

从牛顿力学到爱因斯坦相对论

张元仲
中国科学院理论物理研究所

摘要

本文概要地介绍了爱因斯坦狭义相对论的产生的历史背景及其运动学的内容和结论，特别强调了修改牛顿绝对同时性定义是狭义相对论得以产生的关键。此外，简要介绍了相对论动力学及其成就，这些成就也是对狭义相对论的检验。最后，阐述了狭义相对论的未来发展方向。

关键词：狭义相对论、牛顿力学、同时性定义

一百年前，1905年，爱因斯坦在德国的《物理学记事》刊物上先后发表了具有划时代意义的五篇科学论文[1]，其题目分别是：(1) 一个关于光的产生和转化的试探性观点；(2) 分子大小的新测定；(3) 关于热的分子动理论所要求的静止液体中悬浮小粒子的运动；(4) 论动体的电动力学；(5) 物体的惯性同它所含的能量有关吗？这五篇论文涉及到三个重要领域：第一篇涉及光量子论；第二、第三篇是有关分子动理论的研究；第四篇和第五篇是狭义相对论及其重要结论。爱因斯坦的这五篇论文为现代物理学的发展奠定了基础。因而，一百年来物理学蓬勃发展、成果丰硕。为了纪念爱因斯坦的这些重大贡献特别是狭义相对论诞生一百周年，2004年6月10日联合国大会通过决议，把2005年定为“世界物理年”，其徽标（见图1）由狭义相对论中的光锥时空图经过艺术加工而成。本文旨在向广大读者介绍相对论的产生历史、基本观念、重要成果，并展望未来的可能发展方向，以此纪念爱因斯坦对人类的科学事业所作出的伟大贡献。

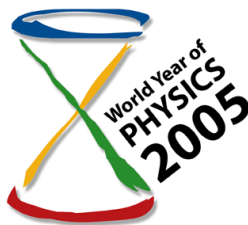


图1. “世界物理年”徽标

（一）狭义相对论产生的历史背景

1. 电磁现象与牛顿力学观念的矛盾

1905年之前，电磁学的很多实验现象用牛顿力学中的物理观念难于解释。(1) 寻找“光以太”的实验给出的是否定的结果。当麦克斯韦电磁场方程把光解释成电磁波时，人们自然与声波类比。声波不是独立的物质存在，而是物质的震动，即物质是声波的“媒质”。类比声波，光是否也是在某种被称为“光以太”的媒质中传播。为了寻找这种想象中的“以太”对光传播的影响，1881年，迈克耳逊完成了第一个这类实验。他让一台干涉仪转动90度，观测干涉条纹是否移动。其原理是，如果有“以太”弥漫于太阳系中，地球在绕太阳的轨道中运动时，如果不带走“以太”，那么在地球看来，就会存在“以太风”，使光线的运动速度受到改变；因而，干涉仪中互相垂直的两臂中的光速（因与“以太风”方向的夹角不同）变得不同；当干涉仪转过90度后，两个臂互换了方位，其中的两条光线的速度也发生了互换因而造成了干涉条纹的移

动。1887年，迈克耳逊和莫雷以更高的精度重做了实验。结果没有观测到预期的条纹移动。(2) **单极电机问题**：用一条导线滑动连接到一个圆柱形永久磁铁的赤道和一个极点，当磁铁绕其圆柱体的对称轴转动时，导线中产生了一个电动势。这种单极感应早已在工程技术上用来制造发电机（称为**单极电机**）。但是，当把牛顿力学中的伽利略变换用于麦克斯韦电磁场方程时，却无法解释这种单极感应现象（是磁体转动还是导体转动表现出了不对称性）。(3) **电磁规律不满足伽利略相对性原理**；或者说，在伽利略坐标变换下，麦克斯韦电磁场方程不像牛顿力学第二定律那样保持形式不变。(4) **电子的惯性质量随其运动速度的增加而变大**：用电磁场使运动电子的运动轨迹偏转，测量其偏转的大小；结果表明，只有把电子的荷质比（电荷与惯性质量之比）看成是速度的函数才能解释测量值；其它的实验分析显示电子的电荷与速度无关，因而得出惯性质量与速度有关的结论。这与牛顿力学中的“惯性质量是常数”的结论相抵触。(5) **测量的光速是个常数**：在牛顿的时代，人们以为光线的传播速度是无穷大，这是牛顿对钟（即定义他的时间坐标）的基础；但是，从1676年丹麦天文学家罗迈（O. Roemer）第一次提出用观测木星卫星隐食周期的方法测量光速到1850年法国物理学家傅科通过改进菲索的方法对光速更精确的测量，所获得的数值似乎表明光速是一个常数；法国科学家彭加勒早在1898年就提出真空光速不变的假设；这显示出光速与牛顿力学中的速度相加公式相抵触。

2. 解决上述矛盾的各种尝试

(1) 为了挽救“以太说”，爱尔兰物理学家斐兹杰惹与荷兰物理学家洛仑兹通过对电磁学的研究分别独立地提出了长度收缩假说（称为**斐兹杰惹-洛仑兹收缩**），即在以太中运动的杆子将沿其运动方向收缩一个倍数（这个收缩因子与后来狭义相对论中的收缩因子相同）。(2) 为了解释电子质量与速度的关系，1903年阿伯拉罕把电子看做是一种运动的完全刚性的球形粒子而推导出了质量与速度的关系式（其最低次近似与狭义相对论的近似结果相同，因而可以解释上述电子的荷质比实验）。1904年洛仑兹假定电子质量起源于电磁，并假设电子的尺度沿运动方向发生收缩（即**斐兹杰惹-洛仑兹收缩**），由此导出了电子质量与速度的关系式（与后来的狭义相对论中的公式形式相同）。(3) 为了使电磁场方程在坐标变化下保持形式不变，洛仑兹修改了伽利略变换中的时间坐标变换关系，于1904年导出了新的坐标变换（1905年彭加勒把这个变换称为**洛仑兹变换**）；但是，洛仑兹使用牛顿的绝对时间观念无法解释这个新变换中时间坐标的物理含义。(4) 彭加勒在1905年之前已经接近了**光速不变原理**和**相对性原理**的提出，甚至接近了狭义相对论的发现：他在1898年发表的“时间测量”的论文中写道：“光具有不变的速度，尤其是它的速度在一切方向上都是相同的，这是一个公设，没有这个公设，就无法量度光速。这个公设从来也不能直接用经验来验证；…”；此外，1904年他在圣路易斯会议的报告中写道：“也许我们将要建造一种全新的力学，我们已经成功地瞥见到它了。在这个全新的力学内，惯性随速度而增加，光速会变为不可逾越的极限。原来的比较简单的力学依然保持为一级近似，因为它对不太大的速度还是正确的，以致在新力学中还能够发现旧力学”[2]。

在所有这些尝试中，物理学家们始终没有放弃牛顿力学中的物理观念特别是关于时间的定义。彭加勒虽然意识到时间的测量与光速的假定有关，但是他没有更进一步来定义同时性。因此，即使意识到全新力学的可能出现，也不可能发现狭义相对论。

3. 万事俱备，只欠东风

我们看到，1905年之前，为了解决牛顿力学观念与电磁学实验的矛盾，物理学家们通过修修补补并引入众多新的假设而得到的各种方程式，诸如洛仑兹变换、洛仑兹质-速关系式、斐兹杰惹-洛仑兹长度收缩和拉摩（1900）时间变慢公式以及电磁场的质-能关系式等等，在形式上与后来狭义相对论中的相应公式完全一样。如果只为解释上述实验结果，这些修修补补的牛顿型理论完全够用了。但是，这些理论包含有太多的假设且时间的物理含义不清，更无法回答为什么这些理论公式中都包含真空光速。彭加勒已经接近了狭义相对论，但是缺少关键的一步。爱因斯坦在前人的这些基础之上，认识到解决问题的关键是更改牛顿的同时性定义，为此引入光速各向同性的假定来对钟（即把不同地点的钟表相互校准）。在爱因斯坦第一篇题为“论动体的电动力学”的狭义相对论论文中，第一节的标题便是“**同时性的定义**”，其中写道：“如果在空间的A点放一只钟，那末对于A附近的事件的时间，在A处的一个观察者能够通过找出和这些事件同时出现的时针位置来加以确定。如果又在空间的B点放一只钟（这是一只同放在A处的钟完全一样的钟），那么通过B处的观察者，也能够确定B点附近的事件的时间。但

是若没有进一步的假定，就不可能把 A 处的事件同 B 处的事件在时间上作比较。至此，我们只定义了‘A 时间’和‘B 时间’，还没有定义 A 和 B 的公共‘时间’。当我们假定光从 A 到 B 所需要的‘时间’等于它从 B 到 A 所需‘时间’的时候，这后一个时间也就可以定义了。”爱因斯坦的这些陈述表明：（1）他引进了“光速不变原理”的基本假设，（2）用“光速不变原理”来定义惯性系中的时间坐标（即“公共时间”，也就是对钟）。这是狭义相对论与牛顿力学的差别所在，关于这一点爱因斯坦在 1916 年发表的题为《广义相对论基础》的论文中已经作了明确的说明：“狭义相对论与经典力学的分歧，不在于相对性原理，而只在于真空中光速不变的假设。这个假设和狭义相对性原理结合起来，如所周知，就得出了同时性的相对性和洛仑兹变换，以及 … ”。

（二）牛顿力学中的基本概念

1. 物理理论中的真空

一切经典物理理论的出发点是首先定义好三维空虚空间(真空)和一维时间。人们假定这个三维空间是平直的和各向同性的(满足欧几里得几何学)，时间是均匀流逝的。但是，这样的规定是抽象的、不具体的。

把三维的真空和一维的时间与物理世界联系在一起的物理定律就是**牛顿力学第一定律(惯性定律)**，即**不受力的物体，要么相对静止，要么相对作匀速直线运动**；它定义了孤立的检验质点在真空中如何运动。因为是“定义”，所以如果你对惯性定律的上述陈述追问“为什么”，那么你就会得到一种循环式的答案，例如：（1）**什么叫不受力**？物理学家们曾争论过很长时间，有一种解释是说“当一个物体离其它所有物体足够远时，这个物体就可以被说成不受力”。但是，什么叫“足够远”？这似乎又回到了出发点的“不受力”；（2）**什么叫“直线”**？在日常生活乃至实验室中，通常把真空中的光线(光走的轨迹)当做直线的标准，这又成了逻辑循环：不受力的物体走直线；反之，直线是不受力的物体所走过的轨迹。另外，需要一提的是，能否用测量的方法判断空间是平直的还是弯曲的，已经争论过几百年而无定论[4]；（3）**什么是匀速**？速度是相对于观测者(即参考物)的，相对作匀速(无加速)运动不一定是惯性运动，只有其中的一个是，另一个才是，这又是逻辑循环。所以，我们也不能用无加速度来作为不受力的判据。另外，速度是否均匀依赖于用来对钟的信号是否匀速，这又是逻辑循环。所以，在惯性定律的上述陈述中，“直线”和“匀速”等等只是一种假定，即等价于假定“真空”是平直的和均匀各向同性的而且检验粒子在其中运动速度的方向和大小也是不变的。当然，“真空”是一种理想情况，在现实世界中不可能严格地找到它，只可以近似地实现。但是，这种理想的“真空”特别重要，因为它是一切物理理论(牛顿力学、相对论和其它理论)的基础：一切物质都在空间和时间中运动。

2. 牛顿力学中的坐标系的定义

在三维真空中要描写物体的位置，需要选择一个参考物，理想的参照物就是作惯性运动的物体，在该物体上固定上三条互相垂直的具有长度刻度的刚性杆(即坐标轴 x, y, z)，它们构成一个笛卡儿坐标系。物体在空间中的位置由空间坐标 x, y, z 的数值表示。若要描写物体的运动(或者更广泛地说要描写某个物理事件在某个空间位置发生的时间)，我们还需要定义时间坐标 t ：在空间的每一点都放有一只结构完全一样的标准时钟，这些时钟的读数给出了“**当地的时间**”；如果我们假定存在瞬时传播的信号，我们就可以使用这种信号作为通讯手段把位于空间各处的时钟相互对准；这些对准了的时钟所记录的时间就是**时间坐标 t** 。这样定义的坐标系 (x, y, z, t) 就是牛顿力学乃至经典物理学中的笛卡儿坐标系。

3. 关于时间坐标 t 的定义

在牛顿力学的文献书籍中，通常没有上面对时间坐标 t 的定义，因为牛顿把时间看成是绝对不变的，即牛顿的同时性是绝对的。但是，当把牛顿的时间与实验室中的“钟表指针”联系在一起时就遇到了困难。实现牛顿时间的“对钟”有两种方法：一是**缓慢移动钟**方法，即把一只标准钟从坐标原点移动到其它任意点来校准各地的时钟，另一方法是使用**瞬时信号**对钟。但是，第一种方法行不通，因为我们已经知道移动会改变钟的速率。对此，物理学家们讨论过许多年，得到的结论是：缓慢移动的时钟其速率的变慢与狭义相对论中的结果一样。因而，不可能用这种方法来校准牛顿的时钟。第二种方法也行不通，因为在自然界中没有发现**瞬时信号**，

而且也不会存在：因为按照牛顿理论，瞬时信号的动能是无穷大，而任何有限的物质既不可能发射也不可能吸收无穷多的能量。在日常生活和实验室中，通常是用光信号对钟的，但光速是有限的而非无穷大。所以，牛顿的同时性定义不能严格地而只能近似地去实现，这也就是为什么牛顿理论不能严格地而只能近似地描写物理规律的原因所在。正如前面说的，正是爱因斯坦认识到问题的这一关键所在并对牛顿同时性定义进行了修改，才建立起狭义相对论。

4. 伽利略坐标变换

由惯性定律知道，相对于惯性系 $k(x, y, z, t)$ 作匀速直线运动的另一个参考系 $k'(x', y', z', t')$ 也是惯性系，它们之间的坐标变换是伽利略变换

($x' = x - vt$, $y' = y$, $z' = z$, $t' = t$)，这里的初始条件是：在 $t' = t = 0$ 的初始时刻两惯性系重合；其它时刻， k' 系相对于 k 系以不变速度 v 沿 x 轴的正方向平行移动。伽利略变换给出：

(1) 同时性的绝对性，即在一个惯性系中不同地点同时发生的两个物理事件，在其它一切惯性系中看来也是同时发生的；(2) 长度和时间间隔不随运动而改变；(3) 牛顿速度相加公式，即 $\vec{u}' = \vec{u} - \vec{v}$ (其中， \vec{u}' 和 \vec{u} 是同一个物体分别在 k' 系和 k 系中的速度)。

5. 伽利略相对性原理

伽利略相对性原理是说：力学定律在一切惯性系中均有效。这个原理表明，利用力学的方法不可能观测到绝对运动。牛顿力学第二定律在惯性系 k 中写成： $\vec{F} = m\vec{a}$ (其中 \vec{F} 是力， \vec{a} 是物体的加速度， m 是物体的惯性质量)。相对性原理是说，在 k' 系中方程式具有相同的形式： $\vec{F}' = m\vec{a}'$ (其中带“'”的量是 k' 系中的相应观测量)。更具体地说， $\vec{F} = m\vec{a}$ 经过伽利略变换后变成了 $\vec{F}' = m\vec{a}'$ ，反之亦然。这个原理也显示：物体的惯性质量 m 是个与运动速度无关的常数。另外，牛顿万有引力定律也满足伽利略相对性原理。

(三) 狭义相对论基础

1. 真空和惯性定律也同样是相对论的基础，而且也是假定三维空间是平直的和均匀各向同性的。这一点与牛顿的情况没有区别。

2. 狭义相对论中的惯性系定义

如同前面的牛顿坐标系一样，狭义相对论中的惯性坐标系也分为空间部分和时间部分；由于真空的含义与牛顿的相同，因而狭义相对论的惯性系中的空间部分与牛顿的相同：在真空中的孤立物体上固定三个笛卡儿坐标轴，用来表征空间任意位置的三个空间坐标 (x, y, z) 。

但是狭义相对论中惯性系的时间坐标 t 的定义则与牛顿的有本质的差别，这种差别来自对钟方法即同时性定义的不同。正如上面说的，牛顿假定的绝对时间(牛顿同时性定义)只能用瞬时信号对钟来实现；而狭义相对论的时间坐标是通过用光速对钟来定义的(这称为爱因斯坦同时性定义)：例如，为把放在 x 点的时钟与放在原点的时钟对准，从原点向 x 点发射一个光信号，光信号离开原点时原点的时钟指针显示 t_0 时刻，所以当光信号传播到 x 点时就要把 x 处的时钟指针调整到 t_x 时刻， t_x 与 t_0 之间的关系是： $t_x = t_0 + x/c$ (其中 c 是真空光速， x/c 就是光信号从原点传播到 x 点所花费的时间)。对于其它空间点的时钟，也是使用完全类似的方法对准。这里说的是 k 系中的时间坐标的定义；其它任意惯性系(如 k' 系)中的时间坐标的定义与 k 系中的完全类似。因此，只有知道了光速 c 的数值才能进行对钟；这就是当初爱因斯坦为什么引进光速不变原理这一假定的唯一原因。光速不变原理陈述为：光在真空中总是以不变得速度 c 传播，且与光源的运动速度无关。除了这个原理中的单向真空光速 c 不能测量因而它的各向同性没有办法用实验检验外，其它的内容如双程真空光速不变、 c 与频率无关、 c 与光源的运动速度无关等等都被大量实验所证实[5]。

至此已经显示，爱因斯坦的坐标系与牛顿的坐标系之间的唯一差别在于时间坐标的定义不同。狭义相对论中的坐标变换(洛仑兹变换)与牛顿力学中伽利略变换之间的差别必定也来自不同的时间坐标的定义；所以狭义相对论中的运动学和动力学现象与牛顿经典物理学中的现象之间的差别也必定来自时间坐标定义的不同。只要把狭义相对论中的光速 c 趋于无穷大，狭义相对论中的一切方程式也就退化成了牛顿理论中的方程式(如果这些方程式在牛顿理论中存在的话)；换句话说，对于那些光的传播时间可以忽略不计(即观测不到)的物理现象，才可

以使用牛顿理论。

3. 狭义相对性原理

伽利略相对性原理是对伽利略惯性系而言的；而狭义相对性原理则是以爱因斯坦的惯性系为出发点的；从这两个原理的陈述内容来看，狭义相对性原理只是对伽利略相对性原理进行了推广，即把“力学定律”扩充成为“一切物理定律”。因此，**狭义相对性原理**陈述为：一切物理定律在所有惯性系中均有效。但是在用数学语言陈述时，**狭义相对性原理**应当写成：一切物理定律的方程式在洛仑兹变换（见下面）保持形式不变。

4. 洛仑兹变换

狭义相对论的出发点是两个基本假设：第一个假设是相对性原理；第二个假设是光速不变原理（这两个原理的陈述形式前面已经给出了）。

此外，正如前面指出的，还有隐含的出发点（假定），即三维空间的均匀性和各向同性、时间的均匀流逝、真空和惯性定律的存在。

从这些基本假定出发而得到的坐标变换是**洛仑兹变换**：

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

其中 $\gamma = 1/\sqrt{1-v^2/c^2}$ 称为**膨胀因子**。这里选择的惯性系 k 和 k' 的初始条件与前面伽利略变换中的相同。当光速 c 趋于无穷大时，洛仑兹变换退化成伽利略变换。

5. 狭义相对论的运动学效应[5]

洛仑兹变换是狭义相对论的核心方程，一切运动学结果都来自于这个变换。由这个变换可以得到（1）**同时性的相对性**：在 k 系中的两个不同地点**同时**发生的两个物理事件，在 k' 系看来不再是同时发生的。这个现象不能用实验证明，因为这是由爱因斯坦同时性定义决定的；

（2）**长度收缩**：运动尺子的长度比它静止时的长度缩短了（没有直接的实验证明）；（3）**时钟变慢**：一只运动的时钟指示的时间间隔要小于静止在相应点上的两只时钟指示的时间之差（即运动的钟变慢了）；已有很多的实验证明，例如光子的多普勒频移实验、飞行介子的寿命增长实验、原子钟的环球航行实验等等都已证明了时钟变慢的相对论预言；（3）**爱因斯坦速度相加公式**（不同于牛顿的公式）已经由菲索型的流动水和运动介质的实验所证实。（4）超光速信号违反因果律，因而狭义相对论排出了超光速信号的存在，光速是有质物质的极限速度。

（四）狭义相对论动力学[5]

上面谈的是狭义相对论的运动学，它所描写的是真空中的时空结构而不涉及物质之间的相互作用（或说“力”）。这就是说，“**运动学**”只是提供了“物质在力的作用下进行运动”的“平台”。**动力学**描写的是物质在力的作用下的运动规律。

1. 相对论力学

有了上面的洛仑兹变换之后，就要修改已有的牛顿理论使之成为满足狭义相对性原理的相对论性理论。牛顿第二定律修改成： $\vec{F} = d\vec{p}/dt$ （这个方程式在洛仑兹变换下保持形式不变，即满足狭义相对性原理），其中 $\vec{p} = m\vec{v}$ 是物体的动量， \vec{v} 是物体的速度， m 是物体的**相对论质量**（总的惯性质量）， m_0 是**静质量**。 m 和 m_0 之间的关系称为**质-速关系**： $m = m_0/\sqrt{1-v^2/c^2}$ ，它被至今为止的很多实验所证实[5]。

相对论力学还给出质量与能量的关系式（**质-能关系**）： $E = mc^2$ ；每一种类型的质量都有相应得能量；如固有能量 $E_0 = m_0c^2$ ，动能等于总能量减去固有能量：

$$T = E - E_0 = (m - m_0)c^2 = \frac{1}{2}m_0v^2 + \dots$$

不同形式的能量之间可以互相转化，例如在正负电子的湮灭过程中正负电子的固有能量转化成了光子的动能。质-能关系被大量的核反应实验所证实并应用于核武器及核能发电。

2. 其它的动力学

自然界只有四种基本相互作用（力）：引力、电磁力、弱力、强力。按照狭义相对性原理，这四种力的动力学方程式都要在洛仑兹变换下保持形式不变。（1）**广义相对论**（一种**引力理论**）：

牛顿万有引力定律在洛仑兹变换下不能保持形式不变，所以必须修改；爱因斯坦（1916年）把它修改成了弯曲时空理论，即广义相对论（我们将在以后的文章中专门介绍）。（2）**电动力学**：真空中的麦克斯韦电磁场方程和洛仑兹电磁力公式在洛仑兹变换下保持形式不变，由此，爱因斯坦在他1905年的第一篇论文中得到了不同惯性系中的真空电磁场量之间的关系式并解释了前面提到的“单极电机”现象。运动介质中的电磁场方程是闵柯夫斯基于1908年建立的，这个理论很好地解释了各种运动介质的电磁现象[5]。（3）**相对论性量子力学**：最先（1925-1926）建立的描写微观物理世界的动力学是**量子力学**，这个理论是非相对论性理论，既不能描写微观高速粒子的运动也不包含粒子的自旋。满足狭义相对论要求的微观粒子的相对论波动方程同时包含了粒子的自旋；可以说，微观粒子的自旋是相对论的产物。这些相对论波动方程包括：1926年克莱因和高登提出的描写零自旋粒子运动的克莱因-高登方程；1928年狄拉克提出的自旋 $\frac{1}{2}$

粒子的狄拉克方程。这两个方程以及描写自旋为1的麦克斯韦方程构成了粒子理论的基本方程。

（4）**粒子物理理论**：描写基本粒子之间的电磁相互作用、弱作用和强作用的运动规律，已经获得巨大成功；其中，电磁力和弱力的电弱统一理论荣获1979年诺贝尔物理学奖；强相互作用的量子色动力学获得2004年物理诺贝尔奖。（5）**超弦理论**：四种基本相互作用的弯曲时空中的大统一理论，现在还只是纯理论的研究，并没有实验证明。

3. 闵柯夫斯基四维时空

1908年闵柯夫斯基发现把时间坐标作为新的一维“空间”同三维空间放在一起构成四维“空间”（即四维时空），称为**闵柯夫斯基时空**，它是平直的，其四维间隔 $ds^2 = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2$ 在洛仑兹变换下保持不变（对于运动学和动力学的四维间隔都如此）。因而，狭义相对论被称为**平直时空理论**。使用四维时空形式，上述所有动力学理论的方程式变得十分简练因而才得以建立和发展。这种四维时空还表明物理时空不是孤立的三维空间外加一维时间，而是时间和空间的四维统一体；这从根本上改变了牛顿的绝对空间和绝对时间的观念，建立起了人类崭新的相对论时空观。

（五）几点说明

1. **为什么所有相对论的公式中都含有真空光速 c ？**简单一句话：因为同时性的定义是用 c 来实现的。物理量中的基本量是长度和时间。要度量长度，就要事先规定长度单位“1米”，然后我们就能测量“2米”、“3米”、等等；但实际上，我们测的是“1米”的倍数，即“2米”、“3米”中的“2”、“3”等等，而不可能测量出“米”。类似地，时间的测量也是先规定时间单位“1秒”，然后测量的是“1秒”的“2倍（2秒）”，等等。在1905年之前，由于人们普遍接受了牛顿绝对时间的观念，以为定义了“1秒”就可以测量任何时间了。但是，“时间”的度量与长度的度量不同，“时间”分“当地时间”和“公共时间”两种（正如前面所引爱因斯坦第一篇论文中的论述所指出的）。定义了时钟的“一秒”，只是规定了“当地时间”的度量单位，而没有规定如何确定具有物理意义的“公共时间”。所以，真空光速 c 就起到了定义“公共时间”的作用。

2. **用类比的方法理解“单向光速 c 是假定而不能实验检验”**：上面已经指出有三个基本量：长度、当地时间、公共时间。长度是用“米”定义的，所以“米”不可能被检验；当地时间是用“秒”来定义的，所以“秒”不可能直接被测量；同样地，公共时间是用“单向光速 c ”来定义的，所以 c 也不可能用实验来检验。

3. 牛顿理论与相对论的关系

如何理解“牛顿理论是相对论的近似”。如果物质的运动速度 v 比光速 c 小很多，那么在忽略 v^2/c^2 的小量即忽略相对论效应时，相对论理论就成为牛顿理论。对此，我们不能认为相对论与牛顿理论没有质的差别。现在我们用例子说明“近似”是什么意思。例如，物体的静质量为1克，当它运动起来后，它的总质量增加到1.01克。这就是说，牛顿理论认为这个运动的物体的质量仍为1克；而相对论认为是1.01克=1克+0.01克，其中的0.01克是相对论效应。如果我们的仪器只能测出0.1克而测不出0.01克，那么我们就可以忽略这个0.01克的相对论效应。所以，“近似”是因为仪器的精度不高，并不等于相对论与牛顿理论没有差别（那个0.01

克就是差别)。因此,测量在数值上可以“近似”,而物理观念不能近似:无论高速低速、无论宏观微观宇观、无论强场弱场,时空结构都是相对论的而非牛顿的。

(六) 小结和展望

综上所述,狭义相对论已经成为现代物理学的一大基础,也就是说,没有它就没有现代物理学。因此,在谈论狭义相对论的证据和成功时,决不能只盯住它的两个基本假设和运动学效应是否被实验证实,因为一百年来全部现代物理学(从微观到宏观再到宇观)的巨大成就也都是狭义相对论成功的证据。

狭义相对论的关键之点是同时性的爱因斯坦定义。研究表明,如果仍然使用光信号对钟,但是放弃光速不变原理而假定光速完全任意,就意味着修改爱因斯坦同时性定义,进而得到更一般的坐标变换[5]。但是这种一般的变换与洛仑兹变换没有本质的差别。即使发现了超光速信号只要不是瞬时信号,也不会本质上改变相对论的时空结构。因此,除非发现其它的对钟方法,否则狭义相对论的时空结构(运动学)就难以被突破。相反,相对论动力学的发展空间很大:随着未来十年各种大型实验装置和观测装置的陆续运行,粒子物理、天体物理、广义相对论和宇宙学必将获得重大的乃至突破性的进展。

参考文献

- [1] A. Einstein, *Annalen der Physik*, **17** (1905) 132; **17** (1905) 289; **17** (1905) 549; **17** (1905) 891; **18** (1905) 639.
- [2] 李醒民,“彭加勒对物理学革命的直接贡献”,《自然信息》1984年第2期第79页
[X.M. Li, “Direct Contribution of Poincare to Physics Revolution”, *Nature Information*, p.79 (1984)]
- [3] A. Einstein, *Annalen der Physik*, **49** (1916) 769
- [4] 库伯,《物理世界》上卷,第113-125页(海洋出版社1983年出版)
(L.N. Cooper, “An Introduction to the Meaning and Structure of Physics”, Vol. 1, pp. 113-125, Seas Press, 1983)
- [5] (a) 张元仲,《狭义相对论实验基础》,科学出版社,1979,1983,1994
(Y.Z. Zhang, “Experimental Foundations of Special Relativity”, Beijing Science Press, 1979, 1983 and 1994);
(b) Yuan-Zhong Zhang, "Special Relativity and Its Experimental Foundations", World Scientific Publishing Co Pte Ltd, Singapore, 1998

Abstract

In this paper the historical background of the development of special relativity and the relativistic kinematics and its results are briefly summarized. In particular, it is emphasized that the modifying of Newtonian absolute simultaneity is the key point for constructing special relativity. Furthermore, the relativistic dynamics and its achievements are introduced, which are also tests of special relativity. Finally, direction about developing special relativity in the future is expounded.

Key words: special relativity, Newtonian dynamics, definition of simultaneity