

广义相对论与黎曼几何系列之六 狭义相对论的诞生

张天蓉[†]

2015-09-18收到

[†] email:tianrong1945@gmail.com

DOI: 10.7693/wl20151008

据说爱因斯坦仅用两个星期就建立了狭义相对论，这固然因为他是个天才，但也不能不承认当时这个理论已经万事俱备只欠东风、水到渠成呼之欲出的事实。

当年，牛顿力学和麦克斯韦电磁理论两者都取得了巨大成功，但各自建立时没有相容的考虑，之后才发现有不相容之处。牛顿力学建立在伽利略变换的基础上，对所有的惯性参考系都是等价的，符合伽利略的相对性原理。而麦克斯韦经典电磁理论却似乎要求有一个绝对静止的“以太”参考系存在。由于历史的原因，以太在人们脑中根深蒂固，以太一词在法语中为夏天的意思，古代的人们认为它是天上的物质，是第五种元素，热的元素。因此，当电磁理论与相对性原理产生了矛盾时，许多科学家倾向于承认以太而摒弃相对性原理。因为人们始终认为光是某种物质的振动，而像以太这种漂浮于整个宇宙空间

的物质便是这种热振动的承载体。因此，以太是不可否定的，当时物理学界掀起了一股以太热：理论物理学家们尽力建造以太的机械模型，实验物理学家们则竭尽所能来寻找以太。然而，多种方法的探索却始终未能成功。

如果以太存在的话，接下来会有一大堆尚未弄清楚的问题：以太是一种什么样的物质？由什么组成？它的性能如何？它与其他物质如何相互作用？比如有一个很简单的问题，就使物理学家们伤透脑筋：当地球(或者其他物体)相对于以太运动时，以太是更像非常粘滞的液体那样会被拖着一起运动呢？还是像某种无质量的神秘物质一样静止却又无孔不入？或者是介于两者之间？换言之，应该可以通过实验，测定出当物体运动时对以太的拖曳系数。人们为此的确进行了不少的实验和观察，但仍然说不出个所以然来，因为某些实验结果及观

察资料互相矛盾：天文观测到的光行差现象说明星体运动对以太不拖曳；斐索水流实验的结果支持部分拖曳的理论模型；还有著名的迈克耳孙—莫雷实验得到的“零结果”，则只能解释为以太是被地球完全拖曳着一起运动。

地球以 30 km/s 的速度绕太阳运动，如果存在以太，以太又不是被地球运动“完全拖曳”的话，地球运动时的“以太风”就会对光的传播产生影响，根据经典力学的速度叠加原理，当地球逆着以太风或顺着以太风的时候测出来的光速应该不同。因而，1887 年左右，迈克耳孙和莫雷进行了多次实验，企图通过测量光速的变化，即测量垂直方向上的光程差，从而探测到地球相对于以太参照系的运动速度。

阿尔伯特·迈克耳孙 (Albert Michelson, 1852—1931) 是美国籍波兰裔物理学家，他和莫雷一起进行的实验的原理如图 1 所示。

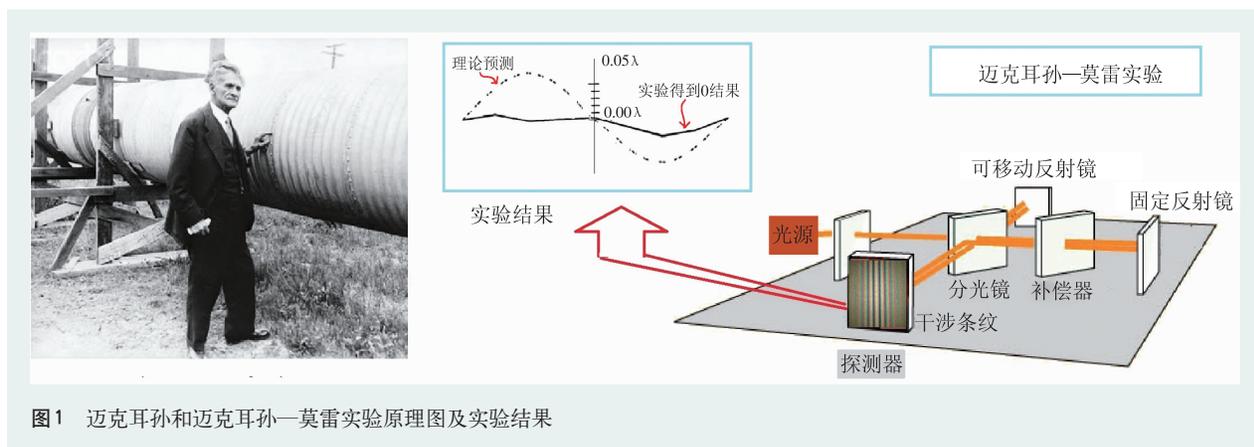


图 1 迈克耳孙和迈克耳孙—莫雷实验原理图及实验结果

从光源发出的光被分光镜分成水平和垂直两条路线(两臂),最后经过反射镜重新汇聚而产生干涉现象。经过调试使得两条路径相等时,探测器可以探测到干涉条纹。两条路线的差异则会使得干涉条纹产生移动。设备是浮在水银上的。转动会带来两条线路的光程差的改变,从而带来干涉条纹的移动。如果存在“以太风”的话,当光线经过的路径顺着“以太风”或逆着“以太风”时,光程是不一样的。由于地球以一天为周期的自转,以及围绕太阳以一年为周期的公转,这两种运动将会使得实验中得到的干涉条纹产生周期性的(一天或一年)移动。

光的速度是如此之快,为了提高实验的精确度,迈克耳孙—莫雷实验曾经在美国的克利夫兰以及美国西海岸加州的威尔逊山进行,因为有人认为在实验室内进行实验时以太是被地球拖曳的;并且,这样可以尽量增大光线经过的路径的长度,实验设施中的“臂长”最大达到32 m。尽管如此,实验得到的却都是“零结果”。(参考图1中间框中的“实验结果”:实线是实验值,虚线是将期望的理论结果值缩小到原来高度的八分之一所画出来与实验值相比较的,它们仍然比实验值大很多!)也就是说,迈克耳孙—莫雷实验没有观察到任何地球和以太之间的相对运动。因而,也可以说这是一次很“失败”的实验,不过大家公认,迈克耳孙的干涉实验精度已经达到了很高的量级,因此,迈克耳孙获得了1907年的诺贝尔物理学奖,他是第一个获得诺贝尔物理学奖的美国人^[1]。

迈克耳孙—莫雷实验没有探测到任何地球相对于以太运动所引起

的光速的变化,这个“零结果”使人困惑。如何解释麦克斯韦理论、相对性原理、伽利略变换、速度叠加、斐索水流实验、迈克耳孙—莫雷实验等这些理论及实验之间的矛盾呢?荷兰物理学家洛伦兹想了个好办法。

洛伦兹(Hendrik Antoon Lorentz, 1853—1928)曾就读于莱顿大学,于1875年获得博士学位。1877年,年仅24岁的他就成为莱顿大学的理论物理学教授。洛伦兹于1892年到1904年间发表了一系列论文,提出了他的“电子论”,那还是在汤姆孙用实验证实电子存在之前。洛伦兹提出,物质的原子和分子包含着小刚体,每个小刚体,即“电子”,携带一个正电荷或负电荷。洛伦兹认为,光的载波介质“以太”和一般的物质是不同的实体,它们之间以电子作媒介而相互作用。光波便是因“电子”的振动而产生的。洛伦兹用他的经典“电子论”解释物理现象,1895年,洛伦兹描述了电磁场中带电粒子所受的洛伦兹力,1896年,洛伦兹成功地解释了由莱顿大学的塞曼发现的原子光谱磁致分裂现象。洛伦兹断定塞曼效应是由原子中负电子的振动引起的。他从理论上计算的电子荷质比,与汤姆孙从实验得到的结果相一致。1902年,洛伦兹和塞曼分享了诺贝尔物理学奖。

洛伦兹想从他的电子论出发来解决迈克耳孙—莫雷实验的“零结果”。洛伦兹的时代,“量子”尚未正式诞生,顶多算个“小荷才露尖尖角”。因而,他的物理观念基本上是经典的,并且,“以太”在洛伦兹的脑袋中根深蒂固。既然这些实验都暂时探测不到以太的任何机械性能,那么就暂且把这点放在一边不

考虑好了。洛伦兹假定,作为电磁波荷载物的以太,在物质中或在真空中都是一样的,物体运动时并不带动以太运动。于是,洛伦兹这种缺乏物质属性的电磁以太模型,所代表的只不过是一个抽象、绝对、静止的时空参考系而已。洛伦兹的目的首先是要相对于这个“以太”参考系,找出一个适合用于其他参考系的数学变换,能够将原来看起来互为矛盾的现象都统一起来。当然,最好还能够保持麦克斯韦方程的形式不变。

根据洛伦兹的设想,相对于以太以一定速度 v 运动的尺子会变短:

$$L=L_0\sqrt{1-v^2/c^2}$$

这种运动坐标系中长度收缩的效应,正好抵消了原来设想的相对于以太不同方向上运动而产生的光速差异。如此一来,洛伦兹轻而易举地解释了迈克耳孙—莫雷实验的零结果。

实际上,当时的许多物理学家都在思考如何建立一个与牛顿力学相容的电磁模型。物理学家沃伊特(Voigt)和斐兹杰惹(Fitzgerald)等都提出过尺缩效应。除了空间收缩外,洛伦兹还提出了“本地时间”这个重要概念:

$$t=t_0-vxL/c^2$$

但这只是当时洛伦兹为了简化从一个系统转化到另一个系统的变换过程而提出的数学辅助工具而已。此外,另一位物理学家拉莫尔则注意到,在参照系变换时,除了长度收缩效应之外,他还在电子轨道的计算中发现某种时间膨胀:

$$t=t_0/\sqrt{1-v^2/c^2}$$

在众多物理学家的努力下,洛伦兹将“长度收缩”、“本地时间”、“时间膨胀”等综合起来,最

后推导出了符合电磁学协变条件的变换公式^[2, 3]:

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

并且,从麦克斯韦方程组导出的波动方程在洛伦兹变换下保持不变。

直到1900年,著名的数学家庞加莱意识到洛伦兹假设中的所谓“本地时间”,正是移动者自己的时钟所反映出来的时间值。1904年,庞加莱将洛伦兹给出的两个惯性参照系之间的坐标变换关系正式命名为“洛伦兹变换”,并且首先认识到洛伦兹变换构成群。但庞加莱始终未抛弃以太的观点。用洛伦兹变换替代伽利略变换之后,经典力学理论和经典电磁的理论得以协调。之后,洛伦兹变换成为爱因斯坦狭义相对论最基本的关系式,是狭义相对论的核心。

如上所述,在1905年爱因斯坦提出狭义相对论之前,构建这个理论的所有砖块几乎都已经齐全,所需要的一切都已经成熟。理论已成雏形,等待大师来画龙点睛。

命名“洛伦兹变换”的庞加莱

本来是很有可能成为这个画龙点睛之人的,庞加莱精于数学,但对经典物理也有着深刻的见解。早在1897年,庞加莱就发表了《空间的相对性》一文,其中相对论的影子已经忽隐忽现。第二年,庞加莱又接着发表《时间的测量》一文,提出了光速不变性假设。1905年6月,庞加莱先于爱因斯坦发表了相关论文《论电子动力学》^[4]。

回顾狭义相对论的发现史的确很有趣,洛伦兹和庞加莱当时都已经是年龄五十上下的大师级人物,为什么这个发现的殊荣落到了一个当年不过二十多岁的专利局小职员

的头上?
图2是1911年参加第一次索尔维会议的科学精英们的照片。当时,量子力学刚刚冒出水面,玻尔等一派尚未形成气候,无资格出席,大多数都是“经典”领域中的英雄人物:洛伦兹作为会议主持人,理所当然地和会议赞助者索尔维并排坐在中间,庞加莱和著名的居里夫人正在热烈地讨论着什么

问题,那时的爱因斯坦还只能站在背后。他身体略微前倾,目光往下

注视,默默而又好奇地张望着他们。

如果要问,爱因斯坦对建立狭义相对论到底贡献了些什么?或许可以这样回答:爱因斯坦贡献的是他天才的思想,是他深刻认识到的革命性的时空观,以及相对论建立后得到的质能关系等重要结果。

爱因斯坦曾经说:“我想知道上帝是如何设计这个世界的,我对诸

种现象并不感兴趣,我想知道的是他的思想”。大自然这个上帝,总是用最优化的方式来建造世界,因此,爱因斯坦从上面所述杂乱纷呈的理论、假设、观点及实验结果中,去粗取精、去伪存真,只选定留下了必要部分——两个他认为最重要、最具普适性的原理:相对性原理和光速不变原理。

根据麦克斯韦方程组,可以得到电磁波满足的波动方程,得到电磁波传播的速度不涉及参照系的选择,爱因斯坦由此得到启发,提出光速不变原理,认为对所有惯性参照系,光速都是同样的数值。这个结论也被许多实验结果所证实,包括迈克耳孙—莫雷实验的零结果,也不就是对光速不变的精确定义吗。爱因斯坦重视相对性原理,是因为马赫的哲学观对他影响很大,他不认为存在绝对的时空。新的相对性原理,不仅要对力学规律适用,也得对电磁理论适用,为了要保留相对性原理,便必须抛弃伽利略变换。那没关系,正好可以代之以协变的洛伦兹变换。尽管洛伦兹推导他的变换时假设了“以太”的存在,但洛伦兹的那种“以太”模型,已经没有了任何机械性能,也不像是任何物质,那么,又要它做什么呢?有以太或没有以太,变换可以照样进行啊。

为什么爱因斯坦很容易就摒弃



图2 狭义相对论的3位发现者在1911年的第一次索尔维会议上

了以太？究其原因与他当时对光电效应等量子理论的研究也有关系。洛伦兹和庞加莱等坚持“以太”模型，是出于经典波动的观点，总感觉波动需要某种物质类的“载体”，而爱因斯坦研究过

量子现象，知道光具有双重性，既不完全像粒子，也不完全等同于通常意义下的“波”。对粒子来说，是不需要什么传输介质的，所以，没有什么以太这种东西。

所以，爱因斯坦摒弃了以太的观

念，重新思考“空间”、“时间”、“同时性”这些基本概念的物理意义，最后，用全新的相对时空观念，同样导出了洛伦兹变换，并由此建立了他的新理论——狭义相对论^[5]。

参考文献

- [1] Dorothy Michelson L. The Master of Light: A Biography of Albert A. Michelson. 1973
- [2] Lorentz H A. Simplified Theory of Electrical and Optical Phenomena in Moving Systems. Proceedings of the Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences, 1899, 1: 427
- [3] Lorentz H A. Electromagnetic phenomena in a system moving with any velocity smaller than that of light. Proceedings of the Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences, 1904, 6: 809
- [4] Poincaré H. On the Dynamics of the Electron. Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences, 1905, 140: 1504
- [5] Einstein A. Zur Elektrodynamik bewegter Körper. Annalen der Physik, 1905, 17: 891; 英文翻译为 George Barker Jeffery 和 Wilfrid Perrett 翻译的 On the Electrodynamics of Moving Bodies(1923); 另一版英文翻译为 MeghNad Saha 翻译的 On the Electrodynamics of Moving Bodies(1920)

订阅《物理》得好礼

——超值回馈《岁月留痕——<物理>四十年集萃》

2012年《物理》创刊40周年，为答谢广大读者长期以来的关爱和支持，《物理》编辑部特推出优惠订阅活动：向编辑部连续订阅两年(2015—2016年)《物理》杂志的订户，将免费获得《岁月留痕——<物理>四十年集萃》一本(该书收录了从1972年到2012年在《物理》各个栏目发表的四十篇文章，476页精美印刷，定价68元，值得收藏)。

读者和编者

欢迎各位读者订阅《物理》(编辑部直接订阅优惠价180元/年)

(银行汇款请注明“《物理》编辑部”)

咨询电话：(010)82649266; 82649277

Email: physics@iphy.ac.cn

订阅方式

(1) 邮局汇款

地址：

100190, 北京603信箱

《物理》编辑部收

(2) 银行汇款

开户行：

农行北京科院南路支行

户名：

中国科学院物理研究所

帐号：

11250101040005699

