

DOI:10.12405/j.issn.2097-1486.2025.04.003

双生子佯谬时间观之争及其判决性

孙圣

电子科技大学 人文社科高等研究院, 四川 成都 611731

摘要: 双生子佯谬是朗之万试图以爱因斯坦容易接受的方式在动钟延缓效应与相对性原理之间构造时间悖论而提出的思想实验。此类思维方式已然不同于牛顿时期的自然哲学土壤, 其对于哲学观念的革新意义十分关键。但由于科学争论环境的降温而被忽视, 对于判决性哲学根源的考察遗留至今。实际上, 逻辑进路也可用于对思想实验做排除性的考察。提出并论证, 其思想渊源出自这一时期学界的共同困境, 理性观念未能及时作出调整以适应经验发现。朗之万改进洛伦兹构想并将其放置在理论体系中以激化旧有矛盾, 在方法论上所沿用的是庞加莱等人的共同进路。从动钟延缓的几类错误理解出发, 史哲分析将有助于考察思想实验判决性的根源, 理解哲学观念的现代转向何以发生。并在基础自然科学领域, 促进科学理解与原始创新意义上的科学发现。

关键词: 动钟延缓; 时间观; 以太; 思想实验; 判决性

中图分类号: O412.1; B029

文献标志码: A

文章编号: 2097-1486(2025)04-0343-10

Debates and Crucial Account of Time View of Twin Paradox

SUN Sheng

Advanced Institute of Humanities and Social Sciences, University of Electronic Science and Technology of China,
Chengdu 611731, China

Abstract: Twin paradox is proposed as a thought experiment by Langevin who pretends to create temporal incompatibility between time dilation effect and principle of relativity, which he thought would be easily accepted by Einstein. The way of thinking of the paradox differs from the background of natural philosophy of Newton's period. It plays an important role on the shifting of philosophical concepts which is ignored due to cooling down of the scientific debate environment. It is why the review on philosophical origin of crucial experiments is still shown on the lists of today's studies. Indeed, the logical approach can also be employed to conduct eliminative reviews of thought experiments. The study proposes that the thought of twin paradox comes from the common dilemma, that is, human beings fail to make adjustment on rationalistic concepts according to the empirical discoveries. This study shows that the scenario of Lorentz is improved by Langevin and placed into the theoretical framework to intensifying the existing contradictions, the approach of which follows Poincare in sense of methodology. From several types of misunderstanding on time dilation, historiography of science could be the right way of tracing the crucial account of thought experiments, which contributes to one's understanding on the modern shifting of philosophical concepts. In the realm of fundamental natural sciences, it fosters scientific understanding and scientific discovery in the sense of original innovation.

Keywords: time dilation; time view; ether; thought experiments; crucial account

0 引言

“双生子佯谬(Twin Paradox)”由法国物理学家

保罗·朗之万(Paul Langevin)于1911年以思想实验的形式提出,并将其视为“双生子悖论(Twin Paradox)”^{[1]31-54}。试图在“动钟延缓(time dilation)”与相

基金项目: 甘肃省基础科学研究计划-软科学专项(23JRZA398); 国家社会科学基金西部项目(23XZX003)

收稿日期: 2025-10-01; 修回日期: 2025-11-15

对性原理之间构造悖论,用以批驳狭义相对论。进而引发理论物理学界的广泛争论。争议部分在于,与相对论冲突的时间观争论何以从未出现超越双生子佯谬的争论进路。双生子思想实验后被判决性实验证伪而降格为佯谬^[2]。被证伪通常意味着理论内核不再具有波普尔意义上的科学价值。很多时候仍可用于设计判决性实验而具有方法论价值。类似情形还有“贝尔不等式(Bell's inequality)”^[3]。其判决性实验支持了量子力学的非定域性。也遗留了疑难,此类判决性的哲学根源是什么?

1 问题的提出

1.1 方法论在整体上的哲学分析:思想实验的判决性何以可能

我们知道,除爱因斯坦外,亨德里克·洛伦兹(Hendrik Lorentz)、亨利·庞加莱(Henri Poincaré)、赫尔曼·闵可夫斯基(Hermann Minkowski)等诸多科学家均为狭义相对论的提出奠定了理论基础。双生子思想实验的提出,既是朗之万的个人工作,也是科学发展的历史必然,体现了传统时间观与相对论之间的冲突。与之相关的判决性实验用于检验各方理论并最终改变了人们的时间观。两个问题具有较强的相关性而可放在一起讨论。

早在培根提出“判决性实验”^[4]¹²²表述时,其判决性的哲学根源就注定成为理论物理与科学哲学的重要议题。在提供辅助性的判决方面,部分类型的思想实验确有相似功能。其他类型或可提供未经检验的知识。反驳性的思想实验的功能主要是前者。有代表性的哲学观点来自美国哲学家罗伊·索伦森(Roy Sorensen)。模态反驳模式的思想实验能凭借其逻辑结构对物理学理论做出排除性的判决^[5]。建设性的思想实验的功能主要是后者。较为被普遍接受的是英国哲学家蒂莫西·威廉姆森(Timothy Williamson)的观点。思想实验的想象力构成了人类的主要知识来源^[6]。

根据索伦森的哲学分析,不难发现,爱因斯坦火车思想实验是一种建设性的思想实验。从它能推导出动钟延缓等对于当时物理学界而言的全新知识内容。相比之下,追光思想实验则是一种反驳性的思想实验。被爱因斯坦用以对伽利略协变与麦克斯韦方程组、洛伦兹变换之间的不相容做出排除性的判决。爱因斯坦认为自己的物理结论无需借助真实实验的验证。信心显然来自于反驳性的追光思想实验此前的成功。而信心的作用对象则延展至建设性的

火车思想实验,以及由此而来的包括动钟延缓在内的狭义相对论推论。不同于发生在真实环境中的实验,思想实验完全依赖于人类头脑的想象。物理学首先是一种实证科学。思想实验提供的建设性推论,此类知识未经检验。不同于反驳性的思想实验,其有效性难以赢得人们的信任,依赖真实物理实验对其的判决。对于将信心从反驳性思想实验向建设性思想实验的延展,物理学界、科学史学界与科学哲学界均存在相左看法。

这里只提及对于物理学思想实验的判决功能在整体上持谨慎乐观态度,仅在这一将信心做过度延展问题上做有限批评的观点。索伦森本人持反对立场。他认为,简单预设可想象性与可能性之间的等价性是武断的^[5]³⁹⁻⁴⁰。在美国哲学家大卫·查尔莫斯(David Chalmers)看来同样如此,想象世界与可能世界之间存在不可逾越的鸿沟^[7]¹⁶⁹。双生子思想实验的提出,其目的是明显的,方式是巧妙的。朗之万试图以此对动钟延缓的有效性做出排除性的判决,并以此反驳狭义相对论。相比于火车思想实验,朗之万使用的逻辑结构更接近于追光思想实验。它是反驳性的和判决性的,而非建设性的与知识提供性的。也就是说,双生子思想实验在分类上存在具有判决性的可能。至于它为何最终在判决上是失败的,我们将在最后的章节从其逻辑结构展开详细的讨论。

在物理学的一阶问题上,朗之万与爱因斯坦均能自觉地应用思想实验作为二阶研究进路。尽管如此,他们都未清醒地意识到,思想实验的判决性来源于反驳性而非建设性。相关的哲学分析是必要而关键的。具体而言,双生子思想实验能提供培根意义上的判决性吗?为此,在做了必要的科学哲学理论准备工作之后,需要回到科学思想史的语境之中,进行具体的分析。

1.2 双生子思想实验用以争论的逻辑出发点

由动钟延缓效应所开启的时间观之争,最初是从这一时期的电磁学领域的相关发现开始的。尽管如此,如果要求为电磁场做出可视化的科学想象,即便在理查德·费曼(Richard Feynman)这位发明了费曼路径积分等可视化方法的美国物理学家看来,是难以完成的可怕要求^[8]²⁶⁸。显然,试图直接通过电磁学视角来想象动钟延缓效应并最终促成科学理解的这一进路通常是行不通的,但彻底离开电磁学进路对于问题的描述又是不完整的。为此,要回到将朗之万面临的时间观问题,将其放在思想史的环境

中加以考察,沿用史论结合^[9]的方式,以寻找突破口。

回顾科学思想史,朗之万之所以将双生子思想实验、动钟延缓效应与相对性原理放置在同一体系中,是因为他期待这样的操作能为从逻辑上拒斥容纳三者且自洽的体系进而反驳相对论时间观提供某种可能性。现在不难知道,对于操作所导致的冲突,直接将其矛头指向动钟延缓效应,其前提是不成立的。前提是,对“同时性”测度细节的缺省、非惯性系对洛伦兹变换不适用等因素的影响可忽略不计。事实上,这些因素不能忽略^{[10][11]}。

我们知道,动钟延缓效应是狭义相对论的必然结论。在朗之万看来,假若双生子思想实验不是佯谬而是一个悖论,则能激化动钟延缓效应与相对性原理之间的冲突。从而,拒斥狭义相对论及其时间观。其可行性在于,相对性原理极强的基础性,使得与之冲突的理论易判为无效。朗之万的思想来源是连贯的。对思想脉络做整体把握,从而理解双生子佯谬所争论的问题。为此,要对与之相关的相对性原理及其基础性做出必要的考察,参考此前与洛伦兹、庞加莱和爱因斯坦直接或间接的争论。对于物理学问题的哲学分析,应随时保持对于科学家的关切的回应。为此,在分析之前,建立必要的科学常识,确定争论的有效范围和有效手段,明确争论对象的概念及其数理基础。尽管研究从科学思想史切入对于争论的描述,但需要申明的是,相对性原理及其基础性所具有的哲学价值,不以科学史研究为唯一范畴和必要前提。

“相对性原理(principle of relativity)”通常是指由庞加莱提出的版本。它又可表述为“惯性系平权”,要求物理定律对于所有惯性参考系保持数学形式不变。在无转动的情况下,相对匀速直线运动的坐标系之间不能通过任何物理实验加以判决。它常被认为是使人们能一致化讨论物理定律对称性的基础。在庞加莱看来,相对性原理可轻易地由日常经验所佐证^{[4][9]}。相对性原理允许动钟延缓效应在惯性参考系变换下具有对称性^{[11][12]}。另一类对称性则是与时间反演变换有关的^{[12][43]}。两类有关时间的对称性分别对应着不变量和守恒量^{[13][155]}。它们共同决定着理论物理学及现代宇宙学分支的很多重要结论。例如,各向同性观者的世界线正交面不一定是均匀面^{[13][361]}。

更早版本的“相对性原理”可追溯到伽利略协变的提出^{[14][10]}。在此基础上发展了牛顿体系。牛顿直

接将第一个绝对静止参考系的定义做缺省配置,悬搁对它的数学、物理和哲学讨论。牛顿体系从根本上无法回答此类问题^{[14][10]}。对系统状态的描述,在物理学仅取决于相对参数,例如,相对距离,而非绝对方向^{[4][72]}。麦克斯韦方程组规定,光速的平方与真空介电常数和真空磁导率的乘积成反比。除非真空介电常数与真空磁导率是与参考系运动状态相关的函数,否则光速不能随参考系运动状态发生改变。显然与伽利略协变发生冲突。“以太”理论不仅不能协调冲突,还会使之加剧。洛伦兹的处理方式是,提出高速运动长度会缩短。洛伦兹并不清楚这意味着什么,以及它会对传统时间观造成怎样的影响。

早在1904年,庞加莱就觉得有必要根据洛伦兹变换对伽利略意义上的相对性原理作出修正——从经验观察得出的物理学原理对静止或匀速直线运动观者而言在数学形式上应完全相同,无法确定自身所处参考系的绝对运动状态。实际上,在理论物理中,首先确定一个稳固不变的东西是必要的。然而,要确定的并非是第一个绝对静止的参考系。用数学语言说则是,物理定律的函数状态取决于绝对参数的二阶微分方程^{[14][7-8]}。也就是,只取决于相对运动关系及其相对参数。庞加莱意识到无法区分匀速运动和静止观者。在他看来,问题会以某种方式得以解决。他未得到狭义相对论的结论——用光看待世界。相反,他用其他方式补偿这一问题。

我们知道,在参考系变换对称性的意义上,不同于质量和能量,带电粒子的电量既是不变量又是守恒量^{[13][155]}。正是守恒量和不变量集中在同一个对象的同一个性质上,才使得从相对性原理架起通向狭义相对论的桥梁成为可能。朗之万的理论能最大程度的满足最小作用原理。从运动学出发,洛伦兹的计算结果与动力学直接冲突。迫于体系自洽的需要,平衡洛伦兹变换对于电子的影响,庞加莱引入了“庞加莱张力”。在这一时期,庞加莱张力的存在,是使电子模型与狭义相对论相容且使电子保持稳定的必要前提。电子质量的起源如今更多的指向规范对称性的自发破缺。庞加莱张力为何与电子质量电磁或非电磁起源相关,其关注度逐年增高^{[8][381-384]}。

从哲学上讲,庞加莱的研究进路与朗之万相似,同样将目标理论置于同一体系中以考察它们的相容性。具体说来,匀速直线运动的电子,其拉格朗日量、动量与能量在数学表达上应是相关的。此时学界普遍接受,以此来判定理论模型与最小作用原理之间的兼容性,是可行的。可见,这一时期的思想碰撞在时

间观上以双生子思想实验得以呈现,绝非偶然。

2 时间观之争及背后哲学观念的冲突

2.1 经验上对于动钟延缓的检验未缓解理性上的观念冲突

尽管,近代科学理论体系建立在尊重经验的基础之上,但科学的使命是使经验结论更具一般意义,因而需要尽可能地向外延展^{[4]121-128}。在似乎注定永不相关的对象之间发现新的联系^{[4]143-144}。最终使得科学发展至爆发冲突的必然阶段。在理性上,狭义相对论造成的影响具有滞后性。与工匠传统所取得

的丰硕成果不同的是,哲学观念未作出及时改变。建立与相对性原理毫无矛盾的体系导致违反物理直觉的情形。此前在经验上,这一时期的实验在一定程度上证实了爱因斯坦的动钟延缓效应,或者说是,横向多普勒效应。例如,赫伯特·艾夫斯(Herbert Ives)等的工作。尽管最初目的是验证以太的存在而非支持相对论^[15]。这是容易的,都通过类似镜子反射夹角等方式判定光信号的动钟延缓效应,如图1所示。对于光线反射与发射两个事件,地面观者用携带的时钟测得的时刻差为 t 。两事件时刻差同样可由车上观者测得,为 t' 。

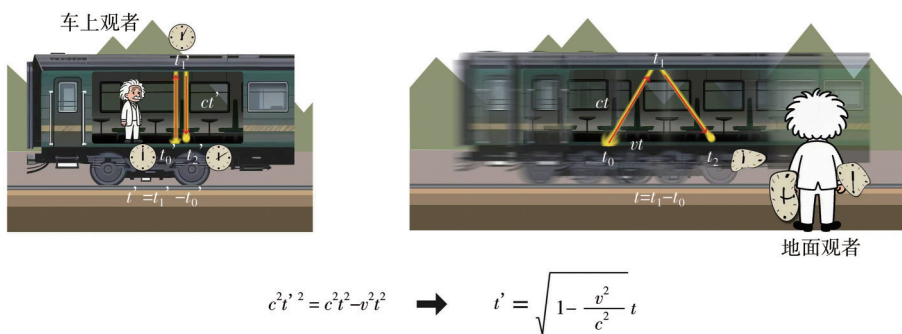


图1 爱因斯坦火车思想实验

Figure 1 Einstein's train thought experiment

洛伦兹变换及其动钟延缓效应同样可用于描述地面观者所观测到的车上观者的固有时。爱因斯坦火车实验对于光线的发射、反射和接收,选取的是火车参考系,在地面参考系中做镜像实验必然也同样发现这个现象,即将图1中的“车上观者”与“地面观者”几字互换位置不会改变公式是否成立。但是,理解这一问题存在一定难度。在当时人们看来,相对运动观者所观测到的动钟延缓效应是截然相反的——似乎无法区分哪个效应是真的。难以在满足相对性原理的同时,保证世界的实在性不发生崩溃。这一时期大多数物理学家,强调物理时钟的变慢是相对于以太的真实效应,但不满足相对论的对称性。光学现象被误认为是由观测所引起,而非时空本质。物理时钟变慢则被要求借用以太和绝对静止才能保证其“真实性”的解释。由此而引申出对于动钟延缓的五类错误理解。

一是错误地认为,光学现象与物理时钟之间的差异可区分时间的真实性。例如,此前提及的艾夫斯的工作,以及约瑟夫·拉莫尔(Joseph Larmor)的工作^[16]。二是错误地认为,动钟延缓只对机械钟表有效而对生物过程和心理过程无效,或至少无法察觉。例如,亨利·柏格森(Henri Bergson)试图用“绵

延”区分物理学时间和心理学时间^[17]。洛伦兹将动钟延缓解释为“局域时间(local time)”,与之相对的是,绑定于“以太”的真实时间的绝对效应^[18]。他认为光学多普勒效应是表观的而需要调整,物理上的时钟变慢则是相对于以太的,是真实的。洛伦兹甚至希望通过两者的差异来计算绝对运动,揭示以太的存在。人们如果相信洛伦兹的解释,则必须在以下的第三与第四类错误理解之间做出选择:三是错误地认为,运动观者可直接感知自身固有时变慢;四是错误地认为,运动观者观测到静止观者时钟变快。第三与第四类错误理解虽未被这一时期的物理学家所明确提出,但它们是洛伦兹解释的必然推论,也是第一类错误理解的自然延伸。在洛伦兹看来,能区分绝对运动。

这使得这一时期的科学家普遍倾向于认为,有理由相信以下两个判断之一:(1)倘若,绝对静止的观者发现自身固有时正常,可测得身处运动状态的其他惯性系的观者的固有时变慢;(2)倘若,其他运动的惯性观者发现自身的固有时正常,可测得绝对静止观者的固有时变快。在洛伦兹解释框架下,似乎只有(1)与(2)这样的表述,才不至于出现表观矛盾。“可测得”的表述被洛伦兹等人认为是光学的,而

非物理的、本质的,因而常将以上表述中的“可测得”或“在谁看来”等的判决方式去掉。这一时期的物理学家对此的直接陈述,选择更多的是方式(1),即静止在以太中的时钟正常,而运动的时钟绝对变慢。在绝对静止观者看来,自己固有时不变,但运动观者的固有时变慢。而在运动观者看来:要么,(3)自身固有时不变,绝对静止观者的固有时变快;要么,(4)绝对静止观者的固有时不变,但运动观者自身固有时变慢。不难发现,(2)与(3)从表述上完全相同,既然,人们选择(1)而排除(2),也就是排除(3),则在运动观者看来,只能保留(4)。

显然,在逻辑上,作为洛伦兹解释框架的必然结论,在第三类与第四类这两个错误理解之中能且只能选择一个。五是错误地认为,动钟延缓的相对性存在矛盾,即惯性观者对对方时钟的测量结果不可能都变慢。这就是朗之万的双生子佯谬。相比于此前想象场景而言,其进步意义不言而喻。它首次强调了测度指向了时空的本体论意义,尽管争论背后未必是对此的清醒认识。这也是它何以缺省了测度对象的加速过程,及其导致的两参考系间的非对称性。而后它将非对称性错误地归因到狭义相对论的动钟延缓也就不难理解了。

2.2 对于动钟延缓几类错误理解的哲学分析

在培根之后,“判决性实验”对物理学的影响是巨大的。除判决性实验外,学界在对物理学对象、概念和公式的筛选过程中,也会倾向于认为可判决的对象、概念和公式是更加物理的。例如,如今人们更多地将弦论视为数学的而非物理的。现代科学一方面建立在经验主义的基础上,在向外扩展时又依赖理性主义方法。其表现为,可判决性的前提是可测度性。现在不难知道,双生子佯谬尽管存在错误的在非惯性系中应用洛伦兹变换等问题,但之所以能引发与动钟延缓效应等的时间观之争,其关键更多在于其哲学观念更新不及时。当时对“同时性”未建立一种基于“测度”的观念^{[19]141-147}。此前的同时性放之四海而皆准,无需规定,这是相对论所反对的。只有能二次“对表(measuring rods)”的参考系才能约定“同时性”^{[20]106-114}。第一类观点显然是错误的。

第一类观点在奥卡姆剃刀意义上也是多余的额外假设。而且,将洛伦兹变换中的坐标标记为“真实”与“表观”完全是人为的。没有任何实验能用“测度”的方式将二者加以区别。托马斯·库恩(Thomas Kuhn)用“不可通约性”^{[21]111-135}解释“同时性”的这一变化,是否恰当姑且不论。能够知道的是,“同时性”

概念是否得以成立,要以“测度”的方式加以“判决”。在这一点上,朗之万的工作是与前人完全不同的。黑洞视界表面的信息密度极限、信号传播的光速上限等测度的因素,会判决很多哲学思辨的有效边界,在难以想象的范畴与程度上影响着人们对于世界的理解^[22]。这些进步都得益于朗之万等人推动的观念变化。无论对人、植物还是基本粒子,物理定律及其对称性都同等有效。相对论要求在惯性系中静止的粒子在另一惯性观者的观测上,其振幅和相位随时间变化均满足洛伦兹变换^{[23]91-92}。不难发现,第二类观点也是错误的——人们可轻易通过所处参考系的植物生长速度和机械时钟的滴答速度之间的差异,判定观测者所处参考系对于宇宙中心的绝对运动速度。这违背光速不变原理和相对性原理。

在纠正第二类观点之后,可能会进而引发第三类错误理解。误以为承认了动钟延缓对心理过程有效,就等价于承认,能感受到自己的固有时变得不再正常。实际上,第三类错误理解在这一点上与第二类观点的问题相同。它会导致,通过对自身状况的感知,可实现对绝对速度的判决。这一时期,理论物理学界开始逐步接受,相对性原理和光速不变原理共同成为异地同时性的基础。不存在所谓的绝对空间和绝对运动,只存在物体间的相对运动。也就是说,它禁止了通过测量手段来确定第一个静止参考系的可能。人们甚至无法从自然界中找到第一个最基本的无加速系^{[24]41-44}。实际上,对于宇宙中的物理定律在宇宙中任何时空点都有效的信念,在我们如今看来是如此显而易见而无需说明的。但在庞加莱之前,物理定律的数学形式在参考系之间是否存在“对称性”的信念并未被确证和严肃认真地对待过。

在这一点上,庞加莱之后的理论物理学家转而获得明确的哲学自觉。对应的,这也是为什么庞加莱会认为,以太只能是纯粹的形而上学对象,而非物理对象。这是由于,相对性原理在逻辑上必然与以太理论相冲突。从“以太”定义不难发现,如果它存在,则相对于“宇宙中心”绝对静止。当时人们的想法是,通过测定地球在两个正交方向上或春分点和秋分点等不同时刻的光速,根据相对于地球的运动特征,能找到宇宙中心的判决标准。现在人们知道,“宇宙存在中心”的假设是有害的。倘若物理学原理仅对相对于以太静止的宇宙中心有效,将变得不比神学更高明,无法应用在任何已知的现实物理场景之中。可以说,相对性原理是物理学的“第零定律”,它使物理学定律放诸四海而皆准。

哲学上讲,相对性原理倾向于是对所有可能世界有效的。甚至比能量守恒定律等对于我们所在的现实世界有效的物理学原理更加基础。从物理学的对称性上讲,相对性原理是其他有关对称性的物理学理论的基础。能量守恒定律等也仅仅是某些东西在某些变换保持不变^{[4][139]}。本质上反映一种对称性。第四类观点虽然满足了动钟延缓的字面含义,同样违背相对性原理。纠正第四类观点直接导致第五类观点,而别无选择。

2.3 双生子思想实验对于科学革命时期物理体系内部深层矛盾的揭示

对于动钟延缓的相对性,洛伦兹设计了类似的时钟悖论——单个参考系的单个时钟不会出现悖论,但如果涉及两个参考系,则两个时钟下难以保证悖论不会出现。朗之万则在庞加莱、洛伦兹、爱因斯坦等人争论的基础上将想象场景做了改进而提出双生子思想实验。如果说,迈克尔逊-莫雷实验所测得的光速不变现象与伽利略协变之间的冲突,体现的是科学革命前夕的经验和理性之间的冲突。那么可以说,朗之万的工作激化了冲突,使人们清晰意识到相对论时间观在科学理解上的挑战。

可见,双生子思想实验是这一思想史阶段对时间观之争系列描述中的最高版本,难以在争论进路上被超越。此后以其为基础设计判决性实验也就不难理解了。朗之万所提出的双生子思想实验属于第五类错误理解。在洛伦兹等人的基础上,朗之万发现了更深层的矛盾。它源于庞加莱与爱因斯坦有关相对性原理的哲学观念存在根本差异——什么是相对的,什么是绝对的?在朗之万看来,令人难以理解的是,动钟延缓所使用到的“相对运动”“相对延缓”与牛顿体系绝对的时序实在之间是如何不冲突的,以及这样的张力是如何存在的。在动钟延缓效应与双生子思想实验之间如何选择哲学立场,以及两者与相对性原理之间的逻辑关系,这在当时的学界是共同的疑问。

现在人们知道,这涉及时序实在。例如,德国物理学家托马斯·穆勒(Thomas Müller)证明了,史瓦西黑洞视界处自由下落观者不能看到宇宙终结,但其固有时却在远处观者看来是发散的(blow up)^{[25][2194]}。其逻辑表述为,考虑到广义相对论引力场红移与狭义相对论动钟延缓的双重作用,在视界附近自由下落观者与远处静止观者对对方固有时的观测不是彼此的逆^[26]。其哲学解释为,时序实在不存在^[27]。但直到广义相对论被发现之后很多年,这一观念的改

变才逐步得到学界的普遍认可。相对而言,在朗之万所处时期,人们对于时间观的争论方式还处于较为初等的程度上。双生子佯谬的提出,在争论方式上已代表这一时期的最高水平。

从前文的论述中不难发现,朗之万将三者放置于同一体系中加以比较的这一思想进路是存在历史必然性的。基于各自的哲学思考,这一时期物理学家的二阶进路之间存在着相似性。然而,这并不妨碍他们在对动钟延缓等具体一阶问题上采取迥异的时间观立场。除爱因斯坦和前文提及的科学家外,这一时期的其他物理学家则在众多错误理解中摇摆不定,或者干脆未公开表明立场。即便是庞加莱,直到1912年去世之前都没有对此充分发表意见。从庞加莱给爱因斯坦的通信不难发现,尽管庞加莱提供了数学上的技巧,但又不认为狭义相对论的预言能真正成功。

可见,相对性原理的提出者与双生子思想实验的提出者,在反对动钟延缓效应真实性与自治性的问题上是为了一致的。不同之处在于,朗之万直接明确将改进的想象场景锁定在第五类错误理解上。已较此前庞加莱、洛伦兹等人对此的争论有了重要的推进。通过前文的史哲分析,不难发现,朗之万无论是在具体对于动钟延缓的思考深度上,还是对于争论进路上,在当时与狭义相对论相冲突的时间观之中,都是难以超越的。

3 判决的逻辑进路何以可能

3.1 物理教学依赖哲学观念的革新:回应双生子佯谬的方式能否避开广义相对论?

用闵可夫斯基(Minkowski)四维时空的方式可将对于争论的回应限定在狭义相对论范畴内,如图2所示。飞船观者的世界线用虚线表示,其线元长度 ds 的积分正比于飞船观者的固有时,对应三角形斜边。固有时可用 $d\tau$ 表示,等于 $ids/c^{[28][29]}$ 。地球观者则对应直角边。线元平方 ds^2 由直角边平方和组成,即 $-c^2dt^2 + dx^{2[24][24]}$ 。考虑到闵可夫斯基四维时空中的时间为虚数,平方为负数,不难发现,飞船观者的固有时小于地球观者的固有时或坐标时。狭义相对论的动钟延缓效应确实存在,且不会出现如朗之万双生子佯谬中所描述的矛盾情形。

之所以不会出现朗之万双生子佯谬中的动钟延缓的相对性和对称性,原因在于,两名观者经历的加速过程不同。使得二者在闵可夫斯基四维时空中所

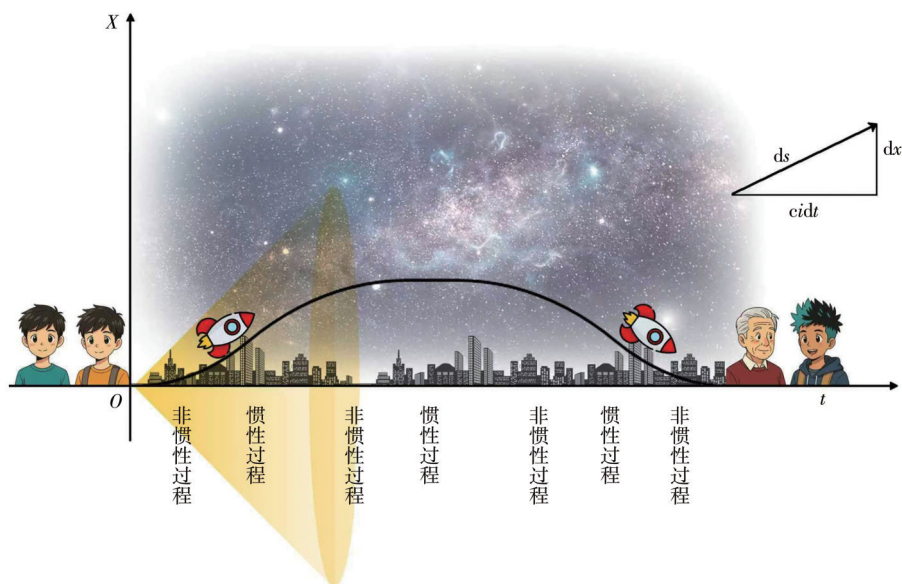


图2 闵可夫斯基时空刻画双生子佯谬

Figure 2 The Minkowski spacetime diagram of the twin paradox

画出的世界线长度并不相同。而发生了动钟延缓的对称性破缺,即延缓不再是相对的。飞船观者经历了非惯性过程,地球观者则未经历非惯性过程,两名观者之间不能随意地应用洛伦兹变换。非对称性并非源于狭义相对论,而是源于“调头(turn around)”的加速过程。

至此,并未直接使用广义相对论。物理史学家则常将其作为证据,认为回应双生子佯谬并不直接依赖于对广义相对论的使用。虽然不像科学发现与科学革命一样艰难,但科学理解同样伴随着阵痛。在埃德温·泰勒(Edwin F. Taylor)和约翰·惠勒(John A. Wheeler)合著的《时空物理》^[29]一书中则将非对称性的哲学分析应用于物理教学过程中。这意味着,物理学家需要清醒地认识到,在培养物理专业的青年学生时,要从哲学观念的更新开始。

实际上,飞船观者在越大的加速度中离开,则其固有时越小,动钟延缓效应越明显。有时被认为,需引入广义相对论的等效原理——加速观者可局域地视为在引力场中,在越强的引力场中,其固有时与平直时空中的坐标时相比,变慢越明显。回应双生子佯谬是否需借助广义相对论是存在争议的。一方面,正是闵可夫斯基四维时空形式对这一问题的回应,实现了从狭义相对论到广义相对论的过渡^{[30]287}。爱因斯坦等效原理(EEP)对测度与判决的要求是同样的——无法通过局域的测度方式获取关于自身处于引力场还是加速状态的判决。另一方面,学界也关注到,狭义相对论的最初描述并非几何形式^{[31]316-326}。

至少,对双生子佯谬的直接或间接回应,成为通向广义相对论的动机之一。从爱因斯坦《关于相对论异议的对话》^[32]一文的回应中可以看出,时间膨胀和长度收缩是时空的固有属性,所有惯性系观测现象均自治,无需引入绝对参考系,但同时,他本人也承认,这一表观矛盾源于加速度的引入,对此狭义相对论并未作出恰当且充分的说明。是否意味着,在未借用通向广义相对论的几何形式前,时间观之争才是可能的?是否存在直接从逻辑或哲学获得对双生子思想实验的反驳的可能?

3.2 逻辑分析:从模态反驳模式考察双生子思想实验的漏洞

通过前文的分析,容易知道,从整体上看思想实验的方法论意义,其部分类型因具有反驳性逻辑结构的具有判决性。而从具体的判例上看,对于时间观之争的判决,朗之万、庞加莱、爱因斯坦、洛伦兹等人的操作,均是在当时的整个理论体系中放置具有判决性的理论假说以激化旧有矛盾。其中,朗之万与爱因斯坦则更偏重于使用思想实验的方法。尽管如此,朗之万的双生子思想实验具有反驳性的逻辑结构,也符合这一时期科学家一贯的思想渊源,却不具有判决性。其原因为何?根据索伦森的模态反驳模式(modal refutation model)能实现对于双生子思想实验逻辑结构特征的凝练。由反事实假设、推理演绎、不相容场景、解释归因和结论模块组成。

反事实假设P:动钟延缓具有相对性。

推理演绎:双胞胎兄弟之一,飞船观者以亚光速

飞行离开地球。在地球观者看来,可对飞船观者应用洛伦兹变换,飞船观者动钟延缓,即飞船观者生物过程变慢,显得更年轻。考虑到相对性原理,或者说,惯性系平权,在飞船观者看来,同样可对地球观者应用洛伦兹变换,地球观者动钟延缓,即地球观者生物过程变慢,显得更年轻。当飞船观者返回地球时,两名观者再次相遇,彼此可再次观察双方的年轻程度。

不相容场景:双方都发现对方比自己年轻,出现矛盾,这一场景不可想象。

解释归因:反事实假设导致了不相容场景。

结论:反事实假设为假,动钟延缓具有绝对性。

实际上,朗之万在推理演绎的过程中缺省了可判决的测度细节,即飞船观者在返回地球之前要经历加速过程。飞船观者真实感觉到“推背感”,而不再是惯性系。洛伦兹变换不再适用于这一过程。从逻辑上,也能反驳双生子思想实验。接下来,研究说明如何找到其推理漏洞。为了得到他期待的结论,其推理过程实际上隐含了额外的反事实假设Q:“非惯性系平权”。即朗之万假设了洛伦兹变换同样适用于非惯性过程,但未曾明确声明它。

这里将其补齐,并放置在反事实假设模块中。这里将使用到的对于思想实验的判决方式,几乎不要求人们具有任何物理学或几何学知识。相反的,只需要在逻辑学范畴加以处理。具体说来,对于符合索伦森模态反驳模式的思想实验而言,假设P,得到“非P”,只要能确定从P到“非P”的解释相关性,其结论至少在逻辑上不会被判决为无效。然而,朗之万本人尽管使用了这一隐藏的反事实假设Q,整体上假设的是“P且Q”,实现的不相容场景是“非(P且Q)”。但是,他并没有在双生子思想实验的反事实假设模块将其做明确的声明。这里,“非(P且Q)”是由思想实验所实际假设的“P且Q”导致的,即“P且Q”对于二者的不相容具有解释相关性。朗之万直接将不相容场景单独地归谬为反事实假设模块P中的内容。但是,P对此不具有解释相关性。

可见,双生子思想实验何以无效,判决还是出于逻辑的。人们在双生子佯谬思想实验刚提出之时,未能充分意识到朗之万使用了明确声明之外的反事实假设Q“非惯性系平权”。否则,根本无需争论也不会有此后的判决性实验。朗之万的这一操作代表了这一时期人们在物理直觉上的共性。就在狭义相对论的“相对”时间观刚刚代替了牛顿体系的“绝对”时间观之际,人们尚未建立有效的物理直觉。朗之万所提出的双生子佯谬,其对于动钟延缓的质疑,迫

使人们直面加速问题,而走向了广义相对论。

相对性原理的外延在得到推广的同时,其内涵也发生了根本性的变化。等效原理允许加速场与引力场的“局域”不可分。但在非局域环境下,狭义相对论的时间“相对性”被引力与时空的“绝对性”所取代。这样,时间的“绝对性”再次被广义相对论以“时空作为整体”的形式请了回来。在双生子佯谬及其判决性实验之后,人们无需将“不是惯性系”表述为“不是相对于地球的惯性系”。由此可见一斑,狭义相对论本身存在令人不安的相对性,其表现正是人们对于动钟延缓的多重不理解。引发了同时期诸多反对声音,其代表则是双生子思想实验。好在,“推背感”的绝对性才不会令人感到不安。绝对性尽管无法在时序实在意义上被保证,但人们在时空弯曲、物质分布与引力波传播等整体意义上找回了绝对性。这使得相较于狭义相对论而言,广义相对论的结论更易理解。

3.3 哲学审视:桂起权对判决性实验与时空观念革命的分析

本文对于双生子思想实验判决性根源的史哲分析,与科学哲学家桂起权在《科学思想的源流——科学哲学历史导论》^[33]中的核心观点相契合。桂起权强调,科学理论的演进并非由单个“判决性实验”一锤定音,而是一场概念框架的整体性变革。它不仅仅是增加一个新事实,更应推崇思想实验在理论发展中的作用。即迈克尔逊-莫雷实验并不应该被简单描述为对“以太漂移”与否的“判决性实验”,也不应将其视为直接导致相对论的诞生。当出现反例时,科学家可以选择调整网络中的任何一部分来保护核心假设。他以迈克尔逊-莫雷实验为例论证了,同一实验现象(“零结果”)在洛伦兹与爱因斯坦的理论中获得了截然不同的解释。

洛伦兹的选择是保留以太并添加假说,这是经典的、直观的,但缺乏操作性的形而上学设定。他通过引入“长度收缩”等特设性假说,试图将其消化于经典物理的框架之内。而爱因斯坦则由此发动了一场颠覆绝对时空观的哲学革命,选择抛弃以太和绝对时空。这表明,反常经验本身并不自动推翻旧范式,理论的更替更深层次上是哲学观念与概念体系的重构。爱因斯坦狭义相对论的诞生,并非仅仅基于这一个实验。它更多地源于对麦克斯韦电磁理论、经典力学时空观、同时性概念等一系列问题的深刻哲学性反思和追求理论基础的统一与逻辑简洁性。提醒人们应从观念上重审朗之万双生子佯谬及

其证伪的物理学观念革命意义。

桂起权的这一分析框架,为我们理解双生子佯谬的提出与解决提供了深刻的洞见。朗之万之所以构造出此一佯谬,正是其经典时空观与相对论关系性时空观冲突的集中体现。他未能意识到,动钟延缓(时间膨胀)在惯性系之间的对称性,恰恰挑战了“哪个钟真的慢了”的经典实在观,这本身就是一场观念的革命。实验结果的解释是依赖于理论的。“双生子佯谬”之所以会产生,是因为人们错误地将惯性系中成立的对称性“每个观察者都看到对方的钟走慢了”,应用到了一个非对称的、涉及加速度和惯性系转换的真实场景中。

而佯谬的最终解决,在桂起权看来,打破对称性的关键在于,认识到宇航员兄弟的世界线是一条“有去有回的折线”而非惯性直线。在广义相对论的框架下,根据局域等效原理,经历加速和减速的兄弟所处的参考系是非惯性的,他的时空几何与一直处于惯性系的兄弟是不同的。区分固有时与坐标时是处理这一佯谬过程中所必要的观念。这一几何化的世界线分析,不仅清晰地揭示了对称性破缺的根源在于加速度的引入,更标志着时空观念从经典的“实体论”向相对论的“关系论”的根本转向。研究在前一节,从模态逻辑角度对双生子思想实验结构的剖析,正是对桂起权所强调的“理论整体性”与“概念清晰性”在方法论上的一次具体实践。

4 总结与展望

综上所述,仅通过对双生子思想实验逻辑结构的哲学分析,便足以揭示其无效性。该佯谬的核心谬误在于,它试图在一个涉及加速(位移对时间的二阶导数不为零)的场景中,维系狭义相对论动钟延缓的完美相对性。事实上,佯谬所追求的动钟延缓的“绝对性”,源于局域等效原理下的引力场红移,这已超出了狭义相对论的范畴。因此,期望在狭义相对论框架内彻底解决由此引发的时间观之争,是不切实际的。

重审这一经典论争,其深远意义远超佯谬本身。在认知层面,它作为理解桂起权所强调的“科学理论发展的复杂性与整体性”的绝佳案例,生动展现了哲学观念革新是突破科学前沿的先导。在教育层面,对此的史哲分析是培养未来科学家跨学科批判性思维与现代物理直觉的关键环节,是人才创新的基石。在国家战略层面,对此类基础科学中“元问题”的持续探索与澄清,是摆脱单纯技术跟踪、孕育原始创新

与实现高水平科技自立自强的源头活水。最终,双生子佯谬从困惑到解决的完整思想史诗,不仅记录了时空观念从绝对实体迈向动态关系的关键变革和史诗跃迁,更为我们标示出一条通往创新深处的清晰路径。

参考文献:

- [1] LANGEVIN P. L'évolution de l'espace et du temps[J]. *Scientia X*, 1911: 31-54.
- [2] HAFELE J C, KEATING R E. Around-the-world atomic clocks: predicted relativistic time gains[J]. *Science*, 1972, 177(4044): 166-168.
- [3] BELL J S. On the Einstein Podolsky Rosen paradox [J]. *Physics*, 1964, 1(3): 195-200.
- [4] 庞加莱. 科学与假设[M]. 张卜天, 译. 北京: 商务印书馆, 2023.
- [5] SORENSEN R A. Thought experiments[M]. Oxford: Oxford University Press, 1992.
- [6] WILLIAMSON T. Model Science[J]. *Canadian journal of philosophy*, 2016, 46(4/5): 453-492. DOI: 10.1080/00455091.2016.1205851.
- [7] 大卫·查尔莫斯. 有意识的心灵[M]. 朱建平, 译. 北京: 中国人民大学出版社, 2013.
- [8] 费曼. 费曼物理学讲义(第二卷)[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2020.
- [9] 孙圣. 暗能量若干可能来源的史哲透视[J]. *自然辩证法研究*, 2025, 41(3): 99-105. DOI: 10.19484/j.cnki.1000-8934.2025.03.003.
- [10] 孙圣. 科学思想实验的划界问题研究: 技术细节及其缺省[J]. *自然辩证法研究*, 2022, 38(6): 109-114. DOI: 10.19484/j.cnki.1000-8934.2022.06.007.
- [11] 孙圣. 机会主义是由具身认知向度导致的吗?: 对等效原理若干科学史争论的新审视[J]. *自然辩证法研究*, 2024, 40(4): 115-122. DOI: 10.19484/j.cnki.1000-8934.2024.04.010.
- [12] 孙圣. 量子力学的逆向因果争论及其辨析[J]. *科学技术哲学研究*, 2024, 41(3): 41-47.
- [13] 梁灿彬, 周彬. 微分几何入门与广义相对论(上册·第二版)[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [14] LOGUNOV A A. Henri Poincare and relativity theory [M]. Moscow: Nauka Publishers, 2005.
- [15] IVES H E. The Doppler effect considered in relation to the Michelson-Morley experiment[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1941, 31(5): 369-374.
- [16] LARMOR J. Aether and matter [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1900.
- [17] BERGSON H. Duration and simultaneity[M]. Paris: Félix Alcan, 1922.

- [18] LORENTZ H A. Electromagnetic phenomena in a system moving with any velocity less than that of light[J]. *Special Theory of Relativity*, 1970(2): 119-144.
- [19] 孙圣, 万小龙. 测度对于观念的改变何以重要[J]. *哲学分析*, 2024, 15(6): 138-150, 194. DOI: 10.3969/j.issn.2095-0047.2024.06.011.
- [20] MAUDLIN T. *Philosophy of physics: space and time* (first paperback edition) [M]. Princeton: Princeton University Press, 2015: 106-114.
- [21] KUHN T. *The Structure of Scientific Revolutions* (2nd edition, enlarged) [M]. Chicago: The University of Chicago Press, 1970.
- [22] 孙圣. 律则必然性对层级个体化问题的回应[J]. *自然辩证法通讯*, 2023, 45(5): 42-48. DOI: 10.15994/j.1000-0763.2023.05.006.
- [23] 费曼. *费曼物理学讲义* (第三卷) [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2020.
- [24] 余允强. *广义相对论引论* [M]. 北京: 北京大学出版社, 1997.
- [25] MULLER T. Falling into a Schwarzschild Black Hole[J]. *General relativity and gravitation*, 2008, 40: 2185-2199. DOI: 10.1007/s10714-008-0623-7.
- [26] 孙圣. 时序实在何以不可能: 非逆对麦克塔格特的隐喻[J]. *自然辩证法研究*, 2021, 37(12): 103-109. DOI: 10.19484/j.cnki.1000-8934.2021.12.015.
- [27] MCTAGGART J E. The unreality of time[J]. *Mind*, 1908, 17(68): 457-474.
- [28] 赵峥. *黑洞的热性质与时空奇异性: 零曲面附近的量子效应* [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2016.
- [29] TAYLOR E F, WHEELER J A. *Spacetime physics* (2nd edition) [M]. New York: W. H. Freeman and Co., 1992.
- [30] 江晓原. *科学史十五讲* (第二版) [M]. 北京: 北京大学出版社, 2016.
- [31] LEHMKUHL D. Why Einstein did not believe that general relativity geometrizes gravity [J]. *Studies in History and Philosophy of Science, Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 2014, 46: 316-326. DOI: 10.1016/j.shpsb.2013.08.002.
- [32] EINSTEIN A. Dialog über Einwände gegen die relativitätstheorie [J]. *Die Naturwissenschaften*, 1918, 48: 697-702.
- [33] 桂起权. *科学思想的源流: 科学哲学历史导论* [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 1994.



孙圣,男,山东黄县人,北京师范大学科学技术哲学博士,美国罗格斯(Rutgers)大学哲学系访问学者,电子科技大学人文社科高等研究院副教授,硕士生导师。先后担任中国自然辩证法研究会工程与社会发展专业委员会副秘书长兼常务委员、物理学哲学专业委员会委员、科学思想史专业委员会委员、中国科学技术史学会科学文化专业委员会委员、CNKI专家库评审专家。主要从事量子物理哲学、量子计算、物理思想史研究。

担任国家社会科学基金项目首席专家、主持教育部人文社科基金项目、省软科学项目等多项。主要参与国家社会科学基金重大项目2项,提供阶段性成果1项。主要代表作有《暗能量若干可能来源的史哲透视》《多世界解释的理论出发点及其哲学分析》《量子开关对因果结构的知识论重塑》《高阶费曼图对物理主义之争的数学消解》《科学传播的艺术实践及其限度——以彭罗斯图和粗粒化熵为例》《从霍金黑洞面积定理看物理直觉的可迁移性及其复杂性》《科学思想实验的划界问题研究:技术细节及其缺省》《律则必然性对层级个体化问题的回应》等。在新华出版社公开出版发行独著《思想的粒度与边界》一书,新华客户端阅读量超10万,在《自然辩证法研究》《自然辩证法通讯》《中国社会科学院大学学报》《浙江社会科学》《哲学分析》《科学技术哲学研究》《系统科学学报》等国内外专业学术期刊上发表CSSCI论文20余篇,其中2篇被人大复印报刊资料全文转载,量子芯片及教具相关成果获批欧洲与中国香港发明专利2项,科学传播研究及跨学科作品获美国、意大利相关学会主办的全球性比赛与国内省级及以上奖项10余项。Email: sheng.sun@uestc.edu.cn

(责任编辑:彭 鹏)