

• 学术评论 •

爱因斯坦的遗产

Einstein's Legacy

曹天予 / CAO Tianyu

(波士顿大学哲学系, 美国波士顿, 999039)
(Philosophy Department, Boston University, Boston, 999039, USA)

呈现在本书的文章(大部分已绝版)是爱因斯坦围绕相对论革命所作的反思, 它们对物理学的根本问题富有深邃的洞见。本书读者将被爱因斯坦关于相对论革命的概念性问题技艺高超的阐述深深吸引: 它的起源, 它那激动人心的思路历程——从牛顿力学、经由麦克斯韦的电动力学、到他自己的狭义相对论和广义相对论。同样引人入胜的是爱因斯坦对物理学基础(foundational)问题的深入探索, 以及在基本(fundamental)物理学的发展进入关键阶段时他富于灵感的飞跃。

但是, 对于那些具有广泛智力兴趣的读者而言, 这本书最引人入胜的特征或许是清晰展示了爱因斯坦关于基本物理学发展的广阔视野。实际上, 他对基本物理学发展的驱动力及其方向的理解触及了当代文化的最深层次。原因有两个。首先, 作为相对论革命和量子论革命的结果, 现行的基本物理学是当代物理学界的概念基石。因此, 它的进一步发展要求对我

们描述的物理世界图像的基础进行根本性的改变。

其次, 爱因斯坦的理解以其特殊的基础思维(foundational thinking)方式其特征。它广泛涉及物理学(以及一般科学)、物理学哲学(以及一般科学哲学)中的各种问题。特别是, 爱因斯坦的基础思维是立足于他在哲学上(包括认识论、方法论和本体论的基本问题, 我们将在下面看到)的独特而复杂的立场。实际上, 爱因斯坦对涉及这些领域的问题的观点有效地塑造了20世纪这些领域智力生活的主流。在新世纪, 尤其是当前, 情况仍然如此。由于相对论革命和量子论革命的看似不可调和的结果, 迫切需要和强烈希望拥有一种相互协调的世界观。

本书读者会对爱因斯坦极为认真地对待哲学印象深刻。关于物理学基础问题的哲学思索, 沿着赞成或反对以马赫(Mach)、牛顿、康德和庞加莱(Poincare)所代表的学派的思路,

收稿日期: 2021年12月29日

作者简介: 曹天予(1942-)男, 美国波士顿大学哲学系教授, 研究方向为科学哲学和科学史、物理学哲学、认知哲学等。

Email: tycao@bu.edu

*本文是作者为Minkowski Institute Press 2021年4月出版的新书*Albert Einstein, Relativity: Meaning and Consequences for Modern Physics and for our Understanding of the World*所写的引言。该书收录了爱因斯坦本人的一本书*The Meaning of Relativity*和他的六篇论文“The Principle of Relativity and its Implications in Modern Physics”“Notes on the Origin of the General Theory of Relativity”“Non-Euclidean Geometry and Physics”“The Problem of Space, Ether and the Field in Physics”“On the Method of Theoretical Physics”“Physics and Reality”。这些文章是爱因斯坦对自己理论的解释以及他对物理与世界的看法。(此文由曹南燕译)

影响他对物理学的看法,也直接引导了他的物理研究。爱因斯坦将哲学直接并实质性地纳入物理学的做法已经形成了一种模式。20世纪20年代开创性的物理学家,诸如玻尔、玻恩、海森堡、德布罗意、玻姆、惠勒和彭罗斯,无论他们自己的哲学偏好如何,都有意识地遵循了这种模式。

爱因斯坦的所有思考都凝结在他对物理实在(physical reality)概念以及对关于未来更深层次的物理实在概念的远见卓识中。那是比相对论革命和量子论革命所揭示的层次更深的层次。对于爱因斯坦来说,物理实在是物理学研究人员试图把握的最终目标。尽管这种揭示需要人类的努力,包括经验的积累、创造性的想象力和猜想、精心设计的测试以及许多其它方面,但实在本身独立于人类的活动。实际上,爱因斯坦坚持认为,实在既制约物理学理论,也为其发展提供条件。当然,爱因斯坦的物理实在概念是物理学家之间以及哲学家之间激烈辩论的题目。但不管怎样,为了欣赏辩论的深刻和精妙之处,最好还是首先了解爱因斯坦的实际立场,以及什么样的经验和理念在起作用、哪些东西诱导并支持了他的立场。对此,本书呈现的文本为这一努力提供了良好的切入点。

一、基础思维

“基础”是爱因斯坦一生始终专注思考的几个关键概念之一。由爱因斯坦始创并引入物理学界的基础思维,意味着在某种抽象层面上看待物理学。它旨在帮助研究人员以有序的、有层次的和统一的方式借助于基础概念(例如空间、时间、质点,以及场、力和相互作用)去理解外部世界。它意味着以一种特定的方式来看待物理学理论的历史、逻辑结构和方法论。

从基础的视角来看,物理学史上最重要的是其基础的发展。对于爱因斯坦而言,牛顿力学不能作为物理学的基础。因为其概念支柱,绝对空间和绝对时间,与光-电磁现象的新经验不相容;所以无法支持对此现象的恰当理解。作为物理学的基础,狭义相对论不得被广义

相对论取代。因为前者的基石,即惯性参照系,太狭窄了,无法接纳涉及非惯性运动和引力这样更普遍的物理现象;所以无法为其作为物理学基础的特权地位提供理据。然而,广义相对论不能接纳量子概念,因而它作为物理学基础的地位在创建之时就受到挑战。于是,从基础的视角来看,物理学的进一步发展需要弄明白广义相对论和量子论两者的基础,并探索怎样协调两者看似不可调和的基础。

从分类学上来考虑,爱因斯坦的基础思维使他能区分原理性(principled)物理学与建构性(constructive)物理学。前者具有明确定义的逻辑基础,而后者则是前者原理的应用。这是对物理学理论间类别差异的清晰认识,而且明显赞赏前者作为后者的基础。根据爱因斯坦的说法,这种区分有历史特色并在不断演化。原理性物理学中的原理可能是从更基本的原理派生而来的。例如,伽利略的相对性原理只是狭义相对论中相对性原理的一个极限情况:当光速被认为是无限时,后者可以推导出前者。

就物理学理论的结构而言,爱因斯坦的基础思维势必需要一个三方组合图式:(1)一个包括基本实体、基本概念和概念框架在内的基础,其中各种基本范畴间的关系由公理体系组织并受基本原则约束。(2)从基础推导出的定理和定律。(3)从定理和定律推导出的可观察的结果。第二方很容易理解。第三方揭示了爱因斯坦对某种经验论,或更强一点,实在论的终极承诺。建构物理学理论最困难的是要找到一个坚实、合理和有效的基础。

为此,爱因斯坦拒绝了所有现存的进路:牛顿自称的归纳主义、康德的先验论和庞加莱的约定论。他自己的进路诉诸于各种启发原则(heuristics)的引导,从而倾向于某种可作新康德主义和各种其它解读的建构论。这一建构论立场自然地将爱因斯坦引向假设-演绎法,并成为其最著名的倡导者。假设-演绎法是20世纪“经验论”科学哲学的中心论题之一。证实主义和证伪主义都由此出发,沿着新康德主义路线建造其大厦。同时也可以理解,它们两者都求助于爱因斯坦的权威来支持自己的立

场。

二、启发原则和基础

爱因斯坦非常重视某些原理在推动物理学向前发展中的启发能力。举一个例子，伽利略的相对性原理在经典力学现象领域得到了证明，但不适用于光学领域。正如迈克尔逊-莫利实验所表明的，光学领域的相对性原理只有在用洛伦兹协变公式表达时才有意义。但经典力学的相对性原理用洛伦兹协变公式时却不成立。面对这种情况，爱因斯坦建议应将相对性原理视为普遍有效的原理。所有现象，无论是经典力学的还是光学的（电磁的），都应遵守这一原理。在普遍化的相对性原理的引导下，爱因斯坦必须摒弃牛顿力学的基础，绝对空间和绝对时间，并为物理学创建新的基础。根据新的基础，正如闵可夫斯基（Minkowski）明确表达的那样，没有单独存在的空间和时间，唯一的实在是它们的统一，即时空。通过洛伦兹变换，空间和时间作为时空的投影相互关联。因此，爱因斯坦声称，相对性原理是一种启发原则，它使物理学家能够把旧的基础改造成新的基础。

爱因斯坦一生采用了一套启发原则来指导他关于理论构建和评估的基础思维，指导他对未来物理学进一步发展的深思与探索。除了作为狭义相对论基础的相对性原理和真空中光速不变公设（postulate）外，其中最著名的是作为广义相对论基础的等效（equivalence）原理、广义协变性（general covariance）和马赫原理（Mach's Principle）。这一套启发原则中还包理论构建和理论评估的更一般原则，例如数学化原则、统一（unification）原理、简单性、自洽性（consistent）以及与其它既有理论相融贯（coherence）的原则。

某些启发原则（或公设），例如光速不变和等效原理，比其他启发原则具有更明确的经验起源。但是，爱因斯坦对启发原则最强调的是其直观、推测和虚构的特征。它们不是来自对经验的抽象。作为人类智力的自由创造，它

们既不是客观实在本身的直接表像，也不因任何逻辑或先验的必要性由人类心智来选定。爱因斯坦一再声称，启发原则作为虚构并非总是有效。它们是可变的，其变化将导致物理学基础的更替。

从本书的第一篇文章（1922年）到最后篇文章（1936年）（以及爱因斯坦后来一些其它文章）中所显示的马赫原理地位的变化表明了这一点。众所周知，马赫关于物理学机械论观点的认识论批判对爱因斯坦有着深远影响。马赫原理是爱因斯坦自1918年以来打造并使用的一个术语，它表明没有独立存在的空间，而只有存在于本体论意义上的原初物体之间的（运动学和动力学）空间关系的整体，从而为创建广义相对论提供了启发性的指导。在广义相对论的原始版本中，物质（有重量的物体和电磁场）通过度规张量场（ $g_{\mu\nu}$ -场）确定时空几何（时-空关系）。这就将马赫版本与莱布尼兹版本的关系主义空间观区分开来。但是，真空解的发现，否定了马赫原理作为（确定时空关系的）几何的实在性的构成条件。这需要从物本体转变到场本体，这是时空物理学本体论基础的深刻转变。马赫原理在此之后仍然有意义，但仅作为对某些类型的宇宙学模型的特定要求，而不再起本体论上的构成性作用。

然而，从当代视角，从更深的意义和不同的表述来看，至少有两个理由使得马赫原理的吸引力难以抗拒。首先，如果空间（时间）真如马赫原理的精义所指，只是对物理自由度的动力学行为和运动学关系的编码，那么任何物理理论都不应假设任何固定的（平直的或其它形式的）背景空间（时间）。现在马赫原理的这一精义已经获得了一个新名称，即背景独立原理（background independence）。几乎所有研究人员都将其视为构建自洽的量子引力理论的指导原则或先决条件。

第二个原因深刻得多，涉及对场-源关系及其对基本物理学进一步发展的含义的理解。根据马赫原理所引导的广义相对论，描述引力作用的 $g_{\mu\nu}$ 场（度规张量）以源（能量-动量张量 $T_{\mu\nu}$ ）为条件并被其决定。如果源所涉及

的属性多于能量-动量,例如自旋,或者其行为本质上是量子的而不是经典的,该怎么办?那时人们可以用具有更丰富的几何特征(例如,扭力(torsion))的更复杂的中介场来推广引力;也可以沿着玻尔和罗森菲尔德(Rosenfeld)在1930年代初期首先描述、近年来又由圈量子引力(the loop quantum gravity)学派继续研究的路子来量子化中介场(或量子化几何)。当然,无源(source-less)解的存在表明,没有马赫原理的引导,也可以遵循这些思路来推广广义相对论(如在圈量子引力学派那里)。但很显然,有马赫原理的引导比没有好,因为无源案例只能是一种理想化的、不切实际的情况。

等效原理是引导爱因斯坦踏上广义相对论之旅的另一重要的启发原则。它源于惯性质量等于重力质量的观察。然而,正如爱因斯坦所做的那样,这一观察被提升为普遍原理:惯性效应的结构起源于引力场,而不是相对空间。也就是说,惯性是由引力场构成的(constituted),因而只是引力的特殊情况。爱因斯坦思维方式的特点是,不承认经验观察和启发原则之间有逻辑上的联系,比如从经验通过抽象推出原则。启发原则是他的发明或“自由选择的约定(convention)”,满足了他将相对性原理从惯性参照系扩展到任意参照系的深切愿望。

当然,相对性原理才是爱因斯坦用以启动相对论革命的一整套启发原则的核心。相对性原理对他来说不可抗拒。在他整个职业生涯中,不管发生了什么,相对性原理总是在指引着他。根据等效原理,如果参照系间的差异都由引力场引起,而每个参照系都锚定在一个相对空间中,那么没有哪个参照系能享有任何特权。这样,相对性原理完全满足。爱因斯坦自称理清等效原理是他“一生中最快乐的想法”,因为它将相对性原理从惯性参照系的特殊情况提升到任意参照系的普遍情况。

涉及引力时,相对性原理表示惯性和引力之间的区分依赖于参照系。一些情况可能只有纯粹的引力,也可能只有纯粹的惯性而没有引力,或可能两者皆有。不同的表观取决于对参

照系的不同选择。但是,根据相对性原理,它们本质上是同一实在的不同表观,有同一个建构动因(constitutive agent)引力场。

人们可能会注意到,相对性原理只在运动学上,而不是在动力学上,才有充分的意义,而运动学上允许的某些情况可能无法在动力学上实现。尽管如此,但相对性原理的启发性价值主要在于其物理内容。作为物理实在独立于描述框架的一种表述,相对性原理有两个本体论涵义。首先,时空点独立于框架,仅当它们编码物理自由度或物理事件的点型重合(point-coincidence)时,才有内在的个性。这样,与马赫原理的精神一致,这些时空点没有独立的存在,而只是由物理事件构成的本体上的次级存在。其次,表达事件之间关系的方程或自然定律必须是框架独立或微分同胚协变(diffeomorphism-covariant)的。从逻辑上讲,相对性原理直接导致了爱因斯坦的另一启发原则:广义协变性。

人们对广义协变性有一个广为流行的错误观念。根据这种误解,广义相对论是由广义协变指导、构建并表现其特征的。这种观点的困难在于,(具有绝对空间和绝对时间背景的)牛顿力学也可以用广义协变的方法来表述。实际上,是(由相对性原理和背景独立表达的)广义相对论的物理内容,要求其方程必须广义协变。但是,广义协变性本身并不以相对性原理或背景独立为前提,也不是相对性原理或背景独立的同义词。如上所述,违反背景独立的公式也可以具有广义协变性。

尽管就物理内容而言,广义协变不如相对性原理和背景独立丰富。但是,作为对方程形式的限制,广义协变对物理学的核心提供了比相对性原理和背景独立更为新颖的洞见,更别对方程本身的意义了。广义协变洞察力的核心与对称性概念有关。

从数学上讲,广义相对论中的广义协变是通过微分同胚协变来实现的。它表示引力定律(方程)是独立于它在其中生效并被描述的参照框架中的位置。对位置的这种独立性可以理解为平移对称性的局域版本。但其全域版本,

则因其立足于时空流形同质性假设，而被受背景独立约束的广义相对论所拒绝。为了描述引力在时空流形上的整体行为，人们必须找到一种以协变方式从一个局域框架移动到另一局域框架的方法。解决方案是在相关方程中引入协变导数。协变导数不同于普通导数之处，是它包含了一个附加项。在广义相对论的情况下，该附加项与传递引力相互作用的度规张量场（ $g_{\mu\nu}$ -场）有关。

广义协变性观念带来的一个后果是引入 $g_{\mu\nu}$ -场（以及所有建构这些“几何结构”的物理场）。这是一个重大发展。从设定（携带能量-动量的）物理自由度的引力相互作用有局域对称性出发，这些（以各种化身出现的）建构性的物理场，既是传递相互作用时的物理介质（medium），同时也规定了时空几何关系。于是，作为广义马赫原理的化身，这些场成了构成时空几何关系的物理动因（爱因斯坦曾称其为马赫以太）。这就为广义相对论的几何解释提供了概念基础。根据几何解释，满足局域平移对称性的引力相互作用由几何结构传递，因此可由后者来表达。

通过探索不同的几何结构，即那些源自不同于编码在黎曼几何中的局域平移的对称性的几何结构，几何解释为广义相对论的继续扩展和普遍化打开了大门。为理解引力的更多方面，人们已经探索过各种编码局域化了的旋转对称性、庞加莱对称性、标度（scale）对称性和保形（conformal）对称性的几何。这些工作很多都是推测性的。但至少有一种情况好像不无道理。卡当（Cartan）把黎曼几何扩展到包括扭力，并以之用来探讨由携带自旋而不是携带能量-动量的源自由度产生的引力相互作用的一些新问题。

该研究计划还可以再向前推进一步。如果对称性（局域平移对称性以及上面提到的各种扩展形式）是量子源（quantum sources）自由度而非经典相互作用的对称性，该怎么办？与玻尔和罗森菲尔德于1931年提出的著名并极具说服力的论证——即电子的量子处理决定了对中介电磁场也得作量子处理——的思路相一

致，有人提出，中介场和由之构成的几何结构，其本性是量子的，因此必须以量子方式来处理。这为量子引力开辟了一条道路，并为量子几何奠定了基础。

这一思路的微妙之处来自引力的非线性特征。非线性意味着中介自由度的自相互作用，并使有关的方程能有无源解。也就是说，我们可以有一种中介而没有被中介的东西，这里说的是，类似于电磁场本身的纯引力场。只有在假设广义协变或微分同胚协变或引力相互作用的局域平移对称时，纯引力场作为一种抽象才有可能。但当人们直接对纯引力进行量子化时，就无法诉诸玻尔-罗森菲尔德的量子源论证来证明其量子化的合理性。唯一的理由就是它合乎我们的需要。但合乎需要不能保证其实在性：如果引力实际上就是一个经典现象，那为什么要把它量子化？显然，这是比玻尔-罗森菲尔德的论证弱得多的论据。然而，把源包括进来时，必须考虑其自旋和除能量-动量以外的其它特性。量子引力势必更加复杂，相应的对称性也势必扩大。几何将具有更丰富的结构，而且其量子化将远远超出（仅对由能量-动量产生的引力作用的局部平移对称性编码的）黎曼几何的量子化。因此，从广义协变和广义相对论的几何解释的视角来看，如果人们认真地对待玻尔-罗森菲尔德的论证，那么量子引力问题必然要求推广引力概念以及由之在时空流形上建构的几何结构。

量子源的引进也在另一个方向扩展了广义协变。上面讨论的对称性都与框架相关，表达了定律在其中表述的框架对其位置、方向和在时空流形上的其它特征的独立性，即所谓的外部对称性。当对称性与框架无关，而是表达所研究系统的量子态定律的独立性时，那就不会涉及引力和时空流形的几何结构。然而，由广义协变激发的想法（主要是那些有关对称性和由此经由协变导数而引入的中介场的想法）极富建设性，并很快导致了规范不变性（gauge invariance）的想法。众所周知，规范不变性是基本物理学领域非常强大和高效的启发性原则。最初，它在量子电动力学中得到应用。自

1950年代以来,其应用范围已扩展到基本物理学的其它领域,并很快就成为粒子物理学中标准模型和时空物理学中引力的规范理论新框架的支柱。与其它进路(圈引力和弦引力)相比,引力的规范理论是一种极有前途的量子引力进路。

爱因斯坦本人并未直接参与规范不变性和引力规范理论的系统阐述。但如上所述,相对性原理和广义协变的物理内容及其含义为规范不变性和引力规范理论提供了理论依据。规范不变性的两个最重要的创始者魏尔和泡利都在其职业生涯初期对广义相对论进行过深入研究,从而获得了关于规范不变性的关键灵感。

三、数学化和基础

爱因斯坦非常重视广义协变性-对称性-“广义相对论的几何解释”在推广广义相对论中的启发作用,进而把这种重视扩展到对物理学整体的数学化,并把后者提升为指导他理论建构的另一条启发原则。

对于爱因斯坦来说,数学不仅仅是计算。更确切地说,它是物理学基础的关键。要恰当地理解基础概念,必须用适当的数学工具对之作出精确的表述。爱因斯坦经常引用的一个例子是张量计算,它因其内蕴的协变性和不变量体现了相对性原理和广义协变性。更重要的是,爱因斯坦非常重视物理学基础的数学化,以至于他认为,相关的数学探索可以激发对物理学新基础的探索。他在数学引导下建立统一场论的努力失败了,但在这些努力背后的理念依然活着,并一直受到基础研究人员的高度重视。

四、启发原则和方法论

爱因斯坦认为基本物理学方法的特征是,从基础假设到其经验验证,要经过一系列中间环节。在爱因斯坦看来,这个特征源自构建现代物理学基础的启发原则的特色。更具体地说,正如我们刚才讨论过的,在其它启发原则(其中最重要的是统一性、简单性和自洽性)的引

导下,数学化使基础变得越来越抽象,因此它们与经验检测之间的距离也就不可避免地越来越长。

五、基本物理学的进展

爱因斯坦在本书的文章中熟练地回溯了基本物理学的进展。从牛顿力学(配备有质量、绝对空间、绝对时间以及欧几里得几何学)开始,中间经过一个不确定的时期,在此期间,物理学家们想尝试(机械的或洛伦兹式的)以太观念,到狭义相对论(在没有以太背景的闵可夫斯基时空中处理电磁学,展示庞加莱对称性并满足相应的几何原理),最后到达广义相对论。

爱因斯坦认为,基本物理学进化的根本驱动力,是出现了关于难以理解现象的新经验。19世纪一个恰当的例子,就是有关光学现象的新经验的积累。当新经验与现有基础框架之间脱节时,解决的办法是用一套新的基础框架来接纳新经验。因此,对爱因斯坦来说,基本物理学的进化,意味着基础框架的进化。

用新基础框架替换旧基础框架可以分步实现。先通过对旧基础框架的经验批判性考察,揭示其缺乏经验支持的虚构本质,从而拒绝现存基础框架的(唯理论或先验论)固定性。马赫批判性考察牛顿的基础框架对爱因斯坦拒绝这一框架有极大帮助。但是,根据爱因斯坦对探索基础的启发性方式,新的基础框架本质上不能从经验通过归纳和抽象直接推导出来。因此,作为第二步,需要由启发性原则引导的推测性构建。第三步,必须使用假设-演绎方法通过经验检测对新构建的基础框架进行论证和验证。

对于爱因斯坦来说,基本物理学的进化,不是经验的积累或物理概念渐增变化,而是涉及有一定方向的概念革命(用另一套基础框架替换原有基础框架)。方向由他的启发原则指导,其中最重要的是统一原理。统一原理要求,从基础框架的进化中出现的、并得以存活的任何新基础框架,都应能处理尽可能多的不同领

域的现象，最好是所有外部世界中的已知现象。因此，爱因斯坦看到的基本物理学的进化，表现为一系列有其独特基础框架的理论，它们能处理外部世界或物理实在越来越多的方面和层次。爱因斯坦认为，对外部世界不断增长的把握这一定向演变，就是基本物理学的进步；它的最终目标是把握外部世界本身。

六、爱因斯坦的哲学

用传统的标签，很难表征爱因斯坦（从根本上引导其基础思维）的哲学思想，或对其分类。然而，有三条思路非常显著，它们的交织使该复合体成为一种新颖而独特的爱因斯坦式哲学。这一哲学立场开创了科学哲学中的新潮流，尽管其适当的标签迄今付诸阙如。

第一条当然是马赫的经验批判主义。它拒绝唯理论和超验的先验论，将爱因斯坦从牛顿物理观中解放出来；后者的奠基概念是质量、绝对空间和绝对时间、以及可能的超距作用。这条思路的主旨是要揭示，被认为是先验的东西实际上具有经验起源，其有效性必须接受关于外部世界的经验的核查。爱因斯坦对这条思路的应用，超出了马赫的原初范围。这使他得出了反对时空起任何首要作用的“背景独立”概念，并用场本体取代物质本体。

爱因斯坦对马赫经验批判主义的采用，并没有像许多马赫主义者那样，成为实证主义或操作主义的受害者。这里的关键是，第二条思路，即新康德主义建构论，起了解毒作用。马赫路线摧毁了牛顿的基础。通过对经验的抽象所作的归纳，爱因斯坦无法找到任何新的基础。而他对基础更替所采用的启发-数学进路，与建构论却极为合拍。这一进路引起的耐人寻味的问题，涉及这样建构出来的基础的本性。它是物理实在的表述还是人类虚构的约定？

在处理这个问题时，爱因斯坦的思想中出现了一条新的思路，即实在论路线。它成形于和庞加莱的约定论哲学在思想上（而非针对个人）的交锋。庞加莱的约定论哲学涉及科学（几何学、一般数学和数学物理学）与外部世界之

间的复杂关系，其特殊表现形式之一是他的几何哲学。而这正是爱因斯坦的主要关切。

爱因斯坦和庞加莱在很多问题上存在共识。两人都赞赏数学作为决定性的建构工具所发挥的重要作用，这些作用包括对物理学基础的清晰表达、公式化、控制和理解，还包括推动新基础的建构以取代已经过时的基础。两人都同意数学实体和关于它们的陈述，例如坐标、绝对或相对空间，或更一般的几何，具有经验起源。它们的含义必须由物理学来界定，而其有效性则必须由对外部世界的经验来检验。

然而，他们在一个问题上意见分歧：关于科学与对外部世界的经验之间关系的本性问题。这种分歧对理解科学具有深远的哲学意义。

更具体地说，庞加莱将这种关系视为两者间全局的、整体的对应；而爱因斯坦却认为这种对应更为细致化。对于庞加莱而言，在成功的物理学理论中得到验证的，只是理论中用数学方程表达的一定经验领域中的某些整体结构特征；而并不是那些在理论中设定为承载这些特色的载体的、假设的、不可观察实体的真实存在。这一结构主义的科学观蕴含了对理论实体的约定论观点。以太或电磁场的存在与否，只是个方便问题，与真假无关。

在应用于数学物理时，这种整体-约定论科学观的一个必然推论是，能被确认或拒绝的，只是数学-物理复合体的整体性真理（与实在的全局对应），而不是数学和物理学的各别真理。例如，当对光和引力的物理理解的变化，需要修改欧几里得几何时，庞加莱的著名回答是，我们总是可以通过修改相应的物理定律来保留欧几里得几何学，从而使数学物理表述体系与外部世界的经验的整体对应得以保持。对于庞加莱而言，采用哪种几何作为有效几何，欧几里得的还是黎曼的，只是哪个用起来方便的问题。尽管这样做不得不付出修正物理学的代价。

爱因斯坦坚决拒绝庞加莱关于数学物理（特别是几何学）的整体论-约定论观点。他在本书的一些文章中反复说，如果不能假设刚体关系，则欧几里得几何是错误的；而黎曼几何

的真伪是可以经验检查的。某种假设如被外部世界的新经验验证,在物理理论中,如光和引力,就应该被认真地当作确定的真理。如果几何框架不能胜任新物理学,则应该修改的是几何而不是新物理学。后者,在被更新的经验挑战之前,由于其确定的真理地位,不应被任意操纵以保全不适当的几何。

庞加莱的观点具有灵活性的优点,留下足够的余地,在需要时重新调整理论结构各部分(启发性原则、数学框架和物理定律)之间的关系,以适应新经验。然而,爱因斯坦无法接受的是放弃物理学、几何学以至普遍地放弃科学本身的真理地位。这一放弃切断了科学与实在之间的联系。

爱因斯坦自己的观点更为复杂。首先,他认为,科学理论(诸如物理和数学)及其组成部分(实体、结构和定律)为一方,实在为另一方,两者之间存在着细致的对应关系。这一细致对应预设世界上存在着理论实体的指称对象,因此断言每一理论实体的各别真理地位。这和实在论立场完全一致。其次,他对基础形成和基础替换的启发性进路,似乎背叛了对约定论思想的根深蒂固的偏爱,从而吊诡地避开了理论基础(以及所有单独或集体地建立在理论基础上的理论实体)与实在之间僵化的、无可置疑的对应关系。

面对这一明显的悖论,爱因斯坦诉诸层次思维(level-thinking)。尽管他没有系统阐明解决方案,但从本书的文章中可以看出解决方案的所有基本要素。如果建立在基础框架F1上的理论T1被外部世界对其含义的回应所证实,那么T1是正确的。如果以替代F1的另一个基础框架F2为基础的另一个理论T2也以相同的方式得到验证,则T2也是正确的。也就是说,T1和T2都是正确的,但是由不同基础框架表述其特征的不同理论层次的正确程度是不同的。在爱因斯坦自己的话语和实践中,应将T1(例如牛顿的引力理论)作为T2(广义相对论)的极限。T2是包含T1的更为简单、一致和统一的理论。

层次思维暗含的一个形而上学预设,是将

外部世界视为无限丰富,并且其丰富的种类结构(kind-structures)是按等级(hierarchical)方式组织起来的。本体论上,某一层次种类结构因更深层次种类结构的内部动力过程而从中涌现。认识论上,外部世界的等级结构,是通过概念革命或基础框架替换,从一种理论走向更深层理论的科学发展,而被逐步揭示。这样,实在论精神保留住了,而科学史则被视为追逐这一永不停步的实在论宏图的不懈努力;科学史中的这一努力,借助于启发-约定式(heuristic-conventional)的探索和建构日益深入的基础框架、通过发展日益深入、简化和统一的理论结构,来反映世界的统一的等级结构。基础框架的每一层次都必须通过世界对其含义的回应来验证。因此,爱因斯坦科学哲学中的约定因素只是实现其总的实在论抱负的附属的中间手段。最终说来,这些约定因素得受外部世界的控制(检验)。这是一个不打折扣的实在论承诺。

七、爱因斯坦的物理实在概念

爱因斯坦有关物理实在的概念,有一个显著特征,即实在依赖于基础框架。从某一基础框架看来,只有那些满足该框架的要求和约束的东西,才是实在的。这与我们上面刚刚讨论过的他的层次思维、建构论和科学实在论的等级化版本是一致的。由此看来,爱因斯坦对基础框架的反思,深深影响了他的实在概念,并为此后的物理哲学,特别是时空物理哲学和量子物理哲学提供了概念支柱。

例如,就时空物理而言,爱因斯坦在本书的文章中,先对历史情况进行了透彻的考察,然后再去审视广义相对论的情况。爱因斯坦指出,只有当人们从牛顿基础框架的机械观出发,认定存在刚体及其通过超距作用而运动时,才会认为质量、绝对空间和绝对时间是实在的。在狭义相对论之前的过渡期,对光电现象的研究和对超距作用的拒绝,使得人们认为与绝对空间吻合的以太是实在的。或者像后来在狭义相对论中那样,用定义为时空特性或时空函数

的电磁场取代了以太。爱因斯坦意识到，场的实在性以时空流形的连续性为前提，并不时猜测一种连续性被离散性所取代的代数物理的可能性。

在狭义相对论的基础框架中，基于光速恒定有限而对超距作用的拒绝，逻辑上意味着同时性和距离都依赖于所涉及系统的运动状态。狭义相对论基础框架所施加的这一约束，使绝对距离在其中定义的绝对时间和绝对空间的实在性不再被认可。只有在闵可夫斯基时空中的、作为一种不变量的四维间隔，才是实在的。爱因斯坦意识到，为电磁场提供基础的闵可夫斯基绝对时空，其实在性源自惯性框架的特权地位，而后者则以狭义相对论的基础框架所接受的刚体概念为前提。一旦广义相对论对狭义相对论的基础框架进行了彻底的修改，闵可夫斯基时空的实在地位就受到了严重损害。

对于广义相对论，其基础框架施加的最重要约束有三条：马赫原理，连续性和局域平移对称性。正如我们前面所讨论的，马赫原理意味着本体论上的原初实体是物理自由度的总体，而不是先存的空间。爱因斯坦认为，物理自由度的点型重合构成了事件或点。点及其之间关系的总体，被编码为本体论上次级实体时空流形。连续性是一种形而上的独立原理，其直观基础是不间断的因果链和不存在超距作用。连续性反过来又成为广义相对论的一种特殊对称性（即局域平移对称性）的依据；后者，正如我们前面讨论过的那样，具体体现了相对性原理、广义协变和背景独立。

对称性在广义相对论主要指关系约束而不是冗余。通过协变公式表达的对称性约束的满足，要求纳入有关相互作用的中介场。当对称性应用于坐标框架时，如在广义相对论中那样，相应的场被称为动力学几何场：因为除了传递并经历引力相互作用外，它还指定了（黎曼或其它）几何关系和结构，并赋予时空流形一个特定的几何结构。当对称性与坐标系无关，而只涉及所研究的物理系统的状态时，相应的场失去本义上的几何含意，只是充当传递有关相互作用的媒介，并获得一个新名称，即规范场。

由此，爱因斯坦对“时空物理的实在是什么？”这一问题的回答可以概括如下。时空实在基于物理自由度或物理事件的点型重合；这些重合建构了点，而其整体则通过动力学几何场构造成时空流形；这些场的存在，被携带能量-动量的物理自由度间的引力作用必须满足的对称约束所要求和确保。这里主要的建构动因是中介几何场。定义位置的坐标和区间这类不变量，只能通过度规张量场才有意义。方法论上，这就决定了，时空物理的所有研究，都必须专注于对场的探索。因而，爱因斯坦对时空物理的划时代贡献，是启动了他所说的场论纲领。

在物理实在问题上，爱因斯坦在量子物理领域内的贡献，性质上很不一样。他没有像在当时时空物理中所做的那样，为该领域的研究打下坚实的基础。他的贡献在于探寻未来发展的可能途径，主要是通过质疑和挑战主流（哥本哈根）学派关于“何为奠基实在的概念”或“量子领域根本不存在实在”的断言。

对有关问题的理解，迄今一团乱麻。但是，作为量子物理基础框架的核心，原子和亚原子世界的量子本性被视为是给定的。其经验起源是对能量子的经过推论的观察。这些观察意味着能量子具有基本的离散性或量子跃迁，以及由此产生的（观察或算子的不可对易关系。更多启发性（但得到经验支持）原则包括诸如二像性、不确定性和互补性。更为猜想性和有争议的（启发性原则），则集中在（描述量子系统状态的）波函数的几率解释上。几率解释为叠加、纠缠、非局域性和不可分离性（或整体性）原则提供了基础，使个体因果概念成为不可能，并且拒绝了任何实体或性质在测量之前的真实存在。

爱因斯坦对哥本哈根学派以几率为核心的基础框架的质疑，其出发点是他对什么才是真实存在的形而上学预设。他认为，真实的存在，在测量之前和之后，必须是确定的而不是几率的存在。由于哥本哈根学派的基础框架中不存在满足这一要求的東西，爱因斯坦挑战道，它充其量只是一个不完备的框架，更完备的基础

框架有待发展。

把量子本性看作物理世界的某个特定层次上的既定真理,爱因斯坦在本书的几个地方问道,这对基于连续时空流形的场论会有什么影响?他对代数物理的推测,似乎预期了代数量子场论。但是,在代数场论的理论体系中,场的观念已降为习用(conventional)手段,而不是代表实在的要素。因此,这不可能是爱因斯坦想要的。

对爱因斯坦提问动机的更为恰当的理解,似乎是将其看作为在基本物理学领域召唤一个比广义相对论更深层次的新基础框架。在这个基础框架中,量子假设应该是不可或缺的部分,

而它与连续时空的关系,也必须得到逻辑一致的澄清。也就是说,爱因斯坦呼唤对量子引力的自洽的基础框架进行研究。一个幼稚的想法是,这可以沿着几何场量子化或规范理论的路子来进行。但是,传统的量子化程序决定性地依赖闵可夫斯基度规的预设,否则就无法定义对易关系。因此量子化概念本身必须彻底修改,以便把量子化了的东西,通过粗粒化极限过程,还原为经典度规,即具有确定存在而不是处于不确定的叠加的几率状态的度规。这个目标受到高度重视,但使命尚未完成。

[责任编辑 李斌]