

论狭义相对论的建立

李天发 赵立竹 冯杰 刘晶 王珊珊

(上海师范大学数理学院 上海 200234)

(收稿日期:2016-03-13)

摘要:主要从麦克斯韦的电磁理论、迈克尔孙-莫雷实验和洛伦兹变换3个方面来阐述爱因斯坦创立狭义相对论的重要基础,并在此基础上,通过爱因斯坦的论文、信件、演讲报告等资料阐述他本人对建立狭义相对论的描述,进一步加深对爱因斯坦狭义相对论的理解。

关键词:洛伦兹变换 迈克尔孙干涉 麦克斯韦方程 光速不变

狭义相对论诞生已经有100多年的时间了,但至今为止,人们对狭义相对论的理解仍有很大的不同.对于大多数人而言,谈论狭义相对论就像是在讨论外星人一样.狭义相对论诞生后,它颠覆了人们以前对物理世界的认识,人们从内心里认为它是神秘的,不可认识或者说是难以认识的.其实,狭义相对论是对客观物理世界更加准确解释的一个理论,是对经典物理理论中时空认识的修正.在爱因斯坦提出狭义相对论之前,洛伦兹已经建立了洛伦兹坐标变换式,局限于当时对“以太”的认识,洛伦兹坐标变换没有一个相应的物理解释.麦克斯韦方程在做伽利略变换时不表现协变性,导致以太这一标准参考系在电磁理论中的引入.1887年,迈克尔孙-莫雷实验结果出乎所有人意料,它没能证明以太的存在.物理学是一门建立在实验基础上的精密科学,这种矛盾的出现在物理学界就引起了轩然大波,人们通过各种方式,建立各种理论来解释这个矛盾.

本文以对爱因斯坦建立狭义相对论有重大影响的理论或实验为引子,理解和讨论爱因斯坦建立狭义相对论的过程.希望通过这样的方式使更多的人更加清楚地认识狭义相对论.下面我们具体来阐述电磁场理论、迈克尔孙-莫雷实验和洛伦兹变换在爱因斯坦建立狭义相对论中的作用以及爱因斯坦本人对建立狭义相对论过程的描述.

1 麦克斯韦的电磁理论

1785年,库仑总结出了两个点电荷之间相互作用

用力的库仑定律.1820年,奥斯特发现了电流的磁效应,从而把电与磁联系到了一起.安培研究了电流之间的相互作用力,提出了分子电流假说和安培环路定律.在奥斯特发现了电流磁效应之后,法拉第经过十多年的艰辛探索于1831发表了电磁感应定律.麦克斯韦的卓越贡献在于用完美的数学形式统一了电磁场理论,建立了麦克斯韦方程组.但是,在经典物理学大厦中,麦克斯韦方程也表现出一些不相适应.

1.1 真空中的光速是一个常量

由麦克斯韦方程组可以得到电磁波的波动方程

$$\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = \frac{1}{\epsilon_0 \mu_0} \frac{\partial^2 E}{\partial x^2}$$

由于光在真空中沿着 x 轴直线传播能量不变化,所以 $dE=0$. E 是电磁波所具有的能量.由

$$dE = \frac{\partial E}{\partial x} dx + \frac{\partial E}{\partial t} dt = 0$$

可得到

$$c \frac{\partial E}{\partial x} = - \frac{\partial E}{\partial t} \quad (1)$$

式(1)两边同时对 x 求偏导

$$c \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial E}{\partial t} \right) \quad (2)$$

式(1)两边同时对 t 求偏导

$$c \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial E}{\partial x} \right) = - \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (3)$$

因为

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial E}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial E}{\partial t} \right)$$

式(2)与式(3)联立可得

$$c \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \frac{1}{c} = 0$$

亦即

$$\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} \quad (4)$$

将式(4)与麦克斯韦波动方程比较,不难得到

$$c^2 = \frac{1}{\epsilon_0 \mu_0}. \text{ 其中 } \epsilon_0 \text{ 表示真空电容率, } \mu_0 \text{ 表示真空磁导}$$

率. ϵ_0 和 μ_0 已经从实验中得到,都是普适量. 准确的说,这里的 c 是不同频率的电磁波在真空中的传播速度. 平常我们最熟悉的电磁波是光,为了方便起见,我们就只讨论光在真空中的传播速度. 到此为止,我们会发现一个问题,光速在真空中的速度不依赖参考系的变化而变化,这与我们在经典物理学中的认识相矛盾. 接下来我们来讨论一下这个矛盾.

1.2 麦克斯韦方程做伽利略变换时速度变化

伽利略变换是整个经典力学的支柱. 该理论认为时间和空间是独立的,与其中运动的物体无关. 伽利略变换的数学表达式为

$$x' = x - ut$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = t$$

它的物理意义可以解释为,假设有两个参考系 $S(O-xyz)$ 和 $S'(O'-x'y'z')$,两个坐标系坐标轴相互平行且 x 轴与 x' 轴重合, S' 系相对于 S 系沿 x 轴以速度 u 做匀速直线运动,并以两坐标原点 O 及 O' 重合时刻为计时起点,这样就得到了同一物体在两个坐标中的时空变换关系^[1].

如果将各式对时间求导,则得到速度变换式

$$v'_x = v_x - u$$

$$v'_y = v_y$$

$$v'_z = v_z$$

假设我们在真空静止系中发出一道光,从电磁学理论出发我们很容易知道光速就是 c . 但是对于在光传播方向上以速度 u 同向运动的宇宙飞船上,

速度还是 c 吗? 按照伽利略速度变换式,在宇宙飞船上测得的速度应该为 $v' = c - u$. 难道光在真空中的速度不是常量吗? 难道是麦克斯韦方程有问题吗? 由于将电动力学的麦克斯韦方程做伽利略变化时,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”这个参考系才是常量,相对于“以太”为参考系做匀速直线运动的一切参考系都不具备这样的性质^[2].

2 迈克尔孙-莫雷实验

在狭义相对论之前,伽利略相对性原理指出力学规律在任何惯性系中都是完全等价的. 同一物理过程在不同的惯性系中具有相同的数学表述形式. 与之相对应,在一个惯性系内部做任何力学实验都不能够确定这一惯性系本身是在静止状态还是在做匀速运动. 通俗的讲,当你坐在一列匀速运动的火车上,车窗被挡住,你无法观察到车窗外的景象,这时你不能判定火车是处在静止状态还是在匀速运动. 然而,相对论以前的物理学家认为,电磁规律不遵从相对性原理,电磁规律只对某个特定的参考系成立,这个参考系被称之为绝对参考系或“以太”,他们相信能够通过实验来验证这个绝对参考系的存在.

对于验证以太存在,最著名的实验是迈克尔孙-莫雷实验. 1880年,迈克尔孙在柏林大学开始筹划用干涉方法进行以太漂移实验,因为震动干扰太大,他的这次实验并没有成功. 随后他改到天文台的地下室进行实验,并在1881年完成了实验. 实验结果出乎他的意料,他看到的干涉条纹移动远比预期值小很多,约为0.004到0.005条纹. 若考虑到实验误差,几乎可以认为条纹没有移动. 但迈克尔孙认为自己的实验精度不够高,实验不够成功. 就这样,这个实验搁置了一段时间没有继续下去. 直到1884年,迈克尔孙聆听了威廉·汤姆逊的学术报告,并会见了瑞利,就1881年的实验交换了意见. 在这次学术报告后,迈克尔孙重拾勇气,并下决心与著名的化学家莫雷合作,继续做实验来验证以太的存在^[3].

如果光是依靠以太来传播的,并且在以太中的

光速是一定的. 当光的接收者以一定的速度相对于以太运动, 他应当看到迎面而来的光的速度大于从后面追来的光的速度. 地球相对于以太运动, 不同方向的光应有不同的速度. 这种差异相对于光在以太中的速度来讲是很小的, 不能直接测量^[4]. 迈克尔孙通过测量不同方向的光速之差而引起的干涉效应来验证以太的存在. 最终, 迈克尔孙-莫雷实验的结果显示, 在误差允许的范围内, 干涉条纹并没有发生如预期理论值 0.04 个条纹. 这个实验结果引起了轩然大波, 绝大多数人不相信这个结果, 这些人就是以太理论的坚定支持者. 1922 年, 爱因斯坦在日本京东大学的演讲中提到, “还在学生时代, 我就在想这个问题了. 当时我知道迈克尔孙实验奇怪的结果. 我很快得出结论, 如果我们承认迈克尔孙实验零结果事实, 那么地球相对于以太运动的想法就是错的. 这是引导我走向狭义相对论的最早想法.”^[5]

3 洛伦兹变换

迈克尔孙-莫雷实验零结果使很多人震惊, 但是他们依然相信以太是存在的, 并通过各种理论来解释这种零结果现象. 在这众多理论中最为出色的就是洛伦兹变换. 洛伦兹用数学形式解释了这个零结果现象. 但是洛伦兹没有抛弃绝对参考系的观念, 更没有抛弃旧的时空观, 对物理学的认识还是局限于经典物理学的范畴.

洛伦兹为了解释迈克尔孙-莫雷实验零结果现象, 大胆提出在绝对空间运动的尺子在运动方向会缩短的假设. 洛伦兹长度收缩公式为

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

式中 l_0 为尺子在绝对空间中静止时的长度, l 为运动时的长度, v 为尺子相对于绝对空间运动时的速度, c 为真空中的光速. 洛伦兹的这一动尺收缩理论能够解释迈克尔孙-莫雷实验零结果现象. 洛伦兹虽然用完美的数学表达式解释了这一现象, 但是他依然没有放弃绝对参考系, 相信存在绝对空间. 洛伦兹在与庞加莱讨论后进一步完善了自己的理论. 这就是

下面将要谈到的洛伦兹变换. 令人可惜的是洛伦兹依然没有跳出绝对参考系观念.

洛伦兹变换与伽利略变换式的数学形式不同, 洛伦兹变换式能在低速情况下回到伽利略变换式. 可以这样来说, 洛伦兹变换是更为完整的, 既包括了伽利略变换的低速情况, 也包含了高速运动下的情况, 如图 1 所示.

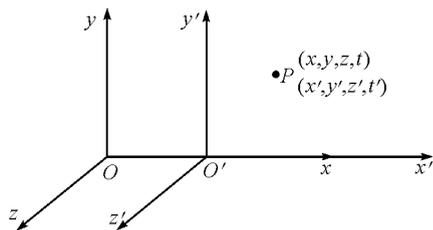


图 1

洛伦兹变换的数学形式是

$$x' = \frac{x - ut}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} \quad y' = y$$

$$z' = z \quad t' = \frac{t - \frac{ux}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$$

从坐标变换可以得到速度变换

$$v'_x = \frac{v_x - u}{1 - \frac{uv_x}{c^2}}$$

$$v'_y = \frac{v_y}{1 - \frac{uv_x}{c^2}} \sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}$$

$$v'_z = \frac{v_z}{1 - \frac{uv_x}{c^2}} \sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}$$

在 $u \ll c$ 情况下, 洛伦兹速度变换就回到了伽利略速度变换. 在 u 的速度比较大时, u 就不可忽略. 我们回到之前谈论的真空中发出的一束光. 我们已经知道光在真空中的速度为 c , 当宇宙飞船以速度 u 与光同向运动, 根据洛伦兹变换, 将 $v_x = c$ 代入

$$v'_x = \frac{v_x - u}{1 - \frac{uv_x}{c^2}}$$

可得在宇宙飞船里光速为

$$v = \frac{c-u}{1-\frac{uc}{c^2}} = \frac{c-u}{1-\frac{u}{c}} = c$$

可见,洛伦兹变换不仅能够解释迈克尔孙-莫雷实验零结果,而且能够解释麦克斯韦方程组要求的光速在真空中的不变性。

4 建立狭义相对论

爱因斯坦接受了奥地利物理学家马赫的思想,即“凡不能由实验证实的概念和陈述,都不应在物理学中占有任何地位。”^[6]于是他抛弃了牛顿的时空观,否定以太的存在,寻找与相对性原理和麦克斯韦电磁理论和谐一致的新的时空变换.在前人研究的基础上,爱因斯坦做出两大假设,一是相对性原理,二是光速不变原理.在两个基本假设的前提下,爱因斯坦一举解决了光速的不变性与速度合成法则之间的矛盾以及电磁理论中的不对称等问题,并论述了“同时”的相对性、时间延缓、长度收缩以及相对性与绝对性.这些理论既是对洛伦兹变换的物理解释,也是对时空的全新认识.

在电磁学中,产生感应电动势的方法有两种,一种是感生电动势,另一种是动生电动势.产生感生电动势的方法是线圈不动,改变通过线圈的磁通量.通常的做法是线圈不动,让磁铁运动,这样就能产生感应电动势.我们再来看动生电动势,动生电动势是让导线运动,切割磁感线产生感应电动势.我们让磁铁不动,线圈做切割磁感线运动,线圈就产生了感应电动势.如果我们从相对运动出发来分析,是线圈运动还是磁铁运动,其实都不重要,重要的是它们之间有相对运动.这样看来,从相对运动出发思考产生感应电动势的两种方法,本质上都是一样的.爱因斯坦曾在论文中这样论述,法拉第的电磁感应现象迫使我做出狭义相对性原理公设.

爱因斯坦对他的相对性原理正确性有强烈的信念.起初,他放弃真空中光速不变性,导致探索光的发射说的可能性.在光的发射说中,光速只相对于它的光源的速度不变,所以它显然与爱因斯坦的相对性原理一致.但是光速不变原理是麦克斯韦方程组

所要求的,除非他的方程组有问题,然而爱因斯坦对麦克斯韦方程的正确性是较为认同的.这种两难处境一直折磨着爱因斯坦.在1924年,爱因斯坦描述了他的两难处境的解决方法.“在7年(1898~1905)徒劳的沉思之后,我突然想到了解答,我们的时空概念和定律只有在它们与我们的经验有明确关系的范围内才能声称是有效的;而经验可以很好地引导我们改变这些信念和定律.通过修正同时性概念,把它纳入更柔顺的形式,这样我达到了我的狭义相对论.”^[7]从这里,我们可以看到爱因斯坦建立狭义相对论的过程中,最重要的转折点是突破绝对时空概念,建立新的时空观念,一举解决了创立狭义相对论道路上的很多难题.

在1922年京都大学的演讲中,据报道,爱因斯坦曾这样说,对于如何协调洛伦兹理论和他的有关相对性的想法这个问题,在奋斗了一年之后,有一天,他访问了一个朋友,与他详细讨论了这个问题.第二天,爱因斯坦对他的朋友说:“谢谢你,我已完全解决了我的问题.”^[7]这个朋友可能就是贝索,是爱因斯坦在瑞士专利局工作时的同事.他也是爱因斯坦在《论动体的电动力学》中唯一致谢的人.爱因斯坦将洛伦兹的理论以自己的相对性思想融合起来,并没有我们今天想的那么简单,而是经历了很多波折,最终才诞生了他的狭义相对论理论.

参考文献

- 1 程守洙,江之永.普通物理学.北京:高等教育出版社,2008
- 2 赵勋国.谈洛伦兹变换的物理意义.现代物理知识,2005(4)
- 3 冯杰.大学物理专题研究.北京:北京大学出版社,2011,4
- 4 王庚.迈克尔孙-莫雷实验.物理实验,1984(6)
- 5 Albert Einstein 著.我是怎样创立相对论的.高学贤译.1982,8
- 6 陈冬颖.狭义相对论的建立与思想创新.合肥工业大学学报(社会科学版),2005(6)
- 7 约翰·施塔赫尔.爱因斯坦奇迹年 改变物理学面貌的五篇论文.2001,7