

谈洛伦兹变换的物理意义

赵勋国

一

由于将电动力学的麦克斯韦方程作伽利略变换时,方程不表现协变性,导致“以太”这一标准参考系在电磁理论中的引入,即光速只相对于“以太”这个标准参考系才是常量,而相对于以“以太”为参考系作匀速直线运动的一切参考系都不具备这样的性质。也就是说,麦克斯韦方程只对“以太”这一标准参考系成立。根据这一假设,在“空空如也”的空间中就必然充满着绝对静止的“以太”,并不难用光学测量发现地球在“以太”中的绝对运动,以证明“以太”这一标准参考系的存在。为此目的,迈克尔逊和莫雷做了精密的实验(著名的迈克尔逊——莫雷实验),却没有观测到地球的绝对运动,这就意味着在“空空如也”的空间中并不存在绝对静止的“以太”,标准参考系这一假设是错误的。在这种情况下,要使麦克斯韦方程在互作匀速直线运动的参考系中保持协变性,使光速在这样的参考系中保持不变,就必须寻求互作匀速直线运动的参考系间的时空坐标变换关系。为此,洛伦兹假设有一坐标系 $O'X'Y'Z'$ 以速度 v 相对于另一坐标系 $OXYZ$ 作匀速直线运动, X' 轴与 X 轴重合, $O'Y' \parallel OY, O'Z' \parallel OZ$,两坐标系上的时间分别用 t' 和 t 表示,且在 $t'=t$ 时两坐标系的原点(O', O)重合。由这一假设洛伦兹找到了如下变换关系式:

$$\begin{aligned} X &= \frac{X' + Vt'}{\sqrt{1 - V^2/C^2}}, \quad y = y', z = z' \\ t &= \frac{t' + V/C^2 X'}{\sqrt{1 - V^2/C^2}} \end{aligned} \quad (1)$$

由(1)求得:

$$\begin{aligned} X' &= \frac{X - Vt}{\sqrt{1 - V^2/C^2}}, \quad v' = v, z' = z \\ t' &= \frac{t - V/C^2 X}{\sqrt{1 - V^2/C^2}} \end{aligned} \quad (2)$$

这就是著名的洛伦兹变换关系。遗憾的是,洛伦兹本人并未认识到这一变换的真实物理意义。他仍然坚持绝对时空观,认为(1)、(2)式里运动坐标系上长度在 X' 方向上的缩短只是运动物体的一种物质属性,而不是它的空间属性,例如:带电粒子电势的等势面在运动方向上的收缩、每个原子的平衡位置在运动

方向上的相互靠近等;而其时间变换则是一种无物理意义的纯数学换算。后来爱因斯坦摒弃了经典力学的绝对时空观,将经典力学中的相对性原理推广到电动力学中,并提出了光速不变原理。从这两条原理出发,经过严密的数学推导,他同样得到了(1)、(2)那样的变换式,才揭示了洛伦兹变换的物理真实性,创立了狭义相对论。

二

从洛伦兹变换导出的背景和导出的过程,已经可以看出洛伦兹变换的物理含义是明确的:(一)不存在绝对的时间和绝对的空间,时间和空间都是相对的;(二)在所有惯性系内,光速是一个常量,与光源的运动状态无关;(三)存在无限多个互作匀速直线运动的惯性系,在这些惯性系内自然定律是一样的;(四)在两个互作匀速直线运动的惯性系内的时空坐标间,存在着式(1)和式(2)那样的只由运动速度决定的变换关系。因此,只要知道了这两个惯性系相互运动的速度,就可以将其中一个惯性系内一时空点的时空坐标变换成另一个惯性系内同一时空点的时空坐标,而使该时空点上的事件等效,结果一样。洛伦兹变换的这些物理含义充分显示了它的认识作用和实用价值,其真理性是不容置疑的。

然而,有不少学者在阐释洛伦兹变换(狭义相对论)的物理意义时,却走向了另一个极端,认为式(1)和式(2)揭示的运动惯性系上的时钟时率的变慢是绝对的。他们写道:同一地点的两只标准钟 C_1 和 C_2 ,校准零点后, C_1 钟以高速 V 离开 C_2 钟飞向太空,并以此速度在太空沿一闭合曲线轨道飞行。在 C_2 钟指示时间 t 时, C_1 钟回到出发点,两种比较, C_1 钟要比 C_2 钟慢 $(1 - \sqrt{1 - v^2/c^2})t$ 秒。这样的阐释表面看来好像是加深了对洛伦兹变换(狭义相对论)的理解,实际上却是从另一个极端否定了这一变换所揭示的时间的相对性,否定了时间的真实物理意义;同时,还给狭义相对论蒙上了一层神秘的面纱,使人们对这一理论产生了种种神思和遐想。显然,这也是不正确的。

(一)所谓时率的绝对变慢,只能是对运动惯性系上的时率和绝对静止参考系上的时率这两者的比

较而言,可是,狭义相对论已经否定了绝对静止参考系的存在,没有了绝对静止的参考系,自然也就没有了运动惯性系上时空的绝对变化。所以,运动惯性系上时率的变慢就不可能是绝对的,而只能是相对的。

(二)对两个互作匀速直线运动的惯性系来说,动系上的时空变化只是静系里的观测者观测的结果,动系上的时空不可能因动系的运动而自行发生与运动速度有关的绝对变化,原因是:

1.两惯性系的运动是相互的,如果一个惯性系上的时空有了变慢、收缩效应,另一个惯性系上的时空也必然会有同样的效应。因此,两惯性系上的时率将始终是一样的,不可能产生动系时率比静系时率绝对慢的现象。

2.互作匀速直线运动的惯性系有无限多个,其中每一个都相对其他无限多个作不同速度的匀速直线运动。如果一个惯性系以速度 V 相对另一个时率为 Δt 的惯性系作匀速直线运动时,这个惯性系上的时率会比另一个惯性系上的时率绝对慢,有一个绝对变慢值 $(1-\sqrt{1-v^2/c^2})\Delta t$,那么,这个惯性系同时相对无限多个时率为 Δt_n 的惯性系以不同速度 V_n ($n=1,2,\dots,\infty$)作匀速直线运动时,这个惯性系上的时率就会同时比那无限多个惯性系上的时率绝对慢,且同时有无限多个绝对变慢值 $(1-\sqrt{1-v_n^2/c^2})\Delta t_n$,这样,就会使这个惯性系上的同一只钟同时指示着无限多个不同时刻,使该惯性系上的同一过程同时具有无限多个不同状态。显然这是不可能的。

3.就时空的本性而言,运动惯性系上的本征长度和本征时间都是一个不变量。不同惯性系中的观测者,只要令他们所观测的校准同时的钟与他们所在的惯性系处于静止状态,他们所观测的钟指示的时刻就都是一样的,绝不会有一只钟因相对另一只钟作匀速运动而使它的时率比另一只钟的时率绝对变慢的现象。因此可以说,本征长度和本征时间都是绝对量。如果本征长度和本征时间可以随所在惯性系的运动速度发生绝对变化,我们将无固定自然规律可循,而且根据式(1),任何以光速或逼近光速运动的物质,它上面的时率将变为零或逼近零,物质的一切过程就会停止;物质在运动方向上的空间尺度

将变为零或趋向无穷小,物质就会消失。真是这样,我们的宇宙将不能存在,或者根本就不会产生。

4.本质上说,狭义相对论是一种观测理论,而运动会影响观测,这已是一种常识。从式(1)可以看出,动系 $O'X'Y'Z'$ 中时间 t' 就是静系中观测者观测的结果。所以很明显,动系 $O'X'Y'Z'$ 中的时率只是相对于静系中的观测者的观测变慢了,而对随动系一起运动(式(1)中 $v=0$)的观测者来说,动系中的时率仍是它的本征时率,并未变慢。

三

狭义相对论源于两条主要原理,即相对性原理和光速不变原理。相对性原理说的是:(一)物理学定律与以两个互作匀速直线运动的惯性系中的哪一个作参考是没有关系的,同一实验,不管是在静止的惯性系中做,还是在作匀速直线运动的惯性系中做,都是等效的,结果都是一样的;(二)在密闭的静止或作匀速直线运动的惯性系中做各种实验,可以总结出相应的自然规律,但是无论如何也不能由这些实验来确定该惯性系的运动状态,该惯性系运动的快、慢或静止,对实验结果都没有影响。不难看出,这一相对性原理本身就表明运动时钟时率的变慢是相对的(是静止观测者观测到比静止时钟的时率变慢了,实际并未变慢),而不是绝对的(与静止观测者的观测无关,是真的比静止时钟的时率绝对变慢了),因为,如果运动时钟的时率真的比静止时钟的时率绝对变慢了,那就意味着:(一)在两个互作匀速直线运动的惯性系中做同一个实验,如孪生子衰老实验, μ 子的衰变实验等,就会得到不同的结果,如乘飞船作太空旅行的孪生子甲要比留在地球上的乙绝对年轻些,高速运动的 μ 子要比静止的 μ 子衰变绝对慢些,这样就违反了相对性原理第一条;(二)在封闭的静止或作匀速直线运动的惯性系中做各种实验,该惯性系的运动状态(快、慢或静止)就会影响实验的结果。因而,只要根据实验的不同结果,就可以知道该惯性系的运动状态(快、慢或静止),例如由于运动时钟的时率会绝对变慢,运动速度越快,时钟时率越慢,不同运动状态下的时钟有不同的时率,因而只要根据封闭惯性系里时钟时率的快慢,就可以知道该惯性系的运动状态,当时钟的时率趋向零时(钟的指针几乎停止了),就知道该惯性系的运动速度要接近光速了。很明显,这又违反了相对性原理第二条。于是就形成了一个悖论,如果要把时间的相对性理

解为不同运动状态下的时钟有不同的时率, 就得肯定由洛伦兹变换得到的运动时钟时率的变慢是绝对的; 而如果运动时钟时率的变慢果真是绝对的, 相对性原理又不能成立。问题何在? 是相对性原理错了? 还是运动时钟时率的变慢不能认为是绝对的 (不能把时间的相对性理解为不同运动状态下的时钟有不同的时率)? 如果说相对性原理已为许多实验和生活观测所证实, 其真理性已为人们公认, 那么, 长期以来认为运动时钟时率的变慢是绝对的 (不同运动状态下的时钟有不同的时率) 这一主导观点的正确性就不能不让人质疑了。

四

在论述相对论的著作里, 都要介绍一个经典的假想实验, 因为这个假想实验是动钟时率比静钟时率绝对变慢的实验依据。这个假想实验可以用不同的假想装置来做, 其中的一种是车厢里和路基上的观测者对车厢里光讯号传播路径的观测实验。现将这一假想实验及其观测结果简述如下:

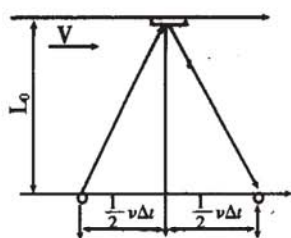


图 1

假设有一列高速行驶的火车, 车速为 V , 车厢内高为 L_0 , 车厢内地板上装有光源, 光源旁有一只标准钟, 正对光源的车顶上装有一面反光镜, 光源发出的光讯号传播方向与列车前进方向垂直, 并经反光镜反射回光源处。在一个光讯号往返一次过程中, 车上观测者观测到的路径是光源和反光镜之间的两条垂直线, 长度为 $2L_0$, 往返一次的时间是 $\Delta t' = \frac{2L_0}{c}$ (3), c 是光速; 路基上的观测者观测到的路径是两条交于反光镜的斜直线 (图 1), 其长度是 $2\sqrt{L_0^2 + (V\Delta t/2)^2}$, 往返一次的时间是 $\Delta t = 2\sqrt{L_0^2 + (V\Delta t/2)^2} / c$ (4)。由(3)可得 $L_0 = c\Delta t' / 2$ 代入(4), 经简单运算, 即得 $\Delta t = \Delta t' \sqrt{1 - V^2/c^2}$ (5), 这是洛伦兹变换的另一种形式。式(5)说明车厢内光讯号往返一次所需的时间, 在路基上观测到的 Δt 要长于在车厢内观测到的 $\Delta t'$ 。也就是说, 车上钟的走时(时率)要比路基上的钟走时(时率)慢, 且车速越快, 慢得越多, 这就说明了运动惯性系上的时率确实是绝对变

慢了。

表面上看, 上述假想实验对运动惯性系上时率的绝对变慢的证明是无懈可击的, 但是仔细分析, 却发现在这个假想实验里, 路基上的观测者对车厢内光路径的观测并不正确, 所得结论有重新认识的必要。

(一) 在上述假想实验里, 之所以能观测到运动惯性系上时钟时率有绝对变慢的现象, 是因为光讯号在车厢里往返一次的路径, 在车厢内观测到的是两条重叠且垂直于车厢地板的直线, 总长度为车厢内高度的二倍 ($2L_0$); 在路基上观测到的却是如图 1 那样的两条交于反光镜的斜直线, 总长度为 $2\sqrt{L_0^2 + (V\Delta t/2)^2}$ 。很明显, 正是路基上观测到的这两条斜直线使车厢里的时钟时率绝对变慢了。换言之, 如果路基上观测到的光讯号路径不是如图 1 那样的两条斜直线, 车厢里的时钟时率就不会变慢。那么, 路基上观测者观测到的光讯号路径, 究竟是不是如图 1 那样的两条交于反光镜的斜直线呢? 只要用光速不变原理对这一观测结果作些分析, 就不难发现, 这一观测结果是不符合实际的。光速不变原理已指明, 光速与光源的运动速度无关, 光速是不能叠加的。在该假想实验里, 光在列车运动方向上的速度为零, 如果路基上观测者观测到车厢里光讯号往返一次的路径是图 1 那样的两条斜直线, 那就表明光源的运动速度 (即列车的速度) V 叠加到了光速上, 形

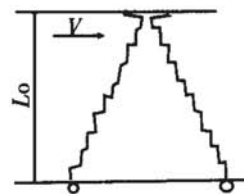


图 2

成了合速度 $V = \sqrt{c^2 + v^2}$, 光走的斜线是光以合速度 V 传播的结果, 这就违反了光速不变的原理。所以, 路基上观测者观测到的车厢内光讯号往返一次的路径, 实际上不可能是如图 1 那样的两条斜直线, 而只能是如图 2 那样的两条锯齿形斜线。锯齿形斜线的纵向(垂直于列车行进方向)微小线段, 就是路基上观测者观测到的车厢内光讯号以光速传播的路径; 锯齿形斜线的横向(列车行进方向)微小线段, 就是路基上观测者观测到的车厢内光讯号在以光速每走一纵向微小线段路径的同时, 在列车行进方向上由列车带进的距离 (在这个方向上光讯号本身的运动速

度为零)。由于光速不变,不能与车速 V 叠加,所以纵向微小线段和横向微小线段这两个矢量不能相加合成斜直线,光讯号就只能以图2那样的锯齿形路径传播。对图2那样的锯齿形路径,不难看出,光讯号走的路径实际上只是那些纵向微小线段,也不难理解,那些纵向微小线段的总和就是车厢内高度的2倍($2L_0$)。光讯号在列车行进方向上由列车带进的距离(那些横向微小线段)并不增加车厢内光讯号往返一次路径的长度,也不影响光讯号这样往返一次所需的时间,只是对路基上观测者来说,改变了光讯号在列车行进方向上的位置,车速越快,光讯号发出地点和返回地点就相距越远。这些观测结果表明,在上述假想实验里,车厢里光讯号往返一次所需的时间,路基上观测者观测到的 Δt 与车厢内观测者观测到的 $\Delta t'$,实际上是一样的,都是 $2L_0/c$,并不存在式(5)那样的变换关系。因此,这个假想实验不能成为运动惯性系上的时率要比静止惯性系上的时率绝对慢的实验依据。

(二)对上述实验的结论还可以用船只渡河的情况来进一步说明。如图3所示,设河宽为 L_r 、河水流速为 V_r 、船速为 V_s 。

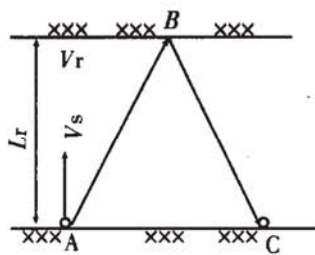


图3

船只向着与河岸垂直的方向渡河时,由于船速 V_s 远低于光速 c ,所以 V_s 可以和水流速度 V_r 相加形成合速度 $V =$

$\sqrt{V_s^2+V_r^2}$ 。这样,在岸上观测者看来,船只以合速度 V 渡河往返一次的路径 ABC 就是如图1那样的两条斜直线,这已是人们的常识。然而,如果船速 V_s 达到光速 c ,根据光速不变原理, V_s 就不能再与 V_r 相加形成合速度 V 。在这种情况下,船只以光速在与河岸垂直的方向上每前进一微小路径,同时也会随河水漂流一微小距离,船只渡河往返一次的路径 ABC 也就不能再形成如图1那样的两条斜直线,而是构成了如图2那样的两条锯齿形斜线。锯齿形斜线的全部垂直于河岸(纵向)的微小线段就是船只渡河的路径,其总和是河宽的2倍($2L_r$);全部平行于河岸(横向)的微小线段就是在船只往返一次的同时,船只随河水漂流的路径,其总和是 $AC=V_r\Delta t(\Delta t=2L_r/V_s=2L_r/c)$ 。从图

3和图2可以看出,水流速度越快,船只以光速渡河的路径被水流“切成”的纵向微小线段就越短、数量就越多;横向微小线段和两锯齿形斜线就越长。但是,不管水流速度多快、横向微小线段和锯齿形斜线多长,两锯齿形斜线的纵向微小线段的总和都只能是河宽的2倍($2L_r$),因而船只渡河往返一次所需的时间也就只能都是 $\Delta t=2L_r/V_s=2L_r/c$ 。这样,就进一步说明了,在上述假想实验里,对路基上的观测者来说,列车速度同样只影响车厢内光讯号往返一次的路径被列车运动“切成”的、如图2那样的锯齿形斜线的纵向微小线段的长度和数量(速度越快、线段越短、线段数量越多);只影响横向微小线段和两条锯齿形斜线的长度(速度越快、横向微小线段和锯齿形斜线越长),并不影响那些纵向微小线段的总和长。这就是说,对路基上的观测者而言,车厢内光讯号往返一次路径的长度也是一个不随车速改变的常量,其值始终为车厢内高度的2倍($2L_0$)。所以,不管车速多快,路基上观测者观测到的车厢内光讯号往返一次所需的时间,也就始终是和车厢内观测者观测到的一样,都是 $2L_0/c$,根本不会有车厢内的时率比路基上的时率绝对慢的现象。

(三)从(一)和(二)的分析可见,在上述假想实验里,要想得到式(5)那样的结果($\Delta t>\Delta t'$),路基上观测到的车厢内光讯号往返一次的路径就必须是如图1那样的两条斜直线,这样就要否定光速不变原理,让车速 V 与光速 c 相加形成合速度 $V=\sqrt{c^2+v^2}$;而在计算光讯号往返这两条斜直线路径所需的时间时,又要遵循光速不变原理,不能用合速度 V ,而只能用光速 c ,否则所得结果就不是 $\Delta t>\Delta t'$,而仍然是 $\Delta t=\Delta t'$ 。这种随意拼凑的方法显然是不科学的,得的结果显然也是不正确的。因而,在该假想实验里不会存在式(5)那样的变换关系, Δt 不可能大于 $\Delta t'$ 。

五

综上所述,可以断言,在阐释洛伦兹变换的物理意义时,把动系中时率的变慢绝对化,认为“动钟时率要比静钟时率绝对慢”,是不符合实际的,也是不符合洛伦兹变换(狭义相对论)的原义的,因而是一种超越真理的错误(有位伟人说过,真理再向前一步,就会变成错误),是由假想的错误观测带来的错误认识。

(上海市欧阳路318号501室 200081)

现代物理知识