

爱因斯坦与狭义相对论的建立

赵 峥



爱因斯坦的学校生涯

爱因斯坦出生于德国乌尔姆一个犹太小工厂主的家庭,在慕尼黑度过了中小学阶段的大部分时光。幼年时讲话很晚、性格内向,总是独自默默玩耍或思考,父母曾担心其智力有问题。上学后依旧沉默寡言,不为老师同学所喜爱,而且学习成绩一般。

当时的德国中产阶级家庭有一个传统,每周请一两个贫困大学生到家中吃晚餐。爱因斯坦家也是如此。有位来做客的大学生发现小爱因斯坦喜欢看书,便每次都带几本书给他,包括科普读物、物理、化学、地质、矿物乃至数学和哲学,五花八门什么书都有,爱因斯坦对所有的书都表现出极大兴趣。这位大学生成为最受小爱因斯坦欢迎的朋友,每次见面都兴奋不已,问这问那。爱因斯坦还有一个特点,能长时间集中注意力。每天放学后,他总是一个人躲在一边,兴致勃勃地读那些书、摆弄玩具或其他物品,不大注意大人在干什么,有时会猛然向别人提出一两个古怪的问题,这些问题往往与大人们正在交谈的内容、正在做的事情毫无关系。

酷爱音乐的父母对小爱因斯坦影响很大,他会拉小提琴,可以说小提琴和数学物理一起伴随他的一生。成年后的爱因斯坦甚至自认为自己的小提琴水平超过数学物理,但别人都不这么认为。

爱因斯坦父亲的生意并不成功,工厂倒闭后不得不举家迁往意大利去投亲靠友。临行前把小爱因斯坦安排在德国慕尼黑的一所优秀中学读书。校方一来歧视犹太人,二来由于爱因斯坦信仰无神论,因此对他存有成见。特别讨厌他居然敢打断老师讲话,并经常向老师提出古怪问题。爱因斯坦也不喜欢这所学校的严格校规和呆板教学。后来他对学校的一切忍无可忍,就去找医生开一份神经衰弱证明,打算离开这所讨厌的学校休学半年。谁知校方更加急不可耐,未等爱因斯坦递上生病证明就主动找他谈话,劝其退学,让他到意大利去找父母。爱因斯坦最初为之一愣:“退学!这怎么向父母交代?”转而又想:总算能永远离开这所讨厌的学校了。于是,16

岁的爱因斯坦愉快地接受了校方的建议。

年轻的爱因斯坦热爱数学和物理,但他不会意大利语、又不喜欢德国,于是决心到瑞士德语区求学。他第一次没有考上苏黎士工业大学,于是进入瑞士阿劳州立中学补习。这所学校给学生以充分的自由。爱因斯坦一生中对学校很少有好印象,只有阿劳中学是个例外。他晚年时回忆道:“这所学校用它的自由精神和那些毫不仰赖外界权威的教师的淳朴热情,培养了我的独立精神和创造精神。正是阿劳中学成为了孕育相对论的土壤”。这是因为,在阿劳中学学习期间,由于空闲时间较多,爱因斯坦曾思考过不少与课堂学习无关的东西。特别是他曾反复考虑过一个“思想试验”,当一个观测者追上光、与光一起运动时会看到什么。这个问题的思考对他后来建立相对论大有帮助。

经过1年的补习,爱因斯坦终于如愿以偿地进入苏黎士工业大学教育系。这个系主要培养数学、物理教师,所开课程主要是数学和物理。闵可夫斯基、韦伯(不是姓名用于命名磁通量单位的那个韦伯)等著名数学、物理教授都在此讲课。但爱因斯坦有自己的一套学习方法,他更愿意自己阅读当时一些大科学家写的名著,而不愿听课。

爱因斯坦并非完全不去学校,只不过经常在下放学后才去,他或者到实验室一个人摆弄实验,验证一下白天自学的物理知识;或者与一两个知心同学到学校的咖啡馆讨论学术问题。其中有几个同学很照顾爱因斯坦。一个是他的女友米列娃,常常帮助不去听课的爱因斯坦记笔记。米列娃相貌平平、脚有残疾,是一个善良、严肃、沉静而具有自由思想的塞尔维亚姑娘,是充满活力的爱因斯坦的忠实听众。另一个是好友格罗斯曼,经常在考试前夕将自己工整而漂亮的笔记借给爱因斯坦,他就硬着头皮苦读几天,勉强熬过考试,使他对这些课程更无兴趣。格罗斯曼的性格与爱因斯坦相去甚远,是公认的好学生,总是衣冠整洁、遵守校规、认真听课、成绩优秀。然而,性格和作风上的差距并没有妨碍他们成为终生好友。在他们二人的帮助下,爱因斯坦才没有补考留级,并有空读了不少有用书籍,思考了许

多物理学的基本问题。但是爱因斯坦却得不到老师的重视和喜爱,由于他成绩一般,而且不常去听课,闵可夫斯基教授对爱因斯坦没有太多印象,韦伯教授则对他没有好印象。韦伯不但厌烦他不来听课,还认为他没有礼貌,有一次居然称呼他“韦伯先生”,而不是“韦伯教授”。毕业时格罗斯曼等几个同学令人羡慕地留校工作,而爱因斯坦则不得不拿着文凭黯然离开。

离开校门的爱因斯坦在求职过程中尝尽辛酸,没有一个大学接受他的求职申请。犹太血统和无神论信仰,增加了找工作的困难。经济拮据使爱因斯坦不得不在电线杆上张贴广告,试图以讲授数学、物理和小提琴赚钱糊口。他曾当过补习老师,也曾为老同学帮自己找到几个月的临时工作而喜出望外。他好长一段时间没有固定收入,米列娃对此忧心忡忡。爱因斯坦当时诸事不顺、四面碰壁,与米列娃的婚事也遭到父母的坚决反对。

爱因斯坦的丰收年

1902年,幸运之神开始眷顾爱因斯坦。“伯乐”式的朋友格罗斯曼设法把他推荐给伯尔尼发明专利局局长。在那里,爱因斯坦终于得到一个固定工作,虽然只是最低等的三级职员,但毕竟有了一份稳定收入,使爱因斯坦有了结婚的经济基础。同时由于爱因斯坦的坚持,他父亲终于在临终前同意了这门婚事。同米列娃结婚之后,两个儿子相继来到人间。家庭负担的加重,使他们的经济重新拮据起来。但是爱因斯坦是“一只快活的小鸟”,他在艰苦条件下继续思考着最重要的科学问题。

爱因斯坦经常审理发明“永动机”的申请,这虽然费去他一些时间,但荒唐而活跃的思想也多少给他输入一些新灵感。重要的是,专利局的工作使他有充分闲暇研究自己喜爱的东西。他把想看的书摊开放在抽屉内,无事时便偷看,一旦上司出现,就赶快把抽屉关上。局长是一位开明、宽容的领导,有几次虽然看见了却并未干涉。即使在今天看来,这份清闲的工作加上如此宽容的环境,对爱因斯坦也是再合适不过了。他的大多数成就,都是在这个职位上做出的。爱因斯坦发表相对论后,有些人评论说:“看,我们的社会有多么不公!竟然没有一个大学要爱因斯坦,使他不得不在专利局浪费时间。否则,他一定会做出更多的成就!”爱因斯坦的朋友数学家希尔伯特反驳道:“没有比专利局对爱因斯坦更合适的

工作单位了。”

在专利局工作期间,爱因斯坦与他的几位热爱科学与哲学的好友成立了一个叫做“奥林匹亚科学院”的小组。这是一个自由阅读、探讨的俱乐部。小组成员都具有大学文化水平,工作单位、专业背景各不相同,有学物理的、有学哲学的、还有学工程技术的。几个年轻人利用休息日或下班时间一边阅读、一边讨论,内容海阔天空,以哲学为主,也包括物理和数学。他们充满热情地阅读、讨论了许多书籍,其中包括马赫的《力学史评》,这本对牛顿绝对时空观展开猛烈批判的书,对爱因斯坦建立狭义和广义相对论都产生了极大影响。还有庞加莱的名著《科学与假设》,令他们一连几个星期兴奋不已。该书内容丰富、思维活跃,其中关于“同时性”的定义、时间测量和黎曼几何的描述对爱因斯坦建立相对论发挥了重要影响。爱因斯坦高度评价这个读书俱乐部,认为这个俱乐部培养了他的创造性思维,促成了他的学术成就。爱因斯坦曾经提醒一些记者,不要过分渲染他的童年和少年时代,希望他们注意“奥林匹亚科学院”对他的影响。

在此期间,爱因斯坦开始了自己的学术生涯。他最初研究毛细现象,然后研究布朗运动、光电效应和时空理论,发表了一系列重要论文。应该说,他发表的论文总数并不算多,1901年1篇、1902年2篇、1903年1篇、1904年1篇。这些论文水平一般,主要研究毛细管。1905年是爱因斯坦的丰收年,他除博士论文外又连续完成了4篇重要论文,其中任何一篇都能拿诺贝尔奖;6月发表了解释光电效应的论文,提出光子说;7月发表了关于布朗运动的论文,间接证明了分子的存在;9月发表了题为《论运动物体的电动力学》的论文,提出了相对论(即后来所称的狭义相对论);11月发表了有关质能关系式的论文,指出能量等于质量乘光速的平方 $E = mc^2$,此关系式可以看作制造原子弹的理论基础之一。在科学史上,1905年爱因斯坦26岁时做出的成就,只有牛顿23~25岁在乡下躲避瘟疫那段时间取得的成就可以与之相比,那一年被称为牛顿的丰收年。

他提出相对论的划时代论文,充满了难懂的革命性新思想,采用的却是当时大学本科生就能看懂的数学工具,并且没有引用任何参考文献。如果放在今天,这样的文章恐怕很难通过审稿。一般的审稿人不是看不懂其中的物理内容,就是会轻视作者

的数学水平,或者因作者不引文献而误认为文章的内容跟不上世界潮流,显得没有水平。爱因斯坦很幸运,这篇文章被送给水平高、思想活跃而又不压制年轻人的普朗克审稿,一下就被推荐发表在德国的物理年鉴上。此后,他又连续发表几篇论文,建立起狭义相对论的全部框架。

洛伦兹收缩与洛伦兹变换

19世纪下半叶,麦克斯韦从以太的弹性理论导出了一组电磁场方程,不仅包括了库仑定律、毕奥-萨伐定律、法拉第电磁感应定律等所有已知电磁学定律,而且使它们更加完备。虽然今天我们知道以太并不存在,且从以太的振动去推导电磁场方程既不正确,也无必要,但麦克斯韦所得结论还是正确的,今天仍然公认他对电磁理论研究做出了卓越贡献。

从麦克斯韦电磁方程组出发可以得到一个重要结论:电磁波以光速传播,光速是一个恒定的常数。伽利略相对性原理告诉我们,物理规律在一切惯性系中都是相同的。麦克斯韦方程组在所有惯性系中都应成立,即光速在任何惯性系中都应相同,是同一个常数 c 。按照牛顿的观点,所有相对于绝对空间静止或作匀速直线运动的参考系都是惯性系,惯性系之间可以差一个相对运动速度 v 。依照矢量迭加的平行四边形法则,电磁波(即光波)的速度如果在惯性系 A 中是 c ,那么,在相对于 A 以速度 v 运动的另一个惯性系 B 中,就不应再是 c 了,而应是 $c+v$ (当 c 与 v 反向)或 $c-v$ (当 c 与 v 同向)。但是,麦克斯韦电磁理论明确无误地告诉我们,光速只能是 c ,不能是 $c+v$ 或 $c-v$ 。毛病到底出在哪里呢?

通过上面的讨论不难看出,我们用到了麦克斯韦电磁理论(它要求光速只能是常数 c)、相对性原理(它要求包括电磁理论在内的所有物理规律在一切惯性系中都相同)、伽利略变换(即作为速度迭加原理的平行四边形法则,它被当作相对性原理的数学体现)这些原理,就是这三条原理导致了矛盾。

当时,“以太”理论根深蒂固,虽然迈克尔逊实验与光行差实验明显矛盾(光行差现象表明地球没有拖动以太,而是相对于以太运动;迈克尔逊实验则没有测出地球相对于以太运动的速度,表明地球相对于以太静止,即地球似乎拖动了以太),绝大多数人仍然不怀疑以太的存在,不怀疑“光波是以太的弹性振动”。为了保留以太理论,同时克服上述理论和实验上的困难,当时最杰出的电磁学专家洛伦兹等人

决定放弃相对性原理。他们想保留麦克斯韦电磁理论,同时解决迈克尔逊实验与光行差实验的矛盾。为此,他们提出以太相对于绝对空间是静止的。麦克斯韦电磁理论只在相对于以太(即绝对空间)静止的惯性系中成立。光波相对于以太(绝对空间)的速度是 c ,相对于运动系的速度不再是 c 。他们又提出一个新效应:相对于绝对空间运动的刚尺,会在运动方向上产生收缩(洛伦兹收缩)

$$l = l_0 \sqrt{1 - v^2/c^2} \quad (1)$$

式中 l_0 是刚尺相对于绝对空间静止时的长度, l 是刚尺相对于绝对空间以速度 v 运动时的长度, c 是光速。“洛伦兹收缩”可以解释为何迈克尔逊实验观测不到地球相对于以太的运动。这是因为沿运动方向放置的镜筒发生了洛伦兹收缩,缩短了光程,这一效应抵消了地球相对于以太运动带来的光速改变。他们认为洛伦兹收缩是物理的,会引起收缩物体内部结构和物理性质的变化。洛伦兹等人进而认为,作为相对性原理数学体现的伽利略变换

$$\begin{cases} x = x - vt \\ y = y \\ z = z \\ t = t \end{cases} \quad (2)$$

应当代以新变换(庞加莱称其为洛伦兹变换)

$$\begin{cases} x = (x - vt) / \sqrt{1 - v^2/c^2} \\ y = y \\ z = z \\ t = [t - (v/c^2)x] / \sqrt{1 - v^2/c^2} \end{cases} \quad (3)$$

式中 (x, y, z, t) 为静止惯性系中的坐标和时间, (x', y', z', t') 为运动惯性系中的坐标和时间, x 轴与 x' 轴重合, y 轴与 y' 轴、 z 轴与 z' 轴分别平行,运动方向沿 x 轴, v 是运动系相对于静止系的速度, c 是光速。这里,除去公式上的差异外,物理上还有一个重要区别:(2)式表示的是任意两个惯性系之间的变换、(3)式表示的是惯性系相对于绝对空间的变换。即(2)式中的速度 v 只是两个惯性系之间的相对速度,与绝对空间无关。而(3)式中的 v 却是惯性系相对于绝对空间的绝对速度。(3)式中的 (x, y, z, t) 特指相对于绝对空间静止的惯性系的坐标与时间。

洛伦兹变换(3)有两个优点,第一是从它可以推出刚尺收缩公式(1),第二是麦克斯韦电磁方程在洛

伦兹变化下形式不变。伽利略变换不具备这两个优点。洛伦兹等人用公式(1)、(3)克服了迈克尔逊实验造成的困难,代价是抛弃了相对性原理。

突破绝对时空观

洛伦兹等人忙于研究相对于绝对空间运动的原子在运动方向上发生收缩时,其内部结构会如何变化、内部的电荷分布会如何改变、内部的作用力会呈现何种状态。爱因斯坦正在此时发表了狭义相对论,不过他并不知道洛伦兹等人的工作,也没有注意迈克尔逊实验,他主要抓住的是斐索实验与光行差实验的矛盾。光行差现象与迈克尔逊实验的矛盾体现在运动介质是否拖动以太上。光行差现象表明作为介质的地球完全没有拖动以太,迈克尔逊实验则表明地球完全拖动了以太。斐索实验研究了流水对光速的影响,其结论是:作为介质的流水似乎部分地拖动了以太,但又没有完全拖动,也与光行差现象认为“运动介质完全不能拖动以太”的结论相冲突。

爱因斯坦深受奥地利物理学家兼哲学家马赫的影响。马赫曾勇敢批判占统治地位的牛顿绝对时空观,认为根本就不存在绝对空间和绝对运动,一切运动都是相对的。爱因斯坦接受马赫相对运动的思想,认为以太理论和绝对空间概念应该放弃。他认为伽利略变换不等于相对性原理。他考虑了麦克斯韦电磁理论(包括光速 c 是常数的结论)、相对性原理与伽利略变换之间的矛盾。认为“光速不变”、“相对性原理”比伽利略变换更基本。他把“光速不变”看作一条基本原理,称为“光速不变原理”。“光速不变原理”不仅提出真空中的光速均匀各向同性,是一个常数 c ,更重要的是提出在任何惯性系中测量真空中的光速都是同一个常数 c ,与观测者相对于光源的运动速度无关。

爱因斯坦是在长时间反复思考后得出这一原理的。早在他的相对论论文发表之前1年多,他就认识到相对性原理和麦克斯韦电磁理论都是大量实验证实的理论,都应该坚持。但是麦克斯韦理论要求光速是一个常数,相对性原理又要求光速在各惯性系中都相同。这就是说,光速应该是与光源运动速度无关的常数。但是按照人们的日常观念,如果相对于光源静止的观测者测得的光速是 c ,那么以速度 v 向着光源运动的观测者测到的光速将是 $c + v$ 。而以速度 v 背离光源运动的观测者测到的光速将是 $c - v$ 。爱因斯坦觉得“这真是个难解之谜”。

1905年5月的一天,他带着这一问题专门拜访了好友贝索(“奥林匹亚科学院”的成员之一)。经过一下午讨论,爱因斯坦豁然开朗,应该把光速不变看作一条公理,即把光速看作绝对的。5周之后,爱因斯坦开创相对论的论文就寄给了杂志社。

贝索一生都在听课、学习,课听了一门又一门、书学了一本又一本,却一事无成。他喜欢与别人争论、反驳别人的意见,但从不独立完成一件工作。与他的这次讨论大大启发了爱因斯坦,可他自己并未搞清启发了爱因斯坦什么。爱因斯坦在这篇创建相对论的划时代论文的最后感谢了贝索对自己的帮助和宝贵建议。贝索十分激动地说:“阿尔伯特,你把我带进了历史。”

爱因斯坦1922年在日本京都的一次演讲中曾提到,与贝索的讨论使他认识到两个地点的钟“同时”,并不像人们通常想象的那样,是一个“绝对”概念。物理学中的概念都必须在实验中可测量,“同时”这个概念也不例外。而要使“同时”的定义可测量,就必须对信号传播速度事先有个约定。由于真空中的光速在电磁学中处于核心地位,爱因斯坦猜测应该约定(或者说“规定”)真空中光速各向同性而且是一个常数,然后在此基础上定义异地时间的同时。这样“同时”将是一个相对概念。我们看到,定义两个地点的钟同时,必须首先假定光速各向同性而且是一个常数,即必须假定光速是绝对的。爱因斯坦曾经与贝索等人一起阅读庞加莱的《科学与假设》,该书就议论过时间测量与光速的内在联系。庞加莱猜测,要测量时间可能首先要对光速有一个约定。与贝索的讨论可能使爱因斯坦想起了庞加莱的观点,不过爱因斯坦并未明确指出这一点。此外,与贝索的讨论还可能使爱因斯坦想到了他在阿劳中学读书时考虑过的那个思想试验:以光速运动的观测者将看到光是不依赖于时间的波场,但从未有人见过这种情况,所以光不可能相对观测者静止,一定作相对运动。

爱因斯坦能够从纷乱的理论探讨和实验资料中,认识到应该把光速看作绝对的,并毅然提出这一全新观念,极其难能可贵。在光速不变原理和相对性原理的基础上,他推出了两个惯性系之间的坐标变换关系,这个关系就是洛伦兹等人早已得出的变换公式(3)。不过,爱因斯坦是在不知道洛伦兹等人工作的情况下,独立推出这一公式的。更重要的是,

爱因斯坦对公式(3)的解释与洛伦兹完全不同。洛伦兹认为相对性原理不正确,认为存在绝对空间(以太),变换(3)中的速度 v 是相对于绝对空间的,因而,变换(3)描述的是相对于绝对空间运动的惯性系与绝对空间静止系之间的关系。爱因斯坦则认为相对性原理成立,不存在绝对空间、不存在以太,公式(3)描述的是任意两个惯性系之间的变换, v 是这两个惯性系之间的相对速度,根本与绝对空间的概念没有关系,所以他赞同把自己的理论叫做相对论。

有趣的是,相对论的最主要公式洛伦兹变换是洛伦兹最先给出的,但相对论的创始人却不是洛伦兹而是爱因斯坦。应该说明,这里不存在篡夺科研成果的问题。洛伦兹本人也认为,相对论是爱因斯坦提出的。在洛伦兹主持的一次讨论会上,他对听众宣布:“现在,请爱因斯坦先生介绍他的相对论。”这是因为洛伦兹一度反对相对论,他还曾与爱因斯坦争论过相对论的正确性。更有趣的是,“相对论”这个名字是洛伦兹起的。在争论中,为了区分自己和爱因斯坦的理论,洛伦兹给爱因斯坦的理论起了个名字——“相对论”。爱因斯坦觉得这个名字恰如其分,于是就欣然接受了。

相对性原理与光速的绝对性

1905年前后,许多人都已接近相对论(狭义相对论)的发现,除去上面提到的洛伦兹收缩和洛伦兹变换之外,在爱因斯坦的论文发表之前,拉莫(J. J. Larmor)已经给出运动时钟变慢的公式,庞加莱(H. Poincare)已经正确阐述了相对性原理,并推测真空中光速可能是常数,而且可能是极限速度。此外,一些特殊的情况下的质量公式、质能关系式均已有人给出。但是首先正确阐述相对论并给出完整理论体系和上述全部结论的还是爱因斯坦,因为只有爱因斯坦在两个基本观念(“相对性原理”和“光速的绝对性”)上同时实现突破。

一般介绍相对论的文章都非常强调爱因斯坦之所以能建立相对论,关键是他坚持了“相对性原理”。在当时的情况下,认定“相对性原理”是应该坚持的一条根本性原理、伽利略变换并不等价于“相对性原理”,放弃后者、坚持前者的确并非易事。这是洛伦兹和大多数物理学家都没有认识到的。但是,应该注意到,关于运动相对性的观念自古以来各国都有,例如我国宋朝诗人陈与义的诗:“飞花两岸照船红,百里榆堤半日风,卧看满天云不动,不知云与我俱东。”

到17世纪,伽利略已经通过对话的形式正确给出了相对性原理的基本内容。牛顿虽然认为存在绝对空间,同时认为转动是绝对运动,但他还是认为各个惯性系大体上是等价的。应该说,牛顿在他的理论中部分应用了相对性原理。1900年前后,虽然洛伦兹等人考虑放弃相对性原理,但由于马赫对牛顿绝对时空观的勇敢批判,深受马赫影响的爱因斯坦还是清醒地认为应该坚持“相对性原理”的。然而,仅仅坚持“相对性原理”,还不足以建立相对论。庞加莱已经正确阐述了“相对性原理”,并认为真空中的光速是一个常数,甚至提出光速可能是极限速度,但是他仍未建立相对论,因为建立相对论还必须实现观念上的另一突破——认识到光速的绝对性。“光速的绝对性”在一般相对论书籍中是用“光速不变原理”或“麦克斯韦电磁理论”表述的,这样的表述方式虽然正确,但不容易使读者意识到这一观念是多么大的突破。

洛伦兹与庞加莱都曾非常接近相对论的发现,但爱因斯坦才是相对论的唯一发现者。事实上在相对论发表后,洛伦兹和庞加莱都曾反对它。洛伦兹后来接受了相对论,庞加莱则至死都未发表过赞同相对论的言论,而且他对爱因斯坦的评价也不太高。他去世前不久应苏黎世工业大学的邀请,对爱因斯坦申请教授位置发表了以下意见:“爱因斯坦先生是我所知道的最有创造思想的人物之一,尽管他还很年轻,但已经在当代第一流科学家中享有崇高的地位。……不过,我想说,并不是他的所有期待都能在实验可能的时候经得住检验。相反,因为他在不同方向上摸索,我们应该想到他所走的路,大多数都是死胡同;不过,我们同时也应该希望,他所指出的方向中会有一个是正确的,这就足够了。”后来的研究进展表明,历史与这位数学大师开了一个极大的玩笑:爱因斯坦在1905年指出的所有方向都是正确的。

(北京师范大学物理系 100875)

作者简介



赵峥,汉族,1943年出生于四川成都,北京师范大学物理系教授。曾任中国引力与相对论天体物理学会理事长,现为中国物理学会理事,引力与相对论天体物理学分会委员。主要从事相对论、

弯曲时空量子场论、黑洞与时空理论的研究。

现代物理知识