

广义相对论

——纯粹理性思维的巅峰之作

曹则贤[†]

(中国科学院物理研究所 北京 100190)

2015-10-01 收到

[†] email: zxcao@iphy.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20151003

General relativity: the pinnacle of creation by pure thought

CAO Ze-Xian[†]

(Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

时间的脚步是三重的：未来自其中姗姗来迟，
现在箭一般地飞逝，而过去已成永恒……
空间的尺度是三重的：长度不停地向远方绵延，
宽度倾盖无边，深度则直入无底之渊。
——席勒《孔夫子的箴言》¹⁾

天地之义，物理数定……
——施耐庵，罗贯中《水浒传》

摘要 相对论的发展是一个长达300余年的思想历程，在爱因斯坦1915年奠立广义相对论的那一刻达到了顶峰。相对论是纯粹理性思维的胜利，是物理现实的内在和谐与数学表达的形式美学之间完美的相互激励。物理规律的变换不变性是相对论的核心思想。沿着朴素相对论、伽利略相对论经由狭义相对论抵达广义相对论，这一条绵密的思想河流上有最激动人心的关于物理学创造的历史画卷。

关键词 广义相对论，狭义相对论，伽利略相对论，变换，不变性，爱因斯坦

Abstract The development of relativity is a process of creation by thought lasting for more than 300 years, reaching its pinnacle at the moment when Einstein laid the foundation for general relativity in 1915. The theory of relativity, which seeks the invariance under transformation for the physical laws, is a marvelous victory of human's pure mind, an exemplar of mutual excitation between the inner harmony of physical reality and the formal aesthetic of mathematical representation. In the current article the author endeavors to reveal, along the thought flow from the primitive relativity, Galilean relativity to Einstein's generalized relativity via special relativity, a panoramic view of the construction of a pillar of modern physics.

Keywords general relativity, special relativity, Galileo relativity, transformation, invariance, Einstein

1) 原文为 Friedrich Schiller 的作品 *Sprüche des Konfuzius*: Dreifach ist der Schritt der Zeit; Zögernd kommt die Zukunft hergezogen, Pfeilschnell ist das Jetzt entfliegen, Ewig still steht die Vergangenheit ... Dreifach ist des Raumes Maß. Rastlos fort ohn' Unterlaß strebt die Länge fort in's Weite; Endlos gießet sich die Breite; Grundlos senkt die Tiefe sich.

1 引言

1915年11月25日,36岁的爱因斯坦在普鲁士科学院报告了“基于广义相对论对水星近日点运动的解释”^[1],接着在1916年第7期的物理年鉴上正式发表了“广义相对论基础”^[2]一文,对广义相对论作了系统的阐述,并特别地在B部分把发展广义相对论所采用的数学工具以最简单明了的方式(in möglichst einfacher und durchsichtiger Weiser)作了介绍,以免物理学家为了理解广义相对论还要费心去学习那些数学。这标志着广义相对论的诞生。广义相对论是爱因斯坦历经七年切磋琢磨而成的纯粹理性思维之巅峰之作,其采用的数学工具抽象艰涩,其得出的物理结论出人意料,而贯穿其中的创造者的敏锐直觉更让人自叹弗如。在1919年恒星光线经过太阳附近发生弯折的预言被观测证实以后,爱因斯坦一夜之间成了家喻户晓的人物,相对论成了艰深学问的符号,而“爱因斯坦”干脆就是天才的同义词。

爱因斯坦是20世纪最伟大的科学家,和牛顿一样是所有时代最伟大的科学家。在所谓的20世纪物理学两大支柱之中,爱因斯坦独立成就了一个(相对论,包括狭义相对论和广义相对论),并影响和塑造了另一个(量子力学),这个行止笨拙的教授简直就是“纯粹智慧的化身”。人们对爱因斯坦的赞誉从来都不吝文辞,美国《时代周刊》称赞他为天才中的天才,只是通过冥想就能发现宇宙并不是如我们所见的那样。或许杨振宁先生的评价最为专业、中肯:“(爱因斯坦是)一个特立独行的思想者,无畏、独立、富有创造性,而且执着。”^[3,4]

时光荏苒,转眼间广义相对论已面世百年。广义相对论和它的创造者一直在影响物理学甚至数学的发展^[3,4]。无疑地,对广义相对论创立百年最好的纪念是学习它从而能从专业的角度去欣赏它;倘若是能掌握它并用之于研究,对于一个物理学习者来说,那该是怎样的赏心快事。

本文讲述一个不专业的物理学习者对广义相

对论及其创造者的礼赞,内容涉及相对论发展的所有阶段以及爱因斯坦以外的很多伟大学者。不把爱因斯坦置于一堆天才及其伟大创造的背景之上就无法显出爱因斯坦是天才中的天才,重要的是广义相对论也会看似无源之水。沿着朴素的相对论、伽利略的相对论经狭义相对论抵达广义相对论,一路上的智力风景会让人惊讶不已。爱因斯坦工作的特征包括深度、眼界、想象力、执着与独立性^[3,4],如要深刻理解和学习爱因斯坦的这些伟大品质,阅读其著作也许才是正确的途径。

2 朴素的相对论

据说物理学开始于~2600年前,米利都学派的泰勒斯某一天突然领悟到自然(φύσις)是可以认识的,而非总是要简单地把其中发生的一切都归于神的意志。物理学(φυσικά)由此兴起,到开普勒(1571—1630)的时代物理学已经相当成熟,人类通过观察思考获得了相当丰厚的力学、光学和天文学知识。一个值得注意的事实是,人们观察自然现象时多是以自身为参照点的;就关于更广大的宇宙图景来说,地心说是观察者将观察者的脚下作为参照点的自然而然的結果²⁾。

开普勒1601年自第谷手中继承的行星轨道观测数据就是以地球为中心的,若将火星的轨道画出来,大致上如图1所示。对这样的轨道要想给出一个简明的数学描述,太挑战人的数学才能了。将参照点移到太阳上,重新计算的火星轨道看起来则是一个简单多了的闭环。开普勒尝试用卵形线去描述这样的火星轨道,在一番失败以后,他于1605年引入了椭圆轨道的概念,这构成了所谓的开普勒第一定律。注意,开普勒第二定律是1602年就被发现了的。

将一组观测数据换个参照点重新计算,其不言而喻的假设是这并不会带来所关切之现象背后物理规律的改变。若将物理规律写成 $F(x; \lambda) = 0$, λ 代表除位置坐标 x 以外的任何变量,参照点改变对应的物理规律不变性意味着对于任意

2) 对于那时的人类来说,有别的选择吗?

的 x_0 , $F(x-x_0; \lambda)=0$ 成立。这个位置坐标的平移变换对应的不变性, 即空间没有择优的起点, 应该算是最初的、朴素的相对论, 对应佛家智慧的“无去来处”。关于位置坐标的平移变换, 在复杂一些的晶体对称群和伽利略群/洛伦兹群中都是出现的(前者的位移是离散化的有限值, 后者的位移是连续的), 只是很少被特别强调而已。

如果说物理规律相对于观察点移动的不变性有些抽象的话, 放在具体的物理现象中去考察就容易理解的多。比如由等量正、负电荷组成的体系, 其电偶极矩就与参照点, 或曰坐标原点, 的选择无关。

行星轨道之奥秘的破解, 关键的一步在于默认物理规律和物理现实不依赖于观察点的选择。可以理解开普勒构造出行星运行三定律时的兴奋, 他得意地暗示他是那个上帝等了六千年才等到的勘破这个秘密的人, 并说他的书也许要等一个世纪才能等来它的读者^[5]。

3 伽利略相对论

人们在日常生活中还注意到, 某些运动是不易觉察的。我国东汉时期的《尚书纬·考灵曜》中就有句云:“地恒动不止而人不知, 譬如人在大舟中, 闭牖而坐, 舟行而不觉也。”无独有偶, 伽利略在1632年的《关于两个主要世界体系的对话》中描述他的相对性原理时用的也是大船的例子, 不过那船里的人们有更多的主动探索的成分。若船在水面上匀速前行, 船里的人会看到“水自瓶儿中滴出, 鱼在缸中游动, 蝴蝶儿在舱中飞舞, 一切如常”, 也就是说在舱中的人通过对舱内运动的观察无法判断船的动静。此结论对应佛家智慧的“动静等观”(图2)。

伽利略的相对论, 用数学语言来说, 就是变换 $r'=r-vt$; $t'=t$ 不会带来物理规律的变化, 因此我们无从判断我们是在哪样的匀速平移运动中。伽利略的相对论是稍后出现的牛顿力学的相对论。牛顿力学的公理包括: 1)存在一个绝对的

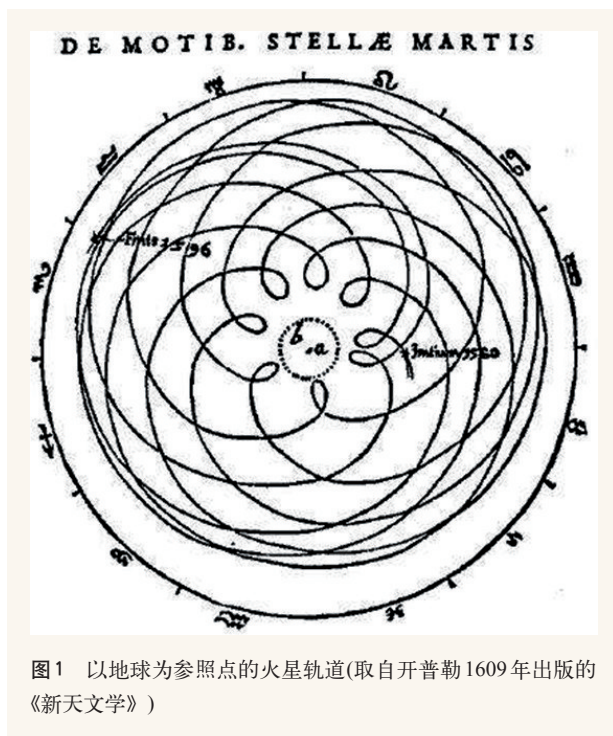


图1 以地球为参照点的火星轨道(取自开普勒1609年出版的《新天文学》)

空间³⁾, 在其中牛顿定律成立。相对于绝对空间作匀速直线运动的参照系是惯性系; 2)所有的惯性系共有个普适的时间。显然, 对于形如 $md^2r/dt^2 = -\nabla\phi(r)$ 的牛顿运动定律, 作伽利略变换后其形式保持不变。伽利略相对论是对哥白尼日心说更强的支持, 因为在运动着的地球上我们的观测数据指向(或者说得自)同样的运动规律。地球是运动的观点就不是那么令人难以接受了。

在伽利略相对论中, 绝对空间的概念被放弃了。在每一个时刻, 都有一个不同的三维欧几里得空间, 用卡当的几何语言, 伽利略时空是一个基空间为 R^1 (时间)纤维为 R^3 (空间)的纤维丛, 不同纤维之间不存在点到点的对应^[6]。伽利略时空中的测地线定义了牛顿的惯性运动; 粒子加到其它粒子上的力是没有时间延迟的, 即它们总在同一个 R^3 空间内; 而物理定律必须是伽利略变换不变的。伽利略相对论中一般性的时间—空间变换可表示为 $x'=Rx+vt+d$, $t'=t+\tau$ ^[4]。注意, 质量出现在牛顿力学/伽利略相对论的讨论中, 但质量是一个孤立的参数。

亚里斯多德的物理学, 开普勒的行星运动定

3) 按照彭罗斯的说法, 牛顿没有纤维丛的概念, 他只好求助于绝对空间。



图2 北京西山大觉寺无量寿殿上的牌匾，上书“动静等观”

律，伽利略的相对论，牛顿力学及万有引力理论，这些还都是离地面不远的物理学。

4 狭义相对论⁵⁾

狭义相对论发展的主线之一是实用的启发。巴黎老城区市政厅与巴黎火车站之间时钟时间的差别对市民来说已是不小的烦恼，而不同火车站之间时钟时间的差别对德军参谋总长来说是会耽误军机大事的，电报为(粗略)协调各火车站的时钟时间提供了技术上的可能⁷⁾。催生狭义相对论的现实三要素，火车、钟表和电报，在19世纪最后几年凑到了一起。注意到机械表都有个调节时间的旋钮，就不难理解同时性是个值得商榷的概念——绝对同时性的概念被质疑了。

狭义相对论发展的另一条主线是对电磁学理论的深入研究。麦克斯韦在引入位移电流的概念后把电磁学的经验定律写成了优美的麦克斯韦方程组，而这个方程组是可以导出波动方程 $\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2}$ 的。这个方程组暗示了电磁波的存在，且此电磁波的传播速度 $V = 1/\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}$ 数值上和

当时测定的光速接近，让人不由得猜测光是否就是电磁波。电磁波后来确实在1887年被人产生出来了，而光也被确信是高频的电磁波。一个不易觉察但却蕴涵一场物理学革命的事实是，电磁波的传播速度，或曰光速，是从公式 $V = 1/\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}$ 计算而来的，它从根源上从来都不涉及任何参照点！对于电磁学的波动方程，欧洲大陆的科学家会象对待任何方程一样研究它的不变变换，1887年德国人 Woldemar Voigt 给出了这个方程的不变变换⁸⁾，即所谓的洛伦兹变换

$x' = (x - vt)/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ ， $t' = (t - xv/c^2)/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ 。这个变换意味着量 $ds^2 = -c^2 dt^2 + dx^2$ 不变和波动方程 $\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2}$ 形式的不变。值得注意的是，连广义相对论的关键概念“张量”也是 Woldemar Voigt 提出的。在洛伦兹变换中， v 是个参数，经历用 v_1 和 v_2 的两次变换等价于用 $v = (v_1 + v_2)/(1 + v_1 v_2/c^2)$ 作一次变换，此即狭义相对论中的速度相加公式，是光速为速度上限的数学基础。狭义相对论的一个重要结果是质能等价关系 $E = mc^2$ ——此公式后来成了狭义相对论的符号⁹⁾。

当时光进入20世纪的前几年，狭义相对论所有元素都已齐备，但是是爱因斯坦将之发展成了基本的物理学原理。爱因斯坦很早就注意到了麦克斯韦电磁理论应用到运动物体上时会显现出某种不对称性——磁体靠近导体和导体靠近磁体的描述有不一致的地方。对这个问题的思考不是青年爱因斯坦作为专利审查员闲来无事的消遣。1880年，爱因斯坦全家移居慕尼黑，其父亲兄弟俩创立了一个电机厂(Elektrotechnische Fabrik)，制造基于直流电技术的电气设备。这个厂子到1894年因为直流技术在对交流技术的竞争中失败

4) 此变换中 R 是描述3D空间转动的矩阵，它和速度 v 、空间平移矢量 d 各有3个自由度，加上时间平移 τ ，此变换共有10个参数。去除匀速运动项，且若平移矢量 d 只取一组线性无关基矢的整数倍线性组合，即 $x' = Rx + n_1 \vec{a}_1 + n_2 \vec{a}_2 + n_3 \vec{a}_3$ ，这就是晶体的空间群。

5) 狭义相对论，一般英文表达为 special relativity，但爱因斯坦也用 restricted relativity 的说法。

而倒闭，但是此时15岁的爱因斯坦已经从这个成长氛围中获得了足够多的电磁学知识和足够深入的思考。他注意到了力学与电磁学之间的不协调，以及经典电磁理论应用到运动物体上时的不对称性。到1905年他的奇迹年，爱因斯坦应已经思考该问题多年了。

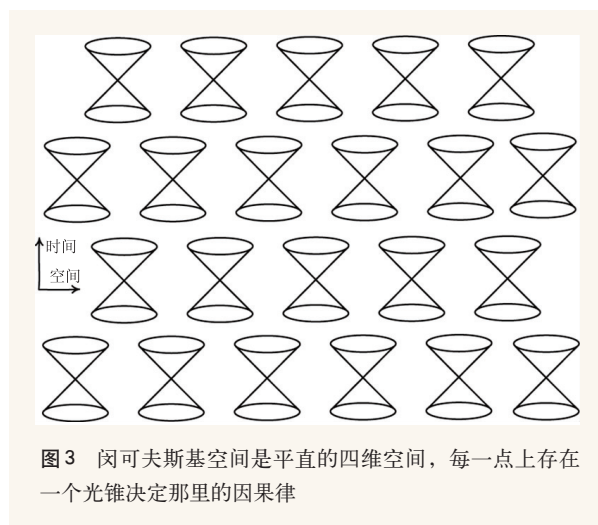
爱因斯坦狭义相对论的关键思想是对绝对同时性的放弃以及宣称相对于任何运动的发射体光速是恒定的且光速是速度的上限^[10]。基于这些观点给狭义相对论或爱因斯坦贴上“革命性”的标签，愚以为太过了些——爱因斯坦在文章中是用相当委婉的语调阐述其观点的。

狭义相对论直到闵可夫斯基引入时空的概念才算完成，狭义相对论的时空是四维的闵可夫斯基空间，这个空间是平直的，在其中空间坐标和时间具有形式上的等价性。绝对时间的概念被放弃，时间不再是时空流型的基空间。由于存在光速作为速度上限，因此每一点可到达的物理空间由一个光锥所决定(图3)。可以把光锥看作是切空间中的结构，那里光锥被称为零锥(null cone)。零锥在切空间中是球形的，由方程 $g_{\mu\nu}v^\mu v^\nu = 0$ 决定，其中 v^μ , v^ν 是切空间中的矢量， $g_{\mu\nu}$ 是闵可夫斯基度规。把有限光速当成基本的物理就是把光锥的结构当成基本的^[6]。零锥决定狭义相对论中的因果律。

由电磁学理论而来的狭义相对论，或者洛伦兹协变性，以及由此导出的时空观念，很容易将电磁学理论(法拉第与麦克斯韦的场论)重新表述。经典的动力学理论也可以加以改造以使其满足洛伦兹协变性^[11, 12]，一个典型的例子是洛伦兹力作用下带电粒子的运动问题。但是，牛顿万有引力力学不能被纳入狭义相对论的框架，爱因斯坦决定将相对论扩展^[6]到引力场。

5 广义相对论

广义相对论的想法源于1907年，当时爱因斯



坦受邀写一篇关于狭义相对论的综述文章。爱因斯坦注意到牛顿理论依赖于绝对同时性(absolute simultaneity)的概念，笔者以为确切的说法应是引力相互作用的即时性问题(instantaneity)。如何改造牛顿力学使其象电动力学呢，如同在电动力学里那样引入时间延迟？但那样的效应很小，且会得出一些错误的结果，比如抛体会因为存在侧向速度其下落距离要短一些。爱因斯坦觉得不能在狭义相对论的框架内解决这个问题。爱因斯坦后来说他之所以发展广义相对论是对狭义相对论偏爱惯性运动不满意，一个从一开始就不偏爱任何运动状态的理论应该更让人满意些。狭义相对论的洛伦兹不变性太窄了，应该构造相对于四维连续统上非线性坐标变换的物理定律不变性。

牛顿引力场中的自由落体感觉不到自己的重量，这一事实给了爱因斯坦以醍醐灌顶似的启发。爱因斯坦觉得引力质量与惯性质量之间的等价性不是偶然的，它应该更有深意，可以基于这个弱等价原理去扩展狭义相对论。进一步地，爱因斯坦认识到匀加速运动和均匀引力是等价的，或者直截了当地说匀加速运动产生一个均匀引力场^[6]——这意味着引力场可以用加速度(数学上为二阶微分形式)描述。加速度意味着速度的不停变化，结合狭义相对论坐标变换中速度描述时空坐标系的转动，显然引力场的相对论必然涉及

6) 因此，广义相对论的英文既有 general relativity 也有 generalized relativity 或者 generalized theory of relativity 的说法。

弯曲时空。还有重要的一点是，马赫的力学批判引导爱因斯坦认为某个运动状态占优是由宇宙中的物质分布造成的，则物质分布应可自其所产生之引力场中的自由落体径迹推知。这样，到1912年夏天爱因斯坦手里有了构成广义相对论的诸多重要元素，他还需要合适的数学工具把思想翻译成方程。

广义协变性要求物理定律在所有的参考框架内应该取相同的数学形式。对非惯性参考框架要求物理定律不变，其实就是要求(二阶微分方程形式的)物理定律对含二阶微分项的变换的某种不变性，即微分同胚协变性⁷⁾。这是一个强的、绝对性的约束。这个不变性的要求以及要构造的引力论本质上是几何的理论决定了张量语言是合适的表达工具。爱因斯坦为此不得不花时间去学习张量的数学(图4)，试着在其上每一点狭义相对论都成立的洛伦兹流型上构造能描述引力的张量场。

即便有了物理思想与数学工具的准备，也并

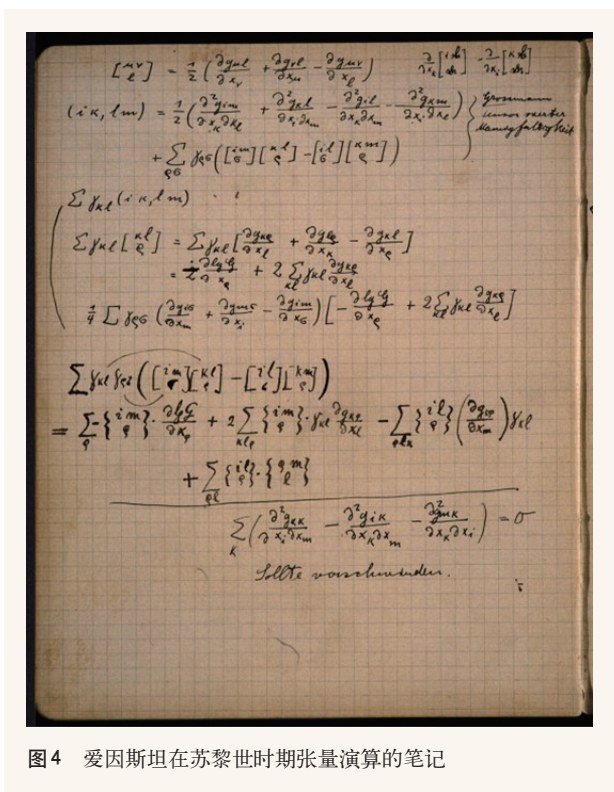


图4 爱因斯坦在苏黎世时期张量演算的笔记

7) 这注定了它的非线性本质?

不存在指向正确的非线性引力场方程的明确路径。爱因斯坦能指望的就是基于哲学思考和对伟大综合理论的向往^[11]去猜测了。从质量密度 ρ 产生的弱静引力场出发，其度规张量的分量 g_{00} 近似地为 $g_{00} \sim -(1+2\phi)$ ，其中 ϕ 是由泊松方程 $\nabla^2 \phi = 4\pi G\rho$ 所决定的牛顿引力势。注意到非相对论性能量密度 $T_{00} \sim \rho$ ，可得到关系 $\nabla^2 g_{00} = -8\pi G T_{00}$ 。这启发了爱因斯坦去猜测对于一般的能量-动量张量 $T_{\mu\nu}$ ，引力场的方程应该取 $G_{\mu\nu} = -8\pi G T_{\mu\nu}$ 的形式。显然张量 $G_{\mu\nu}$ 应该具有度规张量的二阶微分的量纲。考虑到能量-动量张量 $T_{\mu\nu}$ 是对称的且在协变微分的意义上是守恒的等因素，爱因斯坦选取了 $G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu}$ 从而最终得到了广义相对论的场方程 $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} = -8\pi G T_{\mu\nu}$ ^[2, 11, 12]。能量-动量张量成了时空弯曲的起源，因此广义相对论是引力的几何理论。如同在狭义相对论中那样，物体运动沿时空中的测地线进行，广义相对论弯曲时空中的测地线方程为 $\frac{d^2 x^\mu}{d\lambda^2} + \Gamma^\mu_{\rho\sigma} \frac{dx^\rho}{d\lambda} \frac{dx^\sigma}{d\lambda} = 0$ 。用数学的语言，所谓的测地线就是流型上能平行移动其切矢量的曲线。

有趣的是，爱因斯坦在1915年11月报告了其广义相对论场方程的内容，1916年3月正式发表，但是针对此引力场方程的一个解已由 Schwarzschild 在1916年1月就给出了。1917年，爱因斯坦期望从场方程得到一个静态宇宙的解，于是引入了宇宙常数项，由此场方程变成了 $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = -8\pi G T_{\mu\nu}$ 的形式^[13]。

6 爱因斯坦和广义相对论的影响

在广义相对论之前的物理学，即便采用了日心说，也还是离地不远的物理学。天空，或者更遥远的宇宙，是作为叙事背景存在的。1917年爱因斯坦将广义相对论用于模型化宇宙的大尺度结构，引导了引力论与现代宇宙学的

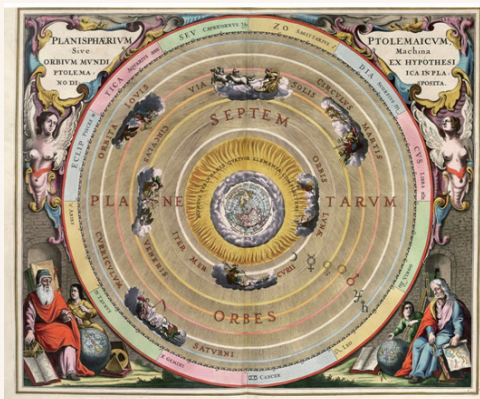


图5 (左)托勒密宇宙体系中天空是遥远的背景。右下角代表天穹的符号 Ω 是量子力学标志性的符号；(右)广义相对论关注宇宙的大尺度结构

发展^[11, 14]，只是有了广义相对论以后，宇宙的大尺度结构才成了物理学研究的对象(图5)。爱因斯坦的广义相对论不只是带来了宇宙图景认识的革命，也为理论物理学带来了独特的研究模式——凭借哲学与数学支撑的理性思维去洞察自然的奥秘。爱因斯坦的思想一直主导着其后基础物理的研究模式。爱因斯坦强调的研究方向，包括物理几何化、非线性(真正的物理定律不可能是线性的也不可能从线性得到)以及关于场之拓扑的考虑(其实就是注重理论架构及物理现实的整体性，反映的是其整体论的哲学)，在过去几十年间得到了长足的进展。广义相对论还促进了几何学的大发展和催生了统一理论的发展。虽然最终的大统一理论尚未成功，但是强—电磁—弱三种相互作用的统一依然是个了不起的进步，为物理学打开了更加广阔的视野。此外，虽然闵可夫斯基是对称性作为物理学主导原则的肇始者，爱因斯坦在构造相对论过程中对对称性原则的推崇以及成功运用让对称性原则更加深入人心，使之成了指导和塑造理论物理的决定性概念或者原则。坐标变换不变性给出了广义相对论，阿贝尔规范对称性给出了电磁学，而非阿贝尔规范对称性给出非阿贝尔规范场，这些都是对称性原则在基础物理领域的胜利。对称性原则加上对称性破缺如今也是凝聚态物理研究的范式。

7 结语

广义相对论是爱因斯坦一个人的辉煌，但广义相对论却不是无源之水。从朴素相对论简单的参照点平移下的不变性，伽利略相对论的关于绝对时空中观察者匀速运动的不变性，到闵可夫斯基空间中的洛伦兹不变性，再到一般赝黎曼流型上二阶微分方程(或者二次型微分形式)的坐标变换不变性，相对论是一条绵密的思想河流。它一定程度上——愚以为——是对(物理学上时空结构与动力学所涉及的)二阶微分方程变换不变性理论的由易到难的探索。爱因斯坦凭一己之力建立起相对论，不光是靠天才的大脑，重要的因素还包括其对电磁学细节的熟悉，德国社会深厚的哲学与数学底蕴对爱因斯坦的熏陶和帮助，前者得益于马赫、康德、莱布尼兹等人，后者得益于格罗斯曼、闵可夫斯基和希尔伯特等人。因此爱因斯坦是幸运的，也从来都是谦虚的，其所追求的物理学之表述都是清晰简单的(图6)。如果把相对论同爱因斯坦的热力学成就相参校，也许对这种哲学、数学与物理学的协同效应在爱因斯坦身上的天才体现会有更深刻的认识。检视爱因斯坦其人其事，笔者有时甚至觉得是否可以这样说，(理论)物理学是得以数学化的自然哲学。此外，爱因斯坦后期把精力的大部分都花在寻求大统一场论的建立上并一直为其作辩护——自从广义相对

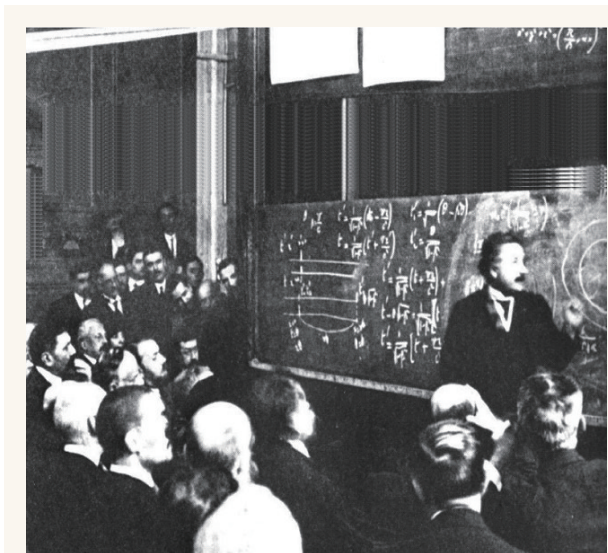


图6 1922年爱因斯坦在法兰西学院讲课

论被创建以来这个问题就一直盘踞在他的脑海里。追求物理理论框架的大统一，是德意志这个

迟来的民族国家追求统一的集体潜意识在物理学上的投射。

广义相对论是纯粹理性思维的巅峰之作。但是，考察爱因斯坦创立广义相对论的过程，无疑会看到爱因斯坦从未放弃把物理实在性作为其理论的锚点。在广义相对论创立之前，爱因斯坦就预言了光线在引力场中的偏转以及光谱在引力场深处的红移^[15]，在广义相对论发表的同时爱因斯坦就用该理论计算了水星近日点的进动。爱因斯坦的引力理论被接受，不只是因为其优雅的数学结构和能够纳入此前的牛顿理论的事实，更在于它始终关切可实证的物理实在。爱因斯坦构建广义相对论时所采取的思维方式，其对数学简单性的追求以及对实在性、整体论哲学的坚持，在一百年后的今天对理论物理——甚至其它自然科学领域——的研究依然具有不可忽视的指导意义。

参考文献

- [1] Einstein A. Erklärung der Perihelbewegung des Merkur aus der allgemeinen Relativitätstheorie (基于广义相对论对水星近日点进动的解释). Sitz. Preuß. Akad. Wiss., 1915. 831—839
- [2] Einstein A. Annalen der Physik, 1916, 354 (7): 769
- [3] Yang Chen-Ning. Physics Today, 1980, (6): 42
- [4] Yang Chen-Ning. Studies in the History of Natural Sciences, 2005, 24: 68
- [5] Kepler J. Gesammelte Werke (全集). Band 18, C.H.Beck(1937—1969)
- [6] Penrose R. The road to reality. Vintage books, 2004
- [7] Galison P. Einstein's Clocks and Poincare's Maps: Empires of Time. W.W. Norton & Company, 2004
- [8] Voigt W. Göttinger Nachrichten, 1887, 7: 41
- [9] Einstein A. Annalen der Physik, 1905, 18 (13): 639
- [10] Einstein A. Annalen der Physik, 1905, 17 (10): 891
- [11] Weinberg S. Gravitation and cosmology: principles and applications of the general theory of relativity. John Wiley & Sons, 1972
- [12] Carroll S. Spacetime and Geometry. Addison Wesley, 2004
- [13] Einstein A. Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie(对广义相对论的宇宙学审视). Sitz. Preuss. Akad. Wiss., 1917. part 1, 142—152
- [14] Misner C W, Thorne K S, Wheeler J A. Gravitation. W. H. Freeman & Company, 1970
- [15] Einstein A. Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik, 1908, 4: 411

致歉声明

2015年第8期《物理》第542页刊登了曹则贤研究员的《物理学咬文嚼字之七十五：内一外》一文。在制图过程中，编辑部出现失误：将549页的图6上下颠倒(网刊已修正)。在此，我们向作者及广大读者表示诚挚歉意。

《物理》编辑部
2015年10月8日