进入自然规律的形式之间存在着密切的联系，依照古典力学并且依照狭义相对论，空间（空间时间）是独立于物质或者场而存在的。赖兴巴赫说：“爱因斯坦的工作比许多哲学家的体系包含着更多的固有哲学。”爱因斯坦认为，现代哲学的基本原理组成了我们所有人生活的世界，这些原理是活生生的，是经过千百年实践检验证明的。爱因斯坦是一个奇迹，他的贡献极大地促进了人类的文明进步。在当今之世，他已经成为人类智慧的化身和道德的典范。他的业绩远远超出诺贝尔奖所给予的标志。未来的时代愈久远，现在与之比肩的名人将逐渐被人淡忘，而爱因斯坦必将越来越成为后世敬仰的楷模。普朗克讲：“要对爱因斯坦的理论作出中肯评价的话，那么可以把他比做 20 世纪的哥白尼，这也正是我所期望的评价。”

爱因斯坦认为，哲学是科学研究之母，科学生发新的哲学思想，科学和哲学二者在他身上可谓珠联璧合、相得益彰。在常规科学时期，科学家是在范式的指导下解难题的，哲学表面看来对科学似乎不起什么作用，岂不知，哲学成分早已包含在范式之内了。但是当科学面临危机和革命时，科学家单在科学自身之内是找不到足够的破旧立新的思想武器的，他们只好求助哲学批判和哲学分析。而且这样的任务也只能由有哲学头脑的科学家来担当，因为他们“最清楚鞋子究竟是在哪里夹脚的”，富有科学功力和哲学素养的科学家便顺天应时地成为科学革新家。在创立狭义相对论的过程中，科学和哲学在爱因斯坦的思想中是水乳交融、彼此砥砺、相辅相成的。

爱因斯坦“博观而约取，厚积而薄发”。他善于博采众家之长，又不墨守成规或拘泥于一家之言，他既从专业哲学家斯宾诺莎、莱布尼兹、康德、休谟等人那里汲取了丰富的思想营养，又从哲人科学家开普勒、伽利略、牛顿、安培、亥姆霍兹、黎曼、普朗克、马赫、彭加勒、奥斯特瓦尔德、迪昂、皮尔逊等人之处获得了有益的启迪，加之他善于结合科学实践进行思考和创造，从而形成了他的综合实在论思想。这种实在论既在各种不同的乃至对立的哲学流派之间保持了必要的张力，又在传统和革新之间保持了必要的张力，因而成为一种卓有成效的科学研究纲领。霍耳顿教授在 60 年代末发表的一篇著名论文《马赫、爱因斯坦和对实在的探索》中这样写道：“在我们这个世纪的思想史中，有一章可以题为‘阿尔伯特·爱因斯坦的哲学历程，这是一段从以感觉论和经验论为中心的哲学哲学，到以理性论的实在论为基础的哲学历程。”把爱因斯坦科学哲学概括为由温和经验论、基础约定论、意义整体论、科学理性论、纲领实在论构成的独特而绝妙的多元张力哲学，在这个兼容并蓄、和谐共存的哲学统一体中，五种不同的乃至异质的要素相互限定、彼此补充，保持着恰到好处的“必要的张力”。

爱因斯坦从小就对哲学怀有浓厚的兴趣，他的科学哲学的思想来源十分丰富。这里既有从古希腊到近代的哲学大家，也有从开普勒到普朗克的诸多哲人科学家，以及他与逻辑经验论的风云人物的交流和对话，尤其是以马赫、彭加勒、迪昂、奥斯特瓦尔德、皮尔逊为代表的批判学派对爱因斯坦科学哲学思想的形成影响极大。但是爱因斯坦并没有墨守成规，而是在汲取批判学派思想营养的同时，结合自己的科学实践和哲学思考，对它们进行了改造和发展，从而成为批判学派科学哲学思想的集大成者和发扬光大者。Einstein 在进行着基本



概念的批判分析工作时，也就是在进行着哲学思考。他认为他在物理学基本概念上的发现是哲学的发现，这些发现决定了他的所有物理学成果。爱因斯坦曾经说过“与其说我是物理学家，不如说我是哲学家”。

各个时代的哲学大家都是爱因斯坦的思想沃土，其中包括古希腊的先哲，近代哲学大师如笛卡儿、莱布尼兹、斯宾诺莎、洛克等，以及爱因斯坦的同胞先辈叔本华和尼采，爱因斯坦也崇尚中国先哲孔子。在批判学派表人物马赫、彭加勒、迪昂、奥斯特瓦德、皮尔逊的科学哲学名著中，爱因斯坦科学哲学的诸多构成要素都能在其中窥见到蛛丝马迹乃至明显烙印。在爱因斯坦与逻辑经验论者石里克等以及哥本哈根学派的交流和交锋中，尤其是它在爱因斯坦对自己的科学探索过程和科学成果的哲学反思中。

寻求一个明确体系的认识论者，一旦他要力求贯彻这样的体系，他就会倾向于按照他的体系的意义来解释科学的思想内容，同时排斥那些不适合于他的体系的东西。然而，科学家对认识论体系的追求却没有可能走得那么远。他感激地接受认识论的概念分析；但是，经验事实给他规定的外部条件，不容许他在构造他的概念世界时过分拘泥于一种认识论体系。因而，从一个有体系的认识论者看来，他必定象一个肆无忌惮的机会主义者：就他力求描述一个独立于知觉作用以外的世界而论，他象一个实在论者。就他把概念和理论看成是人的精神的自由发明（不能从经验所给的东西中逻辑地推导出来）而论，他象一个唯心论者；就他认为他的概念和理论只有在它们对感觉经验之间的关系提供出逻辑表示的限度内才能站得住脚而论，他象一个实证论者；就他认为逻辑简单性的观点是他的研究工作所不可缺少的一个有效工具而论，他甚至还可以象一个柏拉图主义者或者毕达哥拉斯主义者。

爱因斯坦创建的相对论在物理学上起到了无法比拟的作用，它从逻辑思想上统一了物理学，使物理学建立在经过严格的科学考察过的时空理论的基础之上。许多物理概念都是经过相对论改造过的。爱因斯坦的相对论不仅改变了物理学，而且对哲学也产生了重大的影响。

1905年，爱因斯坦的狭义相对论宣判了机械自然观的死刑，这是自然科学史上的一次大变革，也是辩证法在物理学基础中的胜利。它把牛顿经典运动定律中所说的那种关于时间和运动的形而上学的机械观点提高到辩证法的高度。牛顿定律是速度远远小于光速的极限定律。牛顿的形而上学观点方法，尽管是当时所公认的定律，但是由于物理学的发展，碰到了无法逾越的鸿沟。爱因斯坦运用辩证思维的冲击力量摧毁这些障碍，并为物理学的进一步发展开辟了道路。在爱因斯坦以前，虽然有其他一些研究家确实已经采用形式数学的方法解决了运动物体的电动力学问题，然而爱因斯坦的功绩仍是不可低估的。

普朗克在一次演讲中说：爱因斯坦时空观的“勇敢精神的确超乎自然科学研究和哲学认识上至今所取得的一切大胆成果”。

在科学上时空观是指对时间和空间物理性质的认识；在哲学上，是指对时间和空间的系统认识，即从根本上进行的思辨。狭义相对论理论由爱因斯坦提出，不是一种巧合，而是一种必然。爱因斯坦站在前人的肩膀上，通过对科学的研究和对哲学的探讨，经过10年的沉思，才有了此灵感，才创立这个伟大的时空理论。

在人类的科学和认识史上，从亚里士多德到牛顿、爱因斯坦，我们可以看到他们的时空观都是不同的。亚里士多德的时空观是基于柏拉图的哲学思辨。同样，从牛顿时空观到爱因斯坦时空观变化及其过程中，马赫对爱因斯坦的哲学思辨起到了奠基的作用。马赫认为：“在现代物理学中保持着牛顿绝对空间和时间的观点在我们看来是毫无意义的。”爱因斯坦摆脱人类以往关于时间与空间性质的种种不正确认识的思想基础，正是得益于马赫对牛顿时空观的批判，以及对绝对时空观的批判所提供的哲学武器，才使得爱因斯坦从狭义相对论的困惑中得以解脱，从一个完全新颖的方向来考虑时空观：绝对空间与绝对时间的概念是想象中的虚构，一种形而上学的概念，而不是直接由物理学的观察和实验得来的。

科学史家杰拉耳德霍耳顿认为：相对论不但对于物理学本身，而且对于现代科学的哲学也是一种关键性的进展。（见许良英编，第17页）这样一种新时空概念及其所形成的对自然的新时空观，并不容易被理解和接受。同时，这种时空概念与哲学上传统的时空观表现出有限性和无限性、直观性和非直观性上的冲突，有限与无限、有界与无界的辩证关系再次进入人们的思考中，这进一步增加了对其理解的难度。所以，无论是在物理学上还是哲学上，接受相对论的时空概念都不是一件轻而易举的事情。

### 3、狭义相对论对于现代物理学理论结构的影响

现代意义下的物理学的主要任务是，依据观察和实验所获得的事实，运用地建构物理图象。这种思想的形成和发展以及物理世界图象的变迁，构成了物理学思想的主流。在这个意义上考察物理学思想的发展，董光壁曾把它概括为五种形态（思辨物理学、数学物理学、实验物理学、理论物理学和计算物理学）和四种物理世界图象（力学物理世界图象、能学物理世界图象、电磁学物理世界图象和基本相互作用统一物理世界图象），其中的计算物理学和基本相互作用统一物理世界图象出现在20世纪。

20世纪之初量子论和相对论的诞生被公认是一场物理学革命。正是它的发展导致一种新的物理学研究

纲领的确立、一种新的物理世界图象的形成和一种新的物理学研究方法的兴起。

历史上构造物理理论的方法大体上可分成两种：模型构造法和公理构造法，爱因斯坦又称为“构造理论”（Constructive-Theory）和“原理理论”（Principle-Theory），模型构造法中将研究涉及的对象建立具体的物理模型，然后对模型中的物理量，根据实验建立定律，由定律组（方程组）形成理论体系。牛顿起初建立的是“质点力学”，他所使用的模型有：绝对时间、绝对空间、质点等。公理构造法，是类比欧几里得几何理论的建构方法。这种方法首先建立几条公理，然后运用逻辑推理的方法，建构起整个理论体系，相对论就是这样建立起来的。这两种物理理论的建构方法的特点是：模型法比较直观；公理法理论深刻，并具有数学美。实践证明这两种方法都是成功的方法，各有优缺点，有时可以同时使用相互补充。

#### 4、狭义相对论中相对与绝对问题

在 Einstein 以前，物理学家从来没有认识到区分绝对物理量和相对物理量在理论上有多么重要！Einstein 也在《相对论》中写道：如果关于  $K, K_1$  是一个匀速运动而全无转动的坐标系，那么，自然现象在  $K_1$  中的发生过程，和  $K$  中的发生过程遵循完全一样的基本定律。这就是相对性原理(Principle of Relativity)。

相对论是从场的问题上兴起的。由于旧理论的矛盾与不一致，迫使我们把新的性质归之于自然界的一切现象的舞台——一时一空连续区。相对论的发展经过两个阶段。狭义相对论只能应用于惯性坐标系，就是只能应用于牛顿所建立的惯性定律在那里有效的系统里。狭义相对论建立在两个基本假设上：在所有的相互作用匀速直线运动的坐标系中物理定律都是相同的；光速永远具有相同的值。从这两个被实验所充分确认的假设中推出了运动的杆与钟具有随速度而改变其长度和韵律的性质。相对论改变了力学定律。如果运动微粒的速度接近光速，旧的定律就失效了。相对论所重新提出的关于运动物体的新定律由实验完满地确认了。相对论（狭义）的另一个结论便是质量和能量之间的关系，相对论把质量守恒和能量守恒两个定律结合成为一个质—能守恒定律。

绝对观念、终极真理来源于绝对事物，世界上没有绝对事物，也就没有绝对观念、绝对真理。自从黑格尔以后，那种企图建立绝对观念、终极真理的时代就一去不复返了。爱因斯坦时空观的巨大成就，并没有穷尽、也不可能终结人类时空观的发展。相对论仅仅是产生新时空观的新起点。我们将继续追求对真理探索，找出相对论暂时还不能解决的问题的答案。

要读懂 Einstein 的《相对论》，关键在于对其“相对性”的理解。许多人在研读《相对论》的过程中，往往会有一个“否定之否定”的过程。当代人在学习《相对论》以前，都曾深受牛顿自然哲学思想的熏陶，坚信牛顿关于物质、时空、运动的观点都是绝对正确的。初识《相对论》，获知在牛顿理论中具有绝对意义的物质的质量、时间的间隔等物理量，在 Einstein 的理论中都只有相对的意义，都会有不同程度的惊讶。惊讶之后，除了少数人仍坚信牛顿理论是绝对正确、Einstein 的理论是谬论以外，大多数人都接受了 Einstein 的理论。相信《相对论》是正确科学理论的人群中，不少人哲学相对主义的思想倾向会油然而生：原来世界上没有绝对正确的东西，一切科学理论都只有相对意义。但随着对相对论理解的逐步深入，人们发觉 Einstein 的相对论，实际上并非宣扬相对主义，而是强调事物的“绝对性”：虽然时间间隔、空间距离等只具有相对意义，但取而代之的有四维时空间隔的绝对性、自然规律的绝对性、因果关系的绝对性等。实际上 Einstein 本人也是这样认为的。1921 年 9 月 30 日，Einstein 在给施默尔的信中说：把他的理论叫做“相对论”是普朗克提出的，尽管他自己不喜欢，还是不得不使用它。他说自己更喜欢用“不变论”这个名称。【1】从牛顿理论到 Einstein 的《相对论》，人们的思想观念有了这样一个从绝对到相对，又从相对到绝对的认识过程，是否最后完成了呢？第一，从牛顿理论的绝对性到 Einstein 理论的绝对性，两者不是同一回事，相对论是牛顿理论的补充、发展，使之更为完善，是科学的进步。第二，有些人认识到了相对论的“绝对性”以后，可能会自觉不自觉地认为 Einstein 的相对论是“绝对真理”，不可能再有修改发展；任何对相对论提出质疑的人，都还没有读懂相对论。笔者以为任何科学理论都有其适用范围，相对论也不会例外。有人对相对论提出质疑，对于探究相对论的适用范围，进一步揭露物理学基础理论中还可能存在有待改善的问题，也许是有积极意义的。

相对性原理在不同的惯性系中找到了相同的部分，这些部分，无论是观察还是实验，都不可否认的是“这个”样子，它也就是我们的常识。绝对量和相对量的区分依据就是相对所有的惯性测量坐标系变换而言，凡是那些不变的物理量——即绝对量，只有这种绝对物理量才可以称之为基本物理量；也是所谓的不可测的物理量。也是永远不可测知的物理量。同时也是最核心的物理量。凡是那些可变的物理量——即相对量，这种相对物理量只有技术工程学的意义。当然，这是可测知的物理量。是核心物理量的外围物理量。是次基本物理量。绝对式和相对式的区分依据就是相对所有的惯性测量坐标系变换而言，凡是那些不变的物理式——即绝对式，只有这种绝对物理式才可以称之为基本物理定律；也是所谓的不可测分的物理式。同时也是最核心的物理定律。凡是那些可变的物理式——即相对式，这种相对物理式只有技术工程学的意义。当然，这是可测分



的物理式。是核心物理式的外围物理式。是次基本物理式。绝对和相对区分，早在 18 世纪的数学大师就自觉地明确区分开来，并且深知只有那些绝对量和绝对式才有核心意义。

参考文献：

- 【1】 杭州出版社 2001 年 6 月出版的《Einstein 语录》第 151 页。

### 5、光速不变性原理与唯物辩证法关系的思考

爱因斯坦认为按照麦克斯韦电磁理论，电磁波的速度为  $c$  是依据真空的导磁率和介电系数得到的，电磁波是以电磁和磁场转换传播的。他认为依据经典力学认为以光速追逐光看到的却是只振荡而不前进的电磁波肯定是不符合电磁理论的，它们之间存在着不可调和的矛盾，要么抛弃电磁理论的电磁波速度的结论，要么抛弃经典力学的速度叠加原理。爱因斯坦为此一直追逐了 10 年，最后他抛弃了经典力学的速度叠加原理，在 26 岁时提出了光速不变原理，从而提出了相对论。

相对论提出了光速不变原理，爱因斯坦在 1905 年的相对论论文里称其为“公理”，而在 1916 年爱因斯坦出版的《狭义与广义相对论浅说》里却这样写道“我们可以假定关于光的速度  $c$  是恒定的这一简单的定律已有充分的理由为学校里的儿童所确信，谁会想到这个简单的定律竟会使思想周密的物理学家陷入智力上的极大的困难呢？原理：是指具有普遍意义的最基本的规律，必须由实践确定其正确性。公理：反复的实践检验是真实的，不需要证明同时也无法去证明的客观规律。爱因斯坦在自己写的书中也承认“假定关于光的速度  $c$  是恒定”，并且这个假定也没有经过实验的确认。

研究 space-time 的性质需要进行测量，光或电磁波是测量 space-time 的唯一工具，从而是了解 space-time 性质不可缺少的因素。

相对论常遭指责，说它未加论证就把光的传播放在中心理论的地位，以光的传播定律作为时间概念的基础。然而情形大致如下：为了赋予时间概念以物理意义，需要某种能建立不同地点之间的关系的过 程。为这样的时间定义究竟选择哪一种过程是无关重要的。可为了理论只选用哪种已有某些肯定了解的过程是有好处的。由于 Maxwell 与 H.A.Lorentz 的研究之赐，和任何其他考虑的过程相比，我们对于光在真空中的传播是了解得更清楚的。【1】

狭义相对论只所以适用于电磁场是因为电磁场的传播速度都等于光速，在电磁场发生的两个事件是以光速联系着，如果以其它信号联系，同时性与因果律的概念也会变化。互补性观点可以看作因果性概念的一种合理性推广。相对性原理认为任何物理规律对于任何参考系都成立，真空光速不变性原理却告诉我们光比其他物质更具有优越性，光速为定值，光速是物体运动的速度极限，不可能有比光速更大的速度，唯物辩证法认为除了作为整体的宇宙及其一般规律而外不承认任何绝对不变的东西和绝对不变的界限，光速原理并不只是光的原理，而是用光速表示一切速度的极限和宇宙的 space-time 性质，也说明唯物辩证法的观点具有一定的局限性。

参考文献：

- 【1】 A. Einstein 著 李灏 译。《相对论的意义》科学出版社 1979 年。

### 6、狭义相对论与唯物辩证法的关系初探

随着研究工作的不断的深入，Einstein 的哲学观发生了很大的变化，已经逐渐地变为辩证唯物主义的哲学观，尽管 Einstein 不相信辩证唯物主义。例如十月革命后，前苏联中央马列主义学院院长梁赞诺夫（1870-1932）找到伯恩斯坦商量出版，后者让 Einstein 审稿。1924 年 6 月 24 日，E 给伯恩斯坦回复了书面意见：“B 先生把恩格斯关于自然科学的札记送到我这儿来，要我发表意见看它们是不是可以出版。我的意见如下：如果这些札记的作者不是一位值得注意的历史人物，那么我就劝他不出版这些札记，因为不论用现代物理学眼光看，还是用物理学史的眼光看，这些札记都无特殊价值。但我觉得这些札记是值得公布的，因为这是恩格斯精神意义的有趣材料。”

1905 年，爱因斯坦的狭义相对论宣判了机械自然观的死刑，这是自然科学史上的一次大变革，也是辩证法在物理学基础中的胜利。它把牛顿经典运动定律中所说的那种关于时间和运动的形而上学的机械观点提高到辩证法的高度。牛顿定律是速度远远小于光速的极限定律。牛顿的形而上学观点方法，尽管是当时所公认的定律，但是由于物理学的发展，碰到了无法逾越的鸿沟。爱因斯坦运用辩证思维的冲击力量摧毁这些障碍，并为物理学的进一步发展开辟了道路。在爱因斯坦以前，虽然有其他一些研究家确实已经采用形式数学的方法解决了运动物体的电动力学问题，然而爱因斯坦的功绩仍是不可低估的。

相对论一些假设条件(如真空光速不变)违反人们的直觉,相对论伟大之处在于它使人们摆脱了牛顿绝对时空观的束缚,对时间和空间的概念赋予了新的物理学涵义——时间和空间不是别的而正是运动着的物质本身,进一步说是物质本体通过运动所表现出的现象形态。大部分人在学习或研究相对论时,参考的是一些教科书,但相对论是一个同(真空中)物质运动密切相关的很深的时空理论,一些教科书上并没有直接反映这种思想,而对相对论的一些逻辑推导或讨论又在牛顿的绝对时空框架内进行,但相对论作为一种时空理论必然离不开时空坐标这样一些概念,人们在碰到时空坐标这种概念时自觉或不自觉地与绝对时空框架联系起来,而忽视了时空本身的物质属性和运动属性,这样就使得相对论的一些逻辑假设和理论推导难以让人们在直觉和理性思维方式下去体验和把握,由此造成了学习者或研究者的思维混乱。

从表面上看,相对论是一关于时空坐标变换的理论,其实坐标变换仅是一种数学处理手段,还是表象的东西。严格讲,相对论是一个关于运动着的物体或粒子与真空相互作用的理论,要描述这种相互作用机制可以采用坐标变换的方法也可以采用其他方法,爱因斯坦采用了前者,前者更直观、更经济些,但却远离了物理本质。其实,相对论的一些结论可用粒子物理和量子力学以及牛顿力学(从某种意义上讲,牛顿力学是一种经验科学,但它在本质上也是一种物体或粒子与真空相互作用的理论,引力、物体的惯性、质量等无一不与物体或粒子与真空相互作用机制有关。从根本上说,爱因斯坦是为了克服经典物理学内在的不统一性而创立了狭义相对论。这种不统一性包括牛顿力学与电动力学的内在不统一性,绝对参照系与非绝对参照系之间的不统一性。为了克服这些逻辑不统一性而作的长期不懈的探索,自然地引导爱因斯坦走向狭义相对论。正如英国著名物理学家邦迪所精辟评述的那样,任何主张,只要声言物理学的统一性是必不可少,都必然会推出狭义相对论,因为它不能容忍所有的惯性系从动力学的观点看来是等效的,但根据光学测量又是可分辨的。

## 第八章 狭义相对论困难的思考

### 1、狭义相对论效应与加速度之间的关系

物理学是一门自然科学,它的理论和应用基础是建立在实验和观测上的。而实验和观测总是离不开某一个具体的参考系(或坐标系),加上历史上把惯性系之间的伽利略相对性原理和伽利略变换推广到狭义相对性原理和洛伦兹变换,从而建立狭义相对论这样的背景,许多物理学工作者以参考系的属性(惯性系或非惯性系)来界定狭义相对论的范畴是自然的,不足为怪。至于这种界定的优劣,那就是属于“仁者见仁,智者见智”的事情了。

1966年,人们做过实验让粒子做接近光速的高速圆周运动,粒子既有很高的速度,也有很高的加速度。实验表明,粒子寿命的变化只与速度有关,而与加速度无关。在验证时间膨胀效应的实验中,有许多实验涉及加速过程,覆盖的加速度范围非常广。例如在原子钟环球航行实验中,时钟经受的向心加速度为 $10^{-3}g$ ( $g$ 代表地球表面的重力加速度);在转动圆盘的实验中,光源的向心加速度达 $10^5g$ ;在穆斯堡尔效应的温度依赖性实验中,晶格中原子核振动的加速度以及作圆周运行的 $\mu$ 介子的向心加速度都高达 $10^{16}g$ 以上。尽管加速度范围这么广,但最终,几乎所有的实验都得到了与狭义相对论预言的由速度引起的时间膨胀效应基本相符的结果。这一事实表明,加速度对实验中的时间膨胀没有任何贡献。即使我们承认时间膨胀效应的存在,也只能说这些效应都是由速度引起的时间膨胀效应,而“非加速度效应”。

相对论中引起广泛兴趣的一个问题是“孪生子佯谬”问题,它曾困扰了物理学界几十年,特别是50年代掀起了空前激烈的争论,发表了许许多多的文章。然而时至今日,“孪生子佯谬”的问题,可以说不但在实验上而且在理论上都已经很好地解决了,因而不妨将之改称为“孪生子效应”。可是,近年国内有人认为“孪生子效应”并没有从理论上得到解决,而且沿用当今的理论(相对论)可能导致某观测者看到“返老还童”的荒谬结果。这种见解其实是把两个坐标系中观测到的钟慢效应,误认为是某个观测者所“看到”的结果。

根据Einstein的观点,狭义相对论效应不具有累积效应。如果不具有累积效应,那么在实验中怎么测量狭义相对论效应?时间与长度的变换符合洛伦兹变换,您如何理解双生子佯谬和潜水艇悖论?假设一个物体在运动方向上的长度为 $l$ ,开始由静止做加速运动,当速度达到 $0.99c$ 时开始减速直到静止,那么开始与最后的长度是否相等?如果速度相等说明不具有累积效应,时间变换也符合洛伦兹变换,为什么现代物理学的实验证明时间膨胀(譬如 $\mu$ 子绕地运行)具有累积效应,而长度收缩是瞬时效应?

从Einstein狭义相对论我们知道,运动物体发生“尺缩”、“钟慢”等效应。运动物体“尺缩”效应在狭义相对论看来并不是动体自身物质的收缩,只是时空的一种性质,是时空测量中必然产生的效应,动体的内部结构不会发生任何变化;按Einstein自己的说法:狭义相对论是涉及到刚性棒、理想钟和光信号的理论,

根本不考虑动体物质的具体结构和动力学效应问题，这样狭义相对论中动体的“尺缩”“钟慢”等效应不是一种伴随动体物质结构变化的物理实在以及动体运动过程中基本性物理量的真实变化，在狭义相对论中，根据洛伦兹变换运动物体的长度在运动方向上收缩，是观察效应，还是本质规律？洛伦兹认为这种收缩效应是实在的、客观的，是真实的动力学效应，这种收缩效应引起物质内部结构和物理性质变化，对物质来说具有普遍意义。狭义相对论中‘钟慢、尺缩’属运动学效应，而广义相对论中。它们已属动力学效应，不应该是观察效应，而是物理的真实性。Einstein 曾说过：“……仅仅是外部关系的结果，不是一种真正的物理变化”。如果仅仅是观测效应，显然不符和 Einstein 的哲学观——“有一个独立于知觉之外的客观世界是一切自然科学的基础”。

为了导出狭义相对论，爱因斯坦作出了两个假设：运动的相对性(所有匀速运动都是相对的)和光速为常数(光的运动例外,它是绝对的)。他的好友物理学家 P.Ehrenfest 指出实际上蕴涵着第三个假设，即这两个假设是不矛盾的。物体运动的相对性和光速的绝对性，两者之间的相互制约和作用乃是相对论里一切我们不熟悉的时空特征的根源。(李新洲,《寻找自然之律 -- 20 世纪物理学革命》)

## 2、Lorentz transformation 的修正

如果认为加速运动的物体引力质量增加、长度缩短、时钟延缓，减速运动的物体引力质量减小、长度增加、时钟加速，这样我们便可以看出自然界的改变具有对称性。这样 twins paradox 便可以迎刃而解，因为双生子在运动过程中既有加速过程，也有减速过程，时钟既有延缓过程，也有加速过程，所以见面时年龄应当相同，潜水艇悖论根本不存在。

在上文的理想实验中，物体的引力质量（或者长度）开始与最后应当相等，静止引力质量（或者长度）是绝对的，运动引力质量（或者长度）是相对的，运动引力质量（或者长度）是在实验过程中观察者测得的引力质量（或者长度），并非内禀引力质量（或者长度），不同观察者测得的引力质量（或者长度）不同。

因鉴于此，现将 Lorentz transformation 修正如下：

$$t = t_0 [1 - (\int_0^t a dt_0)^2 / c^2]^{+1/2}, l = l_0 [1 - (\int_0^t a dt_0)^2 / c^2]^{+1/2}, \text{加速时取负号, 减速时取正号。}$$

1966 年 Farley 等人以 2% 的精度证实， $\mu$  子的衰变率与加速度无关。笔者认为实验中可能只考虑到法向加速度，没有考虑到切向加速度，上式中的加速度为切向加速度。

根据 space-time 平权理论，加速运动的物体时钟延缓与长度缩短本质是一致的，速度不变（即能量不变）时长度与时间不变，进一步说明了场的 space-time 本质观点的正确。根据这个修正，上面的潜水艇悖论自然不存在，潜水艇对于不同的观察者看都应当是相对于海平面静止的。这样修正与 Lorentz transformation 并不矛盾，与上面的实验也符合，狭义相对论效应不是由加速度决定，而是由加速度对于时间的积分决定。（我认为这一修正可能只是近似，可以从广义相对论推导而来，希望有关数学家可以做这方面的工作。）

## 3、狭义相对论效应与广义相对论效应的统一

狭义相对论与广义相对论是紧密地联系在一起，有质物体的最主要的作用就是产生空间曲率，一切物体在重力场中运动的轨道之所以会发生弯曲在于空间本身是弯曲的，引力质量的大小是物体周围空间曲率大小的表现形式，因此加速运动的物体引力质量的增加可以认为从 space-time 中获得，此时引力场增强。不同观察测得同一物体的引力质量不同，但是宇宙的总能量不变，进一步说明能量守恒定律的正确性，即狭义相对论效应是能量守恒定律的表现形式。相对论中的时间、长度、引力质量不但具有相对性，同时具有绝对性，是相对性与绝对性的统一，Bohr 的观点具有一定的局限性。广义相对论揭示了物质对 space-time 结构的反作用。因此一个粒子的引力质量并不是它本身所特有的，而是由宇宙中所有其它粒子决定的。这样运动引力质量与静止引力质量之间便统一起来，从根本上解决了上面的问题。狭义相对论可以从广义相对论推导出来。我们在地球上之所以能站起来行走，是由于一切天体都向地球发射引力波。按照广义相对论，只在引力作用下运动的物体，如果用它自己的时钟测量，它总是走者一条费时最多的路线。

设想宇宙中的每一个粒子都带有自己的时钟（一个给定的时间），固有时间（绝对时间）是对相对时间流逝的仅有的有内禀特性的度量方式。例如当物理学家列出某种亚核粒子的寿命时，他们指的是用粒子自身的钟测得的寿命，而不是实验者测得的寿命。因为如果用实验者测得的寿命，还必须说明粒子与实验者的相对加速度，根据广义相对论它不是一个内禀的物理量，因此会因不同实验而异。相对论天空存在着“两朵乌云”，这是 Einstein 发现的：第二朵乌云：在狭义相对论中，任何事物都随观察者的不同而不同。它还包含下面两层意思：一个是每个观察者都只承认自己的结论正确，其他观察者的结论不正确；另一个是所有观察者都对。想在两个观察者中决定谁是正确的，既没有经验上的方法，也没有理论上的方法。这就是相对论的相对性。很明显，这个观点与经典天体力学中的观念相矛盾。“Einstein 自从量子力学革新了物理学中的思想方法以后，到他逝世为止，一直想要保持经典天体力学中的观念，即一个系统的客观物理状态必须跟观察它



的方式完全无关。虽然 Einstein 坦白地承认，他对这方面达成一个完整的解答的希望到目前为止尚远未满足，而且他还没有证明这一观点的可能性，他认为这是一个有待解决的问题。（W.泡利的《相对论》补注 23）”后面我们将分析根据引力场的时空本质的观点，这朵乌云根本不存在，观察者运动状态不同测量物理量不同，主要是相对时空作用的结果，但并非实证主义的观点。

在 Lorentz transformation 修正后，狭义相对论仍然仅适用于惯性参照系。由于相对 space-time 总会影响绝对 space-time 的结构，因此不可能通过追求物理学世界图景的客体性的意向从其实在图景中排除观察及其制约着的效应，重新解释相对论与量子力学，不过相对论效应与测不准原理也是客观的，Einstein 与 Bohr 分别看到了问题的一个方面。这样修正也符合 Einstein 的基本思想。

由于狭义相对论的几何基础是 Minkowski 空间，它仅适用于直线运动。在曲线运动中速度的大小和方向都可能变化，虽然曲线的每一点可以认为是直线段，但是总体上不能看作直线。因此曲线运动必须用广义相对论解释， $\mu$ 子作圆周运动时间延缓，必须用广义相对论研究。狭义相对论应当是广义相对论的特例。在没有物质的空间中，场方程的解就是 Lorentz transformation。

广义相对论认为，万有引力实质上只不过是弯曲时空的物理效应，时空弯曲由物质的分布及其运动决定。从大范围讲，时空是弯曲的，平直时空只存在于小的局部范围内。这就是为什么在宇宙中实际上总是找不到严格的惯性系，而只能找到近似的局部惯性系的原因。

孪生子效应之所以出现“佯谬”或“悖论”，不在于留在地球上的孪生子所处的惯性参考系中是否观测到旅行孪生子的时钟变慢，问题的症结在于从旅行孪生子所处的非惯性参考系中是否也能得到同样的结果。从非惯性系的观点来处理这个问题，借用发展广义相对论所用的一套张量分析数学工具进行计算是方便的。在这个意义上说，孪生子效应的比较令人信服的解决还是与广义相对论有关的。

#### 4、爱因斯坦的早年哲学观

##### （一）唯心主义者

第一阶段唯心主义者（1879年——1891年），当时 Einstein 是一个宗教信仰者，一个唯心主义者。他在《自述》里写道：那时“我还是深深地信仰宗教”的。他作为一个有思想、有感情的人，出于对追名逐利的世俗传统的厌恶，因而到宗教中去寻找出路和安慰。但是，“这种信仰在我 12 岁那年就突然中止了。”由于读了通俗的科学著作，Einstein 很快相信《圣经》里的故事有许多不可能是真实的。

##### （二）实证主义者

第二阶段实证主义者（1891年——1916年），它自 1891 年起像一根红线一样贯穿于 Einstein 的一生，成为他的哲学思想的牢固基石和本质特征。十七世纪牛顿时代的物理革命是文艺复兴人文主义思想的直接结果，而二十世纪初的物理学变革是十九世纪末哲学变革的结果。爱因斯坦统一性思想是建构在物质性基础之上的，因此，它的最显著、最根本的特征就是坚持了唯物主义路线。也可以说，这就与恩格斯首先提出的“物质性统一”思想保持了本体论意义上的一致。恩格斯认为世界是统一的，并且这个统一的基础是它自身的物质性：“世界的真正的统一性是在于它的物质性，而这种物质性不是魔术师的三两句所能证明的，而是由哲学和自然科学长期的和持续的发展来证明的。

上大学时，爱因斯坦有几位卓越的数学老师，按理说应该在数学方面得到深造，可是他“大部分时间却是在物理实验室工作，迷恋于同直接经验接触”。他曾设计了用热电偶检测地球运动引起光速变化的实验，由于得不到设备和支持，实验最终未能完成。爱因斯坦的女婿凯泽尔在传记中写道：“谁也无法使他参加数学讨论会，他还没有看到掌握存在于数学之中的创造力的可能性。他希望完全凭经验进行研究，以适应他当时的科学情绪。作为一位自然科学家，他是一位纯粹的经验论者。”凯泽尔断言早期的爱因斯坦是“纯粹的经验论者”固然言过其实，但至少道出了爱因斯坦当时的经验论思想倾向是相当明显的。

爱因斯坦的这一倾向也表现在他与奥斯特瓦尔德的关系上。在 1901 年那个心情沉重的春天，面对失业的爱因斯坦于 3 月 19 日和 4 月 3 日两次给这位莱比锡大学的化学教授写信，恳请谋取一个实验员的职位（看来他相信自己是一个实验论者）。他说他发表的毛细管论文是受到奥斯特瓦尔德《普通化学教程》一书的启发，说自己是“一个对绝对测量很熟悉的数理工作者”。爱因斯坦的父亲也于 4 月 13 日贸然给奥斯特瓦尔德写信，为儿子求职，说他儿子“在当代所有大物理学家中最崇敬奥斯特瓦尔德”。

爱因斯坦选中奥斯特瓦尔德并非偶然。因为奥斯特瓦尔德不仅是一位第一流的物理化学家，而且还是世纪之交一位活跃的哲人科学家。他反对对自然现象作纯力学的解释，坚定地怀疑并批判了力学自然观。以他为代表的能量论者认为，只要能测量观察中所出现的各种量（例如能量、压力、体积、温度、热、电位、质量等）即可，用不着把它们归结为假想的原子过程或动力学的量。他们谴责像以太这类具有无法直接观测到的性质的概念。他们发出号召，要求重新考察作为所有物理推理基础的基本原理，尤其是要考虑牛顿运动定



律、力和作用的概念、绝对运动和相对运动概念的适用范围。所有这些破除迷信的要求(除了反原子论),肯定与年轻的爱因斯坦的志趣十分契合,而且现象论的思想也与他的经验论追求相近。

### 5、洛伦兹变换是动力学效应

我们认为,对于高速力学运动,实际上存在着不同性质的时空变换。我们把它们分别称为“运动学变换”与“动力学变换”:(相对论的)“运动学变换”指的是:对于同一物体在不同惯性坐标中测量它的长度、运动所经历的时间间隔以及质量,此时被测物体本身运动状态不变,只是由于测量系统与被测物体的关系不同而得到不同结果,这时自然不存在物体属性的实在性变化。动力学变换(效应)指:在同一坐标系、针对同一物体的静止和运动两种不同状态,测量其长度、运动所经历的时间间隔以及质量。此被测物体由静止到运动,经历一个加速过程,此时,长度收缩、时间延长、质量增加不仅是观察效应,而且是物体属性变化。这是由于有关“高速运动介子寿命的延长”“加速器中被加速电子、质子的惯性质量加大”,以及“铯原子钟绕地球飞行后变慢”的实验告诉我们:物体的实在属性确实发生变化,而不是观察效应。至于这种变化的机制,还有待进一步研究。狭义相对论就其本身的内容来说,是研究不同惯性系间时空坐标变换。因此,这种物质属性的变化已超出了狭义相对论的范畴。——钱时惕

洛伦兹认为这种收缩效应是实在的、客观的,是真实动力学效应,这种收缩效应引起物质内部结构和物理性质变化,对物质来说具有普遍意义。从 Einstein 狭义相对论我们知道,运动物体发生“尺缩”、“钟慢”等效应。运动物体“尺缩”效应在狭义相对论看来并不是动体自身物质的收缩,只是时空的一种性质,是时空测量中必然产生的效应,动体的内部结构不会发生任何变化;按 Einstein 自己的说法:狭义相对论是涉及到刚性棒、理想钟和光信号的理论,根本不考虑动体物质的具体结构和动力学效应问题,这样狭义相对论中动体的“尺缩”“钟慢”等效应是不是一种伴随动体物质结构变化的物理实在以及动体运动过程中基本物理量的真实变化。狭义相对论中‘钟慢、尺缩’属运动学效应,而广义相对论中它们已属动力学效应,不应该是观察效应,而是物理的真实性。Einstein 曾说过:“……仅仅是外部关系的结果,不是一种真正的物理变化”。如果仅仅是观测效应,显然不符和 Einstein 的哲学观——“有一个独立于知觉之外的客观世界是一切自然科学的基础”。

文章前面分析了洛伦兹变换,说明了其真实含义,使狭义相对论时钟收缩效应与广义相对论的时钟收缩效应统一在一起,圆满地解释了双生子佯谬和潜水艇悖论,说明了相对性原理正确的原因。

狭义相对论中的运动长度与运动时间其实是相对 space-time,并非绝对 space-time,这是 Einstein 实证哲学观的体现。马赫的观点是,物体的运动不是绝对空间中的绝对运动,而是相对于宇宙中其他物质的相对运动,因而不仅速度是相对的,加速度也是相对的;在非惯性系中物体所受的惯性力不是“虚拟的”,而是一种引力的表现,是宇宙中其他物质对该物体的总作用;物体的惯性不是物体自身的属性,而是宇宙中其他物质作用的结果。马赫的精辟见解被 Einstein 取名为马赫原理。狭义相对论与广义相对论中的时钟延缓本质上是一样的,加速运动的物体激发的引力场的增强,空间曲率变大,相当于引力质量增加,长度缩短,时钟延缓;减速运动恰好相反。如果将引力场与产生引力场的源(物质)作为一个整体来考察。则牛顿的万有引力定律是从整体的角度来考察万有引力场,比如引力质量、惯性质量等描述的是物体和场这个整体的物理性质。只要产生场的物体的整体性质在空间的状态不随时间变化、也不随物体的运动而变化。我们就认为这些引力质量和惯性质量总是守恒的。

在爱因斯坦的狭义相对论论文中,既有大胆的假设和虚构的成分(这是理性论思想的体现),也有明显的经验论和操作论的成分。而且,马赫的思维方式对爱因斯坦的影响也十分明显,它显著地表现在两个相互关联的方面。第一,爱因斯坦在他的论文开始就坚持,只有对各种概念,尤其是对时间和空间概念的意义进行认识论的分析,才能理解物理学的基本问题。第二,爱因斯坦认为各种感觉,也就是各种“事件”所提供的东西等同于实在,而不是把实在放在感觉经验之外或感觉经验之后的位置上。根据 Einstein 的观点,狭义相对论效应不具有累积效应。如果不具有累积效应,那么在实验中怎么测量狭义相对论效应?时间与长度的变换符合洛伦兹变换,您如何理解双生子佯谬和潜水艇悖论?假设一个物体在运动方向上的长度为  $l$ ,开始由静止做加速运动,当速度达到  $0.99c$  时开始减速直到静止,那么开始与最后的长度是否相等?如果长度相等说明不具有累积效应,时间变换也符合洛伦兹变换,为什么现代物理学的实验证明时间膨胀(譬如  $\mu$  子绕地运行)对于空间具有累积效应,而长度收缩对于时间是瞬时效应?

有一种比较普遍的观点,即相对论是一种基于测量的理论。关于相对性理论是一个测量理论,有美国大学物理教科书编者 R. Resnick 先生也作过如下评述:在经典力学中,运动影响测量也不是一个奇怪的概念。例如,由测量得到的声音或者光波的频率与声源或者光源相对于观测者的相对运动有关。这一现象称为 Doppler 效应,他是每一个人都熟悉的现象(比如汽车从身边驶过那个机声声调的变化)。虽然,所有的

物理学都认为地面上的观测者和行驶中的火车上的观测者所测得的同一运动物体的运动速度，动量和动能数值是不同的，但是在经典物理学中，空间和时间的测量是绝对的。而在相对性理论中，(除了光速的测量是绝对的，与观测者是否在运动无关)包括空间与时间的测量都是相对于观测者的。不仅实验事实推断起来与经典物理相矛盾，而且只有考虑了时间与空间的相对性以后，才能使依据物象来完美构造的物理定律对于所有的观测者来说是不变的，即物理定律的绝对性。的确，如果像时间和长度的经典概念所要求的那样，放弃 Maxwell 电磁场方程的确定形式，那么留给我们的将是一个任意而又复杂的方法系统。比较起来，相对性理论那个方法才是确定的和简单的。所以，相对性理论应当称作绝对论。这个理论的主要之点不在于测量数值的相对效应，而在于把物理定律的相对性移去了，反倒强调了物理定律的绝对性，即所谓事物运动规律不依赖于观察者的立场。

从 Einstein 狭义相对论我们知道，运动物体发生“尺缩”、“钟慢”等效应。动体“尺缩”这种收缩效应在狭义相对论看来并不是动体自身物质的收缩，只是时空的一种性质，是时空测量中必然产生的效应，动体的内部结构不会发生任何变化；而洛伦兹认为这种收缩效应是实在的、客观的，是真实的动力学效应，这种收缩效应引起物质内部结构和物理性质变化，对物质来说具有普遍意义。按 Einstein 自己的说法：狭义相对论是涉及到刚性棒、理想钟和光信号的理论，根本不考虑动体物质的具体结构和动力学效应问题，这样狭义相对论中动体的“尺缩”“钟慢”等效应是一种伴随动体物质结构变化的物理实在以及动体运动过程中基本物理量的真实变化。

根据 Einstein 的观点，在狭义相对论中，Lorentz 收缩应当属于观察效应，然而到了广义相对论时空弯曲(收缩)是本质规律。它确实是一种观察得到的结果，但是对于运动体系确实存在这种规律。一维可以理解为数轴，理论上有了原点、单位、方向就可以使每一个时间点与一个数值(时间)对应起来。但我们某时刻总是在某时间点上及不能倒退，也不能超前，也不能让时间停止。这样的时间可以与时钟程对应关系。但建立坐标系时，数轴变成了坐标轴。坐标轴上的刻度，表示的不再是坐标轴上的值，而是扩展到整个坐标系，即坐标线(二维)和坐标面(三维)。时空参考系中的时间，是四维时空中的一维。时钟的某一时刻都应该有时空图中的坐标线、坐标面与之对应，Lorentz transformation 中是有这些东西的，称之为同时性。但在非惯性系中，由于产生了时空弯曲，同时性失去了原有的意义。

在相对论中，Einstein 指出，空间收缩的效果是可测量的。然而 Einstein 却又宣称，对同一参考框架，两不同的时空度规(metric)解(例如：史瓦西(Schwarzschild)解和各向同性的解)在物理上是等效的。基于史瓦西解和各向同性的解产生相同的光线偏移，Einstein 评论，“应该注意，这个结果和相关的理论，同样地不被我们的坐标系统的任意选择所影响”。宋健说，关于 GPS 能否检验收缩因子的存在这个问题，至今使研制 GPS 的人头痛。航天部门林金教授已多年研究此问题，目前还介入指导中国的 GPS 研制。泡利在其《相对论》一书中有一段评论(上海科学技术出版社，凌德洪等译)：“……我们知道，这种收缩是和同时性的相对性有关的，正因为这个理由，曾经有过这样的论断，这种收缩仅是一种‘表观’收缩，换句话说，它是由于我们的时空测量所引起的……但是我们不认为这样的观点是合适的，而认为在任何情况下洛伦兹收缩原则上是可以观察的。在这一方面，爱因斯坦的理想实验是富于启示性的。它证明了观察洛伦兹收缩所必须的，测定空间上相互隔开的两事件的同时性，可以完全借助于量杆来完成，而不必用时钟。我们设想用具有相同的静止长度  $L_0$  的两个杆  $A_1B_1$  和  $A_2B_2$ ，它们分别以大小相等，方向相反的速度  $v$  相对于  $K$  运动。当  $A_1$  和  $A_2$ ， $B_1$  和  $B_2$  分别重合时，我们在  $K$  中标出这两点并记为  $A^*$  和  $B^*$  (由于对称性的理由，这种重合在  $K$  中是同时发生的)。因而  $A^*B^*$  的距离当用在  $K$  中为静止的杆来度量时，其值为  $L=L_0*(1-v^2/c^2)^{0.5}$ 。由此可知洛伦兹收缩不是单一量杆所量出的性质，而是两根彼此作相对运动的同样的量杆之间的倒易关系，这种关系原则上是可以观察的。”

瓦瑞恰克是在狭义相对论诞生之初就对相对论作出重要贡献的物理学家，发现了相对论速度空间可以用罗氏几何来理解。对于相对论的时空观的提法，他提出了自己的看法，就是认为“尺缩”仅仅是由“校准时钟和度量长度的方法所引起的……”。这是他在莱比锡《物理学的期刊》上一篇《关于艾伦菲斯特的悖论》论文中提出的，爱因斯坦觉得“对这些意见是不应当置之不理的，因为它们可能引起混乱。”于是写了《关于艾伦菲斯特的悖论——对 V. 瓦瑞恰克的论文的意见》，发表在同一刊物上，文章短小，似乎击中要害，我们引述最重要的文字(《爱因斯坦文集》第二卷，范岱年等编译)：“这一点瓦瑞恰克先生或许会承认……但是他也许会坚持这样的观点，认为洛伦兹收缩的根源完全在于任意规定‘我们校准时钟和度量长度的方法’。下述理想实验表明，这种观点是多么缺乏根据。设有两个(静止时相比较)等长的量杆  $A'B'$  和  $A''B''$ ，它们能够沿着一个非加速的坐标系的  $X$  轴，同  $X$  轴平行的，以同样的取向滑动。当  $A'B'$  向  $X$  轴的正方向， $A''B''$  向  $X$  轴的负方向，以任意大的恒速度运动时， $A'B'$  和  $A''B''$  应当相互滑动而过。这时端点  $A'$  和  $A''$  在  $X$



轴的一个  $A^*$  点相遇，端点  $B'$  和  $B''$  在  $X$  轴的一个  $B^*$  点上相遇。于是，根据相对论，距离  $A^*B^*$  小于量杆  $A'B'$  和  $A''B''$  中任何一个的长度，这是可以由一个在静止状态中同线段  $A^*B^*$  相重合的量杆来加以证实的。”

从 Einstein 狭义相对论我们知道，运动物体发生“尺缩”、“钟慢”等效应。运动物体“尺缩”效应在狭义相对论看来并不是动体自身物质的收缩，只是时空的一种性质，是时空测量中必然产生的效应，动体的内部结构不会发生任何变化；按 Einstein 自己的说法：狭义相对论是涉及到刚性棒、理想钟和光信号的理论，根本不考虑动体物质的具体结构和动力学效应问题，这样狭义相对论中动体的“尺缩”“钟慢”等效应不是一种伴随动体物质结构变化的物理实在以及动体运动过程中基本性物理量的真实变化，在狭义相对论中，根据洛伦兹变换运动物体的长度在运动方向上收缩，是观察效应，还是本质规律？洛伦兹认为这种收缩效应是实在的、客观的，是真实的动力学效应，这种收缩效应引起物质内部结构和物理性质变化，对物质来说具有普遍意义。狭义相对论中‘钟慢、尺缩’属运动学效应，而广义相对论中。它们已属动力学效应，不应该是观察效应，而是物理的真实性。Einstein 曾说过：“……仅仅是外部关系的结果，不是一种真正的物理变化”。如果仅仅是观测效应，显然不符和 Einstein 的哲学观——“有一个独立于知觉之外的客观世界是一切自然科学的基础”。

钱时惕讲：“我们认为，对于高速力学运动，实际上存在着不同性质的时空变换。我们把它们分别称为“运动学变换”与“动力学变换”：（相对论的）“运动学变换”指的是：对于同一物体在不同惯性坐标中测量它的长度、运动所经历的时间间隔以及质量，此时被测物体本身运动状态不变，只是由于测量系统与观测物体的关系不同而得到不同结果，这时自然不存在物体属性的实在性变化。动力学变换（效应）指：在同一坐标系、针对同一物体的静止和运动两种不同状态，测量其长度、运动所经历的时间间隔以及质量。此被测物体由静止到运动，经历一个加速过程，此时，长度收缩、时间延长、质量增加不仅是观察效应，而且是物体属性变化。这是由于有关“高速运动介子寿命的延长”“加速器中被加速电子、质子的惯性质量加大”，以及“铯原子钟绕地球飞行后变慢”的实验告诉我们：物体的实在属性确实发生变化，而不是观察效应。至于这种变化的机制，还有待进一步研究。狭义相对论就其本身的内容来说，是研究不同惯性系间时空坐标变换。因此，这种物质属性的变化已超出了狭义相对论的范畴。” Einstein 说过：……这也许是物理学的一个特征，某些基本问题可能会永远纠缠着我们。狄拉克临终前提醒我们：……对狭义相对论的认识还远没有完善。2005 年 6 月，英国的 J.Dunning-Davies 教授曾说过一段很有意思的话：“在 20 世纪末，许多人仍象对待圣物那样盲目相信由相对论推出的任何结果。他们忘记了所有理论都是人为的，而宇宙却不是人造的。任何理论或模型，只不过是微不足道的人类智力作出的某种解释。但许多人如此深信某个理论的正确，而知名权威们竟不惜代价地阻止任何人对这些理论提出任何问题。Dingle（对相对论）的忧虑至今被隐藏起来，Thornhill 对狭义相对论（SR）的有效性的怀疑难见天日。……实际上，主流物理学并非如大多数人以为的那样坚实与无懈可击。”

根据 Einstein 的观点，狭义相对论效应不具有累积效应。如果不具有累积效应，那么在实验中怎么测量狭义相对论效应？时间与长度的变换符合洛伦兹变换，假设一个物体在运动方向上的长度为 1，开始由静止做加速运动，当速度达到  $0.99c$  时开始减速直到静止，那么开始与最后的长度是否相等？如果速度相等说明不具有累积效应，时间变换也符合洛伦兹变换，为什么现代物理学的实验证明时间膨胀（譬如  $\mu$  子绕地运行）具有累积效应，而长度收缩是瞬时效应？

我们生活的世界是 3 维线性空间，加上时间维是 4 维。在这个空间上给出一个度量（就是一个二次型矩阵）：标准的情形  $\text{diagonal}(1, 1, 1, -1)$ 。观测者的参考系不同，这个度量也不同。有人认为度量是人为给定的，因为度量的选择不能改变整个空间或流形（就是高维的曲面，广义相对论中存在弯曲）的微分结构和拓扑结构。度量的选取乃是观察者的感觉，同一个客体可以给出不同的度量，但是最终决定空间结构的拓扑量和微分结构不会改变（Milnor 怪球是拓扑同胚但微分结构不同的例子）。‘钟慢、尺缩’等度量的改变是观察效应，还是物理的真实性，决定于我们认为到何种程度上的结构是真实存在的。（拓扑，微分，度量是逐步细化、逐步更高层次的结构。）我们处理的眼光角度不同，得出“‘钟慢、尺缩’等度量的改变是观察效应，还是物理的真实性”问题的答案就不同。

**笔者认为，Lorentz transformation 不是观测效应，是物质运动过程中的真实变化，不具有累积效应，它的本质只能通过广义相对论才能理解。**

## 6、修正后的洛伦兹变换的实验验证问题

通过这样修正狭义相对论，不但可以解释减速以及虚速率下的相对论，而且发现相对论更加具有数学上的美感：运动物体的长度既可以增加，也可以缩短；运动时钟既可以延缓，也可以加速；运动物体的引力质量既可以大于静止质量，也可以小于静止质量。自然界物体的运动——加速与减速、实速率与虚速率更

加显示出对称性与统一性，反映在科学上便具有科学美。无疑这样修正符合 Einstein 的科学思想——“大自然总是喜欢简单与美感。”笔者认为简单本身就是一种美感。进一步可以设想，这样还可以解释一些用现代物理学无法解释的现象，譬如由于运动物体的引力质量可以减小，可以解释动物在死亡过程中重力略微减小——其体内某些物质的运动速度在减速（当然应该利用实验证实）等等。澳大利亚新南威尔士大学网站对双生子问题的解释网页 <http://www.phys.unsw.edu.au/~jw/twin.html> 说明了上述观点的正确。

假设 A、B 两物体的静止质量相等，一个物体以角速度  $\omega$  旋转，同时两物体以  $V$  作平动，那么根据 Lorentz transformation，他们的能量相等，可是旋转物体具有转动动能，那么如何解释？狭义相对论只研究了平动状态下的情形，因此在转动状态下需要进一步修正。假设一个物体的静止引力质量为  $m_0$ ，转动动能为  $E$ （计算时应当考虑相对论效应），则它的能量为  $m_0c^2+E$ ，此时它的运动引力质量为  $(m_0c^2+E)/c^2$ 。如果一个物体同时作平动与转动，那么转动时的运动质量可以作为平动时的静止质量。自旋是带电粒子的相对性理论的一个自然特色，它和广义相对论是以一种未知的方式深刻地联系在一起。两个电子的总自旋通过体系轨道波函数的对称性质，对氦原子的能量具有很大的影响。

下面的实验可以验证修正的 Lorentz transformation 的正确性：用宇宙飞船携带国际米原器、时钟到月球旅行一周，在运动过程中使米原器始终沿着运动方向。根据广义相对论，在运动过程中引力场在减弱，返回后米原器的长度应当基本不变，时钟的运动应当加速。Hafele 和 Keating 把铯原子钟分别放在地面和飞机上，据说飞机向东绕地球一周返回地面，飞机上的铯原子钟比地面的慢，而飞机向西绕地球一周返回地面，飞机上的铯原子钟比地面的快，说明了上面的修改是正确的。，“根据凯利博士从美国海军天文台索取的原始资料复印件，四个钟的其中三个有严重的不稳定基线漂移。用 Hafele 在 1971 年内部报告上自己的话说，多数人包括我自己不认为这些原子钟指出的时间加快说明任何问题，理论与测量数值的不同令人困扰。理论上东向飞行的钟应比地面钟-40ns，西向飞行的钟应比地面钟+275ns。而实验值用最稳定的 447 号钟，东向飞行的钟比地面钟-97ns，西向飞行的钟比地面钟+26ns，从对比数据可以发现实验的值与理论计算发生严重的偏差，根本谈不上实验验证了狭义相对论的时间延缓效应。”当物体作匀速直线运动时，物体的质量没有变化，周围的时空结构也没有变化，因此与静止状态效果一样，并不辐射引力波，相对性原理是正确的。

### 7、几个狭义相对论验证实验的重新分析

尽管相对论解释了许多实验，但是否揭示了导致实验的本质原因，需要继续研究。1971 年美国科学家在地面将精度为 0.00000001 秒的铯原子钟对准，把其中 4 台原子钟放到喷气式飞机上绕地球一圈，然后返回地球与地面上静止的原子钟比较，结果是绕了地球一圈的这 4 个原子钟比地面上的慢了 59 毫微秒（0.000000059 秒），与广义相对论的计算结果误差为 10%。后来将这个实验的喷气式飞机换成宇宙飞船，实验数据更接近广义相对论的计算结果。物理学家曾经利用原子钟高速运动时钟减缓寿命的延长，说明狭义相对论的正确，笔者认为这是不妥的。因为原子钟在高速运动过程中，地面上的时钟相对于它也在高速运动，为什么地面上的时钟不减慢呢？因为原子钟在实验中有一定的飞行高度，在飞行过程中实际是变速运动，加速运动的物体可以产生引力场，根据广义相对论引力场中时间延缓，所以对此应当重新分析。引力场强度不变，时钟的快慢不变，强度变大，时钟延缓，反之时钟加速。1971 年，为了验证相对论的时间变化，美国进行了原子钟环球飞行实验，其结果是：时钟向东飞行时慢了  $59 \times 10^{-9}$ ，往西飞行时快了  $273 \times 10^{-9}$ 。广义相对论的计算值与实验结果有一定的偏差（尤其钟快现象）。总之，在实验中的三组原子钟相互看来，实验中既有“动钟变慢”现象，也有“动钟变快”现象。

一般认为，来自外层空间的宇宙线轰击地球大气，产生了大量的  $\mu$  介子，这些  $\mu$  子具有很宽的能量范围，飞行速度有大有小，高能量的  $\mu$  子速度非常接近光速  $c$ ，可大于  $0.9954c$ 。 $\mu$  子寿命很短暂，产生后会很快衰变掉，各个  $\mu$  子的实际寿命有长有短，但是当我们统计群体  $\mu$  子的平均寿命时发现，其平均寿命是恒定的。一群  $\mu$  子衰变掉一半所需的时间，称为半衰期，常被用作寿命的标志，大量的实验统计出静止  $\mu$  子的半衰期  $T = 1.53 \times 10^{-6}$  秒，恒定不变。在  $\mu$  子和介子实验中， $\mu$  子和介子作有加速的圆周运动，实验证实作这样运动的  $\mu$  子和介子的平均寿命大于静止  $\mu$  子和介子的平均寿命。因为 1963 年的一次实验中，人们在高 1910 米的山顶上，测量铅直向下的速度在  $0.9950c \sim 0.9954c$  之间的  $\mu^-$  子数目，每小时平均有  $563 \pm 10$  个；然后在离海平面 3 米高的地方测量相同速度的  $\mu^-$  子数目，平均每小时  $408 \pm 9$  个。 $\mu^-$  子从山顶运动到海平面所需

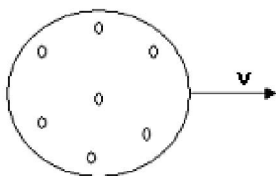
$$t = \frac{(1910 - 3)m}{0.9952 \times 3 \times 10^8 \text{ m/s}} = 6.4 \times 10^{-6} (s)$$

时间应为：

。这是静止  $\mu^-$  子半衰期  $(T_{1/2})$  的 4 倍多，如果高速运动的  $\mu^-$  子半衰期和静止时相等的话，人们预期在飞行经过 1907 米距离后，在海平面附近的  $\mu^-$  子数应不



$\frac{563}{2^4} \approx 35$   
到  $2^4$  个。而当时实际测量却有 408 个，这清楚地表明，运动着的  $\mu^-$  子半衰期增长了，或者说，衰变过程变慢了。



### 【1】 【2】

笔者认为这是一个广义相对论效应—— $\mu$ 子和介子在飞向地球的过程中,引力场在增强,同时由于 $\mu$ 子带有电荷,地磁场的存在相当于加强了引力场。笔者认为下面的实验也应当是一个广义相对论效应,长度收缩不具有累积效应:在现代高能物理研究中常用的粒子加速器中,粒子可以被加速到 0.9998c 的高速。从下表可以看出原长 1 米的原子管道的长度收缩效应。

速度	静止长度	运动长度
0.1c	1m	0.995m
0.5c	1m	0.886m
0.8c	1m	0.6m
0.9c	1m	0.436m
0.97c	1m	0.243m
0.99c	1m	0.141m
0.999c	1m	0.045m
0.9998c	1m	0.02m

参考文献:

【1】A.P. 弗伦奇 著《狭义相对论》 人民教育出版社 1979 年 6 月第 1 版。

【2】倪光炯 李洪芳 著《近代物理》上海科学技术出版社 1979 年 8 月第 1 版。

## 8、同时性的绝对性

泡利所说“测定空间上相互隔开的两事件的同时性,可以完全借助于量杆来完成,而不必用时钟。”绝对有序的概念和普适时间的概念都包含同时的绝对性论断,这与狭义相对论的同时的相对性是完全矛盾的。最后可以提到,在时间观念上,作为现代物理学的两个支柱的相对论和量子理论一直存在着抵触。量子力学在绝对意义上使用时间的概念,同时性也具有绝对的意义,而相对论认为这是不容许的。正如狄拉克所说:“这里我们就碰到了巨大困难的开头。……这个抵触是最近四十年来物理学的主要问题。可以说,物理学家们的主要努力全是围绕着要协调相对论和量子力学这一问题而转的。对于这一课题已经做了大量工作,但还看不到解决的办法。”现在,远距关联实验的结果也许为我们解决这个问题提供了一点依据和线索。

根据相对绝对论,同时性应当是相对性与绝对性的统一,也符合唯物辩证法的观点——除了作为整体的宇宙及其一般规律而外不承认任何绝对不变的东西和绝对不变的界限。狭义相对论引发了对空间和时间的物理概念的清晰理解,对运动着的测量杆和测量钟的行为的认识。它在原则上去掉了绝对同时性的概念,表明了当处理运动速度同光速相比不是小的可以忽略的运动时,如何对运动规律进行修改。它导致了 Maxwell 的电磁场方程组形式上的澄清,尤其是它还引发了对 electric field 和磁场本质上的同一性的理解。它把质量守恒和能量守恒这两个规律统一起来,从而展示了质量和能量的等效性。从形式的观点上看,人们可以这样来刻画狭义相对论的成就:它概括性地表明了普适常数 C (光速) 在自然规律中扮演的角色,同时展示了以时间为一方,空间坐标为另一方,两者进入自然规律的方式之间存在着密切联系。【1】一九零五年 Einstein 第一篇相对论论文“论运动物体的电动力学”中讲到  $t_A - t_B = r_{AB}/c - v$ ,  $t_{A'} - t_{B'} = r_{AB}/c + v$ , 这里 Einstein 误用了经典速度合成公式,许少知先生首先发现并对此进行了批评。如果用相对论速度合成公式可得  $t_A - t_B = r_{AB}/c$ ,  $t_{A'} - t_{B'} = r_{BA}/c$ 。由于相对于观测者 A、B 是以速度 V 运动的,因此光从 A→B, 距离  $r_{AB}$ , 不等于光从 B 返回到 A, 即:  $r_{AB} \neq r_{BA}$ , 还是可以得到同时性的相对性结论。

协同学的创始人, H·哈肯是这样说的:“狭义相对论否定了绝对参考系的存在,但是 3k 宇宙背景却是一个很好的绝对参考系。这个新的绝对空间导致了一个有趣的时间概念:在狭义相对论中,作任意运动的不同观察者不可能找到一个共同的时间,而与 3k 宇宙背景联系的观察者却经历着一个宇宙的或者说是普适的时间。”

【2】相信有一个外在的客观世界，以及对其描述时我们的时、空概念具有客观性、统一性、普适性和相对独立性，这是物理学的最基本信念和概念基础，全部物理学可以说都建立和展开在此基础之上。Einstein 所讲的同时性的相对性只是对于以光速传播的电磁场而言，并非绝对化。在运动会上以光信号与声信号得到的同时性是不同的，但是绝对的同时性在理论上还是存在的，例如 A 点发出的光信号，在以 A 点为圆心，以 R 为半径的圆上收到信号的时间是同时的。郭峰君先生说：“众所周知，狭义相对论推导洛仑兹变换是以坐标系的原点 O' 与坐标系 K 的原点 O 完全重合的瞬间开始计算坐标位置和计时时刻的。Einstein 在论证所谓“尺缩钟慢效应”时，却都疏忽了坐标系的原点 O' 与坐标系 K 的原点 O 是否处于完全重合的瞬间这个必须具备的最起码的基础条件，全然忘记了他自己设计的“同地性”和“同时性”这两个最原则的基本概念。爱因斯坦说：‘只要时间的绝对性或同时性的绝对性这条公理不知不觉地留在潜意识里，那么任何想要满意地澄清这个悖论的尝试，都注定要失败。’

参考文献：

- 【1】Einstein 著 方在庆 韩文博 何维国 译。《Einstein 晚年文集》海南出版社 2000 年 3 月第 1 版。  
 【2】《自然杂志》7 卷 8 期 P582。

### 9、虚速率及其存在下的相对论

赫拉克利特 (鼎盛年约 BC504 - 501) 已经认识到“思想是最大的优点，智慧就在于说出真理，智慧只在于一件事，就是认识那善于驾驭一切的思想。”，亚里士多德 (BC384 - 322) 则更加明确地指出“人们追求智慧是为了求知，并不是为了实用。”

量子统计物理证明了，任何具有上限能量且有有限个能级的平衡孤立系统，可以出现负绝对温度。当温度  $T \rightarrow +\infty$  后，系统内能再增大，温度跳变到  $T < 0$ ，这就是负温度状态。负温度的存在，不仅在理论上得到证明，而且在核磁共振与激光技术中已有应用。

由量子统计物理可知，粒子具有的统计平均速率与系统温度的平方根成正比， $V \propto T^{0.5}$ ，当  $T > 0$  时，V 为实速率；当  $T < 0$  时， $V = v_i$  为虚速率【1】。

既然负温度的存在，不仅在理论上得到证明，而且在核磁共振与激光技术中已有应用，因此我们应该承认负温度与虚速率的存在，进一步假定 Lorentz transformation 对于虚速率状态依然成立。

当物体的运动速率为虚速率时，加速度应当为虚加速度，此时  $[1 - (\int_0^t a_i dt)^2 / c^2] > 1$ ，于是：当速率的绝对值增加时，物体引力质量减小、长度增加、时钟加速；当速率的绝对值减小时，物体的引力质量增加、时钟延缓、长度缩短。

参考文献：

- 【1】 阎庚年 著。《热力学史》山东科学技术出版社 1989 年 5 月 版。

附录：

负温度——颠倒了的物理世界

文章提供 于 2013-1-14 10:29:29 (北京时间: 2013-1-14 23:29:29)

文章作者: 程鸮

今年元旦刚过，德国物理学家乌尔里克·斯奈德便发布了一项新成就：实现了处于比绝对零度还低的“负温度”状态的气体。这个结果通过新闻界报道引发了对温度的好奇。其实，所谓的“负温度”并不是一项新发明，也不是不可思议的极低温。恰恰相反，那可以说是非常高的温度，以至于无法用通常的温度概念描述。这也是一个与经验相反的颠倒世界。

.....

热力学研究发现，不仅仅不存在绝对零度以下（负温度）的状态，绝对零度本身也是无法达到的。此后发现的量子力学之测不准原理更说明原子是不可能绝对静止，因此不可能存在处于绝对零度的系统。目前所知的最接近绝对零度的物质是在实验室里人为创造出来的。科学家通过激光制冷手段可以将处于气体状态的原子冷却到极低温，并因此实现玻色-爱因斯坦凝聚。2003 年，麻省理工学院的实验室将钠原子降到 450pK（1pK 是 10 的负 12 次方开尔文度），是现在的最低温记录。

后来的统计物理学研究为熵作出了更为清楚的定义：熵值描述的是系统在可能占有的微观状态上的分布程度。如果一个系统只占有小部分的状态，比如固体中分子只在固定的晶格点附近振动或者按照颜色站好队的水，它的熵值便比较低。反之，流体中分子可以完全自由运动；不同颜色融合后的分子间的分布组合也大

大增加，其熵值也就比较高。

熵还为温度本身提供了一个更为严格的定义。因为热运动并不是系统唯一的能量来源，把温度简单地看作热能的衡量并不准确。物理学中的温度是改变一个系统的熵所需要的能量。在不同的状态下，将一个系统的熵改变一定量时所需要的能量是不同的，而这正是系统温度的不同。

在我们日常的世界中，能量和熵的变化总是步调一致的，系统在获得能量的同时熵会增加。物体获得能量（热量）后会膨胀，扩大状态空间，甚至从固体融化成液体、进而蒸发为气体，这都是趋向无序的过程。反之，能量减少时熵也会减小。这样得出的温度数值随状态变化虽然不同，却永远是正数，也就是绝对零度以上。

然而，在量子世界里，我们可以遇到甚至构造出一些奇异的体系，与日常经验不符乃至相反。在经典世界里，随着能量的增加，系统中粒子动能会越来越大，没有止境。它们能占据的态也因此越来越多，更加无序，所以系统的熵会随着能量增加。

而量子世界中的粒子只能占据量子化的能量态。随着能量的增加，越来越多的粒子会进入高能量态。绝大多数的量子系统有着无止境的高能量态，粒子占据越多的高能量态，系统的熵越高。这与经典系统没有区别。的确，量子系统在高温条件下通常可以用经典物理描述。

但在非常特殊的情况下，人们可以设计出只存在有限能级的量子系统。在这样的系统中，粒子所能占据的能量态有限。能量增加的结果使得越来越多的粒子集中在最高的能级上。这样集中的结果是系统趋于有序，熵反而减少了。如果所有的粒子都集中在最高能级上，系统会变得完全有序，熵因此变成零——与所有粒子都集中在最低能量态的经典意义上的绝对零度情形一样，只是完全颠倒了。因为能量增加导致熵减少，按照“改变系统的熵所需要的能量”的定义，该系统的温度是负数！

这个意义上的负温度虽然匪夷所思，它其实是很早就被科学家认识的。它之所以稀有，是因为它在经典物理世界中不可能存在，在量子世界中也需要非常特殊的条件才可能。这样的负温度系统早在 1951 年就被物理学家在核子自旋系统中证实了。差不多同时，科学家发明了激光。他们选择合适的材料和条件，使得其中原子只有少数几个能级可供电子跃迁，然后输入能量将大量原子激发到其中的高能激发态，使得处于高能量态的原子多于基态。这样的原子体系便处于负温度状态。而这些原子步调一致地从激发态跃迁回基态时所付出的光子便成为激光束。

核自旋和激光系统都不是“纯粹”的负温度系统。它们只是在特定的自由度（自旋和原子能级）上实现了负温度，而原子本身所处的还是平常的正温度环境。今年德国物理学家所实现的突破便在于他们把一些经过激光制冷的原子通过调制整体地进入了负温度状态，这些原子完全处于负温度，不再另有正温度环境。但这样实现的状态非常不稳定，只能存活非常短暂的时间。

如果负温度系统接触到正温度系统是会发生什么样的现象？处于负温度状态的系统是不稳定的，会自发的释放能量。激光束正是这种能量释放的表现。它们接触到正温度系统时会自发地将能量传递给对方。正温度系统接收热量后能量和熵都会增加，温度增高。同时负温度系统在损失能量时（如果没有外来能量补充的话）熵也会增加，直到失去负温度状态。因此整个系统正像热力学定律所要求的那样向熵增加的方向演变。因为在这个过程中能量（热量）是从负温度一方传向正温度一方，负温度并不比正温度更“冷”，而是比任何正温度还要“热”——这正是一个颠倒了物理世界。来源：搜狐

5/4/2017