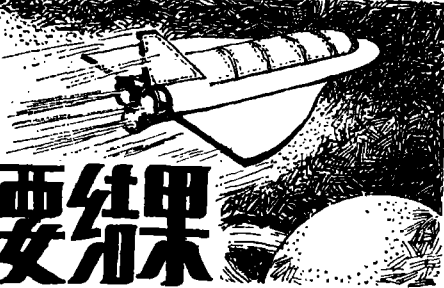


关于狭义相对论的基本假设和主要结果



中国科学院理论物理研究所 张元仲

狭义(或特殊)相对论是与广义(或一般)相对论相对应的名称。“狭义”(或“特殊”)是指观察者具有特殊的运动状态——匀速直线运动。“广义”(或“一般”)是指观察者可具有一般的运动状态。从另一种意义上说,狭义相对论又更带普遍性,因为它描述的是自然界中四种相互作用(强、弱、电磁和引力相互作用)的共同的时空特性。当然,把引力相互作用与狭义相对论的基本精神结合起来并不象其他三种相互作用那样简单。由于狭义相对论的这种普遍性,使它成为与量子力学相并列的物理学的理论基础之一。狭义相对论的内容和应用是丰富的,要想用一点点笔墨全面涉及是不可能的。我们在此只是对它的二个基本假设和主要的一些结果谈谈我们的理解和看法。

首先,我们需要承认下面的一些前提:存在惯性观察者(或说惯性参考系),存在标准的时钟和刚性尺子。惯性观察者使用标准时钟和标准尺子测量物理事件的时空位置,建立起时间和空间坐标。不同的观察者(即相互作用匀速直线运动的参考系)测量同样的物理事件建立起各自的时空坐标。狭义相对论中的坐标变换(洛伦兹变换),正是在这些不同的惯性系的时空坐标之间建立起了联系。为了建立这种联系,需要引入二个必要的假说——相对性原理和光速不变原理。

光速不变原理是说:光在真空中总是以恒定不变的速度传播着,这个速度的大小与光源的运动状态无关。

引进光速不变原理的目的,在于定义不同地点的时钟的同时性。时间是物理学中最基本的测量量之一。惯性观察者仅仅有了时钟是不够的,因为这些个别的时钟放置在空间的各个地点只能孤立地记录(定义)当地的时间,不把这些放置在各地的时钟进行同步,就无法比较发生在各地的不同事件之间的先后次序。怎样调节各地的时钟的指针使它们同步起来呢?这需要有一种在它们之间建立起联系的媒介。回忆一下牛顿经典力学。在那里,或者假定钟的移动对钟的速率不产生影响,因而可以通过一只移动的标准钟把各地的时钟对准;或者假定存在瞬时传播(传播速度为无限大)的信号,各地的钟用这种信号进行较准(绝对同时)。但是,人们并没有找到这种信号。实际使用的仍然是光信号。把光传播的极高速度近似看成无限大,这样做对研究低速运动的现象并不会带来可观测的影响,这是因为测量仪器不是绝对精确的。所以,惯性观察者只有时钟和尺子是不充分的,还必须把不同地点的时钟进行校准。牛顿力学隐含了这个问题;狭义相对论则把这个问题提到了至关重要的位置上。如何来校准不同地点的时钟呢?所谓“对钟”,就是定义同时性。如果采用光信号(至今还找不到能代替光信号的媒介物)对钟,就必须事先知道光信号的传播速度。可是如何才能事先知道光的传播速度呢?如果观察者用实验去测量它就必须事先把各地的钟对准。这样就陷入了循环:对准时钟需要知道光速,测量光速又需要先对准时钟。所以,单向光速(指在同一个参考系内光沿任意方向传播的速度)的不变性是无法用现有的实验手段作出判断的。因此,光速不变原理包含有科学假设,它并非是经验的总结。做这种假设的目的,只在于定

义同时性。除了单向光速不变性的问题外,其他的内容,例如往返平均光速的不变性、光速与光源运动的无关性、不同惯性系中光速的相等性等问题,是可以实验检验的。总之,凡是只需要一只钟来测量的物理量,就可以用实验测量。几十年来,各种类型的实验结果与光速不变原理是相容的。这些结果已包含在《狭义相对论实验基础》的书中,近来并没有很多新的实验。

上面已经谈到,除了单向光速的不变性不能用实验检验外,其他诸如平均回路光速的不变性、光速与光源运动的无关性以及光速与光的能量的无关性等方面,都被大量的实验所证实。这些实验结果,明显地与经典力学中的速度相加公式相抵触。在这种矛盾面前,是放弃经典的速度相加定理还是放弃相对论?或者两者是否都可以不要?显然,经典速度相加定理与光速的实验矛盾,因而应当对它进行修改。但是,光速不变原理的引入目的在于定义同时性。如果不要光速不变原理,就必须找到另外一种用来定义同时性的信号和方法。而且,这种新的方法不能与光速不变原理中已经被实验证明了的内容相抵触。然而,在实践中并没有找到这种新方法。既然不能放弃光速不变原理,那末能不能对它进行修改呢?这个问题的回答也是清楚的:要修改它,只能修改那些没有或不能被实验证明的部分,这部分就是单向光速的不变性。长期以来,特别是六十年代以来,人们从理论上分析过这种可能性,得到的结论是:在保持平均回路光速不变的前提下,可以假定单向光速可变;作这种修改所得的结果对于可观察的效应而言与狭义相对论的结果没有差别;也就是说,如果在实践中仍用光信号对钟,那么光速的这种单向性就不可能测得出来。既然如此,就没有理由不采用最简单的假设——单向光速不变性。至此,我们可以这样说,要想放弃光速不变原理除非在实验上发现回路光速不变性或光速与光源运动的无关性不真实。

狭义相对论的另一个假设是相对性原理:一切物理定律在相对作匀速直线运动的所有惯性系中都具有相同的形式。将这个原理与经典物理学中的力学相对性原理进行比较,可以看出两者并没有本质的差别。狭义相对性原理不过是力学相对性原理的推广。它们的本质是一样的;用简单的语言说,就是不存在绝对运动。因此,检验相对性原理最重要的是测量绝对运动的效应。“以太”的引入为绝对运动找到了基础。但是“以太”的概念随着物理学的发展在不断地改变着形式。为适合实验结果,以太被赋予了許多奇特的物理性质:它无所不在;任何有质物体在其中运动并不受到阻力,而且物体内部可以部分地带走它;在以太中运动的时钟要变慢;运动的尺子要缩短;如此等等。但是,为测量以太的存在所设计的各种实验都没有得到正确的结果。到头来,这些实验却都成了相对性原理和光速不变原理的实验证据。回顾历史,我们当然要问:以太的引入给物理学的发展带来了什么作用呢?爱因斯坦抛弃了以太,建立了相对论。这对物理学的进展所起的巨大作用是人所共知的:没有相对论,就不会有相对论量子力学,不会有量子电动力学,不会有量子场论和各种基本粒子的理论,也不会有其他的(诸如在天体物理学中的)重要应用。物理学不是纯粹的概念的集合,而是物理概念加方程式。因此,要想用以太去反驳相对论,还必须用以太的观念重新建立起新的时空理论。就是说,还必须把以太概念公式化,并应用于上述各种领域。但是,现有“以太”的知识离此目的还相距甚远。

上面谈了相对论的两个基本原理。根据这两个原理建立的狭义相对论,给出了许多新的效应。洛伦兹变换是相对论的最基本的方程式,它包含了各种运动学效应。诸如长度收缩,时钟变慢,同时性的相对性,速度相加公式,极限速度等等,都可以由洛伦兹变换直接推导出来。物体运动的动力学定律则可以由洛伦兹变换和相对性原理加以限制:任何物理定律在洛伦兹变换下保持形式不变。下面我们将简单谈谈相对论的一些主要结论。

关于同时性的相对性:两个事件在一个惯性系中是同时发生的,在其他惯性系中看来将不再是同时的事件了。这种同时性的相对性与牛顿物理学中的绝对同时性不同。其原因是牛顿理论中

时间的同时性是用瞬时传播的信号定义的,而相对论的同时性是用光信号定义的。自然界中存在着以有限速度传播的光信号,但不存在以无限速度传播的其他信号。因此,相对论的同时性定义更符合实际。由于同时性的相对性与同时性的定义直接相关,所以它象单向光速不变性一样,是不能用现有的实验手段进行检验的。

关于时钟变慢。由洛伦兹变换推得的时间变慢的关系或是两个惯性系的时间坐标的关系式。其中,一个惯性系相对于时钟静止,这个惯性系读出的时间是固有时间隔;另一个惯性系相对于时钟是运动的,测量运动的钟从一点到另一点的时间间隔需要由该惯性系中相应两点的两只时钟的读数之差给出,这样的时间间隔称为坐标时间隔。显然,固有时间隔与同时性的定义无关;坐标时间隔与同时性的定义有关。由一次洛伦兹变换给出的时间变慢公式是固有时间隔与坐标时间隔之间的关系式。在实验中,可观测的量是固有时间隔。通常所说的“时钟佯谬”,是将固有时间隔与坐标时间隔进行比较时出现的。当我们把坐标时间隔进一步改换成另一个固有时间隔时(这样做需要引入第三个惯性系),运动的钟变慢的效应就是唯一的结论了,即在哪个参考系中进行计算,其结果都是相同的。

关于洛伦兹变换与伽利略变换的关系问题,我们要强调的是,无穷小洛伦兹变换一般说来并不同于伽利略变换。当把光速 c 取成无限大时,洛伦兹变换就退化成伽利略变换,这正表明伽利略变换包含着用瞬时传播的信号对钟的假设。但是,当把光看成有限速度(30万公里/秒)时,无穷小洛伦兹变换指的是两个惯性系的相对速度 v 比光速 c 小很多,将洛伦兹变换按 (v/c) 展开成泰勒级数保留到 (v/c) 的一阶项。这种无穷小洛伦兹变换与伽利略变换进行对比可知,空间变换式相同,时间变换式多出一个 $(x/t)v/c^2$ 的项,这一项称为同时性因子项。如果描述的对象是匀速直线运动的质点,则 $x/t=u$ 就是该质点的速度。只有当 u/c 也是无穷小时,才可以把这个同时性因子项当作 (v/c) 的二阶小项而被略去。此时,无穷小洛伦兹变换变得与伽利略变换相同。然而,如果质点的速度 u 接近于光速 c ,这时同时性因子项成为 (v/c) 的一阶项而不能被忽略。在此情况下,无穷小洛伦兹变换与伽利略变换不同。典型的例子是缓慢运动的电磁学实验。其中,电磁体的运动速度的 v ,电磁信号的速度是 $\frac{x}{t}=c$ 。因此,同时性因子项 $\left(\frac{x}{t}\right)\frac{v}{c^2}=\frac{v}{c}$ 是一阶项,不能被略去。正是因为有这一项存在,才使得在洛伦兹变换下成为协变的电磁场方程得以解释象单极电机这类电磁学实验。通常所说的在低速下洛伦兹变换成为伽利略变换应当是指 v 和 u 同为低速的情况。

关于质速关系和质能关系。质速关系的证明是靠电磁力进行的。因此会涉及到电荷是否随速度改变的问题。对其他的电磁现象的分析表明,电荷与运动速度无关。因而,这类实验才成为质速关系的证据。对质能关系的理解,我们不应把质量和能量混合一谈。质量和能量是物质的两种不同的属性。实际测量也表明了两者的差别;能量是通过功的转换(固有能量转变为动能,动能可以直接观测的;质量并不能直接进行观察,而是通过动力学定律表现出来的。质能关系只是表明了能量的改变量与惯性质量的改变量(当质量的数值用能量的单位表示时)在数值上的相等性。

关于极限速度的问题。光速是一切有质物质的运动速度的上限。不可能有超过光速的通常意义下的粒子存在。如果有这样的粒子存在,那么回路光速的不变性就不应成立。人们早在六十年代就研究了不违反相对论的超光速粒子——快子。这种粒子的速度总是大于光速。它的质量是虚数。它不可能变成亚光速的粒子,但是,这种快子至今并没有找到实验上的证据。

总之,我们想说的是,狭义相对论与牛顿经典物理学的根本差别不在于相对性原理,而在于光速不变原理,即在于不同的同时性定义。