

时空理论的演化历程

吴长龙 俞晓明

(南京师范大学物理科学与技术学院 江苏 210097)

关于空间与时间的理论,从古至今有许多的哲学家和自然科学家为其倾注许多的心智和汗水。大体上可分为三个时期。

第一个时期可称为古代的探索时期

中国古代的庄子就对宇宙有一个自己的看法:“有实而无乎处者,宇也。有长而无本剝者,宙也。”“有实”是指有形体的物质实在,而每一物质实在都有一定的体积、一定的外形,占有一定的空间;“无乎处”,即没有穷处,没有界限。因此,庄子所谓“宇”是指广阔无边的空间实在。“有长”是指时间而言,时间只讲长度,即古今前后,它没有上下左右;“无本剝者”,即无始又无终。因此,庄子之谓“宙”是指无始无终的古往今来。古希腊的伟大学者亚里士多德就对空间和时间进行过较为系统的研究。他认为空间是物体的一种属性,但不是物体本身;空间的存在取决于物体的存在,但又不能混淆两种存在的区别。亚里士多德用“地位”概念来表达空间问题,在他看来,物体的“地位”是三维的,而所谓三维空间就是物体“地位”的三纬度,即长、宽、高,离开物体的具体“地位”而抽象地谈论空间在亚里士多德看来是没有意义的。至于时间,亚里士多德的结论是:尽管时间和变化并不相同,但是没有变化时间便不存在。因此,时间既不是运动,也不能脱离运动,把时间和运动联系起来观点是亚里士多德时空学说的一个重要成果。

第二个时期可称为牛顿时代

在牛顿看来:“绝对的空间,就其本性而言,是与外界任何事物无关而永远是相同的和不动的,绝对的、真正的和数学的时间自身在流逝着,而且由于其本性而在均匀地、与任何其他外界事物无关地流逝着。”他把无限的空间和无始无终的时间作为天地万物生灭变化的舞台背景,所有的变化都可以在其不朽巨著《自然哲学之数学原理》找到因果。后来人们把牛顿的绝对时空和笛卡儿的坐标几何结合起来,使牛顿的时空观从定性走向定量,从粗糙走向精确,以致使没有接触现代物理学的人们,即使是开尔文、洛伦兹这样的科学巨匠,也难以摆脱它,难以摆脱物质运动的绝对舞台——绝对静止的特殊参照系“以

太”。并且把笛卡儿三维整数的描述物体的空间当成了真正的现实的物理空间,直至20世纪法国数学家芒德布罗把分形几何带进人们的视野时我们才知道维数可以是分数的。当然,也存在与牛顿不同的声音,其中黑格尔对时空的认识在某些方面是深刻的,他正确地指出:“人们绝不能指出任何空间是独立存在的空间,相反地,空间总是定实的空间,决不能和充实其间的东西分离开。”在黑格尔看来,空间的物质实在性并不在于它是否为物质所充满,而在于空间就是物体的存在本身,不存在一个普遍的、共同的、绝对的空间,而是存在具体的、相对的、特定的物体空间。另外,黑格尔还正确地指出:时间与空间是统一的,不应该把它们割裂开来。他说:“空间在时间中和时间在空间中的这种消逝和自我再生是一个过程,在这个过程中,时间自身在空间中被设定为位置,而这种无差别的空间性也同样直接在时间中被设定,这就是运动。”恩格斯与其有相似的观点:“一切存在的基本形式是空间和时间,时间以外的存在 and 空间以外的存在同样是非常荒诞的事情。”关于运动,恩格斯说:“运动是物质的存在方式。无论何时何地,都没有也不可能有没有运动的物质。没有运动的物质和没有物质的运动是同样不可想像的。”这些观点,在当时的影响力远远地弱于牛顿的绝对时空观。由于牛顿力学的巨大成功,在很长时间内,很少有人怀疑绝对时空观的正确性。历史上,只有莱布尼兹、贝克莱、马赫等人先后对绝对时空观提出过异议和批判,在此不一一叙述。

第三个时代可称为爱因斯坦时代

这一时代又可分为两个时期。

第一个时期为狭义相对论时期。1887年美国物理学家迈克尔逊和化学家莫雷一起完成了一项著名的实验,现称为迈克尔逊——莫雷实验。该实验的零结果以确凿的事实否定了长期以来人们所认为的以太的存在,对近代物理学的发展产生了重大影响。斐兹杰惹和洛伦兹先后提出了收缩假说以便在以太存在的前提下来解释现象,但很难让人信服。法国数学家庞加莱虽洞察到物理学的危机,但他没有真正从牛顿的时空观中解脱出来,因而不可能在

理论上作出根本性的突破。只有爱因斯坦经过批判性的思考,终于认识到“时间是值得怀疑的!”

爱因斯坦推广了伽利略的相对性原理,认为力学规律和电磁学规律在所有的惯性系中具有相同的形式,不存在一个特殊的参照系,这是狭义相对论的第一个原理。既然一切惯性系都是平权的,以太作为一个特殊的参照系的存在就完全没有必要。爱因斯坦从物理学的花园中赶走了以太这个幽灵。还依据其他一些实验事实,提出了狭义相对论第二个原理——光速不变原理。一旦承认光速不变,迈克尔逊——莫雷实验的结果也是理所当然。在此两个原理的基础上,爱因斯坦自然、逻辑地获取了一些惊人的结论:(1)同时性是相对的;(2)运动的尺子会缩短;(3)运动的时钟会变慢;(4)物体的质量随速度的增大而增大;(5)物体质量和能量满足质能方程。狭义相对论抛弃了牛顿的绝对时间和绝对空间概念,认为空间和时间与物体的运动是无法分开的。狭义相对论用简单的逻辑关系、严格清晰的数学语言把时间、空间和物质的运动联系起来,深刻地揭示了时空与物质运动的统一性。狭义相对论改变了科学家、哲学家、甚至普通人对时空的认识。

第二个时期为广义相对论时期。狭义相对论是以惯性系为前提的。为什么惯性系要优于其他参照系?爱因斯坦认为,相对性原理不仅适用于惯性系,也适用于非惯性系。狭义相对论发表后,震惊了全世界。当时除了爱因斯坦本人没有人看出它还有什么不足之处,只有爱因斯坦有着更深层次的思索。第一,狭义相对论进一步肯定了牛顿力学所定义的惯性参考系在描述物理规律上的优越地位,但自然界却根本找不到一个真正的惯性系,普遍存在的却是非惯性系。爱因斯坦设想应该把所有的参考系在描述自然现象方面看成是等效的。于是,他考虑着如何把狭义相对性原理推广为广义相对性原理。第二,狭义相对论虽然把牛顿运动定律和麦克斯韦方程纳入了统一的框架,却把万有引力拒斥于外。第三,洛伦兹变换替代伽利略变换,主要是否定了绝对时间的概念,建立了相对论时空概念。这是对传统时空观的巨大变革,但并没有涉及时空的内在性质。爱因斯坦在思考解答上述三个方面的问题中,凭他非凡的科学洞察力,首先抓住惯性质量和引力质量这两个概念进行分析。物体的惯性质量等于引力质量。爱因斯坦认为应该“将这个数值上的相等转化

为两种概念在真实性质上的相等”,“才能在科学上充分证实我们这样规定数值上的相等是合理的。”牛顿力学揭示物体有两个基本属性:惯性和引力。惯性质量表现在牛顿第二运动定律中,引力质量则表现于万有引力定律中,惯性质量与引力质量的关系,首先是从自由落体加速度的研究中发现的。加速度恒等,与物体的质量无关。爱因斯坦说:“引力场中一切物体都具有同一加速度,这条定律也可表述为惯性质量同引力质量相等,它当时就使我认识到它的全部重要性,我为它的存在感到极为惊奇,并且猜想其中必有一把可以更加深入地了解惯性和引力的钥匙。”从1907年开始,爱因斯坦便开始了广义相对论的研究。他首先提出广义相对性原理,即自然规律在任何参考系中都具有相同的数学形式,同时,他还抓住了惯性质量同引力质量相等,提出了等效原理:即在一个小体积范围内万有引力和某一加速系统中的惯性力相互等效。在格罗斯曼的帮助下,找到了由高斯——黎曼建立的曲面几何和里奇等建立的张量分析,于1915年完成了划时代的论文《引力的场方程》。在这篇论文中,他提出了引力场方程的完整形式,创立了广义相对论。广义相对论的引力场方程: $G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - g_{\mu\nu}R/2 = -8\pi GT_{\mu\nu}/C^4$,其中 $G_{\mu\nu}$ 为爱因斯坦张量, $R_{\mu\nu}$ 为里奇张量, $g_{\mu\nu}$ 为度规张量, R 为曲率标量, $T_{\mu\nu}$ 为能量动量张量。牛顿的引力场方程: $\Delta\varphi = 4\pi\cdot G\rho(x^i)$,其中 φ 为势函数, ρ 为密度函数。爱因斯坦方程与牛顿方程明显不同。方程的左侧没有直接表述力和势函数的量,只有描述时空弯曲结构的几何量。方程的右侧场源量也不是质量密度 ρ ,而是更为普遍的张量 $T_{\mu\nu}$,这个方程完美地反映了时空的几何结构和引力的关系,把几何学和物理学统一起来,用空间结构的几何性质来表述引力场,从而使非欧几何获得了实际的意义。广义相对论虽然是狭义相对论的逻辑发展,两者仍有质的差别。狭义相对论的时空观是由观察者的运动状态决定的,与时空的内部结构无关,是一种运动学效应。而广义相对论的时空观却是一种与物质分布相关的动力学效应,从新的高度否定了牛顿的绝对时空观,为现代物理学树立了不朽的丰碑,正如玻恩所说:“对于广义相对论的提出,我过去和现在都认为是人类认识大自然的最伟大的成果。”广义相对论不仅对物理学家震撼强烈,而且对哲学家深有启发,它甚至影响了大众的生活观念。