



19 世纪末叶,经典力学、热学、波动光学和电磁学所取得的辉煌成就,使那个时代的物理学家感到充分的自信和满足。1900 年,在英国皇家学会迎接新世纪到来的庆祝会上,开尔文勋爵(Kelvin,即威廉·汤姆孙,W. Thomson)自豪地宣称:“物理学的大厦已经建成,未来的物理学家们只需要做些修修补补的工作就行了。”然而,科学家的慧眼仍然使他看到,“明朗的天空中还存在两朵乌云”,一朵与黑体辐射有关,另一朵与迈克耳孙实验有关。

时隔不到一年,从第一朵乌云中降生了量子论(1900 年年底)。五年之后,又从第二朵乌云中降生了相对论(1905 年)。经典物理学的大厦被动摇了,就在大家认为物理学已经发展到顶峰,马上就要无事可做的时候,新的纪元开始了。

作为现代物理学奠基人的爱因斯坦(A. Einstein),1879 年出生于德国一个犹太工厂主的家庭。少年时代他没有表现出杰出的智慧,除数学外,其他功课皆属平常。他沉默寡言,不喜欢学校中呆板的教学方法,学习成绩一般,很少得到老师和同学的喜爱。引起同学注意的,是他自幼对音乐的爱好和独立思考的习惯。1896—1900 年,爱因斯坦在瑞士苏黎世工业大学求学,他主要靠自学度过了自己的大学生涯。

爱因斯坦一生中对学校很少有好评,只有上大学前在瑞士阿劳中学的那一年补习生活是个例外。他晚年时回忆,“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。”

犹太血统、无神论信仰和对真理正义的追求,给爱因斯坦的生活带来不少麻烦。大学毕业后有两年找不到正式的工作,他在穷困中开始了自己的科学生涯。

1902 年,幸运之神开始敲响爱因斯坦的门户。他的一位“伯乐”式的同学格罗斯曼(M. Grossmann),通过自己的父亲把他推荐到伯尔尼发明专利局工作,使他终于有了一个正式的职业。专利局的工作使他有充分的闲暇进行自己喜爱的研究。虽然他也不得不经常为处理一些“永动机”之类的发明申报而耗费时间,然而荒唐而活跃的思想也多少给他输入了新的灵感。

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组织了一个名为“奥林匹亚科学院”的小组,这是一个自由读书与自由探讨的俱乐部。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,促成了他在学术上的成就。爱因斯坦曾经提醒,不要过分渲染他的童年和少年时代,希望大家注意“奥林匹亚科学院”对他的影响。

在发表若干关于毛细现象和分子运动论的文章之后,爱因斯坦终于在 1905 年公布了多年深思熟虑的结晶——《论运动物体的电动力学》(关于狭义相对论的划时代论文)。虽然在

那个时期,已有一些物理学家非常接近相对论的发现,甚至已经得到了洛伦兹收缩和洛伦兹变换之类的数学公式,然而只有爱因斯坦一个人在抛弃“绝对时空”的同时,抛弃了“以太”,从而彻底跳出了绝对时空观的框架,成为狭义相对论当之无愧的创始人。

这篇数学知识并不高深(只相当于当时大学物理专业学生的数学水平)、没有引用任何文献,而在物理上却极其难懂的论文,幸运地得到理论物理学权威普朗克的支持而很快见诸于世。

此后的十年,爱因斯坦几乎是单枪匹马地开始了相对论性引力论的研究。起先几年,他试图把牛顿引力定律纳入狭义相对论的体系。错误和挫折使他认识到这个问题远比原来预想的要深远和复杂,伟大物理学家的天才直觉使爱因斯坦抓住了等效原理和广义相对性原理,把惯性和引力等同起来考虑,并窥视到时空和物质之间的内在联系,猜测到万有引力很可能是一种几何效应。他的物理思想已经深入到弯曲时空的领域,困难是找不到合适的数学工具。1912年,他的同学格罗斯曼再次帮助了他,向他介绍了当时不为物理学家所熟悉的黎曼几何和张量分析。经过深入的自学,爱因斯坦终于掌握了这一工具,并在与希尔伯特做了有益探讨之后,于1915年完成了他的广义相对论。宏伟的理论框架建立起来了。至此,他的物理思想和数学水平,已远远超前于那个时代的所有物理学家。

表明广义相对论正确的三大验证的结果,使爱因斯坦名震全球。然而,在弱引力场中广义相对论与牛顿引力理论的差别过于细微,场方程的非线性又给求解带来极大困难,所以在此后的几十年中,广义相对论理论本身进展不大。比较重要的是在20世纪30年代时,爱因斯坦和福克(V. Fock)分别独立地从场方程推出了运动方程,使广义相对论的基本方程从两个减少到一个,理论体系更趋完备。除此之外,值得一提的进展是1916年得到静态球对称的史瓦西解;1917年在场方程中引入了长期存在争议的宇宙项;1922年弗里德曼(A. Friedmann)求得膨胀或脉动的宇宙解,此解得到1929年发现的哈勃(E. P. Hubble)定律的有力支持;1948年伽莫夫(G. Gamov)据此提出“大爆炸宇宙模型”。

物理学上的杰出成就,使爱因斯坦于1922年获得了1921年的诺贝尔物理学奖。由于当时一些物理学家怀疑相对论的正确性,获奖原因被委婉地写为“由于他在光电效应和理论物理学其他方面的成就”,而没有直接提到他的划时代杰作。

爱因斯坦的犹太出身和反法西斯情绪使他受到希特勒的迫害,不得不于1933年移居美国。此后他在普林斯顿高级研究所工作,直到1955年去世。爱因斯坦的正义感和傲骨使他不屈服于任何反动势力的压迫,不脱离他所处时代的社会斗争。继在第一次世界大战期间参加反战运动之后,又在第二次世界大战期间参加反法西斯运动。第二次世界大战后,他又为世界的和平与民主而呼喊。

爱因斯坦晚年致力于统一场论的工作。由于时代的限制,到他去世为止,这项工作没有取得重大成就。然而,他的工作应该看作今天蓬勃进展的以规范场论为基础的“弱电统一”“大统一”和“超统一”工作的序幕。

毫无疑问,爱因斯坦是继牛顿之后最伟大的物理学家,他的成就涉及相对论、量子论和统计物理各个领域。爱因斯坦去世之后,他所创立的理论得到广泛传播,并得到了长足发展。

不过,在20世纪50年代前后,相对论的进展与量子论相比,曾经是令人失望的。粒子物理学家费曼(R. P. Feynman)参加了在华沙举行的广义相对论与引力研讨会。在听了一

些驴唇不对马嘴的报告之后,他忍不住在给妻子的信中写下了如下的感想:

“我没有从会上获得任何东西。我什么也没有学到。因为没有实验,这是一个没有活力的领域,几乎没有一个顶尖的人物来做工作。结果是一群笨蛋(126个)到这儿来了,这对我的血压很不好。以后记着提醒我再不要参加任何有关引力的会议了。”

然而,情况很快有了重大改观。1963年克尔(R. P. Kerr)解的得出和1967年脉冲星的发现促使致密星和黑洞物理的研究进入高潮;1970年前后,彭罗斯(R. Penrose)和霍金(S. W. Hawking)证明了奇点定理;1973年,黑洞热力学的四条定律建立起来;1974年霍金又预言了黑洞热辐射。

1965年微波背景辐射的发现,使大爆炸宇宙学获得新动力,各种宇宙模型应运而生,宇宙早期、极早期的研究进入高潮。20世纪70年代到90年代,粒子物理、宇宙论和量子引力的研究汇为一体。进入21世纪后,关于暗物质和暗能量的讨论愈演愈烈,掀起了理论物理学和天体物理学研究的一个又一个新浪潮。以广义相对论为基础的“物理宇宙学”逐渐形成。

1978年,通过对脉冲双星运转周期的研究,间接证实了引力波的存在。2015年又直接接收到来自宇宙深处的引力波信号,从而确证了广义相对论100年前就已预言的这一重要的时空波动的存在。

上述发现使广义相对论再次成为学术界和舆论界关注的重点。

为了更好地理解广义相对论,我们还要回顾一下它的数学工具——黎曼几何建立的历史,新几何开拓者的命运并不都像爱因斯坦那样幸运。

起源于古埃及、完成于古希腊的欧几里得几何(也叫欧氏几何),以它逻辑的严密、形式的完备和优美,两千多年来为数学家和哲学家所倾倒。唯一使人感到美中不足的是它的第五公设,即平行公理。这个公设与其他公设比较,显得过于复杂,人们自然希望第五公设能从其他公设推出,从而不再是一个公设。这方面的尝试开始于公元前5世纪,一千多年中,许多杰出的数学家为它绞尽脑汁,结果都一无所获。无数前人的失败,终于使后人悟出了一个道理。第一个察觉其中奥妙的大概是高斯(C. F. Gauss)。然而,由于欧氏几何在数学、哲学和神学中的神圣地位,高斯缺乏公开挑战的勇气。第一个在欧洲内地公布新几何初步成果的,是年轻的匈牙利数学家鲍耶(J. Bolyai)。鲍耶的父亲是高斯的同学,曾为第五公设的证明耗费了自己的大量精力。当他得知儿子又走上这条自我毁灭的道路时,立即加以劝阻,然而此时鲍耶已经领略了其中的奥妙。他较为幸运,开始这一研究不久就走上了正确的道路。关键在于他采用了反证法,企图从“第五公设不成立”引出谬误。然而,他却在反证的道路上越走越远,始终不见“谬误”的影子。最后,他终于产生了思想上的飞跃,认识到第五公设确实是不可证明的独立公理;但是人们可以引入不同于第五公设的其他公理,例如“过直线外一点可以引两条以上的直线与原直线平行(不相交)”,来取代“第五公设”建立新的几何学。然而,可惜的是鲍耶误解了高斯对他工作的评价,以为高斯要借自己的地位窃取他的成果,于是愤而终止了自己的研究。

首先提出并建立完整的新几何学的是俄国数学家罗巴切夫斯基(N. I. Lobachevski),他用“过直线外一点,可以引两条以上直线与原直线平行(不相交)”的新公设来取代第五公设。然而,他的理论在国内无人能懂,这位天才的数学家被人视为骗子,俄国科学院决定对他的工作不予理睬。他出国演讲遭到冷遇,唯一听懂了他的理论的高斯,没有明确表示支持。不

过高斯建议普鲁士科学院授予他通讯院士的称号,对他的数学水平表示了肯定。罗巴切夫斯基的成果只能发表在他的母校喀山大学的学报上,在学术界没有立即形成广泛影响。他晚年双目失明、处境凄凉,但仍顽强地通过口述完成了自己的工作,并终于得到世界的认可。罗巴切夫斯基的理论被称为罗氏几何。

黎曼(G. F. B. Riemann)用另一个公设来代替第五公设,他提出“过直线外一点的任何直线都必定与原直线相交”。他所建立的几何称为黎氏几何。

实际上,这三种几何描述不同曲率的空间:欧氏几何描述零曲率空间(如平面),黎氏几何描述正曲率空间(如球面),罗氏几何描述负曲率空间(如伪球面与马鞍面)。1845年,黎曼在更高的层面上统一了这三种几何,建立了黎曼几何,用来描述弯曲和扭曲的几何客体。

20世纪初叶,黎曼几何与相对论互不相关、各自发展。爱因斯坦把二者有机地联系起来,使这两门科学都获得了新的动力,互相促进、共同发展。

爱因斯坦把引力看作时空的几何效应,看作时空的弯曲,而时空弯曲的根源在于物质的存在与运动。狭义相对论把时间和空间看成不可分割的整体,把能量和动量看成另一个不可分割的整体。广义相对论表明,时空和能量、动量之间也存在不可分割的联系。

相对论的出现,在物理学上是一场革命,在哲学上也有着重要的意义。它与牛顿的绝对时空观彻底决裂,与马赫(E. Mach)的纯相对主义的时空观也不一致。爱因斯坦在创立相对论的过程中,曾受到马赫思想的启发,他认为自己的相对论与马赫的思想一致,并认为广义相对论的某些效应体现了马赫原理。然而马赫坚决否定相对论,认为相对论与自己的思想毫无共同之处。事实上,相对论与马赫的思想确有不同,广义相对论与马赫原理也确有出入,牛顿水桶实验造成的佯谬还远未澄清。此外,爱因斯坦晚年对时空的看法也是发人深省的:“我想说明,空间-时间未必能看作可以脱离物质世界的真实客体而独立存在的东西。并不是物质存在于空间中,而是这些物质具有空间广延性。这样看来,关于‘一无所有的空间’的概念就失去了意义。”显然,爱因斯坦的哲学思想走在了他创立的物理理论的前面。

广义相对论不是最终的理论,任何建立最终理论的企图都是注定会失败的,理论不可能发展到绝对完善。“完善”只能意味着理论的死亡,只有不完美的理论,才是朝气蓬勃的、有生命的理论。

广义相对论的物理基础

本章首先介绍爱因斯坦在创建狭义相对论过程中最重要的思想突破,介绍光速在相对论中的核心地位,以及狭义相对论所取得的成就和遇到的困难;然后介绍广义相对论的物理基础——等效原理、马赫原理和广义相对性原理,分析牛顿为论证存在绝对空间而提出的著名的水桶实验;最后介绍爱因斯坦对新理论的重要猜测和构想。

1.1 狭义相对论的成就与困难

1. 狭义相对论的建立

1687年发表的牛顿(I. Newton, 1642—1727)的巨著《自然哲学之数学原理》,集伽利略(G. Galilei, 1564—1642)以来力学研究之大成,展示了一个逻辑上完美的力学体系。书中阐述了力学三定律和万有引力定律,牛顿把这些定律放置在绝对空间和绝对时间的框架之中,认为绝对空间和绝对时间是互不相关的,也不依赖于物质的存在和运动。在牛顿力学中,惯性系被定义为相对于绝对空间静止或作匀速直线运动的参考系,力学定律正是在这些惯性系中成立。这些惯性系在描述力学定律上是平权的,它们之间以下面的伽利略变换相联系:

$$\begin{cases} x' = x - vt \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = t \end{cases} \quad (1.1.1)$$

认为各种惯性系平权的思想,被称为伽利略相对性原理(又称力学相对性原理)。

虽然绝对空间和绝对时间的提法是可疑的,不断遭到马赫等人从哲学角度进行的批判,但牛顿的力学体系自身还是自洽的;而且,力学三定律和万有引力定律得到了物理实验和天文观测的广泛支持。

这种情况一直持续到1864年麦克斯韦(J. C. Maxwell)电磁理论的建立。当时的电磁理论建立在力学的基础上,认为电磁波是介质或以太的弹性振动,而以太无所不在地充满整个宇宙空间。不久之后,人们便认识到光波是电磁波,于是以太便被看作光波的载体。一个

重要的问题是,以太是否被运动物质所带动,例如是否被地球或流体的运动所带动。天文学上的光行差现象告诉人们,以太不被地球带动。迈克耳孙(A. A. Michelson)实验又告诉人们,以太似乎是被地球带动的。斐佐(A. H. Fizeau)实验则告诉人们以太被流体有所带动,但是又不完全带动。大多数物理学家注意的是迈克耳孙实验与光行差现象的矛盾,爱因斯坦注意的则是斐佐实验与光行差现象的矛盾,这两个矛盾都可以把思考者引向相对论的发现。面对着矛盾的实验事实,当时的杰出物理学家,如洛伦兹(H. A. Lorentz)等,对原有的物理理论作了若干修改尝试,但都未能抓住问题的本质。

除去上述实验观测上的矛盾外,理论上也遇到了严重困难。麦克斯韦电磁理论有一个重要结论:电磁波(即光波)在真空中的传播速度是一个常数 c 。如果相对性原理不仅适用于力学,对麦克斯韦电磁理论也成立,那么光波在任何一个惯性系中的速度都应该是 c ,与惯性系之间的相对运动无关,也与观测者相对于光源的运动速度无关。生活常识和伽利略变换都告诉我们,如果相对于光源静止的观测者测得的光速是 c ,那么迎着光以速度 v 运动的观测者测到的光速应该是 $(c+v)$;顺着光运动方向以速度 v 奔跑的观测者测得的光速应该是 $(c-v)$,怎么可能这三位观测者测得的光速都是 c 呢?麦克斯韦电磁理论和相对性原理都得到大量实验支持,伽利略变换则被视作相对性原理的数学体现。怎么会产生上述矛盾呢?爱因斯坦被这个难题卡了很长时间。经过反复思考,终于在一次和好友贝索(M. Besso)的讨论中突然悟出了其中的真理。他意识到应该坚信得到实验支持的麦克斯韦电磁理论,坚信真空中的光速不仅是一个常数,而且与惯性系的选择无关。爱因斯坦抓住了这个事实,提出光速不变原理:真空中的光速在所有惯性系中都相同,都是同一个常数 c (即光速与光源相对于观测者的运动速度无关)。爱因斯坦还认识到伽利略变换并不等价于相对性原理,相对性原理比伽利略变换更为基本。于是,他保留了得到实验支持的相对性原理和麦克斯韦电磁理论,抛弃了并无坚实实验基础的伽利略变换。然后,他把相对性原理和光速不变原理一起作为新理论的基础,建立了狭义相对论。

应该说明,提出光速不变原理是非常不容易的事情。这一原理如果成立,就表明光速是绝对的,这将导致一个崭新的观念:“同时”是相对的。也就是说,在一个惯性系 S 中同时发生的两件事情,对于另一个相对于 S 以速度 v 运动的惯性系 S' 中的观测者,这两件事将不是同时发生的,而是一先一后发生的。这个结论与人们的生活经验严重冲突,很难被人理解;因此可以说,理解狭义相对论的关键就在于理解“同时的相对性”。相对论诞生前夕,爱因斯坦的思路被卡住一年多,就是因为他长时间没有认识到“同时”这个概念不是“绝对”的,而是“相对的”。

从在阿劳中学上补习班的时候起,爱因斯坦就开始思考一个“追光”实验:如果一个观测者追上光,以光速运动,将会看见什么?他觉得这个观测者会看到不随时间变化的波场,但是谁也没有见过这种现象。如果这个以光速运动的人在前面用手举着一个镜子,他能在镜中看见自己的像吗?如果能看见,那么自己的脸发出的光相对于自己的速度还是 c 吗?如果还是 c ,那么依据伽利略变换,静止于地面的观测者岂不将看到此光相对于自己的速度是 $2c$ 吗?但是谁也没有见过以速度 $2c$ 运动的光,所有测得的光速都是同一个值 c ,似乎应该承认不存在以光速运动的、相对于光静止的观测者,光相对于所有观测者都是运动的,而且运动速度都相同,都是同一个值 c 。也就是说,应该承认光速与光源相对于观测者的运动速度无关。爱因斯坦还知道,天文学上对双星的观测也支持光速与光源运动无关的观点。

如果有关,双星轨道将发生畸变,但是从未观测到任何双星的轨道有畸变。

长期的反复思考使爱因斯坦倾向于承认“光速的绝对性”,即承认光速各向同性,是一个常数 c ,而且在所有相互运动的惯性系中都是同一个常数 c 。但是,进一步的思考表明,承认“光速的绝对性”,会造成“同时”概念的混乱,爱因斯坦觉得这可真是个难解之谜。在与贝索的讨论中,爱因斯坦突然意识到这些混乱都与人们默认“同时”的绝对性有关。其实,“同时的绝对性”只是人们一个“想当然”的观念,并没有经过实验的认真检验。如果放弃这一观念,把“同时”看作相对的,而且从“光速的绝对性”出发来定义“同时”,那么一切就都迎刃而解了。爱因斯坦的头脑豁然开朗,相对论的大厦呈现在他的眼前。

爱因斯坦明确强调,他的狭义相对论与经典物理学的根本区别不在于相对性原理,因为伽利略、牛顿都赞同相对性原理。他认为根本区别在于他提出的光速不变原理,这一原理才是经典物理学与狭义相对论的分水岭。

爱因斯坦从光速不变原理和相对性原理出发,得到了联系不同惯性系的洛伦兹变换:

$$\begin{cases} x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \end{cases} \quad (1.1.2)$$

用以取代伽利略变换,又在指出“同时的相对性”之后,提出“动尺缩短”“时间延缓”和“质能关系”等新概念。然后他又在闵可夫斯基的帮助下,把电磁理论和动力学定律写成了四维协变的张量形式。

洛伦兹变换表明,时间和空间存在内在联系。“能量动量张量”的表达式和“质能关系式”等表明,质量与运动不可分割。

光速不变原理和相对性原理告诉我们,一切惯性系都是平权的,不可能测出相对于绝对空间的运动速度;所以,牛顿的绝对空间和绝对时间的概念必须放弃。不存在绝对速度,一切匀速直线运动都是相对的;绝对时空的概念和以太一起,被爱因斯坦抛弃了。

需要说明的是,最早得出洛伦兹变换的人不是爱因斯坦,在他之前拉莫尔(J. Larmor)、斐兹杰惹(G. F. Fitzgerald)、洛伦兹等人早已给出了洛伦兹变换的正确数学表达式,但他们对洛伦兹变换的物理理解都是错误的。洛伦兹等人认为 S 系 (x, y, z, t) 是相对于绝对空间(以太)静止的特殊惯性系,因此 S' 系相对于 S 系的运动速度 v 是绝对速度,即相对于绝对空间的运动速度; S' 系中的时间 t' 是所谓“地方时”,并非真正的时间;动尺收缩是相对于绝对空间运动而产生的真实的物理效应,会导致原子内部电荷分布的变化等。爱因斯坦在不知道他们工作的情况下,独立地得出了洛伦兹变换,并给出了正确的物理解释:根本不存在以太和绝对空间, S 系和 S' 系都是同等的惯性系, v 是它们之间的相对速度; t 与 t' 都是真实的时间,在各自的惯性系中都有测量意义;动尺收缩是相对的,是一种时空效应,不会导致原子内部电荷分布的变化。洛伦兹等人最初反对爱因斯坦的理论,为了区分自己的理论和爱因斯坦的理论,他给爱因斯坦的理论起了个名字叫“相对论”,爱因斯坦觉得这个名字还可以接受,于是“相对论”这一名称便被保留了下来。

2. 光速在相对论中的核心地位

“光速”在相对论中处于理论的核心地位,它主要起两个作用:①“约定(即规定)真空中的光速各向同性而且是一个常数”,从而校准了静置于空间各点的钟,使它们“同时”或“同步”,进而在全空间定义了统一的时间。②把“光速不变原理”作为一条公理,在此公理与“相对性原理”的基础上,构建起狭义相对论的大厦。下面我们就来解释这两点。

(1) “约定”真空中的光速

相对论是一个时空理论,在全空间定义统一的时间是研究时空理论的前提;为此,就需要找到一种方法把静置于空间各点的钟“对好”,这个问题远不像一般人想像的那样简单。在相对论诞生的前夜,著名数学家庞加莱(H. Poincare)就曾指出,要想“对准”两地的钟,必须事先对信号传播速度有一个“约定”,或者说“规定”。这是因为当时已经知道任何信号的传播速度都不是无穷大,信号传播需要时间;要想校准两地的钟,必须首先知道两地的距离和信号传播的时间。

那时候,人们还没有意识到距离测量存在的困难,但已认识到确定信号传播的时间需要事先对好两地的钟,这就造成逻辑上的循环。不过,有一个突破困难的方法,那就是事先对信号传播的性质加以约定,或者说规定。庞加莱认为可以用光来传播信号,也许可以约定真空中的光速各向同性,甚至是一个常数。庞加莱谈到上述想法,但没有具体落实。不久之后,爱因斯坦在创建相对论的第一篇论文《论运动物体的电动力学》中把庞加莱的猜想具体化,完成了校准静置于空间各点的钟的理论工作,从而建立起全空间统一的时间。

爱因斯坦写道:

“如果在空间的A点有一个钟,在A点的观察者只要在事件发生的同时记下指针的位置,就能确定A点最邻近的事件的时间值。若在空间的另一点B也有一个钟,此钟在一切方面都与A点的钟类似,那么在B点的观察者就能测定B点最邻近处的事件的时间值。但是若无其他假设,就不能把B处的事件同A处的事件之间的时间关系进行比较。到目前为止我们只定义了‘A时间’和‘B时间’,还没有定义A和B的‘公共时间’。”

他接着写道:

“除非我们用定义规定光从A走到B所需的‘时间’等于它从B走到A所需的‘时间’,否则‘公共时间’就完全不能确定。现在令一束光线于‘A时刻’ t_A 从A射向B,于‘B时刻’ t_B 又从B被反射回去,于‘A时刻’ t'_A 再回到A。

按照定义,两钟同步的条件是

$$t_B - t_A = t'_A - t_B \quad (1.1.3)$$

我们假定同步性的这个定义是无矛盾的,能适用于任何数目的点,且下列关系总是成立的:

- ① 假如B处的钟与A处的钟同步,则A处的钟与B处的钟也同步;
- ② 假如A处的钟与B及C处的钟同步,则B、C两处的钟彼此也同步。

这样,借助于某些假想的物理实验,我们解决了如何理解位于不同地点的同步静止钟这个问题,并且显然得到了‘同时’或‘同步’的定义,以及‘时间’的定义。”论述如图1.1.1所示。

爱因斯坦又写道:“根据经验,我们进一步假设,

$$\frac{2AB}{t'_A - t_A} = c \quad (1.1.4)$$

是个普适恒量,即在真空中的光速。”

公式(1.1.3)可改写为

$$\frac{t_A + t'_A}{2} = t_B \quad (1.1.5)$$

爱因斯坦就把 A 处的钟的时刻

$$\tilde{t}_A = \frac{t_A + t'_A}{2} \quad (1.1.6)$$

定义为与 B 处的钟的 t_B 同时的时刻。这样,他就建立了校准空间各点的钟,从而在全空间定义统一时间的方法。

(2) 把“光速不变原理”作为一条公理

注意,上面谈的“约定”仅仅是对一个确定的惯性系而言,在一个确定的惯性系中“约定”真空中的光速各向同性而且是一个常数。

光速不变原理不是指这一“约定”,而是指光速在所有惯性系中都是同一个常数 c (即测得的光速与光源相对于观测者的运动速度无关)。在光速不变原理和相对性原理这两条公理的基础之上,爱因斯坦构建起了狭义相对论的大厦。

上述两点表明,光速在相对论中是绝对的,处于绝对核心的地位。不过,我们还需要指出:对“光速的约定”和把“光速不变”视作“原理”(即“公理”)等价于对“时空对称性的约定”。约定“光速各向同性而且是一个常数”相当于约定时间的均匀性、空间的均匀性和各向同性,“光速不变原理”则对应着时空的 Boost 对称性。总之,上述有关光性质的“约定”和“公理”相当于约定“时空”具有庞加莱对称性。

3. 狭义相对论的困难

在享受创建狭义相对论成功所带来的喜悦的同时,爱因斯坦清醒地认识到他的理论存在两个严重的困难:第一个困难是“惯性系无法定义”;第二个困难是“万有引力定律写不成洛伦兹协变的形式”。

(1) 惯性系所引起的困难

抛弃绝对空间导致了一个新的困难:惯性系如何定义? 到哪里去找惯性系?

在牛顿理论中,惯性系被定义为相对于绝对空间静止或作匀速直线运动的参考系。狭义相对论不承认绝对空间,上述定义不再有效。一个尝试代替的办法是利用惯性定律来定义惯性系,即定义惯性定律在其中成立的参考系为惯性系。惯性定律是指,“一个不受外力的物体将保持静止或匀速直线运动的状态不变”。然而,“不受外力”是什么意思? 我们只能说,“不受外力”意味着一个物体能在惯性系中保持静止或匀速直线运动的状态。这种定义方法形成了一个无法解脱的自我循环,我们定义惯性系要用到惯性定律,定义惯性定律的要素又要用到惯性系,这样的定义显然是无用的。

通常的力学书告诉我们,地球参考系近似于一个惯性系,太阳参考系比地球参考系更近似于惯性系,银河参考系又比太阳参考系更接近于惯性系……我们的确可以得到一个比一个更近似于惯性系的参考系,但用这样的方法不仅得不到严格的惯性系,而且也不能告诉我

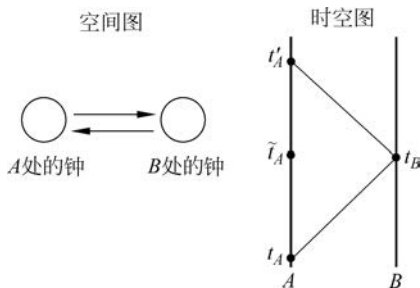


图 1.1.1 惯性系中异地时钟的校准
(空间图与时空图)

们究竟什么是惯性系。另一个想法是,定义一无所有的空间中静止或作匀速直线运动的参考系为惯性系。但是,如果空间一无所有,我们根本无法标记和区分各种运动,任何参考系都建立不起来。

可见,惯性系的定义问题成了狭义相对论的一个基本困难。狭义相对论的整个理论都建立在惯性系的基础上,但是我们却无法定义或找到一个惯性系。我们有了好的理论,却定义不了也找不到它所适用的框架。于是,整个理论好像建立在沙堆上一样。

(2) 万有引力所引起的困难

狭义相对论遇到的第二个困难与万有引力定律有关。爱因斯坦的狭义相对论,把电磁定律和动力学定律都写成了洛伦兹协变的形式,即四维时空的张量方程。然而,他把万有引力定律写成洛伦兹协变形式的任何企图都失败了;该定律无法纳入狭义相对论的框架,似乎与相对性原理矛盾。当时只知道电磁相互作用和万有引力相互作用,其中一种就与相对论不容,这种情况显然不能令人满意。

1.2 等效原理与广义相对性原理

在试图克服狭义相对论两个困难的过程中,爱因斯坦终于抓住了等效原理这把金钥匙。

1. 广义相对性原理

由于无法定义惯性系,狭义相对论遇到了严重困难。爱因斯坦想,既然惯性系无法定义,不如取消它在相对论中的特殊地位,把自己的整个理论置于“任意参考系”的框架中。即,假定相对性原理和光速不变原理对任何参考系都成立,而不仅仅只对惯性系成立;这样,狭义相对性原理被推广为广义相对性原理:

“一切参考系都是平权的,物理定律在任何坐标系下形式都不变,即具有广义协变性。”

光速不变原理适用的范围也从惯性观测者推广到任意观测者:“任意观测者测量的光速都是 c 。”

爱因斯坦指望,基本原理作这样的推广,可以避开定义惯性系的困难,取消惯性系在理论中的特殊地位,而各种物理规律仍能照样写成协变形式。他碰到的首要问题是如何处理惯性力,这种力是惯性系中没有的,但是在非惯性系中却普遍存在。这种力很可能会使物理系统附加新的效应,从而改变物理规律的形式。惯性力有两个特点:

(1) 不起源于物质之间的相互作用,因而没有反作用力;

(2) 惯性力与物质的质量成正比,因此它所拖动物体的加速度与该物体的质量和成分无关。

第一个特点至今仍然使人感到迷惑,第二个特点却使人想到万有引力。引力也与物体的质量成正比,而与物体的成分无关。这种相似性以及伽利略的自由落体实验和马赫对水桶实验的理解,促使爱因斯坦猜想惯性力与引力有相同或相近的本质,因而提出了等效原理。从众多纷乱的现象中,找出反映事物本质的基本原理,正是爱因斯坦的高明之处。

2. 水桶实验与马赫原理

牛顿为了论证绝对空间的存在,设计了一个著名的思想实验:水桶实验。