



狭义相对论诞生的历史背景及其核心与启示

姚梦真 冯杰

(上海师范大学数理学院 上海 200234)

蔡志东

(镇江高等专科学校丹阳师范学院 江苏 镇江 212300)

(收稿日期:2020-03-12)

摘要:从狭义相对论诞生的实验基础、理论基础、哲学基础和问题基础4个方面出发,详细介绍了狭义相对论诞生的历史背景,并介绍了该理论的基本假设和理论核心,探讨了狭义相对论诞生的历程给予我们的启示.

关键词:狭义相对论 历史背景 理论核心 启示

狭义相对论是爱因斯坦在前人的工作基础上创立的全新的时空理论,它彻底颠覆了牛顿的绝对时空观,改造了牛顿力学,修改了麦克斯韦电磁场理论.

狭义相对论的诞生,不仅推动了物理学的发展,还深化了人们对时空观和因果关系的认识.本文从物理学史的角度,阐述了相对论的发展历程及其给我们的启示.

1 狭义相对论诞生的历史背景

1.1 狭义相对论诞生的实验基础

1865年,麦克斯韦总结了前人的成果,提出了位移电流的假说,建立了系统的电磁理论.该理论中存在一个普适常数:真空中的光速,但是却没指出这个速度是相对于哪个参考系的.从牛顿的绝对时空观出发,光速应当是相对于某一特殊参考系的速度.有些学者认为,存在一种绝对静止的光的传播媒介——以太,光速正是相对于以太参考系的速度.为了证明以太的存在,物理学家们设计了多个精密实验来进行研究.然而,各个实验所得结果却相互矛盾,这迫使人们不得不重新审视牛顿的绝对时空观^[1],建立新的时空观.下面简要介绍验证“以太存在与否”的4个重要实验.

1.1.1 双星实验

设有一对双星甲和乙,它们绕同一质心 O 以相同速率 v 旋转,其运动轨迹如图1所示.令地球在右

边极远处的 C 点.在某一时刻,星甲在 A 点朝向地球运动,经过半个周期 $\frac{T}{2}$ 后,它到达 B 点.设该星与地球间的距离为 X ,轨道半径为 R , $t=0$ 时刻星甲经过 A 点,星乙经过 B 点.

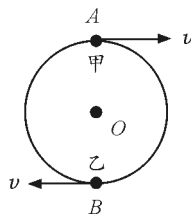


图1 双星实验示意图

则转动的双星在 A 点和 B 点时发出的光相对于地球观察者的速度分别为

$$u = c + v \quad (1)$$

$$u' = c - v \quad (2)$$

星甲在 A 点发出的一束光到达地球的时刻为

$$t_1 = \frac{X}{c + v} \quad (3)$$

星甲在 B 点发出的光到达地球的时刻为

$$t_2 = \frac{T}{2} + \frac{X}{c - v} \quad (4)$$

在地球上的观察者看来,该星从 A 点运动到 B 点所需的时间间隔为

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{T}{2} + \frac{2Xv}{c^2 - v^2} \quad (5)$$

在星甲从 A 点到达 B 点的同一时刻,星乙从 B 点到达了 A 点.按照经典速度合成定理,地面观察者

测得星乙在 B 点的光速为 $c - v$, B 点的光到达观察者的时刻为 $t'_1 = \frac{X}{c - v}$, 星乙在 A 处的光到达观察者的时刻为 $t'_2 = \frac{T}{2} + \frac{X}{c + v}$, 所以, 星乙从 B 到 A 的时间间隔为

$$\Delta t' = t'_2 - t'_1 = \frac{T}{2} + \frac{X}{c + v} - \frac{X}{c - v} = \frac{T}{2} - \frac{2Xv}{c^2 - v^2} \quad (6)$$

因此, 在地球观察者看来, 双星运动的两个半周期是不对称的, 星甲经历的时间比星乙经历的时间长一些, 时间差为

$$\Delta T = \frac{4Xv}{c^2 - v^2} \approx \frac{4Xv}{c^2} = \frac{4X}{c} \frac{v}{c} \quad (7)$$

因为可以取相当远的双星, 因此即便 $\frac{v}{c}$ 很小, ΔT 也是可测的, 即双星两个半周期的不对称是可测的。

但是实验表明, 双星的两个半周期是完全对称的。因此, 在 A 点和 B 点发出的光相对于地球上的观察者其速度必须是相同的, 即观察者所测得的速度与光源速度无关, 这与介质波的性质相似。如果光是一种介质波, 就应当有以太的存在。

1.1.2 光行差实验

光行差现象是指当人们从地面上观测恒星位置时, 所看到的恒星位置将偏离恒星的真实位置^[2]。下面简要说明这一现象。为简单计, 我们假定地球相对于以太的速度 v 沿 x 轴的正方向。如图 2 所示, 如果把望远镜 TE 对准恒星的真实位置 A, 那么将看不见恒星, 只有把望远镜倾斜一个角度 θ 对准 A' 才能看见, A' 叫做恒星的视位置^[2]。这一现象是英国天文学家布拉德雷在 1927 年首先发现的, 他的测量结果表明, 望远镜的倾斜角度 $\theta = 20.5''$, 下面简要介绍其原理。

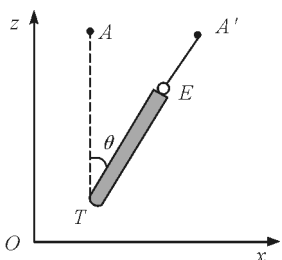


图 2 光行差现象示意图

假设以太存在, 地球相对于以太的速度 v 沿 x 轴正方向, 而恒星光线相对于以太的速度 c 沿 z 轴负方向。依据牛顿力学可知, 地球上的观察者所看到的光线的传播速度是 x 分量和 z 分量的合速度。 x 分量大小为 v , 方向沿 x 轴负方向; z 分量大小为 c , 方向沿 z 轴负方向, 如图 3 所示。故光线的传播方向与 z 轴负方向的夹角应为

$$\theta = \arctan \frac{v}{c} \quad (8)$$

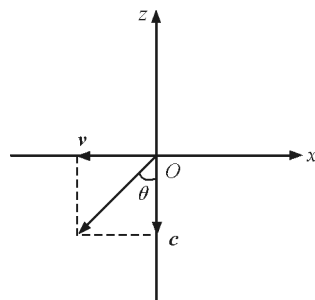


图 3 光行差实验原理图

假定太阳相对于以太静止, 则地球相对于以太的速度即为地球的公转速度 $v = 3 \times 10^6$ cm/s。将这一结果和 $c = 3 \times 10^{10}$ cm/s 一起代入式(8)中, 即可得到 $\theta \approx 10^{-4}$ rad = $20.5''$, 这一结果和布拉德雷的观测结果符合得很好。

光行差实验以强有力的证据表明: 如果以太真的存在, 那么它相对于太阳是静止的。地球在以太中穿行时不会拖动以太, 且光在以太中的速度各向同性且恒定不变。

1.1.3 迈克尔孙-莫雷实验

为证明以太的存在, 迈克尔孙和莫雷设计了一个非常精密的实验, 然而他们实验的结果却与光行差实验所得出的结果相反: 以太应完全为地球所带动。

迈克尔孙-莫雷实验的基本原理如图 4 所示^[3], 从某一单色光源 S 发出的光束到达半镀镜 G 后分为两束, 一束透射至反射镜 M_2 , 在 M_2 反射回 G, 又在 G 处反射到望远镜 T。另一束在 G 处反射至反射镜 M_1 , 再反射回 G 并直达望远镜 T。两束光重新相遇时会由于相位差而发生干涉现象, 出现干涉条纹; 如果相位差发生变化, 则将出现干涉条纹的移动^[3]。

将干涉仪两臂 GM_2 与 GM_1 垂直放置, GM_2 臂方向与地球公转方向一致, $l_{GM_1} = l_{GM_2} = l$ 。设光相对于以太的传播速度为 c , 在与以太(或太阳)相对静

止的观察者看来,光从 $G \rightarrow M_2$ 运动时有 $ct_{GM_2} = l + vt_{GM_2}$ (注:光在向右运动时,除了要经过 l 这段距离,还要加上镜子 M_2 向右运动了 vt_{GM_2} 的距离,才是光走的实际距离). 光从 $M_2 \rightarrow G$ 时有 $ct_{M_2G} = l - vt_{M_2G}$ (注:光在向左运动时,因为 G 向右运动了 vt_{M_2G} 的距离,所以实际距离为 $l - vt_{M_2G}$), 往返时间为

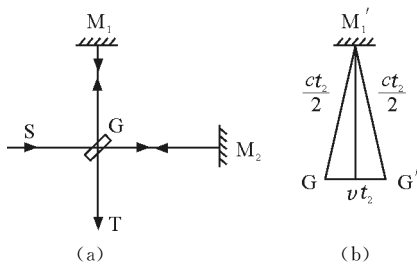


图4 迈克尔孙-莫雷实验原理图

$$t_1 = t_{GM_2} + t_{M_2G} = \frac{l}{c-v} + \frac{l}{c+v} = \frac{2l}{c} \frac{1}{1-\frac{v^2}{c^2}} \approx \frac{2l}{c} \left(1 + \frac{v^2}{c^2}\right) \quad (9)$$

用 t_2 表示光经路径 $GM_1'G'$ 的时间. 静止在以太上的观察者看来,半镀镜 G 和反射镜 M_1 都随地球一起向右运动,光走的路径是斜上斜下而不是直上直下[见图4(b)],故

$$l^2 + \left(\frac{vt_2}{2}\right)^2 = \left(\frac{ct_2}{2}\right)^2 \quad (10)$$

解出 t_2

$$t_2 = \frac{2l}{c\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \approx \frac{2l}{c} \left(1 + \frac{v^2}{2c^2}\right) \quad (11)$$

故由于光源和干涉仪的运动引起光在两臂间传播的时间差为

$$\Delta t = t_1 - t_2 = \frac{l}{c} \frac{v^2}{c^2} \quad (12)$$

即光沿着水平方向往返一次要比竖直方向往返一次时间长,即

$$t_{GM_2G} > t_{GM_1G}$$

将实验装置顺时针旋转 90° , 则有 $t_{GM_1G} > t_{GM_2G}$,

时间差相同, $\Delta t' = \Delta t = \frac{l}{c} \frac{v^2}{c^2}$, 因此总的时间差为

$$2\Delta t = \frac{2l}{c} \frac{v^2}{c^2} \quad (13)$$

光程差为 $\Delta s = c(2\Delta t) = 2l \frac{v^2}{c^2}$, 根据光学结论, 条

纹移动数为光程差与波长之比, 即

$$\Delta n = \frac{\Delta s}{\lambda} = \frac{2l}{\lambda} \frac{v^2}{c^2} \quad (14)$$

实验中所使用的单色光的波长为

$$\lambda = 5 \times 10^{-7} \text{ m}$$

干涉臂长为

$$l = 10 \text{ m}$$

$$v = 3 \times 10^4 \text{ m/s}$$

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

将其代入式(14)可得 $\Delta n \approx 0.4$. 但是实验结果却是 $\Delta n = 0$ [4].

需要说明的是,干涉条纹的移动与否是一个客观事实,与观察者无关. 迈克尔孙-莫雷实验说明,如果以太真的存在,那么地球会完全拖曳以太,这和光行差实验结果正好相反. 当然还有一种解释是,以太并不存在,光速与光源运动无关.

1.1.4 菲佐实验

菲佐在1851年做过流水对光速影响的实验,如图5所示,光源 S 发出的光在半透镜 M 处因反射和透射分成两束,一束光的传播方向与水流方向一致,另一束光的传播方向与水流方向相反,最终两束光汇聚在同一观测点 O , 如图5所示[2].

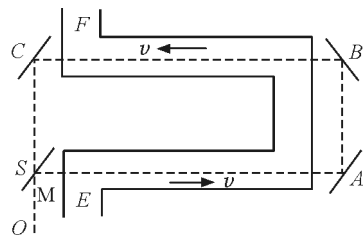


图5 菲佐实验原理图

如果以太被水带动的系数为 k , 则顺水光速为

$$\frac{c}{n} + kv, \text{ 逆水光速为 } \frac{c}{n} - kv, \text{ 两束光的光程差为}$$

$$\Delta s = c\Delta t = c \left(\frac{L}{\frac{c}{n} - kv} - \frac{L}{\frac{c}{n} + kv} \right) \approx \frac{2kLv n^2}{c} \quad (15)$$

其中 n 为水的折射率, v 为水流速度, L 为管子的长度. 水流速度不同,光程差不同,干涉条纹不同. 根据条纹数的变化可以求出以太随水运动的拖曳系数 k , $k=1$ 表示完全被拖动, $k=0$ 表示不被拖动. 实验结果是 $0 < k < 1$, 这一结果既不同于光行差实验,也不同于迈克尔孙-莫雷实验. 它表明:以太会被

水流部分地拖曳.正是这些相互矛盾的结果才促使爱因斯坦最终彻底抛弃以太.

1.2 狭义相对论诞生的理论基础

1.2.1 物理基础

(1) 伽利略相对性原理与牛顿力学

牛顿力学主要由两部分组成:牛顿三定律和万有引力定律.这两部分都是建立在牛顿的绝对时空观之上的,牛顿认为,由于本性而均匀地、与外界事物无关地、自身地流逝着的是绝对时间,就其本身而言,和外界任何事物无关^[1];所谓绝对空间,即存在一个与任何事物无关、与时间无关、均匀而各向同性的、独立而永恒存在的无限大的“容器”.在绝对时空观的概念里,时间和空间是完全分离的,具有独立性,这也是大多数人所接受并当作常识的观点.

在绝对时空观的概念下,可推出牛顿力学在任何惯性系中都成立.换言之,一切惯性系在力学上是完全等价的,这就是著名的伽利略相对性原理.在经典物理学中,速度变换满足经典速度变换关系.狭义相对性原理正是在这一原理的基础上推广而来的.

(2) 麦克斯韦电磁理论

真空中麦克斯韦方程组为^[5]

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{B} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mu_0 \mathbf{J} \\ \nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \end{cases} \quad (16)$$

在自由空间中, $\rho=0, \mathbf{J}=0$,式(16)变为

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{B} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \end{cases} \quad (17)$$

取式(17)第一式的旋度并利用第二式可得

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = -\frac{\partial}{\partial t} \nabla \times \mathbf{B} = -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (18)$$

用矢量分析公式及 $\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$ 得

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = \nabla (\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E} = -\nabla^2 \mathbf{E}$$

代入式(18)可得电场 \mathbf{E} 的偏微分方程

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (19)$$

同理,在方程组(17)中对第二式求旋度,然后把第一式的结果代入,可得磁场 \mathbf{B} 的偏微分方程

$$\nabla^2 \mathbf{B} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} = 0 \quad (20)$$

令 $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$,则 \mathbf{E} 和 \mathbf{B} 的方程可写为

$$\begin{cases} \nabla^2 \mathbf{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0 \\ \nabla^2 \mathbf{B} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} = 0 \end{cases} \quad (21)$$

上式即为真空中电磁场的波动方程,其中 c 是电磁波在真空中的传播速度, ϵ_0 与 μ_0 分别是真空中的介电常数和磁导率.因所有的电磁实验都是在地面参考系中进行的,因而导出的结论原则上也仅适用于地面参考系,但是实验表明,光速与参考系无关^[6].狭义相对论中的光速不变原理正是基于实验和电磁理论两方面的考虑而引入的.

(3) 洛伦兹收缩

1893年洛伦兹最先以以太不被拖带为前提,提出物体沿运动方向长度缩短,缩短因子为 $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ (其中 v 为物体运动速度)这一设想^[3],并成功解释了迈克尔孙-莫雷实验.这种物体沿运动方向的长度比其固有长度短的效应叫做洛伦兹收缩.他同时还导出了洛伦兹变换公式,为相对论的诞生奠定了理论基础.

1.2.2 数学基础

(1) 闵可夫斯基四维时空

闵可夫斯基时空是德国数学家闵可夫斯基提出的一种四维复时空^[1],通常写作 $x_\mu = (x_1, x_2, x_3, x_4) = (x, y, z, ict)$,它由三个空间坐标和一个时间坐标构成,是一个“准欧式空间”.与三维空间类似,无限靠近的相邻两点的“距离”(或“间隔”)的平方等于4个坐标微元的平方之和,即 $dS^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 + dx_4^2$,它在坐标轴旋转时保持不变.洛伦兹变换在几何学上可以看作闵可夫斯基时空的一次旋转,这为相对论提供了一个十分有用的数学工具.

(2) 张量分析

通常,标量描述一个物体整体的、笼统的性质(如温度、体积等),矢量描述一个质点的特性(如质点的位移、速度、加速度等)或场中某一点的特性(电场强度、磁感应强度等).要精确描述物体内部各

部分之间的相互作用,需要用到张量.如弹性力学中的应力张量,电磁理论中的电磁场张量等.用电磁场张量可以把电场强度和磁感应强度作为一个整体统一起来,精确地描述电磁场的特性,并把麦克斯韦方程组写成协变形式(任何惯性系中数学形式相同).张量分析为相对论提供了一个强有力的数学工具.

1.3 狭义相对论诞生的哲学基础

1.3.1 马赫的哲学思想

马赫从经验论出发,批判了牛顿绝对时间、绝对空间的概念^[7].马赫认为,首先这些概念不是从经验中来的,也无法用经验证实.他们是抽象的、不可观察的,是思想的产物.时间和空间概念是通过观察世界上事物间的相互联系获得的,但绝对时间和绝对空间都不能和经验观测相联系^[7].因此,绝对时间和绝对空间就成了没有实际意义的形而上学概念.

此外,物体的运动也是相对的,只有在一个确定的参考系下才能描述某个物体的运动,如果用以判断该物体运动的参照物不存在,就无法得到物体的运动特性.马赫的相对时空观和相对运动观,为爱因斯坦彻底抛弃牛顿的绝对时空,创立相对论指明了正确的方向.

1.3.2 庞加莱的哲学思想

庞加莱在1903—1904年间曾经指出:“以任何动力学或电磁学的观测去检查绝对的匀速运动,是不可能的”^[3],这体现了其相对性原理的思想.1904年他指出光速 c 是动力学的极限速度,即光速是速度的极限^[8].可以说,庞加莱已经走到了创立相对论的大门,只差一步.这些思想对爱因斯坦具有一定的启发作用.

1.4 狭义相对论诞生的问题基础

1.4.1 爱因斯坦16岁时的追光问题

爱因斯坦在16岁时想到一个问题:如果能追上一束光,它看起来会像什么样子的?

按照牛顿力学中的速度叠加定理,光看起来应该是静止不动的波纹.爱因斯坦认为,根据直觉,光波没有理由静止不动.这个问题始终萦绕在他的心头,最终促使他在26岁时创立了狭义相对论,彻底解决了这个问题.

1.4.2 同时的相对性

洛伦兹和庞加莱两人已经走到了相对论的门口,只差最后一步.为什么他们两人没能创立相对论

呢?除了不愿抛弃以太这个概念之外,还有更重要的一点,那就是他们两人都没有认识到(异地)同时的相对性.爱因斯坦是在一次和朋友的讨论中猛然领悟到这一点的.在牛顿力学中,同时是绝对的,一个观察者观察到两个事件是同时发生的,那么任何其他人都认为也是同时发生的.爱因斯坦认识到,由于光速的有限,同时具有相对性.在一个惯性系中观察到是同时发生的事件,在另一个相对于他做匀速运动的惯性系中不是同时的.相对论中的许多效应如尺缩、钟慢效应,都源于同时的相对性,它是牵住相对论这个“牛鼻子上的一根缰绳”,抓住了它,一切都可以迎刃而解.

2 狭义相对论的基本假设及理论核心

2.1 狭义相对论的两条基本假设

爱因斯坦在总结了新的实验事实后,在1905年提出了两条相对论的基本假设^[5].

(1) 光速不变原理:真空中的光速相对于任何惯性参考系沿任一方向恒为 c ,并与光源的运动无关.

(2) 相对性原理:即惯性系之间完全等价不可区分,或物理规律在所有惯性系中都相同.

此外,还有一个约定(假设),在任何惯性系中,时空是均匀的、各向同性的.

2.2 狭义相对论的理论核心

2.2.1 洛伦兹变换

如图6所示,假设有两个惯性参考系 S 和 S' ,起始时两参考系的坐标原点重合且 S' 系相对于 S 系沿 x 方向的速度为 v . S 系和 S' 系同时从零开始计时,计时起将位于原点处的点光源发射一光脉冲.在 S 系中,光脉冲以速度 c 向各个方向传播,波前到达 (x, y, z) 所需的时间间隔为

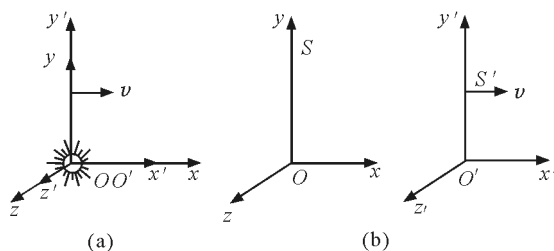


图6 S' 和 S 为两原点重合惯性系, $O(O')$ 处出现光脉冲

$$t = \frac{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}{c} \quad (22)$$

等式两边平方后移项可得

$$x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2 = 0 \quad (23)$$

故在 S' 系中同样可观测到光脉冲以速率 c 向各个方向传播, 则 t' 时刻, 波前到达 (x', y', z') 的球面方程为

$$x'^2 + y'^2 + z'^2 - c^2 t'^2 = 0 \quad (24)$$

为了简单计算, 令 x 轴与 x' 轴重合, 且新旧坐标满足线性关系(时空的均匀和各向同性可以确保变换关系是线性的). 即 $x' = \alpha x + \beta t$, $y' = y$, $z' = z$, $t' = \gamma x + \delta t$, 两边求 Δ 或微分, 注意运动的相对性, 即 O 处的人看 O' ($\Delta x' = 0$) 以速度 v 向右运动, 由此得

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = -\frac{\beta}{\alpha} = v, \text{ 反之, } O' \text{ 处的人看 } O (\Delta x = 0) \text{ 以}$$

速率 $-v$ 向左运动, 由此得

$$\frac{\Delta x'}{\Delta t'} = \frac{\beta}{\delta} = -v, \text{ 将变换关系和这两个关系式代}$$

入式(24), 稍加整理, 可以确定 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$

$$\begin{cases} x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \end{cases} \quad (25)$$

式(25)为洛伦兹变换, 它是相对论运动学的核心. 当 $\frac{v}{c}$ 趋于零, 即低速情况时, 该变换又变为伽利略变换.

2.2.2 四维动力学方程

正如牛顿第二定律是牛顿力学的核心一样, 相对论动力学方程也是狭义相对论力学的核心, 它把牛顿第二定律改造成了具有洛伦兹协变性的方程^[5]

$$K_\mu = \frac{dp_\mu}{d\tau} = m_0 a_\mu \quad (26)$$

其中的 $K_\mu = \gamma_u \left(\mathbf{F}, \frac{i}{c} \mathbf{F} \cdot \mathbf{u} \right)$ 为四维力

$$\gamma_u = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$$

$\mathbf{F} = \frac{d\mathbf{p}}{dt}$ 为普通的三维力. \mathbf{u} 为物体的运动速度, $p_\mu =$

$m_0 U_\mu = \left(\mathbf{p}, \frac{i}{c} E \right)$ 为四维动量, E 为能量. $\mathbf{p} = \frac{m_0 \mathbf{u}}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$ 为三维动量, U_μ 为四维速度, a_μ 为四维加

速度, τ 为固有时, μ 从 1 取到 4.

2.2.3 四维电磁张量和四维矢势——麦克斯韦方程的协变形式

除了用电场强度 \mathbf{E} 和磁感应强度 \mathbf{B} , 从力的角度来描述电磁场之外, 还可以用矢势 \mathbf{A} 和标势 φ , 从能的角度来描述电磁场, 两者的关系为

$$\begin{cases} \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \\ \mathbf{E} = -\nabla \varphi - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \end{cases} \quad (27)$$

利用“洛伦兹规范条件” $\nabla \cdot \mathbf{A} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = 0$, 可以把真空中的麦克斯韦方程化为一个协变方程^[2]

$$\square A_\mu = -\mu_0 J_\mu \quad (28)$$

上式中的 $\square = \partial_\nu \partial_\nu = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + \frac{\partial^2}{\partial (ict)^2} = \nabla^2 - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2}$ 为达朗伯标量算符, $A_\mu = (\mathbf{A}, \frac{i}{c} \varphi)$ 为四维矢势, $J_\mu = (\mathbf{J}, ic\rho) = \rho_0 \gamma_u (\mathbf{u}, ic) = \rho_0 U_\mu$ 为四维电流密度矢量. 该方程为非齐次的二阶线性偏微分方程, 给定电流密度 \mathbf{J} 和电荷密度 ρ 以及边界条件和初始条件, 就可以解出 \mathbf{A}, φ , 代入式(27)即可求出 \mathbf{E} 和 \mathbf{B} .

还有一种方法也可以把麦克斯韦方程化为一个协变方程, 那就是引入一个反对称张量, 统一描述电磁场, 即把 \mathbf{E} 和 \mathbf{B} 这两个矢量的 6 个分量看做张量的分量. 定义电磁场张量为: $F_{\mu\nu} = \frac{\partial A_\nu}{\partial x_\mu} - \frac{\partial A_\mu}{\partial x_\nu}$, 根据式(27)可以得出 \mathbf{E} 和 \mathbf{B} 这两个矢量的 6 个分量与 $F_{\mu\nu}$ 的关系, 如 $B_1 = \frac{\partial A_3}{\partial x_2} - \frac{\partial A_2}{\partial x_3} = F_{23} = -F_{32}$.

$E_1 = ic \left(\frac{\partial A_4}{\partial x_1} - \frac{\partial A_1}{\partial x_4} \right) = ic F_{14} = -ic F_{41}$, 以此类推, 可以定出 $F_{\mu\nu}$ 的 16 个分量.

$$F_{\mu\nu} = \begin{bmatrix} 0 & B_3 & -B_2 & -\frac{i}{c} E_1 \\ -B_3 & 0 & B_1 & -\frac{i}{c} E_2 \\ B_2 & -B_1 & 0 & -\frac{i}{c} E_3 \\ \frac{i}{c} E_1 & \frac{i}{c} E_2 & \frac{i}{c} E_3 & 0 \end{bmatrix} \quad (29)$$

于是,我们可以把真空中麦克斯韦方程组中的第二和第三个方程合并为一个张量方程

$$\frac{\partial F_{\mu\nu}}{\partial x_\nu} = \mu_0 J_\mu \quad (30)$$

把真空中麦克斯韦方程组中的第一个和第四个方程合并为另一个张量方程

$$\frac{\partial F_{\mu\nu}}{\partial x_\lambda} + \frac{\partial F_{\nu\lambda}}{\partial x_\mu} + \frac{\partial F_{\lambda\mu}}{\partial x_\nu} = 0 \quad (31)$$

这样就吧麦克斯韦方程修改成了协变形式,使之在任何惯性系中都具有相同的形式.

式(30)中采用了爱因斯坦求和约定:相同指标表示求和.

2.2.4 四维间隔的绝对性

在洛伦兹变换下,矢量和张量一般都会发生变化,但有一些量会保持不变,因而称之为洛伦兹变换的不变量.因为洛伦兹变换在几何学上表现为“闵氏时空”的转动,在坐标轴转动时,矢量的“长度”或“模”是不变的,因此,四维间隔(无限靠近的两点之间的“闵氏空间距离”)具有不变性,“距离或间隔”的平方自然也不变,即

$$dS^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 + dx_4^2 = dS'^2$$

这就是四维间隔的绝对性(不变性),它是光速不变原理、狭义相相对性原理、时空均匀且各向同性三者的集成(数学表示),在相对论中具有核心地位,堪称相对论的基石.

3 狭义相对论的诞生历程给我们的启示

(1) 注意继承与创新的关系

狭义相对论和其他科学理论一样,都是科学技术和生产水平发展到一定阶段的必然产物.它是在牛顿力学和麦克斯韦电磁理论的基础上创立的一个新理论.它抛弃了“以太”的概念和绝对时空观,把伽利略(力学)相对性原理推广为狭义(物理)相对性原理,把光速不变作为一条基本原理,由此导出了洛伦兹变换公式,得出了“尺缩、钟慢、质增”效应以及质能公式等.狭义相对论的诞生并没有彻底否定牛顿力学,只是给它划定了一个适用范围:宏观低速.

(2) 重视哲学的指导作用

哲学揭示的是世界上事物发展最一般的规律,是指导我们认识世界和改造世界最基本的思想武器.正如爱因斯坦所说,马赫的哲学思想曾直接或间

接地给他以启发,是马赫对绝对时空的批判让他捕捉到时间的“可疑”.哲学不仅对相对论的诞生有着指导作用,它所揭示的关于物质和运动的关系;运动和静止的关系;物质运动和时空的关系等对整个物理学乃至整个自然科学都有着指导作用.

(3) 注重数学和实验的基础地位

物理学是一门以实验为基础,以数学为工具的科学.物理学理论的建立一般都经历:实验—假说—数学推理—实验检验—建立理论—拓展应用等几个阶段.如果把科学研究比作一只鸟,那么实验和数学就是鸟的两个翅膀.近代科学的基本特征就是把实验和数学引入科学,因此,掌握实验技能和先进的数学工具,对物理研究和物理教学都极为重要.

(4) 重视问题的启发作用

爱因斯坦从16岁开始思考追光问题,直到1905年26岁发表著名的《论动体的电动力学》,才算最终解决此问题.他曾说过“提出一个问题比解决一个问题更重要,因为解决一个问题只需要数学或实验的技巧,而提出一个问题却需要非凡的想象力和创造力.”

问题好比发动机,有了问题才有探索的动力,无论是物理研究还是物理教学,都要重视问题的启发作用,做到敢于质疑、善于提问,在一个个为什么中找到研究的方向.

参 考 文 献

- 1 赵展岳. 相对论导引[M]. 北京:清华大学出版社,2003. 5~6,10~11,13~23
- 2 孙景李. 时间·空间与相对论[M]. 南京:南京大学出版社,1994.3~10,15~18,40~42
- 3 漆安慎. 力学[M]. 北京:高等教育出版社,2005.411~414
- 4 冯杰. 大学物理专题研究[M]. 北京:北京大学出版社,2011.290~291
- 5 郭硕鸿. 电动力学[M]. 北京:高等教育出版社,2008. 110~113,188~198,217~220
- 6 张三慧. 力学[M]. 北京:清华大学出版社,2009.297~299
- 7 孙显元. 现代国外自然科学家哲学思想[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,1991.15~19
- 8 蔡伯濂. 狭义相对论[M]. 北京,高等教育出版社,1991. 15~16
- 9 蔡志东,葛宇宏. 关于相对论的体系结构——纪念相对论诞生110周年[J]. 物理通报,2015(2):2~4

(下转12页)

- 展新局面[N]. 人民日报, 2016-12-09
- 2 姜宇, 刘艳磊, 赵言诚, 等. 新工科背景下大学物理案例教学的探索[J]. 高教学刊, 2019(20): 102 ~ 104
- 3 代福, 范东华, 赵丽特. 新工科背景下大学物理教学研究[J]. 教育教学论坛, 2018(22): 198 ~ 199
- 4 叶荣, 杨果仁, 吴显云. 光学课程的课程思政教育研究[J]. 大学物理, 2020(7): 49 ~ 54
- 5 侯书进, 秦佳琼. 探究课程思政建设——以《大学物理》课程为例[J]. 教育现代化, 2020(4): 102 ~ 105
- 6 陈真英, 谢冰, 谢文彬, 等. 立德树人格局下大学物理课程实施课程思政的特色优势研究[J]. 高教学刊, 2019(21): 61 ~ 63
- 7 倪光炯, 王炎森. 文科物理——物理思想与人文精神的融合[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005
- 8 朱鎡雄. 物理学思想概论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009
- 9 赵占娟, 杨焱惜, 李蕾, 等. “翻转课堂”教学改革在医用物理学中的应用[J]. 物理通报, 2020(7): 13 ~ 16

Practice and Exploration on Curriculum Ideology and Politics Integrating into University Physics under the Background of *New Engineering*

Cao Haixia

(Soochow College of Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006)

Abstract: It is necessary and applicable to integrate the ideological and political education into the teaching of General Physics. The paper describes the way of implementation of the ideological and political education in the physics teaching under the background of "emerging engineering education". Besides, the paper discusses how to effectively integrate ideological and political elements into the physics teaching.

Key words: emerging engineering education; general physics; ideological and political education

(上接第8页)

The Historical Background, Core and Enlightenment of the Birth of Special Relativity

Yao Mengzhen Feng Jie

(Mathematics & Science College of Shanghai Normal University, Shanghai 200234)

Cai Zhidong

(Danyang Normal University, Zhenjiang College, Zhenjiang, Jiangsu 212300)

Abstract: Starting from the experimental basis, theoretical basis, philosophical basis and problem basis of the birth of special relativity, this paper introduces the historical background of the birth of special relativity in detail, introduces the basic hypothesis and theoretical core of the theory, and discusses the enlightenment from the birth of special relativity.

Key words: special relativity historical background; theoretical core; enlightenment