

广义相对论的确立

方在庆^{1,2}

(1. 华东师范大学历史学系 200241; 2. 中国科学院自然科学史所 100190)

2025年是爱因斯坦(Albert Einstein, 1879~1955)广义相对论诞生110周年。广义相对论被广泛认为是人类认知自然界的最伟大成就之一。正如玻恩(Max Born, 1882~1970)所言,广义相对论“将哲学的深邃、物理学的直观和数学的技艺令人惊叹地结合在一起”^[1]。一般来说,一个新理论的出现往往是由于旧理论在实验上遭遇反例,或是与其他理论不一致。然而,广义相对论的诞生历史似乎修正了这一传统观点。首先,广义相对论的提出并非源于迫切的经验性问题。虽然水星近日点的进动问题曾引起关注,但这一现象并未被普遍视为重大困扰,且当时学术界通过其他方式对其进行了勉强的解释。在此背景下,牛顿引力理论依然稳固,而未出现其他引力理论来挑战其地位。那么,爱因斯坦的广义相对论究竟是基于何种动因而提出的?

广义相对论源于狭义相对论。狭义相对论基于两个基本原理:相对性原理和光速不变原理。提出狭义相对论后,爱因斯坦意识到其局限性,并指出:“狭义相对论在理论上是不完全令人满意的,因为它赋予匀速运动以特殊地位”^[2]。他认为,赋予惯性系特殊地位既在认识论上不合理,也不符合美学原则。因此,爱因斯坦将相对性原理推广至任意参考系,提出了“广义相对性原理”,即“所有参考物体,无论其运动状态如何,描述自然现象时(即表述普遍自然界定律)是等效的”^[3]。

这一扩展并未完全解决问题。在已知的两种力——电磁力和引力——中,电磁学与狭义相对论不冲突,但引力却难以融入其中。根据牛顿的理论,引力是瞬时的超距作用,而光速不变原理要求任何物理效应的传播速度不能超过光速。如何调和两者之间的矛盾,成为爱因斯坦急需解决的难题。

通过思考,爱因斯坦认识到引力与加速度之间的内在联系,为广义相对论的进一步发展奠定了基础。

1907年,爱因斯坦提出了等效原理,进一步推广了相对性原理;1912年,他意识到时空度规的非欧几何性质,进而引入了度规张量;1913年,他与格罗斯曼(Marcel Grossmann, 1878~1936)合作,提出了“纲要理论”;到1915年,他最终完成了场方程的推导。整个过程持续了八年,尽管历经曲折,最终成功的关键在于爱因斯坦与许多人的合作和讨论,尤其是与竞争者希尔伯特(David Hilbert)的互动。在最后阶段,希尔伯特对理论的推动起到了重要作用。如果没有同行的帮助和竞争者的存在,广义相对论的完成可能还会推迟。

在这一理论发展的过程中,爱因斯坦急于通过天文观测验证尚未成熟的理论,甚至不惜自掏腰包。同时,他的个人生活经历了重大变化,从瑞士联邦专利局的二级职员晋升为国际科学界的重要成员,并在第一次世界大战前夕被邀请加入柏林科学界。这一时期,爱因斯坦不仅要应对科学上的挑战,还要应对战争的风暴。他的广义相对论之路正是在这样的复杂背景中展开的。

1. 等效原理的顿悟与广义相对论的萌芽

广义相对论的基石之一是等效原理,它宣称局部引力效应与加速度效应是等价的,即任何自由下落的参考系与非加速参考系在物理实验上无法区分。爱因斯坦于1907年通过一系列思考和思想实验,得出了这一原理的初步结论。他的顿悟过程始于他在伯尔尼专利局的日常工作,尤其是在思考掉

落物体的加速度时。通过设想,如果观察物体在一个大加速的框架中,它将展现出类似引力场的行为,从而导出了等效原理的核心思想。他回忆道:“假如一个人自由落下,他不会感觉到自己的重量。这一简单的思想打动了,并引领我走向引力的研究。”^[4]这个领悟成为他“一生中最快乐的思想”^[2]并开启了广义相对论的长达八年的发展历程。

从伽利略时代开始,人们就认识到引力质量与惯性质量相等,但对其内在机制一直未深入探讨。爱因斯坦认为,物体的相同性质在不同情境下表现为“惯性”或“重量”,并将这一认识与等效原理结合,提出了新的引力观念。

等效原理的一个核心实验设想是:设想一个封闭的升降机在外太空加速向上运动,升降机内部的人会感受到向下的力,源自惯性质量;而如果升降机静止于引力场中,感受到的力则源自引力质量。爱因斯坦认为,惯性质量和引力质量总是相等的,且在封闭的参考系中,无法通过实验判断一个系统是否在加速,还是静止于引力场中。正如他所说:“引力的引入粉碎了惯性系的概念”^[5]。1913年,爱因斯坦在德意志自然科学家和医生协会年会上进一步阐述了等效原理,并通过思想实验强调:加速的实验室与均匀引力场中的物理现象是等价的。换言之,在一个封闭的房间里,无法做实验区分是处于引力场还是加速运动中^[6]。

等效原理的提出为广义相对论的进一步发展奠定了基础,它标志着从牛顿引力学到新思维模式的过渡,即将引力视为时空的弯曲,而非传统的力学作用力。

2. 与格罗斯曼合作:非欧几何的引入

大约在1912年夏,爱因斯坦意识到相对论的数学问题与高斯曲面几何之间的相似性,从而得出结论:引力场不能用标量势描述,必须用十分量的度规张量来表示。这一突破性思路为广义相对论的形成奠定了基础。在此过程中,爱因斯坦受到他的朋友埃伦费斯特(Paul Ehrenfest)提出的“埃伦费斯

特悖论”启发。该悖论原本讨论的是狭义相对论中的刚性圆盘转动问题,表明旋转圆盘由于相对论效应而发生形变,空间不再遵循欧几里得几何的规律,从而暗示了弯曲空间的必要性。

1912年8月,爱因斯坦回到苏黎世联邦工业大学任教,并开始向数学教授格罗斯曼请教相关数学问题。在格罗斯曼的帮助下,爱因斯坦深入学习了张量理论,并掌握了由克里斯托费尔(Elwin Bruno Christoffel, 1829~1900)发起,里奇-库尔巴斯特罗(Gregorio Ricci-Curbastro, 1853~1925)和列维-奇维塔(Tullio Levi-Civita, 1873~1941)等人发展起来的绝对微分学工具。1913年,爱因斯坦与格罗斯曼共同发表了《广义相对论和引力理论纲要》一文,首次尝试结合新的物理理念与数学工具,提出引力场由度规张量描述,引力对物理过程的影响由广义协变方程表述。尽管这篇“纲要理论”与最终的广义相对论在理论框架上有诸多相似之处,但在数学推导和物理验证上仍显不完备。

在1912年10月29日给索末菲的信中,爱因斯坦表示,他对引力问题的研究取得了显著进展,且自己对数学的专注程度前所未有的,认为早期的相对论成果与当前的研究相比“不过是儿戏”。尽管如此,爱因斯坦和格罗斯曼在“纲要理论”中未能解决如转动系与静止系的等价性等关键问题,也未能准确预测水星近日点的进动。然而,这段合作为广义相对论的最终完成奠定了重要基础。

“纲要理论”与两年多后爱因斯坦发布的最终理论相似之处显著:引力场由度规张量表示,引力对物理过程的影响由广义协变方程表达。然而,理论中的若干问题依旧未解,其中包括未能建立起一个广义协变的框架,且无法确定方程是否适用于转动参照系。此时,水星近日点的观测结果与理论预测不符,爱因斯坦的理论也未能得到实验证明。

根据保存下来的“苏黎世日记”,爱因斯坦经常在物理理念与数学推导之间摇摆不定。有时为了保持守恒定律的要求,他会限制坐标系的选择;而为了维护因果性,他又放弃了广义协变性的原则。

尽管如此,爱因斯坦充满信心地认为:“大自然只把狮子的尾巴显露给我们,但我确信无疑,狮子是个庞然大物,尚不能立即全部显露在我们眼前。我们见到的就像叮在狮子身上的虱子所见到的一样。”^[8]

1914年春,爱因斯坦赴柏林工作后与格罗斯曼的合作告一段落。尽管早期合作未能完全解决理论中的问题,爱因斯坦始终对格罗斯曼充满感激。1936年格罗斯曼去世后,爱因斯坦在给他妻子的信中写道:“没有他的帮助,我虽不会死,但也会在精神上崩溃。”他还回忆起“10年之后的狂热合作”。^[2]在爱因斯坦去世前一个月,他还写道与格罗斯曼的合作,说“我需要在自己在世时至少有一次机会来表达我对马尔塞耳·格罗斯曼的感激之情……这个愿望,给了我写这篇……自传草稿的勇气。”^[5]

3. 广泛的学术争论

爱因斯坦的广义相对论的诞生离不开与当时其他科学家的广泛争论与合作。1912年至1915年间,爱因斯坦与德国物理学家亚伯拉罕(Max Abraham, 1875~1922)、米(Gustav Mie, 1869~1957)以及芬兰物理学家诺德斯特勒姆(Gunnar Nordström, 1881~1923)等人,就引力问题展开了深入的交流。

1912年,诺德斯特勒姆提出了一个基于狭义相对论的标量引力理论。1913年6月底,诺德斯特勒姆访问苏黎世时,爱因斯坦与他进行了详细讨论。受此启发,诺德斯特勒姆对自己的理论进行了修订。爱因斯坦在维也纳召开的德意志自然科学家学会第85届年会上,讨论了诺德斯特勒姆的修订理论,并与米、诺德斯特勒姆等人进行了激烈的辩论。爱因斯坦认识到,诺德斯特勒姆的理论是除“纲要理论”之外较为可信的一种选择。尽管如此,他认为该理论无法解释物体的惯性与周围质量的引力效应之间的关系,因此仍不及他自己的“纲要理论”。爱因斯坦指出,唯一能验证这两种理论优劣的方式是通过日食观测,特别是观测那些靠近太阳的星体的光线偏转情况。他期待1914年的日食能为这一问题提供重要证据。^[6]

1914年5月,爱因斯坦与荷兰物理学家福克尔(Adriaan Fokker, 1887~1972)合作,发表了一篇论文,严格遵守广义协变性要求,探讨了诺德斯特勒姆的引力理论。通过绝对微分运算和广义协变性的要求,爱因斯坦及福克尔证明,诺德斯特勒姆的理论实际上只是爱因斯坦-格罗斯曼理论的一个特例,前者不包括光的弯曲,而后者则考虑了光的弯曲效应。^[6]这一结果进一步增强了爱因斯坦对自己理论的信心。

1915年7月,爱因斯坦应邀前往格丁根讲学,在该地做了六次两小时的讲座,向数学家们介绍他的引力理论。这些报告在格丁根学派引发了广泛讨论,并促使一批顶尖数学家开始关注广义相对论。在讲学过程中,爱因斯坦不断完善新的引力场方程。经过数月的深入思考与修正,他于1915年11月向普鲁士科学院递交了四篇论文,逐步推翻了此前的理论假设,并成功解释了水星近日点的进动。这一突破性进展标志着广义相对论的理论框架趋于成熟。

到了1916年,诺德斯特勒姆开始转向广义相对论的研究,并在翌年弃用了自己之前的理论,转而研究爱因斯坦的广义相对论。同年,曾是爱因斯坦“纲要理论”最严厉的批评者之一的米也开始接受并研究广义相对论。由此,爱因斯坦的广义相对论最终取得了广泛的胜利,成为现代物理学的基石。

4. 与希尔伯特的竞争与合作

1915年,爱因斯坦提出了广义相对论的完整方程,这一突破性理论的提出并非仅凭一人之力。与此同时,德国数学家大卫·希尔伯特也在独立研究中得出了类似的方程。爱因斯坦与希尔伯特的关系既是合作也是竞争。尽管两人在数学和物理背景上有所不同,最终爱因斯坦的理论因其深厚的物理基础获得了更广泛的认可,而希尔伯特则对数学和纯理论物理领域产生了深远影响。

爱因斯坦在1915年7月格丁根的讲学,不仅引起了学术界的广泛关注,还吸引了希尔伯特的目

光。作为当时数学界的领军人物,希尔伯特对引力理论的数学结构表现出浓厚兴趣,并迅速投入研究。他凭借在变分法和微分方程领域的深厚造诣,开始从数学角度重新推导广义相对论的场方程。

在 1915 年 11 月,希尔伯特独立地得出了与爱因斯坦相似的场方程,并在 11 月 20 日向格丁根科学院提交了相关论文。这一成果不仅体现了希尔伯特卓越的数学才能,也让他在这场竞赛中几乎与爱因斯坦同步完成了广义相对论的核心方程。

在研究过程中,爱因斯坦和希尔伯特既保持着密切的学术交流,也在无形中展开了激烈竞争。这场竞速促使两位科学家都加快了研究步伐,同时也在数学和物理两方面相互影响和启发。尽管两人的研究路径不同,但最终指向了相似的理论框架,标志着广义相对论理论体系的最终确立。

尽管两者的方程形式相似,爱因斯坦的理论更为清晰且具有物理意义,而希尔伯特则侧重于其数学框架。这导致了科学史上一场关于谁先得到场方程的讨论,尽管希尔伯特本人并未主张优先权。

最初,爱因斯坦的广义相对论在德国物理学界并未获得广泛认可。普朗克和冯·劳厄等人对爱因斯坦的引力理论持怀疑态度。爱因斯坦曾在信中提到,德国物理学家对他的理论大多持否定态度,并且这些年长的学者“没有自由的、不带偏见的眼光”。尽管如此,爱因斯坦并未因此感到沮丧,反而认为同行的批判反而证明了他理论的价值。

在格丁根,爱因斯坦得到了极大的理解与支持,希尔伯特、克莱因、诺特等数学家对他产生了深刻的影响,并在他研究中提供了宝贵的灵感和支持。爱因斯坦在格丁根的成功演讲,使他在此地受到了极高的评价,而希尔伯特也开始积极参与引力理论的研究。

爱因斯坦与希尔伯特的关系并非全然顺利。在爱因斯坦得出最终的场方程后,他发现希尔伯特也得出了类似的结果,但希尔伯特并未在此之前向他说明其研究进展。爱因斯坦对此感到不满,并在信中表露了自己的心情。然而,希尔伯特很快向爱

因斯坦道歉,并解释称自己忘记了爱因斯坦在格丁根的报告。

1915 年 12 月 20 日,爱因斯坦给希尔伯特写信,表示已经克服了内心的不愉快,并愿意继续保持良好的合作关系。他写道:“在你我之间曾经出现过某种不和谐的状况,但我已经完全克服了。”此后,两人之间的隔阂得到消除,希尔伯特还帮助爱因斯坦的助手弗罗因德利希在格丁根大学找到工作。

1916 年 3 月,爱因斯坦访问格丁根大学,住在希尔伯特家中。在后来的岁月中,希尔伯特在格丁根大学的课程中专门讲授了爱因斯坦的广义相对论,并称之为“爱因斯坦的最伟大的成就”。通过这种合作,广义相对论的理论得到了进一步的传播与发展。

5. 广义相对论的实验验证

广义相对论提出后,面临着严峻的实验验证挑战。尽管爱因斯坦的理论在数学上精确且深刻,实际验证的难度却极大。早在 1911 年 6 月 21 日,爱因斯坦便在提交给《物理学纪事》的论文中预言了光在经过太阳附近的引力场时会发生偏转。爱因斯坦预测:“在太阳附近经过的光线将偏转 0.83 弧秒。由于日全食时,太阳附近的恒星可见,因此可以将这一预言与实际观测进行对比。”他同时指出,验证这一理论可能面临技术挑战,但强调如果光的偏转不存在,那将证明这一理论的假设是错误的。^[7]

这一预言激发了年轻天文学家弗罗因德利希(Erwin Freundlich, 1885~1964)的兴趣。遗憾的是,弗罗因德利希计划在 1914 年 8 月 21 日的日全食中进行观测时,第一次世界大战爆发,导致他被俄军俘虏,观测未能进行。幸运的是,这次观测若按计划进行,可能会得出比爱因斯坦预测值更大的偏差,因为爱因斯坦的预言值是 1911 年预测值的两倍。爱因斯坦曾表达过对验证实验的急切希望,并提醒,尽管该理论大胆,但如果光的偏转无法测量出来,那么这些假设就会被证明是错误的。^[8]

随着技术的进步,广义相对论终于在 1919 年获

得了重要的实验证据。英国天文学家爱丁顿(Arthur Eddington)在当年的日全食中进行了关键的观测。他通过观测太阳附近星光的弯曲现象,成功验证了爱因斯坦关于引力透镜效应的预言,为广义相对论提供了强有力的实验证据。

广义相对论的建立,标志着爱因斯坦在数学、物理与哲学领域的一次划时代飞跃。这一理论不仅揭示了引力的几何本质,还彻底改变了人类对时空、物质与运动的理解。通过等效原理、非欧几何和张量分析,爱因斯坦成功将牛顿引力理论推广到强引力场和高速运动的情境,为探索更深层次的宇宙规律奠定了基础。

广义相对论的影响远超爱因斯坦时代。在理论物理领域,它催生了黑洞、引力波和宇宙膨胀模型的诞生,并为现代宇宙学和天体物理学提供了基本框架。爱因斯坦场方程不仅成功解释了水星近日点的进动,还在之后的实验验证中屡屡获胜,最终成为现代物理学的基石之一。

更重要的是,广义相对论在科学哲学上的启示同样深远。它不仅体现了物理学中数学形式与物理现实之间的高度统一,还展现了科学家在未知领域中敢于打破传统、直面质疑的创造精神。这种基于逻辑推演与物理直觉相结合的方法论,深刻影响了后来的科学思维。

爱因斯坦在广义相对论中展现出的物理直觉与数学推演的完美结合,成为现代科学探索的典范。这一理论不仅改变了我们对宇宙的认知,更昭示着科学追求背后的理性与想象力。正如爱因斯坦所言:“想象力比知识更重要,因为知识是有限的,而想象力概括着世界的一切。”在广义相对论的伟大篇章中,这种想象力正是推动人类认知边界不断拓展的不竭动力。

参考文献

- [1] 赫尔内克. 爱因斯坦传[M]. 杨大伟,译. 北京:科学普及出版社, 1979:54.
[2] 派伊斯. 上帝难以捉摸……爱因斯坦的科学与生活[M]. 方在庆,

李勇,等,译. 广州:广东教育出版社,1998:280;204;260.

- [3] 爱因斯坦. 狭义与广义相对论浅说[M]. 杨润殷,译,胡刚复,校. 上海:上海科学技术出版社,1964:51-52.
[4] 爱因斯坦. 我是怎样创造相对论的[M]. 纽卫星,江晓原编. 科学史读本. 上海:上海交通大学出版社,2008:263.
[5] 爱因斯坦. 爱因斯坦文集:第一卷[M]. 许良英,李宝恒,赵中立,等,编译. 北京:商务印书馆,2009:533-534;54.
[6] 爱因斯坦. 爱因斯坦全集:第四卷[M]. 刘辽,主译. 长沙:湖南科学技术出版社,2002: 443-444;455;540-546.
[7] 爱因斯坦. 爱因斯坦全集:第三卷[M]. 戈革,译. 长沙:湖南科学技术出版社,2002:391.
[8] 爱因斯坦. 爱因斯坦全集:第五卷[M]. 范岱年,主译. 长沙:湖南科学技术出版社,2002: 467;556-557.
[9] Stachel J. *Einstein from “B” to “Z”*[M]. Boston: Birkhauser, 2001
[10] Robinson A. *Einstein: a hundred years of relativity*[M]. NY: Harry N Abrams Publisher, 2005.
[11] Norton J. How Einstein found his field equations: 1912-1915 [J]. *Historical Studies in the Physical Sciences*, 1984, 14: 253-315.
[12] Isaksson E. Der finnische Physiker Gunnar Nordström und sein Beitrag zur Entstehung der allgemeinen Relativitätstheorie Albert Einsteins[J]. *NTM-Schriftenreihe für die Geschichte der Naturwissenschaft, Technik und Medizin*, 1985,22:29-52.

