

郝刘祥, 科学哲学与科学史专家。现任中国科学院大学哲学系主任、教授, 中国科学院哲学研究所负责人。主要研究方向为科学思想史、科学革命和物理学哲学。

科学进步的动力学模式

郝刘祥^{1,2}

1. 中国科学院大学人文学院哲学系, 北京 100049
2. 中国科学院哲学研究所, 北京 100049

摘要 检讨了关于科学进步的3种主流哲学理论的成功与不足, 进而基于科学进步问题与现代科学起源问题之间的密切关联, 系统梳理了三代科学史家关于17世纪科学革命之本质的阐释。以弗洛里斯·科恩关于17世纪科学革命的运动学解释为基础, 并参照蒯因关于科学知识的静态结构分析, 提出了科学进步的动力学模式, 即: 科学进步是信念、理论和经验三者之间从相互脱节或相互抵触走向相互关联并且相互适应的动态调整过程。进一步, 将此动力学模式与库恩的范式理论和斯特雷文斯的知识机器理论进行了比较, 表明该模式不仅可以涵盖这2个理论, 而且可以解释这2个理论所不能解释的科学进步与革命。

关键词 信念; 理论; 经验; 科学进步; 科学革命; 动力学模式

科学进步的模式, 一直是科学哲学中的热门话题, 其核心是要回答: 为什么现代科学自创立之后能够持续进步? 迄今关于这个问题的解答, 有3种主流理论, 即波普尔的证伪主义^[1-2]、库恩的范式理论^[3-4]和斯特雷文斯(Michael Strevens)的知识机器

理论^[5]。但这3种理论在自洽性和解释力方面都存在一定的局限。

本文中, 笔者主张, 要想理解科学进步的模式, 首先得理解17世纪科学革命的本质, 即现代科学是如何诞生于17世纪的西欧的。科学史界关于17

收稿日期: 2023-09-19; 修回日期: 2024-01-02

引用格式: 郝刘祥. 科学进步的动力学模式[J]. 科技导报, 2024, 42(10): 27-39; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2023.09.01426

世纪科学革命的研究,迄今已历三代^[6-7],代表性的成果有柯瓦雷的“自然的数学化”解释^[8-9]、韦斯特福尔的“两大潮流的互动”解释^[10-11]和弗洛里斯·科恩(Floris Cohen)的“3种认识方式的融合”解释^[12]。本文的目标,是通过合理吸收3位科学哲学家和三代科学史家的理论,为科学进步和科学革命提供一个更有解释力的动力学模式。动力学的含义是指,该模式旨在揭示科学进步的内驱动力和调适机制。

第1节将逐一反思3种主流的科学哲学理论,分析他们的成功与不足之处。如迈克尔逊-莫雷实验并未证伪以太假说;分子生物学革命也没有发生库恩意义上的反常、危机与范式转换。斯特雷文斯的知识机器理论在解释力方面确实大大胜过证伪理论和范式理论,但它将科学发现过程完全排除在外。

第2节转向三代科学史家的科学革命观,探讨编史学理论的进步对于科学哲学的意义。其实,库恩的范式理论很大程度上得益于柯瓦雷的编史纲领。20世纪70年代,韦斯特福尔继承和发展了柯瓦雷的编史纲领,试图用毕达哥拉斯-柏拉图主义和机械论-微粒论这2条思想主线来诠释现代科学的诞生。到21世纪,弗洛里斯·科恩为17世纪的科学革命提出了一个更全面的解释:现代科学是3种不同的认识世界的方式,即数学认识方式、哲学认识方式和实验认识方式的逐步融合。

第3节以编史学理论的最新进展为基础,并参照蒯因(W. V. O. Quine)关于科学知识整体结构的分析^[13],提出科学进步的动力学模式,即科学进步是信念、理论与经验三者之间从相互脱节走向相互协调的动态调适过程,并根据这一模式来解释历史上的科学进步与科学革命。蒯因所分析的是当代科学知识的静态(static)结构,弗洛里斯·科恩所描述的是17世纪科学革命的运动(kinematic)轨迹,本文所探讨的则是重大科学进步的动态(dynamic)机制。

最后一节比较了所提出的动力学模式与既有的科学哲学理论之间的联系与区别,表明该模式不仅可以覆盖库恩的范式和斯特雷文斯的知识机器,而且能够解释这2种理论所不能解释的科学进步

与革命。特别是,区分了信念与理论本身。信念是科学家个体层面的底层观念,而理论则是科学共同体可以检验并共享的知识内容。这一区分不仅可以避免相对主义的陷阱,而且可以将科学发现与科学检验视为同等重要的进步环节。

1 3种科学哲学理论

在波普尔的证伪主义、库恩的范式理论和斯特雷文斯的知识机器理论这3种科学哲学理论中,前两者是国内科学哲学界非常熟悉的,故只简要分析。根据波普尔的证伪主义,科学进步的基本模式是猜想与反驳之间的循环:通过猜想而提出的理论命题被判决定性实验证伪之后,人们被迫提出新的猜想,并接受新的反驳,科学理论由此获得进步。

证伪主义的困难在于,证伪并不比证实容易。洪谦^[14]先生就曾指出:“在科学命题的可确定性中,可证实性和可证伪性只能作为特例来看待。”造成这一局面的主要原因是,实验检验的不是单个假说,而是一组假说的合取。英国哲学家艾耶尔(A. J. Ayer)对此说得非常明白:一个陈述有认知意义,当且仅当这个陈述和其他辅助假说合取时,能够推导出观察命题,并且这些可观察命题不能单从辅助假说推出^[15]。用以下公式表示

$$H \wedge A \rightarrow \{O_1, O_2, \dots, O_n\}$$

式中, O_i 是观察命题, A 是辅助假说, H 是待检验的假说。这意味着,判决性试验几乎不存在。

科学史上这样的事例非常多。19世纪中叶,关于以太是否被介质所拖曳,就有2种对立的主张。菲涅尔主张,以太部分被介质(流水)所拖曳,据此他得出流水中的光速公式。1859年,斐索的实验结果与此公式符合得很好,似乎证伪了以太不被介质(流水或地球)所拖曳的假设。现在知道,这根本不是一个判决性实验,因为静止以太的存在这个辅助假说是错的。

另一种情况是,当观察结果与理论假说相冲突时,人们可以发明辅助假说(包括特设性假说)来挽救现有的理论。例如,迈克尔逊-莫雷实验的结果,否定了以太漂移的二阶效应,但洛伦兹通过“洛

伦兹收缩”这一辅助假说挽救了以太的存在。

还有一种情况,即当实验结果与现有理论不符时,鉴于现有理论的巨大成功,人们干脆对此置之不理。例如,1859年勒维耶发现水星近日点43角秒/百年的进动,似乎证伪了牛顿的引力理论,但绝大部分科学家就把这个结果“晾”在那里。这就引导我们进入库恩的理论,即只有严重的或大量的反常才会造成危机。

库恩所谓的“科学革命的结构”,即科学理论演变和更替的基本模式:常规科学→反常与危机→科学革命→常规科学。根据这一模式,常规科学是在范式指导下的解谜活动;常规科学的发展会导致反常,严重的反常导致危机;危机中会诞生新的范式,科学革命是新旧范式的转换。

范式理论的局限主要集中在3点:范式的强制性问题,范式的不可通约性问题,范式理论的解释力不足问题。

1) 范式的强制性问题。库恩用范式来定义科学共同体,从而实现了科学思想的社会还原,这使得该理论有滑入相对主义泥潭的危险。真实的科学共同体,从来不会信奉单一的范式。一位引力理论专家,在接受广义相对论的同时,也会接受牛顿的万有引力理论,此外,还会关注量子引力理论的发展。换言之,主流的范式虽然具有强大的影响力,但并不具备强制力。

2) 范式的不可通约性问题。学界谈论已有很多,笔者仅强调一下戴维森(Donald Davidson)^[16]的观点,即库恩的范式理论是不自洽的。库恩的理论一方面否认独立于范式的经验事实,另一方面又承认“反常”,这意味着存在一个与任何范式都无关的中立世界。

3) 范式理论解释力不足的问题。不妨直接引用哈金(Ian Hacking)的论述^[4]:“首先需要注意,库恩在这里所谈的并非17世纪的那场科学革命。它与库恩假定其结构的那场革命相去甚远。的确,在《结构》发表前不久,库恩曾提出过存在“第二次科学革命”,它发生于19世纪早期,全部新的领域都得以数学化。热学、光学、电学和磁学都获得了各自的范式,之前一团混乱的现象得以理解。这场科

学革命在历史上恰好与我们所称的工业革命并肩而行,无可争议地成为我们今天身处其中的现代技术科学世界的起点。然而,与第一次科学革命一样,这一次革命也没有显示出如《结构》中所述的科学革命的‘结构’。”

事实上,库恩的范式理论也不能解释进化论革命、遗传学革命、分子生物学革命、狭义相对论革命、广义相对论革命以及热大爆炸宇宙学的兴起,因为这些革命都不是来自既有理论与经验之间的冲突。真正从“反常与危机”中诞生的新范式,大概只有拉瓦锡的氧化还原理论和20世纪的量子力学。尽管如此,库恩理论的价值还是不容低估的。首先,库恩的理论至少能解释一部分科学革命;其二,库恩揭示了常规科学发展的意义,即常规科学的发展必然会导致科学革命;其三,库恩强调了美学和形而上学因素在科学进步中的重要影响。

库恩理论的相对主义倾向,在斯特雷文斯的知识机器理论中得到了克服。斯特雷文斯重新回到经验主义传统,而发展出了一种更加精致的经验主义。像逻辑经验主义者一样,斯特雷文斯区分了发现的过程和确证的过程,前者是科学家个人的事,后者是科学共同体的事。科学共同体遵循一条“铁律”(iron rule),即一个理论不管多么优美或多么深刻,都必须而且仅仅服从经验证据的约束。科学理论追求的是对世界的“浅层解释”(shallow explanation),而不是传统形而上学所要求的“深层解释”。牛顿的名言“我不杜撰假说”(hypotheses non fingo)就是最好的例证:引力确实存在,这就够了;至于它到底是什么,不做假说。

关于铁律,斯特雷文斯提出了2个富有洞见的概念,即“第谷原则”(Tychoic principle)和“培根趋同”(Baconian convergence)。第谷原则指的是,“宇宙的奥秘存在于精微的结构、几乎不可分辨的细节,只有那些最灵敏、精巧和昂贵的仪器才能探测到的模式之中”^[15]。斯特雷文斯之所以将此命名为第谷原则,是因为第谷是一位极其敏锐的观察家,同时他的精确观察结果导致了新天文学——开普勒天文学——的诞生。开普勒本人的陈述可以为证^[17]:“感谢神的恩赐,让我们有了第谷这位最勤奋

的观测者,他的观测结果表明托勒密的火星模型存在8弧分误差。我们相信这是假说带来的错误,因此让我们致力于此,以最终发现天体运动的真正形式。……这8弧分是不允许忽略的,它将引导我们走上革新整个天文学的道路。”

培根趋同的意思是,“只要我们以理论的解释力为向导,经验检验终将从相互竞争的理论中筛选出真理”^[5]。举例来说,16世纪下半叶,行星天文学有3种不同的理论,即托勒密体系、第谷体系和哥白尼体系。到该世纪末,欧洲天文学家普遍选择了哥白尼理论,因为第谷对超新星和彗星的观察(图1和图2)^[18],摧毁了人们对天界不变和水晶天球的信念。

知识机器理论并未追求对科学革命的完整解释,其主要缺陷就是只考虑确证环节,而未考虑发现环节。不考虑发现环节,自然体现不出美学、形而上学以及深层解释在科学进步中的重大意义。审美因素在科学发现中的意义,主要体现为对理论的简单性与自洽性的追求。1956年狄拉克(Paul Dirac)在访问莫斯科大学时,曾在黑板上写下:“物理定律必须具有数学美”(A physical law must possess mathematical beauty)。科学史上不少重大进

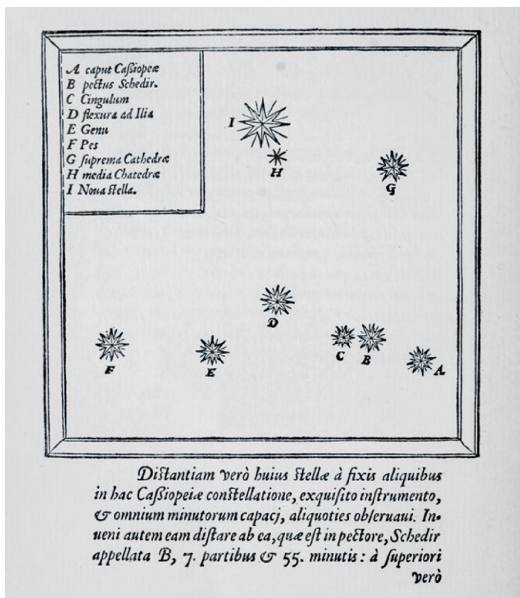


图1 第谷绘制的仙后座(Cassiopeia)星图,显示了1572年超新星I的位置

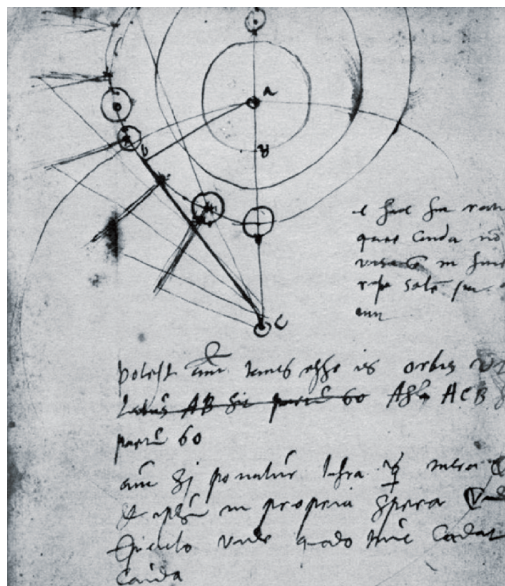
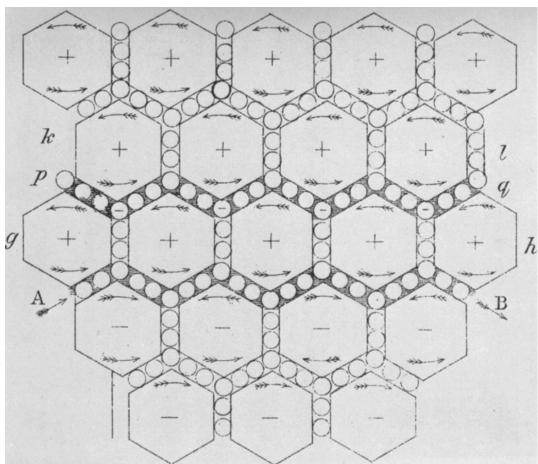


图2 第谷关于1577年彗星的观察笔记,表明彗星来自比月亮远得多的地方

步都来自对形式美的追求。例如,哥白尼提出日心学说的主要动机,就是因为托勒密的偏心轮和对位点模型不符合柏拉图的完美正圆假设。爱因斯坦创立狭义相对论,首先来自他相信麦克斯韦-洛伦兹的电动力学应该在所有惯性系中皆成立。狄拉克的相对论量子力学,可谓协调量子力学和狭义相对论的神来之笔。

形而上学因素在科学进步中的意义,主要体现为对深层解释的追求,即对理论实体的实在性和可理解性的追求。这种追求的效果,只有从长时段的科学发展才能看得出来。还是从牛顿的“我不杜撰假说”说起。引力是一种超距作用力,从哲学角度来看这是一种神秘的、不可接受的魔力。牛顿的著作出版后,莱布尼兹就对牛顿不解释引力的原因“大为震惊”。在他看来,这原因是“以太涡旋”(aethereal vortex)。1864年,麦克斯韦在建立了电磁的场理论后,也曾推测引力应该像电磁作用一样,可以归结为以太介质的作用^[19](图3^[20])。最终,爱因斯坦通过创立广义相对论,成功地将牛顿引力理论转变成一个场理论。从1687年《原理》的出版,到1915年广义相对论的创立,在长达3个多世纪的时间内,科学家始终没有放弃对引力本质的深层解释。



带电的惰轮粒子从A向B流动,带动上下层的以太分子涡旋(用六边形表示)分别做逆时针和顺时针转动(图中下层涡旋转动的方向有误,正确的方向应是顺时针,这里引用的原图),涡旋转动的角速度表示磁场强度按此模型,电场为水平方向,磁场为里外方向,电磁作用的传播为垂直方向

图3 麦克斯韦的以太模型

2 三代编史学理论

第1节的分析表明,现有的科学进步理论,由于各自的局限性,都存在解释力不足的问题。笔者认为,要想完整地解释科学进步,必须深入认识17世纪科学革命的本质。为此,笔者转向科学革命的编史学研究。在科学史界,科学革命特指17世纪的科学革命,本节将循此惯例来使用这一术语。

对科学革命的开创性研究,要归功于柯瓦雷。通过对伽利略的研究,柯瓦雷提出,科学革命的前提是世界观的变革,即用欧几里得的数学空间来取代亚里士多德的物理空间。他将这一转变概括为“自然的数学化”^[18, 21]:“(科学革命的)2个特征是:(1)秩序井然的宇宙(the Cosmos)的瓦解,因此基于这个概念的所有考虑也随之从科学中消失;(2)空间的几何化,即用各向同性的、抽象的欧几里得几何学空间来代替前伽利略物理学中性质各异的、具体的世界-空间概念。这2个特征可以归结为自然的数学化(几何化)以及科学的数学化(几何化)。”

稍后,柯瓦雷意识到,单单用数学柏拉图主义

来解释现代物理学的兴起是不足的。通过对牛顿的研究,他进而提出,科学革命是柏拉图主义和微粒论哲学共同作用的结果^[22]:“在牛顿那里,自然之书是用微粒符号和微粒语言写成的,这一点同玻义尔一样;然而,把他们结合在一起并赋予整本书意义的句法却纯粹是数学的,这一点又同伽利略和笛卡尔一样。”

柯瓦雷关于科学革命的论点,启发了第二代科学史家对科学革命的理解。在《近代科学的建构:机械论与力学》中,韦斯特福尔提出,科学革命是柏拉图-毕达哥拉斯主义和机械论哲学这两大潮流互动的结果。在该书序言中,他写道^[10-11]:“两大主题主导着17世纪的科学革命——柏拉图-毕达哥拉斯主义和机械论哲学。柏拉图-毕达哥拉斯主义以几何术语来看待自然,确信宇宙是按照数学秩序原理建造的;机械论哲学则设想自然是一部巨大的机器,并试图解释后面隐藏的机制。……这两大传统并非总能相配协调。毕达哥拉斯主义传统通过秩序来处理现象,满足于发现精确的数学描述,并把这种描述理解为对宇宙终极结构的表达。而机械论哲学关心的则是个别现象的因果解释。……机械论哲学家一般来说力图从自然哲学中消除一切晦暗不明的痕迹,表明自然现象是由不可见的机制引起的,这种机制完全类似于人们日常生活中所熟知的那些机制。这两种思想运动追求不同的目标,往往相互冲突。……对机械因果关系的解释往往与精确描述之路相反,科学革命的充分实现要求解决这2种主导倾向之间的张力。”

韦斯特福尔的解释无疑加深了人们对科学革命本质的理解,但不足也是非常明显的。首先,机械论哲学的含义过于宽泛,既包括笛卡尔的机械论,也包括波义尔的微粒论。其二,在这种解释中,实验处于从属地位,要么从属于数学柏拉图主义,要么从属于机械论哲学,这显然不能令人信服。

关于现代科学为什么兴起于欧洲,爱因斯坦有一个著名的解释。事件的起因是,美国陆军上校斯威策(Switzer J S)退役后选择在斯坦福大学攻读历史学位,并选修了汉学家芮沃寿(Wright A F)的阅读课。当时课上讨论的一个话题就是“李约瑟问

题”，于是他写信征求爱因斯坦的意见。爱因斯坦在1953年4月23日的回信中写道^[7, 23]：“西方科学的发展基于2项伟大的成就——希腊哲学家发明的形式逻辑系统(体现在欧几里得几何学中)和(文艺复兴时期)发现的通过系统实验来揭示因果关系的可能性。在我看来，中国贤哲未能迈出这2步，用不着惊讶。令人惊讶的是，这些发现竟然被做出来了。”

爱因斯坦的直觉理解表明，对科学革命的合理解释，必须将形式演绎系统和系统化实验考虑在内。这就是接下来要考察的第三代史学家的编史纲领，即弗洛里斯·科恩的“3种认识方式的融合”的解释。

弗洛里斯·科恩认为，在现代科学兴起之前，存在3种“认识自然的方式”或“自然知识的形式”(form der naturerkenntnis)，即亚历山大里亚的认识方式(抽象的-数学的方式)、雅典的认识方式(自然哲学的方式)和文艺复兴时期兴起的欧洲的认识方式(系统的观察和实验方式)。其中，哲学家的方式是通过建立第一性原理，然后应用演绎的方法，自上而下地解释自然现象，代表性的成就有古希腊的原子论、柏拉图的共相理论和亚里士多德的自然哲学。数学家的方式是利用数学模型来表征自然现象，代表性的成就有希腊的行星天文学、阿基米德的静力学以及几何光学。观察和实验的方式实际上来自于工程师传统，这种认识方式强调，真理并不能从理智中导出，而是要到精确的观察和实验中去寻找^[24]。

基于这一纲领，弗洛里斯·科恩认为，这3种方式的融合是逐步完成的。伽利略和开普勒将哲学认识方式引入数学认识方式之中，强调他们的工作符合柏拉图-毕达哥拉斯的哲学思想。笛卡尔则将数学认识方式引入哲学认识方式之中，强调微粒的运动必须服从机械论的数学法则，特别是惯性定律、碰撞定律和离心力定理这3个运动定律^[12]。哲学认识方式与实验认识方式的融合，首先要归功于波义尔和胡克^[12]。17世纪还没有“科学家”这个词，所以伽利略称自己作“数学家-哲学家”，波义尔则称自己是“实验哲学家”。3种认识方式的完美融

合，最终是牛顿完成的。牛顿不仅是哲学家、数学家(微积分的发明者)和实验家(如著名的牛顿环实验)，更是将这3种认识方式融为一体的真正意义上的“科学家”，他的书名《自然哲学的数学原理》即昭示了这一点。

弗洛里斯·科恩关于科学革命的解释，是迄今关于现代科学兴起的最自然、最合理的解释。根据这一解释，现代科学本质上是本体论承诺、抽象化表征和系统性实验的尽可能完美的结合。这一结合首次发生在17世纪，其结果就是现代科学的兴起。

3 科学进步的动力学模式

正如柯瓦雷的科学革命观启发了库恩的范式理论一样，弗洛里斯·科恩的解释也为探讨科学进步的动力学模式带来了启示。按照弗洛里斯·科恩的解释，牛顿力学是哲学认识方式、数学认识方式和实验认识方式的结合，其中哲学认识方式确立了理论的本体论基础，即该理论所承诺的基本存在物(包括绝对时空、微粒物质和超距相互作用)；数学认识方式是建立理论的抽象表征；实验认识方式则提供了理论的经验支撑。

弗洛里斯·科恩的解释，与蒯因关于科学知识结构的刻画可谓不谋而合。蒯因认为，科学知识的边缘是经验陈述，主体是理论陈述，内核则是本体论承诺。唯一的区别是，蒯因用理论知识取代了弗洛里斯·科恩的数学形式的知识。理论陈述当然不限于数学命题。不同的学科，理论表征的方式是不同的。物理学主要采用数学表征，化学和生物学理论通常采用模型表征。化学反应方程式、分子结构模型、进化谱系树、基因图谱等，都是关于理论实体之间结构关系的抽象模型。

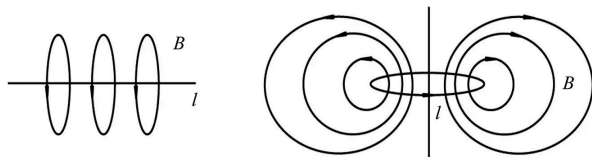
参照蒯因的术语，弗洛里斯·科恩的解释可以表述为：17世纪科学革命的本质，就是信念(本体论承诺，即人们所相信的基本存在，特别是超越感官经验的形而上学实体)、理论与经验三者之间从相互脱节走向相互协调的过程。信念是科学理论的基石，而经验则是科学理论的约束条件。任何科

学理论都要求最大程度地协调信念、理论和经验。17世纪科学革命的独特意义在于,信念、理论和经验三者首次组成了一个牢不可分的三角结构。

这个结构一经形成,科学便具有了自我修正、自我演进的内在动力。这是因为,由于信念的多元性、经验的拓展性以及理论表征的等价性,三者之间的协调状态总会被打破。后续的科学革命,即来自三者之间的内在张力。信念、理论和经验三者之中任意两者的不相干或不一致,都会引发科学进步甚至科学革命。

信念、理论和经验的相对独立性,特别是信念的多元性和经验的拓展性,是造成三者之间内在张力的根本原因。经验探索的相对独立性,在意外的实验发现(如布朗运动和宇宙微波背景辐射的发现)中表现得最为典型。理论发展的相对独立性,主要体现为同一理论可以有多种等价的表述,例如经典力学中的牛顿力学和分析力学表述,量子力学中的矩阵力学和波动力学表述。信念的相对独立性,突出的实例是莱布尼兹、麦克斯韦和爱因斯坦对超距作用的拒斥态度。据此,可将科学进步分为信念驱动、理论驱动和经验驱动3种类型。

1) 信念驱动:基于美学和形而上学观念而引发的理论或实验上的进步。美学因素主要体现为对理论本身的简单性与理论之间的相容性的追求,其背后的形而上学信念是自然的简单性、对称性与统一性。狭义相对论、广义相对论和相对论量子力学的建立,都是这一信念激励的结果。形而上学观念主要指关于实在的本体论构想,例如牛顿关于微粒之间超距作用力的设想,法拉第关于感应力线的设想(图4^[25]),孟德尔关于遗传因子的设想,爱因斯坦关于引力即时空几何的设想等。关于实在的



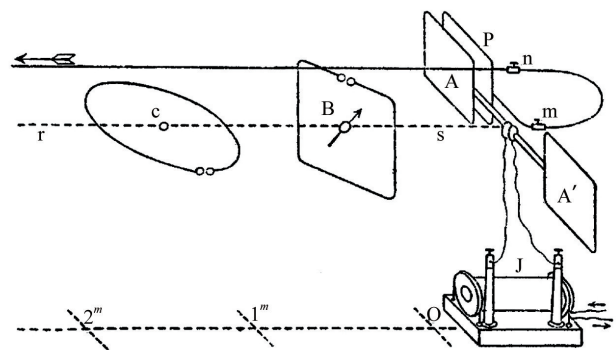
当左边的长直导线被弯曲成线圈时,磁力线会被压缩到线圈之内,使得线圈的两端如同磁棒的两极

图4 法拉第关于磁力线的设想

构想,作为理论表征之基础,不仅推动了理论的构建,同时还刺激了实验工作的开展。麦克斯韦等的以太构想,激发迈克尔逊-莫雷设计了检验以太二阶效应的实验;德·布罗意的物质波构想,促使戴维孙(Davisson C J)和革末(Germer L H)开展了电子衍射实验。

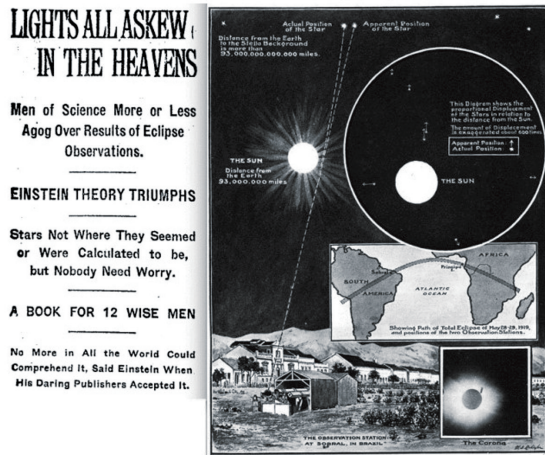
2) 理论驱动:理论的进步所带来的信念转变和实验进展。开普勒在建立行星运动的三大定律之后,进而设想太阳与行星之间存在一种类似于磁力的长程吸引力;麦克斯韦根据其电磁场方程,确认光就是电磁波。这些都是理论导致的信念转变。科学史上大部分的实验研究,都是在理论驱动之下进行的确证性实验。伽利略的斜面实验、赫兹的电磁波实验(图5^[20])以及爱丁顿的光线偏折实验(图6),都是为了检验相关的理论。

3) 经验驱动:实验进展所导致的信念转变与理论发展。法拉第基于磁铁周围铁屑分布的实验演示,提出了磁力线概念,是经验刺激信念的突出事例。实验驱动的理论变革,在科学史上可谓不胜枚举。开普勒因为托勒密的正圆模型与第谷的观察数据存在微小的误差,转而设想行星的轨道是椭圆而非正圆,由此走上了革新天文学的道路。普朗克为了拟合柏林帝国物理技术研究所的两个小组在红外区测得的黑体辐射谱(图7^[26]),提出了普朗克公式,由此揭开了量子力学革命的序幕^[27]。沃森



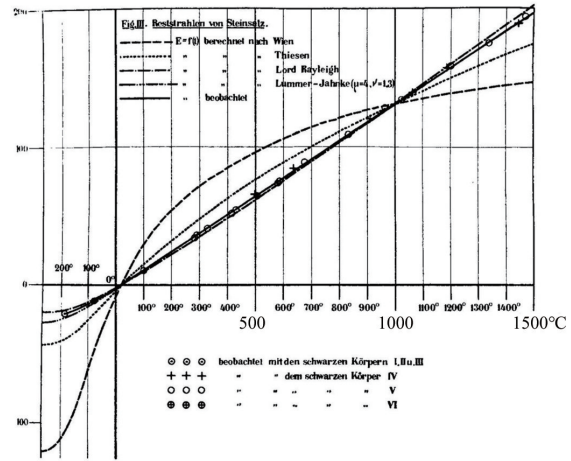
J为感应线圈,AA'为一对铜板,B、C是火花间隙线圈,P是通过导线mn接地的铜板。赫兹证明,通过导线传播的电波与通过空气传播的电波发生干涉。随后的实验他改用墙面反射波与入射波的干涉,测量了电磁波的波长

图5 1888年的赫兹的电磁波实验



1919年5月29日,爱丁顿率领的远征队在西非普林西比岛日全食时的观测,验证了爱因斯坦广义相对论的预言。左为《纽约时报》关于恒星光线偏折实验的报道,右为《伦敦新闻》为实验报道绘制的解释图

图6 1919年的爱丁顿的光线偏折实验
(图片来源:spaceweather.com)



Heinrich Rubens 和 Ferdinand Kurlbaum 在波长 $\lambda=51.2 \mu\text{m}$ 、温度 $T=-188\sim 1500 \text{ }^\circ\text{C}$ 处所测得的黑体辐射曲线。图中实测曲线与根据维恩公式计算出的理论曲线明显不符,与根据瑞利公式计算的曲线也有一定程度的偏离。普朗克曲线没有标在图上

图7 1900年的黑体辐射实验

和克里克的双螺旋模型,有赖于查伽夫(Chargaff E)关于DNA碱基组成的实验结果和富兰克林(Franklin R E)对DNA晶体的X射线衍射图像。

任何科学理论的建立,都不是一蹴而就的。在科学发展的过程中,这3种驱动方式经常是交替发挥作用的。在科学家的脑海里,信念、理论和经验三者始终处于动态的调适过程之中。以经典遗传学的建立为例:孟德尔的路径是信念→经验→理论,而摩尔根的路径是经验→信念→理论。孟德尔关于遗传因子的构想,促使其进行豌豆杂交实验,进而发现了经典遗传学的两大定律(分离定律和自由组合定律)。摩尔根一开始并不接受遗传因子的思想,但他的果蝇杂交实验结果却符合孟德尔的规律,从而迫使他接受了孟德尔的思想,进而发现了

经典遗传学的第三定律(基因的连锁与交换定律)。更进一步,他与弟子斯特蒂文特(Sturtevant A H)合作,通过实验所确定的重组频率,来衡量一条染色体上两个基因之间的距离,建立了基因的图谱表征(图8^[28]),经典遗传学由此完善。

3种驱动方式之间的复杂互动关系,在电磁学理论的发展过程中表现得更为明显。我们把起点放在1820年奥斯特的实验发现上。此前,电和磁之间的联系并不为人所知,电荷之间的作用力被看成是超距作用力(库仑力)。对于如何理解奥斯特效应,英法科学家出现了明显的分歧:安培认为,磁的本质是环形分子电流,电流对磁极的作用是电流元之间的超距作用;循此观念,法国的2位科学家建立了电流元相互作用的毕奥-萨伐尔定律。与



图中显示了黄体(B)、白眼(C, O)、朱砂眼(P)、袖珍翅(R)和残翅(M)6个性状按其于B的相对距离在X染色体上的线性排列

图8 斯特蒂文特的果蝇基因图谱

此同时,英国科学家沃拉斯顿(Wollaston W H)则认为,通电导线周围会产生圆形分布的“磁流体”,从而使磁针的磁极发生偏转。受此启发,法拉第基于通电导线周围铁屑分布的实验提出,电流对磁针的作用是通过空间中分布的磁力线来实现的^[25]。出于电与磁的对称性信念,法拉第在1831年发现了电磁感应现象,并用穿过线圈的磁力线数目的变化来解释感应电流的产生。这一历史速写表明,同一实验导致了2种不同的信念,进而出现了2条不同的理论和实验进路:从超距作用进路出发得到了毕奥-萨伐尔定律,从法拉第的力线进路则发现了电磁感应定律。颇为有趣的是,电磁感应定律的最初数学表述是按电流元之间的超距作用(电动力学势)来处理的。故事的结尾大家都知道:麦克斯韦把力线看成场的形象表示,并把场看成是以太的波动,建立了电磁场的动力学理论。

上述案例表明,科学的进步既不像库恩的范式理论所说的那样,仅仅来自范式(信念或理论)与经验(实验结果)之间的冲突;也不是像斯特雷文斯的知识机器理论所主张的那样,单纯来自“铁律”对既有理论的选择作用。站在理论的角度,可以看到,科学理论的重大进步来自信念和实验的共同推动。

4 与既有理论的比较

基于信念、理论与经验互动的动力学模式,可以避免库恩的范式理论和斯特雷文斯的知识机器理论的内在局限以及由此带来的解释力不足的问题。我们将此模式简称为“动力学模式”,并将之与库恩的范式、斯特雷文斯的知识机器以及蒯因的“信念之网”做一比较。

与库恩的理论相比,动力学模式相当于将库恩的广义范式分解为信念与理论2个部分。这种区分的意义在于,理论属于科学家共同体,而信念属于科学家个人。这样就可以避免范式的强制性问题 and 不可通约性问题。作为个体的科学家在接受一个理论时,可以对其中的本体论承诺持保留态度,即将该理论当成对自然现象的“浅层解释”权且接受下来。

范式之间的通约性问题,在动力学模式中也能得到合理解释。科学理论的更替,都只是在一定程度上修正了原来的本体论构想。以物理学的发展为例。在牛顿力学中,基本的理论实体包括绝对时空、微粒物质和超距作用力三者。在麦克斯韦电磁理论和狭义相对论中,闵氏时空作为整体依然是平直的、均匀的和绝对的(即不依赖于物质和相互作用而独立存在的)。闵氏时空与牛顿时空的唯一区别,只在于同时性的相对性。微粒物质概念和引力相互作用也保留了下来,只是添加了既是物质又传递相互作用的电磁场。20世纪的两大物理学革命——广义相对论和量子力学革命,分别修正了狭义相对论的时空观和物质观。广义相对论保留了经典的物质观,却大幅修正了狭义相对论的时空观:时空不再是物质的活动舞台,而是物质的分布和运动的结果,时空的几何性质直接表征引力。尽管如此,给定了物质的分布和运动,时空的几何是刚性的;并且在局域范围内,基于等效原理,狭义相对论物理学完全适用。另一方面,量子力学(以及量子场论)保留了狭义相对论的时空观,但修正了经典的物质观:物理系统的状态要用量子态来描述,从而表现出“波粒二象性”。无论是从牛顿力学到量子力学,还是从万有引力理论到广义相对论,理论之间至少是部分可以通约的。

库恩理论的解释力不足,主要是因为它把焦点集中在范式(信念+理论)与经验之间的冲突上。这就带来2个严重的后果:其一,它不能解释从“前范式”到“范式”的转变。哈金所提到的17世纪的科学革命和“第二次科学革命”以及孟德尔的遗传学革命,都是从前范式到范式的革命;其二,它不能解释没有发生“反常”的科学革命,包括广义相对论革命、进化论革命和分子生物学革命。广义相对论革命是为了协调牛顿的万有引力理论和狭义相对论的结果。达尔文的进化论革命和沃森-克里克的分子生物学革命,都是基于新的经验事实解决了旧理论的严重不足,使之发生了质的飞跃,并没有出现反常和范式转换。

从动力学模式的角度来看,上述革命都不难得到合理的解释。从前范式到范式,是实验和信念共

同驱动的结果,电磁学理论的建立可为例证。广义相对论的创立,并非为了解释水星近日点的进动这一反常,而是为了追求理论之间的自洽性。达尔文的进化论革命,也没有推翻旧进化论中的共同祖先学说,而是基于加拉帕戈斯群岛的鸟类特征,提出了新物种产生的机制和进化的谱系树结构^[29](图9)。分子生物学革命,是基于新的实验结果,将遗传学从细胞水平推进到分子水平。

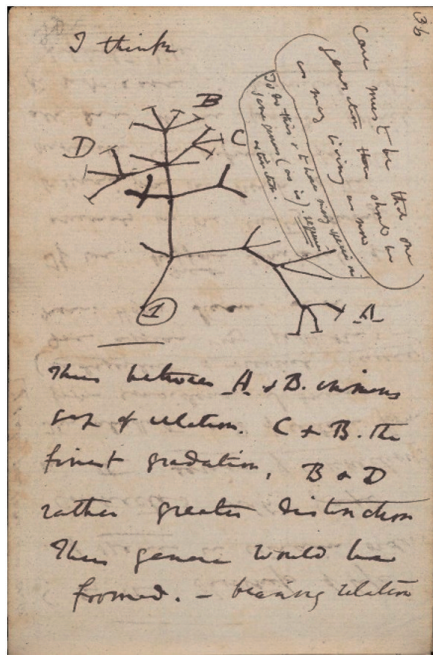


图9 达尔文关于物种演变的笔记,第1次勾画了进化的谱系树结构

(图片来源:剑桥大学图书馆, cudl.lib.cam.ac.uk/view/MS-DAR-00121/38)

与斯特雷文斯的知识机器相比,动力学模式将发现的过程与确证的过程放在同等重要的地位。作为一种精致的经验主义,知识机器理论与传统的逻辑经验主义一样,将发现的过程看作是一个充满灵感的、不可解释的过程。而在动力学模式中,理论的建立是经验和信念双重驱动的结果,其中信念可能来自传统的形而上学,也可能是实验启发之下产生的新观念。要之,发现的过程虽然具有一定的自由想象空间,但要接受经验和信念的指引与约束。

狭义相对论的建立是对此的最佳说明。爱因斯坦的狭义相对论,是审美眼光和实证眼光的完美结合。爱因斯坦当时面对的难题是,相对性原理、光速不变原理和伽利略变换三者是不相容的,那么究竟是保留相对性原理和光速不变原理,还是保留相对性原理和伽利略变换呢?基于简单性的追求,爱因斯坦选择了前者,因为他相信麦克斯韦-洛伦兹的理论应当在一切实性系中皆成立,而不是仅仅在绝对参考系(静止以太系)中才成立。那么伽利略变换该怎么办呢?为此,他诉诸实证,认识到时间是依赖于测量的,时钟的校准依赖于光信号,因此同时性是相对的。只有加上时间和位置测量的实验规定,爱因斯坦才能从狭义相对性原理和光速不变原理推导出洛伦兹变换^[26]。

广义相对论的创立,更能体现信念的力量。这里的信念,既包括一般的形而上学观念,例如相信自然的简单性、对称性和统一性,也包括特定的形而上学观念,如关于时间、空间、物质和相互作用力的设想。爱因斯坦的目标,是要解决牛顿的万有引力理论和狭义相对论之间的不相容性。1907年,爱因斯坦奠定了广义相对论的第一块基石,即等效原理:一个自由下落的观察者感受不到引力,因此引力至少在局域范围内等效于惯性力。1912年,爱因斯坦找到了该理论的第2块基石:在旋转的坐标系中,由于运动方向存在洛伦兹收缩,圆的周长与直径之比小于 π 。既然引力等效于非惯性系,而非惯性系中欧氏几何不再成立,因此引力可以用时空的度规来描写^[23-24]。这也表明,爱因斯坦的深邃思想,始终紧系于经验之磐石。

由于只考虑确证的过程,知识机器理论不仅将科学家个人的深层思想排除在外,而且将经验的作用局限于理论的检验与选择。在动力学模式中,经验的作用不仅体现在确证方面,而且体现在发现方面。基于信念、理论和经验之间的互动关系,发现的过程和确证的过程是相互促进的。

将科学知识看成是信念、理论和经验的融合,实际上借鉴了蒯因的“信念之网”理论^[30]。蒯因认为,人类的科学知识整体是一个信念之网,其边缘是经验,往里是理论,核心则是逻辑和形而上学。

他说：“我们所谓的知识或信念的整体，从最偶然的地理和历史事件，到最深刻的原子物理学甚至纯数学和逻辑规律，只是一个沿边缘同经验保持密切接触的人工织物。或者换个比喻说，整个科学就像一个力场，它的边界条件就是经验。在场的周围同经验的冲突引起内部的再调整。”^[13, 31]

任何一门科学理论都有某种本体论立场，都包含承认这种或那种事物存在的本体论假设。蒯因认为，一个理论的本体论承诺问题，就是按照那个理论有什么东西存在的问题。本体论承诺与经验之间的关系，同理论与经验之间的关系一样，都是要合理地安排或解释经验事实^[13, 31]：“我们之接受一个本体论，原则上同接受一个科学理论，比如一个物理学体系，是相似的。至少就我们讲求合理性而言，我们所采纳的是能够把毫无秩序的零星片段的原始经验加以组合和安排的最简单的概念构架。”

蒯因认为，科学知识是作为一个整体面对经验裁决的。接受经验检验的是知识总体，而不仅仅是离边缘较近的命题。这就是说，信念和理论都必须接受经验的约束。他还强调，经验证据对于知识整体的决定是不充分的(underdetermination)。在既定的经验范围内，完全可以有经验上等效的理论。基于经验而做出的信念或理论调整，最佳的方式是只引起对现存信念体系的最小破坏。

蒯因的信念之网理论，不是专门的科学进步理论。但其中所包含的洞见，如科学理论中的本体论承诺、经验对知识整体的约束作用、信念和理论面对经验调整的最佳方式，对于我们理解科学进步具有重要的启迪意义。本文的动力学模式，即科学进步的目标是要达成信念、理论和经验之间的最大协调，虽然主要承自弗洛里斯·科恩的编史学纲领，但也借鉴了蒯因的思想和术语。

作为逻辑经验主义的传人，蒯因关注的是科学理论的静态结构和经验确证。因此，在蒯因的理论中，经验发挥的只是消极的约束作用，而非积极的指引作用。蒯因理论的目标，是刻画科学知识的逻辑结构，而非其动态演进机制。从静态的角度看科学，很容易夸大“非充分决定”的自由度。从发展的眼光来看，经验上等效的理论，随着经验研究的扩

展，往往不再等效了。哥白尼体系和托勒密体系在16世纪中叶是经验上等效的，但到了17世纪初就不再等效了。经验上等效的理论，如果只是数学上等价，但在物理上(特别是本体论上)不等价，迟早要接受经验的裁决，出现斯特雷文斯所言的“培根趋同”。只有从信念、理论和经验之间的动态调适出发，才能真正理解科学进步。

5 结论

科学进步的模式，也就是人们通常所说的“科学发展的规律”。在这篇文章中，笔者主要基于弗洛里斯·科恩关于17世纪科学革命的解释，同时参照蒯因关于科学知识整体结构的分析，提出了科学进步的动力学模式。根据这一模式，科学进步是信念、理论和经验三者之间从相互脱节或相互冲突的状态走向相互关联并且相互适应的动态过程。

蒯因的信念之网理论，旨在刻画科学知识的逻辑结构，相当于科学的静力学。弗洛里斯·科恩关于17世纪科学革命的解释，只是描述了3种潮流逐步融合的历史过程，相当于科学进步的运动学。静力学关注的是信念、理论和经验之间的平衡状态，运动学关注的是信念、理论和经验之间的融合轨迹。与之相比，动力学强调的是信念、理论和经验之间相互驱动、相互调适的演进机制。

较之斯特雷文斯的知识机器，动力学模式将发现的过程与确证的过程放在同等重要的地位，并且表明这2类过程是相互联系、相互促进的。发现的过程并非不可解释的非理性过程，而是在经验和信念的引导与约束之下的合理化过程。科学的崇高目标，正如爱因斯坦所言，是要“以最适当的方式来画出一幅简化的和易领悟的世界图像”^[32]，而非仅仅满足于对自然的“浅层解释”。自然的简单性信念，以及合理的本体论承诺，是推动理论进步的重要力量，狭义相对论和广义相对论的创立即为明证。

较之库恩的范式，动力学模式将“广义范式”拆解为信念和理论2个部分，从而不仅消除了范式的强制性和不可通约性难题，而且可以解释并非源于

“反常”的科学革命。牛顿力学、麦克斯韦理论和孟德尔遗传学,都是在经验和信念共同驱动下创建“范式”的革命。狭义相对论和广义相对论革命,主要是在信念驱动下,解决既有理论之间的不相容性而发生的“范式转换”。达尔文的进化论革命和沃森-克里克的分子生物学革命,主要是在经验驱动下,使旧的理论发生了质的飞跃。如果一定要用库恩的术语,也只能说是“范式升级”。“反常”所导致的“范式转换”,仅仅是科学革命的路径之一。

信念、理论和经验的相对独立性,特别是实验的拓展性,是三者之间出现内在张力的根本原因。据此,可以将科学进步和科学革命分为信念驱动、理论驱动和经验驱动3种不同类型。基于科学进步的动力学模式,并结合对当代科学前沿的考察,来预测未来的科学革命,已经超出了本文的范围。

参考文献(References)

- [1] Popper K R. Conjectures and refutations: The growth of scientific knowledge[M]. London: Routledge & K. Paul, 1963
- [2] 波普尔. 猜想与反驳: 科学知识的增长[M]. 傅季重, 纪树立, 周昌忠, 等译. 上海: 上海译文出版社, 1986.
- [3] Kuhn T S. The structure of scientific revolutions[M]. Chicago: University Of Chicago Press, 1996
- [4] 库恩. 科学革命的结构[M]. 4版. 北京: 北京大学出版社, 2012.
- [5] Strevens M. The knowledge machine: How irrationality created modern science[M]. Manhattan: Liveright, 2020.
- [6] 郝刘祥. 自然的数学化 关于科学革命编史纲领的探讨[J]. 科学文化评论, 2014, 11(5): 5-23.
- [7] 科恩. 科学革命的编史学研究[M]. 张卜天, 译. 长沙: 湖南科学技术出版社, 2012.
- [8] Koyré A. Metaphysics and measurement: Essays in scientific revolutions[M]. London: Chapman & Hall, 1968.
- [9] 柯瓦雷. 伽利略研究[M]. 刘胜利, 译. 北京: 北京大学出版社, 2008.
- [10] Westfall R S. The construction of modern science; mechanisms and mechanics[M]. New York: Wiley, 1971.
- [11] 韦斯特福尔. 近代科学的建构: 机械论与力学[M]. 彭万华, 译. 上海: 复旦大学出版社, 2001.
- [12] 科恩. 世界的重新创造: 近代科学是如何产生的[M]. 张卜天, 译. 长沙: 湖南科学技术出版社, 2012.
- [13] 蒯因. 从逻辑的观点看[M]. 江天骥, 宋文滢, 张家龙, 等译. 上海: 上海译文出版社, 1987.
- [14] 洪谦. 论逻辑经验主义[M]. 北京: 商务印书馆, 1999: 344.
- [15] 艾耶尔. 语言、真理与逻辑[M]. 尹大贻, 译. 上海: 上海译文出版社, 1980: 8-9.
- [16] Davidson D. On the very idea of a conceptual scheme [M]//Davidson D. Inquires into truth and interpretation. Oxford: Clarendon Press, 1984: 183-198.
- [17] Kepler J. New Astronomy: Astronomia nova, Heidelberg [M]//Caspar M. Kepler Gesammelte Werke. Munich: C. H. Beck, 1990: 177-178.
- [18] Christianson J R. Tycho brahe and the measure of the heavens[M]. London: Reaktion Books, 2020: 51.
- [19] Harman P M. The natural philosophy of James Clerk Maxwell[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1998: 171-175.
- [20] Harman P M. Energy, Force and matter: The conceptual development of nineteenth-century physics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1982: 90.
- [21] 柯瓦雷. 伽利略与柏拉图[M]//刘钝, 王扬宗. 中国科学与科学革命. 沈阳: 辽宁教育出版社, 2002.
- [22] 柯瓦雷. 牛顿研究[M]. 张卜天, 译. 北京: 北京大学出版社, 2003: 8.
- [23] Cohen H F. The scientific revolution: A historiographical inquiry[M]. Chicago: University of Chicago Press, 1994.
- [24] 郝刘祥. 表征、介入与实在——科学革命的结构化进程[J]. 自然辩证法通讯, 2021, 43(6): 24-31.
- [25] Longair M S. Theoretical Concepts in Physics[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2003.
- [26] Pais A. Subtle is the lord: The science and the life of Albert Einstein[M]. Oxford: Oxford University Press, 1982.
- [27] 派依斯. 上帝难以捉摸[M]. 方在庆, 李勇译. 广州: 广东教育出版社, 1998.
- [28] Pierce B A. Genetics: A conceptual approach[M]. San Francisco: W. H. Freeman, 2004: 161.
- [29] 迈尔. 生物学思想发展的历史[M]. 涂长晟译. 成都: 四川教育出版社, 2013: 268-274.
- [30] Quine W V, Ullian J S. The web of belief[M]. New York: McGraw-Hill Education, 1978.
- [31] Quine W V. From a logical point of view[M]. Boston, MA: Harvard University Press, 1980.
- [32] 爱因斯坦. 探索的动机[M]//爱因斯坦. 爱因斯坦文集(第一卷). 北京: 商务印书馆, 1977: 100-103.

The dynamical mode of scientific progress

Hao Liuxiang^{1,2}

1. School of Humanities, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

2. Institute of Philosophy, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract This article analyzed the success and the limitation of the current main theories about scientific progress and then examined the historiographical advance of the scientific revolution given the close relationship between the two topics. Based on Quine's static explanation of the structure of scientific knowledge and Floris Cohen's kinematic interpretation of the scientific revolution, this article proposed a dynamical mode of scientific progress which claims that scientific progress comes from the interactive accommodation between belief, theory and experience. Furthermore, this article compared this dynamical mode with Kuhn's paradigm and Strevens' knowledge machine, and revealed the advantages of this dynamical mode over them.

Keywords belief; theory; experience; scientific progress; scientific revolutions; dynamical mode ●



(责任编辑 王丽娜)