第十一章　近代科学革命的推进

——范式的遵循、坚守与反抗

考察近代科学革命的历程，至17世纪末已经基本完成。这次革命就是“革”传统自然哲学的“命”，也就是“革”亚里士多德自然内在目的论以及柏拉图理念论的“命”，最终确立了机械自然观的哲学范式。机械自然观的哲学范式是近代科学革命的基础和归旨，它使得科学认识的具体方法如数学方法和实验方法在各个自然科学领域中诞生并实施，也使得科学认识在其确立之后突飞猛进，于18世纪、19世纪乃至20世纪取得了一系列巨大的成就，典型的有燃烧学说、原子分子学说、电磁理论、细胞学说、相对论、量子力学、分子遗传学等。对于这些学说，有学者将此看作是科学革命的结果，以至于把它们称为“燃烧学说革命”“电磁理论革命”“细胞学说革命”“相对论革命”“量子力学革命”等。这一切是如何发生的呢？这样的一次次“科学革命”是对机械自然观的哲学范式的一次次冲击乃至“革命”吗？这样的一次次“革命”是一种什么样的革命？是范式的坚守还是反抗？这些是需要探讨的。

一、范式的遵循：机械自然观下的方法论原则贯彻

(一)自然的“祛魅”与“祛魅性原则”

如前所述，近代科学是以机械自然观为基础的，它进一步消除了自然的神灵性和人格化，把自然看作是一架机器、一个死物，其中的任何事物都不存在精神现象，即不存在哪怕些许的思维、情感、意志、文化、智能以及自主的能动性、目的性。这是自然的“祛魅”。如此一来，自然界中的事物是没有经验的，也就是说没有情感、意志、思维和任何目的性等。[[1]](#footnote-1)自然而然地，近代科学家们在对自然进行认识时，就遵循了“祛魅性原则”，把自然看作是无精神性的存在来认识，不去考虑或认识自然的精神性方面。

1. 基于机械自然观对无机世界和生物界的“祛魅”

对于无机自然界，“祛魅性原则”典型地体现在“构成论”中。“构成论”的基本思想是：宇宙及其万物都是由一些基本元素或微粒构成的，宇宙中万事万物的运动、变化都是其构成要素的分离和结合。古希腊原子论自然观和近代机械自然观都含有这种思想。它们否定了宇宙万物都是“生成”的，从而也就否定了世界的历史性和创造性，否定了事物本身的随机性，从而把宇宙看作是机械决定论的，具有可逆性以及时间上的无方向性。

如果宇宙是机械决定的，那么事物的运动和变化就可以按照机械的方式来理解。在亚里士多德那里，宇宙是有内在的目的和本质的，物体运动基于其内在的本质属性。而在牛顿这里，天上星球的运动遵循“万有引力定律”，地上物体的运动遵循“运动三定律”。它们都是由于受到外力的作用才运动的。这种作用非常类似于机械式的推拉，做机械式的运动。就此，宇宙机器的隐喻开始出现，上帝的观念也随之改变，即上帝是宇宙的“第一推动”，一旦宇宙运动之后，就不需要上帝的推动了——这是惯性原理使然。“在牛顿理论中，用惯性原理和万有引力定律解释行星轨道，而不是寻求利用永恒不动的上帝或其他神的推动来解释。强调利用自然方法来解释自然现象，而不是用超自然的存在或力量来解释，这是现代科学的核心部分。”[[2]](#footnote-2)而且，根据牛顿的自然观，宇宙一旦成为机器，其亚里士多德意义上的宇宙目的论和本质主义就不复存在了，地球作为宇宙的中心以及人类作为地球的中心的观念也就被削弱了。这是牛顿世界观的引申义。

如此看来，机械自然观与神学自然观还是有一定关联的。从某种角度上说，宇宙的无限是可以反映上帝全能这一观念的。而且，如果我们相信原子论，并且也相信宇宙是无限的，那么，在虚空中运动的原子如果没有与其他原子碰撞，将会如何运动呢？它将会沿着直线一直运动下去。这就是惯性定律。笛卡尔就是根据上述思想，第一个清楚地论述了它。

对于有机自然界，在生物学家对动植物展开认识时，就很少乃至不研究与生物的思维、智能、语言、通信等相关的现象，即很少乃至不研究生物界的“社会性”方面，生物学研究被限制在生物的物质性或机械性的范围之内，生命被还原为物理的、化学的存在，生物学被还原为生物物理学和生物化学。这方面最突出的就是拉美特利(Julien Offroy De La Mettrie，1709—1751)，他于1748年出版《人是机器》(*L**’ homme Machine*)一书。在这本书中，他宣称，人体就是一台完全受物理和化学因素控制的机器，人与动物之间没有本质的区别，人只不过是另外一种动物，一种“会说话的猿猴”。18世纪的生理学、繁殖和胚胎学就是在这样一种观念的指导下向前迈进的。

考察18世纪科学发展的历史不难发现，科学中的每一个重大发现，如拉普拉斯(Pierre-Simon de Laplace，1749—1827)的《天体力学》、拉瓦锡(Antoine-Laurent de Lavoisier，1743—1794)的氧的燃烧学说等，都在贯彻并不断地证实着机械自然观而不是相反。在当时的科学家中，没有出现重要的机械论反对派。就机械论的社会影响来说，在18世纪，它还只是少数科学家和先进学者坚持的信念，在广大的社会公众层面以及社会知识阶层层面，流行的仍然是中世纪的自然观。这种状况促使那一时期的某些哲学家努力将机械论哲学发展成熟，加以宣传，使之成为那一时代的精神。

与牛顿差不多处于同一时期的英国唯物主义哲学家霍布斯和洛克(John Locke，1632—1704)把科学中的机械论自然观上升为机械唯物论哲学，使机械观的概念范畴，如物质、运动、组成等得到进一步的概括和精炼，发展为经典形态的成熟的机械观。其基本思想是：“整个宇宙由物质组成；物质的性质取决于组成它的不可再分的最小微粒的空间结构和数量组合；物质具有不变的质量和固有的惯性，它们之间存在着万有引力；一切物质运动都是物质在绝对、均匀的时空框架中的位移，都遵循机械运动定律，保持严格的因果关系；物质运动的原因在物质的外部。”[[3]](#footnote-3)从笛卡尔到牛顿，从霍布斯到拉美特利，“机器的隐喻”统治着早期的现代思想，以至于不仅物理的宇宙，而且社会、动物甚至人类都被同样地看作是机器，没有任何生命的冲动。

牛顿的经典力学和英国的机械论哲学传到法国后，对18世纪法国思想界的启蒙运动产生了决定性的影响。他们中的一部分人[[4]](#footnote-4)把物质看作是唯一的实体，是存在和认识的唯一根据，不依赖于思维和造物主而存在；把物质的运动还原为机械运动，具有决定论的因果必然性；把人对物质世界的认识看作是刺激-反应式的反映论，从而走向了认识论上的一元论。

至此，近代之前“附魅”的世界被一步步“祛魅”，形成近代世界。近代世界是一台运转有序的时钟和机器，遵循着一定规律，以稳定的和有序的方式发挥着作用，能够被理性的大脑准确地理解。这就是所谓的机械论自然观。这样的自然观对自然的看法就是，“不承认自然界即被物理科学所研究的世界是一个有机体，并且断言它既没有理智也没有生命。因此，它没有能力以理性的方式操纵它自身的运动，并且它根本就不可能自我运动。它所表现出来的运动以及物理学家所研究的运动，都是外界施与的，它们的规律性应归属于同样是外加的‘自然定律’。自然界不再是一个有机体，而是一架机器：一架按字面意义和严格意义上的机器，一个被在它之外的理智心灵，为着一个明确的目的设计出来、并组装在一起的躯体各部分的排列”。[[5]](#footnote-5)

在18世纪，科学中真正成熟的只有力学和天文学，牛顿的科学纲领“希望从力学原理中导出其余自然现象”，在很大程度上还只是一种美好的愿望。到了19世纪，不仅绝大多数自然科学家对于机械论深信不疑，而且社会大众也普遍接受了机械自然观。在19世纪的科学特别是物理学和化学中，那些最伟大的成就几乎都是在机械论自然观的指导下取得的。对于任何有点科学素养的科学家来说，从力学角度对自然现象进行最终解释，都被看成是一种常识。不仅仅光学、统计力学等领域成为机械论科学的楷模，而且整个物理科学都已建基于力学原理之上。以下四方面的研究进展和尝试比较充分地体现了这一点。

第一，拉普拉斯及其追随者，建立了一种既适用于力学，又适用于热学和光学现象的关于粒子间的力的普遍的数学理论，尽管在1815—1825年这一理论被抛弃，但是拉普拉斯的数学化和公式化对统一的物理世界观，乃至对以后物理学理论的发展都产生了深刻的影响。

第二，1822年傅里叶(Joseph Fourier，1768—1830)关于热的数学理论的发表，把原先只适用于力学问题的数学分析方法，应用于热学的研究之中。这一工作对建立统一的物理学产生了深远和广泛的影响。19世纪40年代，汤姆逊(William Thomson，1824—1907)在热学和电学、质点力学与流体力学及弹性力学之间对数学相似性和物理类似性的比较，加深了人们对物理现象统一性的认识。

第三，菲涅耳(Augustin-Jean Fresnel，1788—1827)关于光的波动说，假定光是依靠以太的振动实现传播的，因而光学又被纳入力学自然观的范畴之中了。

第四，19世纪40年代能量守恒定律的建立，使热、光、电、磁的现象都归并到能量的范畴之下，从而加强了物理学的统一性。麦克斯韦提出了“麦克斯韦方程组”，建立了电与磁之间的数学关系，由此提出了电磁波的预言。该预言在1888年被赫兹(Heinrich Rudolf Hertz，1857—1894)用实验加以证实。电磁理论从本质上揭示了光、电、磁现象的统一性，也说明了电磁力的合理性。

根据以上科学家的工作，以往被认为不可称量的流体——热、光、电和磁等，具有了在机械论物理学框架下进行研究的条件并且呈现数学化。由此，一种思路变得清晰了：相信自然力互相转化和自然界的统一性，是建立热、光、电、化学之间的相互联系的基础。这是18世纪后期物理学的共同观念，也是在对以前所假设的各种不可称量流体进行鉴别、修正、放弃的基础上进行的。“直到放弃了不可称量流体的学说之后，物理学家才承认自然现象的统一性和转化性。放弃不可称量流体学说，并得到新的关于转化现象的实验发现的支持，自然力统一性和等价性学说于19世纪30年代方使人们逐渐深刻地认识到自然现象间的这种关系。”[[6]](#footnote-6)

对于化学，18世纪除了氧气的发现以及燃烧学说的提出外，布莱克(Joseph Black，1728—1799)发现了“固定空气”(二氧化碳)，卢瑟福(Daniel Rutherford，1749—1819)发现了氮气，卡文迪什分解水产生了氢气。到了19世纪，道尔顿(1766—1844)科学原子论的引入，使得化学已经具备成熟的机械论的表现形式；戴维(Humphry Davy，1778—1829)电化学实验的贯彻，为众多元素的发现奠定了基础，也为元素周期律的提出创造了条件。到了19世纪80年代，在吉布斯(Josiah Willard Gibbs，1839—1903)、亥姆霍兹(Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz，1821—1894)和普朗克(Max Karl Ernst Ludwig Planck)的研究工作中，热力学的概念也被用来研究化学过程。化学反应的机制、化学亲合力的性质、化学平衡的理论以及化学反应的方向等，都被纳入热力学解释的框架之中。

对于生物学，随着机械世界观影响的不断深入，机器模型在有机体的研究中越发普遍。在18世纪，沃康森(Jacques de Vaucanson，1709—1782)发明了像活鸭子一样可以喝水、吃东西、消化和排泄的著名自动装置“机器鸭”。为了完全还原鸭子的解剖结构，沃康森甚至在“机器鸭”上安上开口让公众观察机器鸭的运动过程。[[7]](#footnote-7)沃康森的发明使得将有机体看作机器的构想成为现实，有机体的机械化进一步导致了人的机械化。

1748年，拉美特利在《人是机器》(*L'homme Machine*)一书中明确批判了笛卡尔的心—物二元论：“笛卡尔也犯了同样的错误，他们认为人身上有两种不同的实体，就好像他们亲眼看见并且曾经好好数过一下似的。”[[8]](#footnote-8)拉美特利直接将人看作是机器，心灵也是由机器的养料所支持：“人体是一架会自己发动自己的机器：一架永动机的活生生的模型。体温推动它，食料支持它。没有食料心灵便渐渐瘫痪下去……但是你喂一喂那个躯体吧……这一来，和这些食物一样丰富开朗的心灵，便立刻勇气百倍了。”[[9]](#footnote-9)可见，拉美特利认为心灵也依赖于人体的物质供给，即心灵随附于作为机器的人体。

在这种风潮的影响下，越来越多的研究者投入到对有机体的机械论解释中，可以体现在两个方面：一方面，早期生物机械论者通过解剖动物来分析动物运动的机制，通常将动物的运动还原为肌肉的收缩；另一方面，在生理学领域，随着学者们对动物分解食物和释放能量等功能的了解，越来越多的生理学家认为哺乳动物是一台遵循物理和化学定律的“热机”(heat engine)。

在生理学上，哈勒(Albrecht von Haller，1708—1777)逐个考察器官的构造和功能，使解剖学成为一门实验科学，还把动力学原理应用到生理学的研究中。他探讨了肌肉的应激性和神经的敏感，从而为循环系统生理学做出了重要贡献。他发现肌肉的应激性是由于神经的刺激，只有神经才是感觉器官，所以身体中只有与神经系统连接的部分才能体验到感觉，也才有“敏感性”，当感觉器官受到刺激时才能把信息传递到大脑。列奥谬尔(Rene-Antoine Ferchault de Reaumur，1683—1757)是昆虫学的创立者之一，而且发现胃液对食物有消化作用。斯帕兰扎尼(Lazzaro Spallanzani，1729—1799)用鸟类和自己继续列奥谬尔的实验，推进了这项研究，发现胃液对肉类的消化作用需要相同的温度。拉瓦锡发现动物的呼吸是肺吸收氧气释放二氧化碳的过程，这一过程释放热量，维持动物体温。

到了19世纪，生物的机器类比得到了进一步发展。1859年，达尔文(Charles Robert Darwin，1809—1882)出版了开启生命科学新的历史篇章的巨著《物种起源》(*On the Origin of Species*)，提出了生物进化论。达尔文认为生物都具有渐进的历史演变过程，同一类生物有共同的祖先。物种的进化受到自然环境的影响，随着生物族群的扩大，适应环境的个体才能够生存和繁衍后代，而不适应环境的个体将被淘汰，即自然选择。达尔文在《物种起源》中是这样描述自然选择的：“因此，从自然的战争，从饥荒和死亡，我们所能想像的最崇高的目标即高级动物的产生直接随之而来。这种生命观是宏伟的……虽然这个星球按照固定的万有引力定律循环运行，但从如此简单的开始，无数最美丽和最奇妙的形式已经并且正在进化。”[[10]](#footnote-10)达尔文在其著作中鲜有提及哲学思想，他也没有过多探讨生物的本体论问题或者将生物作为机器——达尔文自己并没有表示自己是机械论者。然而，正如乌克蒂斯(Franz M. Wuketits，1955—2018)所言：“从自然选择理论的角度看，生物不是机器而是依赖于机械原则(mechanical principle)并被其改变的系统……生物受外在选择主体(external selective agencies)的支配。达尔文的理论……破坏了普遍的目的论概念。”[[11]](#footnote-11)达尔文认为物种进化的原因来自外界环境的选择而不是生物的内在原因，此时自然选择的效用就类似于牛顿的“力”(force)，而达尔文的进化论思想使其成为“草原上的牛顿”。

不仅如此，在17世纪乃至18世纪，人们普遍将生物体的外观以及功能当作一个由高度智慧的设计师——上帝创造的产物，上帝创造了地球，也创造了地球上的万事万物；人类是仅次于上帝的存在，人类为上帝服务，万事万物为人类服务。到了19世纪，达尔文的进化论表明，生物进化是自然选择的结果而不是上帝设计和创造的，地球上生物的进化及其存在(包括人类)，是数十亿年无数的偶然事件作用的结果。试想，如果没有6500万年前那场小行星撞击地球的浩劫，可能就没有恐龙的灭绝，也就可能没有后来人类的诞生，就此，人类就不是一个事先设计好了的、有目的的进化的、必然的产物。而且，如果生物是由自然选择进化而来，那么，超自然在生物运动变化中就没有了地位，诸如祈祷可以影响生物乃至宇宙中的事物的想法和行为也就成为无稽之谈。这对宗教神学自然观是一个打击，表明上帝干涉和影响人们的日常生活没有根据。“这些学者认为演化论为已经发展了一段时间的构想提供了最后一块重要拼板。具体来说，演化论为最后一种以前看似需要用超自然解释的现象提供了自然解释，也就是说，演化论为我们在生物界所发现的复杂性提供了一个完全自然的机制。在这一点上，在一个科学得到充分发展并且尊重科学的世界观里，西方世界关于上帝的传统观点或者关于宇宙有一个宏伟目标的观点，就已经没有了立足之地。”[[12]](#footnote-12)

在此情况下，宗教神学只有改变他们看待自然的方式，才能适应自然科学发展的需要。怀特海(Alfred North Whitehead，1861—1947)认为，与实体相比较，过程和事件、变化等更为根本。与传统的观念——“客体之间的相互作用产生事件”相反，过程哲学坚持认为实体是从过程和事件中产生的。[[13]](#footnote-13)这一过程哲学思想影响到了德日进(又名“夏尔丹”，法语：Pierre Teilhard de Chardin，1881—1955)。他认为，上帝不是脱离世界的一个事物，而是作为世界基础的不断变化和演化的行为、过程的一部分(或总和，或未来)，参与到世界的运动、变化等过程中，使得这一过程按照自然法则发展。[[14]](#footnote-14)现代神学家豪特(John F. Haught，1942—)则更进一步，吸收了过程哲学的思想，创立过程神学。他认为，上述进化论对宗教神学的挑战是存在的，需要对西方上帝的概念进行完善，去重新思考上帝、创造、宇宙目的等概念，从而发展了过程神学。豪特认为，宇宙是上帝七天内创造的，但是，创造出来的宇宙不是按照具体的蓝图演变的，而是按照自然法则进行的，这样的自然法则与日常运作有关。这些日常的运作由不断发生的、不可预测的过程所构成，也表明宇宙每时每刻都是不同的，都在不断发生、不断变化的过程中被创造。上帝既不计划也不干涉宇宙的日常运作，但是，上帝密切关注并干涉宇宙所进行的创造过程。这个过程又产生于混乱与秩序的平衡之中，即如果混乱太多，则过去进化史上所发生的生物进化所需要的规则就少，如果秩序太多，则生物进化所需要的那种偶然事件不会发生。在这种存在于宇宙之中的上帝创造性地干涉宇宙创造过程的混乱和平衡的创造作用下，宇宙一直被引向未来，甚至上帝可以被比作宇宙被牵引着奔去的那个未来。[[15]](#footnote-15)“这样一来，上帝就紧密地参与到宇宙中去了，同时也紧密地参与到那些从秩序和随机性的平衡中产生的、正在进行的创造过程中去了。因此，宇宙并不是在进行某些‘无意义的闲逛’。事实上，宇宙有自己的目的，而它大致朝向某个特定方向发展就是为了实现这个目的，在这个过程中，宇宙完全是按照包括演化论的核心规律在内的自然规律发展和变化的。”[[16]](#footnote-16)

2. “活力论”的提出、发展及其衰落

(1)活力论的诞生以及启蒙时代活力论[[17]](#footnote-17)

大约从18世纪开始，随着人们对生物的研究逐渐深入，出现了许多单凭物理化学规律无法解释的现象。越来越多的学者意识到生物毕竟不是机器，它有许多特征无法用还原论来解释。其中之一就是斯塔尔，他提出了“theory of phlogiston”(“燃素说”)，同时也于1708年提出organism(“有机体”)[[18]](#footnote-18)一词，由此成为近代生物“活力论”的先驱。他之所以提出organism一词，目的是将此作为machine(“机器”)的对应词语mechanism(机械装置)，表示的是，生物虽然不是机器，但是它却具有服从于有机本质(organic nature)的机械倾向(mechanical disposition)。至于生物的有机本质，斯塔尔认为它来自anima(“灵魂”“灵气”)。这是一种“活跃的存在”(active being)，它的力量来源于一种“有机的，或者说是组织的能量”(organic, or rather organizing energy)，并且通过一个组织起来的身体(organized body)表达自己。所谓有组织的能量，与无组织的“机械性能量”(mechanic energy)是不同的，后者没有目的或目标(sine ullo fine aut scopo)，为有组织的身体所拥有，而前者根据一个“计划”形成生物体，它在所有器官中保持一定的“自然张力”(tonus naturalis)，“调节”血管间的液体交换。[[19]](#footnote-19)概括起来就是，在生物中，灵魂与肉体相对应，没有灵魂，肉体就会失去目标，生物就仅仅是机器；没有肉体，灵魂无处安置，肉体是灵魂的器官。[[20]](#footnote-20)如此，斯塔尔就从“灵魂”的角度，将生命体和非生命体区别开来，“灵魂”是生物所特有的并且无法被机械原则所解释的生命原则。鉴此，也有学者把斯塔尔的活力论称为“泛灵论的活力论”(animistic vitalism)。[[21]](#footnote-21)

考察斯塔尔关于生物的上述观点，是对笛卡尔机械自然观之生物机械论的反动。他虽然承认生物具有机械式的倾向，但是他认为这种机械式的倾向来源于生物“灵魂”的有机本质。

按照通常理解，在当时西方科学界机械自然观占据主导地位的背景下，斯塔尔的上述观点要受到强烈批判，不可能被传播和发展。但是，鉴于当时发育生物学领域所进行的“预成论”(又称“先成论”，preformation)和“渐成论”(又称“后成论”，epigenesis)的争论以及新的科学发现，斯塔尔的观点在西方世界尤其是在德国得到传播和发展。

“预成论”和“渐成论”最早是由亚里士多德提出的。他认为动物有机体发育的模式有两种：一种是“预成论”，认为在卵子或精子中就已经存在动物的微型个体，经过一定的刺激和营养供给，便生长成为个体；另一种是“渐成论”，认为在生物有机体形成之初，存在的是尚未分化的物质，经过了不同的发育阶段之后，才生长出新的部分。

亚里士多德的上述学说的影响一直持续了2000多年，甚至直到19世纪，有关个体发生发育问题的争论几乎还与他的观点有关。

在17世纪，“预成论”占据主导地位，究其原因一是由于亚里士多德自己是赞成“预成论”的，二是由于“预成论”的预设与此时占据绝对主导地位的机械自然观相一致。根据“预成论”，成年动物的各个生理部分在发育之初就以较小的形式存在，完全形成的有机体可以在精子或卵子中找到，就像俄罗斯套娃一般，[[22]](#footnote-22)因此，对其发育的解释就不需要借助灵魂等超自然的生命原则，而只需要这些较小的形式在营养因素等的作用下长大。

法布里修斯(Hieronymus Fabricius，1537—1619)深受亚里士多德的影响，赞同“预成论”。他提出小鸡在胚胎发育的早期阶段已经预先形成，以后不过是已有形态的扩大与发展。哈维和法布里修斯认为，受精的关键因素在精液中，但他们认为，这种因素是一种看不见的、非物质的，类似于磁力的力量，他们称为“精气”(aura seminalis)。列文虎克也受到亚里士多德的影响，倡导“精源论”，认为在精子中已然存在已成形的个体，而且他在运用他的显微镜观察鸡蛋孵化小鸡的过程中，声称看到了小鸡，事实上他不可能看到小鸡，是“观察渗透理论”在起作用。

到了18世纪，仍然有一些学者赞同“预成论”。哈勒(Albrecht von Haller，1708—1777)在研究鸡卵的发育时相信了“卵源论”，认为在尚未离开母鸡体的卵中就已经存在胚胎发育所需要的一切物质。他认为，活力论不是对外在的非物质实体的论述，而是对生物有机体拥有某种类似于牛顿万有引力的力的承诺，这种力有其自身的特点，可以认识但其本质最终未知。斯帕兰扎尼(Lazzaro Spallanzani，1729—1799)也坚持“卵源论”，他用青蛙进行实验表明，青蛙的卵如果非常接近而不是接触精液，就不会产生青蛙，从而否定了哈维和法布里修斯“精气”之说，甚至他还于1779年成功地完成了动物的人工授精。

不过，进入18世纪，生物发育学的进一步研究呈现出一些新的科学事实，一定意义上证伪了“预成论”而支持“渐成论”，“渐成论”逐渐崛起。

活力论先驱斯塔尔的观点在其故乡德国迅速发展起来。1740年，特伦布利(Abraham Trembley，1710—1784)在池塘中发现了一种有触角的生物(水螅)，这种生物有机体看起来像水生植物，但它又同时具备动物的特征(可以移动、收缩)。为了准确识别该种生物有机体的属性，特伦布利把该生物有机体切成小块。令他惊讶的是，切割后的水螅碎片(水螅体，polyp)继续长出了许多新的水螅，就像植物的剪枝一样，切开的水螅越多，再生的水螅就越多。[[23]](#footnote-23)

特伦布利的水螅实验对当时的科学界尤其是发育生物学界，产生了巨大的冲击。从水螅体到水螅的发育并没有按照预成论者所认为的那样，从已经具备生命形式的预成胚胎(embryos)开始，而是直接从水螅体发育为水螅。这是渐成的，完成这一过程的动物发育不是由预先存在于胚胎中的微小生物体逐渐长大，而是生命形式在每一代中的后成呈现。

问题是造成渐成论的原因是什么呢？机械论难以解释，要求助于那样一种在生物生长发育过程中一生都起作用的力量。这就是生命世界特有的活力。

德国生物学家沃尔夫(Caspar Friedrich Wolff，1733—1794)1759年完成了他的博士论文《繁殖理论》(“Theory of Generation”)，系统地叙述了他对各种动物所做的观察，并由此得出一个哲学观念——胚胎发育是“渐成的”。论文完成后，沃尔夫将此送给哈勒审核。后者以宗教的理由否定了沃尔夫的论文。对此，沃尔夫明确指出，一个科学家唯一追求的是真理，他不应以神学为根据预先判断材料的正确程度，而应以科学为根据来作出判断。1768年，沃尔夫通过观察鸡的胚胎发育发现，鸡卵原是没有任何结构的透明的质体，在发育过程中这些同质成分逐渐出现腔和管，然后又逐渐形成鸡的各种内脏。他写道：“我们可以得出结论，体内各种器官并不始终存在，而是逐渐形成的，不管其形成过程如何。我并不是说，它们的形成是由于某些粒子的偶然结合，是某种发酵过程，是通过机械原因或是通过灵魂的活动，我只是说，它是逐步形成的。”[[24]](#footnote-24)

在这里，沃尔夫似乎没有机械论或活力论的价值取向。不过，进一步研究表明，沃尔夫是最早成为德国自然哲学信奉者的生物学家之一。受这种哲学影响，沃尔夫认为，自然中渗透着一种生命力，正是它作用于匀质的生物有机体上，激发出创造和繁殖过程，分化出各种结构。[[25]](#footnote-25)

由于斯塔尔、特伦布利、沃尔夫都是德国人，这也使得活力论的观点在德国迅速发展起来。对此，康德(Immanuel Kant，1724—1804)也功不可没。

面对由预成论和渐成论引发的关于生物有机体发育的机械论和活力论争论，康德试图走一条中间道路。康德在《目的论判断力的批判》(*Critique of the Teleological Power of Judgment*)的开篇区分了外在的和内在的目的性(external and internal purposiveness)。外在目的性构成人工产物(artifact)——由有意识的制造者为特定目的而生产，内在目的性适用于自然产物，定义生物有机体的生长、繁殖等特殊现象。[[26]](#footnote-26)康德将有组织的生命(organized beings)称为“Naturzwecke”，即自然目的(natural purposes)。自然目的具有以下特征：自然目的是自然产生的单元，它在部分和整体的关系方面是目的论地组织的；自然目的不需要外在主体而自我产生，即是自组织的(self-organizing)，自己是自己的原因和结果；整体和部分相互决定。因此，适用于有组织的生命的内在目的论原则，指的是有组织的自然产物内的所有部分都既是目的也是手段。

然而，康德认为目的性只是调节性(regulative)原则，对于反思有组织的生命来说主观上有效，但对于确定有机体的属性而言却不是客观有效的。[[27]](#footnote-27)也就是说，康德认为目的论对于生物学而言是一种启发式(heuristic)工具，具有认识论层面的效果而不提供本体论承诺。由此，从康德生物目的论的观点，很难确定康德究竟是活力论者还是机械论者。他似乎倾向于机械论，但又指明目的论对于生物学而言是不可缺少的。

康德有关生物目的论的思想推动了活力论的发展，尤其体现在布卢门巴赫(Johann Friedrich Blumenbach，1752—1840)的后成论思想中。布卢门巴赫提出，“Bildungstrieb”[[28]](#footnote-28)概念是生命力(Lebenskräfte)的一种，通过这种生命力，生物有机体可以维持其各种功能。Bildungstrieb拥有两个重要特征：第一，它不能被还原为生成液(generative fluid)的化学成分。遵循康德的路线，布卢门巴赫强调生命概念具有内在目的论特征，如果改变其整体的任一组成元素，则整体的组织就将被完全改变。第二，作为一种活力论形式，Bildungstrieb并非独立的实体，而是附着于(superimposed)物质之上，来自生物的化学成分和物理成分之间复杂的相互作用，但是这种作用又不能解释它。为此，布卢门巴赫将Bildungstrieb描述为牛顿式力的有机版本，称之为“活力的唯物论”(vital materialism)。[[29]](#footnote-29)

布卢门巴赫很好地贯彻了康德的目的论思想，但同时也延续了康德思想中的矛盾——他提出了一种无法被物理和化学还原解释的生命力，但他又不想这种生命力脱离于物质、隶属于物质。说到底，布卢门巴赫或许最终也无法说明Bildungstrieb究竟是什么，Bildungstrieb是一种神秘的类似于牛顿力的生命力，引导生命的发育进程。

根据考证，最早使用“vitalist”(“活力论者”)一词的科学家是18世纪90年代蒙彼利埃(Montpellier)医学院的院长仲马(Charles-Louis Dumas，1765—1813)，他领导并形成了蒙彼利埃学派。这一学派将他们自己称为“蒙彼利埃活力论者”。这些活力论者并没有提出形而上学的活力，但是有其自己的活力论(“vitalism”)观点。沃尔夫(Charles T. Wolfe)称之为“蒙彼利埃活力论”(Montpellier vitalism)，并将蒙彼利埃活力论的特征概括为：对希波克拉底(Hippocratic)传统的援引，强调对有机体的整体观察；整体论的烙印，即个体的生命是许多微观生命(micro-lives，被视为个体生命的器官)的结合；这种整体论之于机械论以及唯物论是友好的。[[30]](#footnote-30)

不仅如此，蒙彼利埃活力论者还提出了“动物经济”(animal economy)概念。“动物经济”是一种整体的活体(living body)模型，强调活体的结构(身体的各部分及其位置)和功能(身体各部分的行为和运动)。其中，活体的组成部分是有生命的，活体的组成部分的位置分布、排列(结构)以及部分之间的相互作用(功能)，与部分的生命性共同导致活体整体生命的维持，以此区别于死体(dead body)。蒙彼利埃活力论者以蜂群为例解释动物经济，一群蜜蜂聚集在树上形成整体，蜂群的组成部分(每个蜜蜂)都具有生命，蜜蜂之间的位置排列(结构)以及蜜蜂之间的挤压、推动(功能)使得蜂群整体能够维持稳定于树枝上的状态。沃尔夫认为，“动物经济”是一种基于机械模型和唯物论的将生命体(living body)的结构和功能结合起来的混合概念。它既区别于机械论也区别于万物有灵论，同时区别于拥有形而上学假设的活力论，具有唯物论立场，因此他将其称为“结构-功能活力论”或“功能活力论”(结构性生命力)。[[31]](#footnote-31)

(2)从浪漫主义自然哲学到新活力论

到了19世纪早期，浪漫主义逐渐取代启蒙运动思想成为主流。在浪漫主义的影响下，德国产生了浪漫主义的自然哲学(Romantic Naturphilosophie)。浪漫主义自然哲学家如谢林(Wilhelm Joseph Schelling，1775—1854)有着非常强烈的活力论倾向，他们提出活力应该作为个体生物有机体行为和发育的解释，并且将宇宙本身作为一个生命体，使用诸如“生长”“发育”“成熟”等词语来描述自然和宇宙的历史。[[32]](#footnote-32)然而，浪漫主义自然哲学与启蒙时期的活力论又有较大的差别，不能将其归于启蒙时期活力论阵营。雷尔(Peter Hanns Reill)认为：“毫无疑问，如果没有启蒙时期活力论者创造的概念，浪漫主义自然哲学是不可能被构建的。但在其目标、假设和结论方面，浪漫主义自然哲学与启蒙时期活力论有本质区别……浪漫主义自然哲学试图发展一种不同的自然语言，同时对物质、现实、科学方法和认识论做出新的定义，这些定义与启蒙时期活力论者提出的定义相矛盾。”[[33]](#footnote-33)相较于启蒙时期活力论，浪漫主义自然哲学似乎是对机械世界观的“全盘否定”，试图创建一种类似于古希腊有机世界观的活力论世界观。因此，浪漫主义自然哲学是一种形而上学的(metaphysical)活力论，不承认机械论者的世界观及其对物质的认识，而启蒙时期的活力论者主要聚焦于生物有机体或生命的特殊性，并没有否定生物有机体的物质基础，更没有试图打破唯物论的世界图景。不可否认的是，即使浪漫主义自然哲学与活力论有本质区别，但浪漫主义自然哲学仍然推动了活力论在19世纪的发展。例如，谢林发展了康德和布卢门巴赫的活力论思想，认为有机性质的特征是功能的递增序列(ascending sequence of functions)，这些功能是同一活力原则的不同表现。[[34]](#footnote-34)为此，施泰格瓦尔德(Joan Steigerwald)指出：“谢林的自然哲学对生产力(productivity)的强调鼓励了19世纪初对有机活力(organic vitality)的重新思考转向基于有机功能的生命科学的概念。”[[35]](#footnote-35)

19世纪初，活力论处于一个“尴尬的”境地。一方面，生物机械论仍然具备强大的影响力；另一方面，生物活力论观点层出不穷，有机和无机之间的鸿沟仍然没有跨越，这就导致许多今天被归类为活力论者的科学家其实持有一种机械论与活力论“杂糅”的观点。伯纳德(Claude Bernard，1813—1878)的活力论观点，正是在这种纠结中提出的。

伯纳德十分拥护机械论带来的唯物论形而上学和还原论实验传统，认为“无论‘活机器’(living machine)拥有多少独特的特征，实验的化学以及生命的化学都服从于相同的定律，不存在两种不同的化学”[[36]](#footnote-36)。然而，伯纳德又意识到传统的机械论实验对于生物学研究的局限性，强调生物有机体的独特属性，即：基于内在力的“内环境”(Milieu intérieur)。也正是在对环境的关注中，伯纳德发现传统实验控制的局限，转而寻求活力论原则——有机与无机之间的区分。[[37]](#footnote-37)伯纳德将实验生理学与其活力论思想结合，标志着坚持使用“活力”为普遍解决方法的传统活力论的结束，以及向接受复杂性和独特性为中心特征的生命体生理关系的理解的转向。[[38]](#footnote-38)伯纳德一方面认为，生物有机体服从于物理化学定律，甚至将有机体作为“活机器”以拒斥形而上学的活力论；另一方面认为，机械论方法在研究生物有机体的过程中有局限性，坚持生物有机体的独特性，即保持内部稳定的能力。为此，有学者将伯纳德的活力论观点称为“物理的活力论或自然化的活力论”(physical vitalism or naturalized vitalism)。

伯纳德的思想深刻影响了19世纪中后期以及20世纪初生物活力论者，他们被称为“新活力论者”(neo-vitalists)。根据桑德(Klaus Sander)的观点，新活力论特指19世纪末细胞和发育生物学兴起之后的活力论，与之前的活力论观点不同。[[39]](#footnote-39)然而，与传统活力论类似，新活力论仍然寻求“活力原则”。[[40]](#footnote-40)

根据考察，伯纳德的自然活力论与杜里舒(Hans Driesch)和柏格森(Henri Bergson)的新活力论有本质区别，通常认为杜里舒的活力论观点仍然是本质主义活力论或形而上学活力论，而伯纳德并未寻求“活力”概念，只是认为有机体的独特性在于自我调节并保持内稳态的能力。因此，还不能简单地说是伯纳德影响了新活力论者。

1842年，李比希(Justus von Liebig，1803—1873)在《动物化学》(*Animal Chemistry*)一书中，既为机械论辩护，也持有活力论的观点。他把活力描述为特定物质所具有的一种特性，当该物质的基本粒子以某种排列或形式结合在一起的时候，这种特性就会比较明显。这种力类似于重力和电力，源于生命系统的复杂性。

杜里舒(1867—1941)和柏格森(1859—1941)是新活力论的代表人物。鉴于柏格森的活力论更偏向于一种哲学思想，在此不作介绍。对于杜里舒的活力论思想，与他对鲁克斯(Wilhelm Roux，1850—1924)实验的重新考察和反思有关。

鲁克斯的实验对象是青蛙卵子，他认为第一个卵子包含了后续发育所需的所有遗传物质，而卵子的进一步分化(differentiation)会将不同的遗传物质分配到不同的细胞中，从而形成胚胎发育的“镶嵌模型”(mosaic model)。为此，鲁克斯通过著名的青蛙卵实验来验证他的观点。如图11.1所示，鲁克斯使用一根热针(hot needle)刺穿了双细胞青蛙胚胎的其中一个细胞(上行两个图片的左侧为未破坏细胞，右侧的大细胞为被破坏后的细胞)，左侧未受破坏的细胞基本上正常发育图11.1左图，已经发育出背唇Ee以及三个细胞层，到了图11.1右图阶段左侧细胞已经形成了神经板的褶Md)，而右侧被破坏的细胞仍未分化，保持大细胞状态。鲁克斯的胚胎发育镶嵌模型是一种机械论的预成论模型：胚胎发育所需的遗传物质存在于初始细胞中，随着细胞的分化，初始细胞中的遗传物质被分配到分化后的各个细胞中，胚胎整体的发育是各个分化细胞的镶嵌过程。[[41]](#footnote-41)

Roux
                experiment

图11.1　鲁克斯的青蛙卵实验(1888年)[[42]](#footnote-42)

杜里舒重复了鲁克斯的实验，却发现了不同的现象。杜里舒使用海胆(sea-urchin)的卵子作为实验对象，在细胞阶段摇动海胆卵直到一个细胞死亡或两个细胞分离。起初，这种分裂的结果似乎证实了鲁克斯的镶嵌模型——从分离的胚球中产生了半球形而不是正常卵子产生的球形。如图11.2所示，被分离的两细胞阶段性胚胎卵裂(cleavage)是部分的，即每个产生的细胞层(cell tiers)只包含正常细胞数的一半(即左图和中图中的半8和半16细胞阶段)。到了半32阶段，即胚胎发育成一个开放的半囊胚(blastula)阶段后，半囊胚会闭合开始遵循正常的发育过程[[43]](#footnote-43)，它已经形成了通常的球形，而且只有大小是正常的一半之外，其余各方面都正常。这种整体性持续存在并最终产生了一个小而完整的海胆的幼体。[[44]](#footnote-44)



图11.2　杜里舒的海胆卵实验[[45]](#footnote-45)

杜里舒的海胆卵实验证明胚胎具有自我调节和自我重组能力，驳斥了鲁克斯机械自然观的胚胎发育先成论，表明胚胎发育涉及新的结构和多样性的出现，没有任何复杂的物理化学机器可以被分割成仍然是整体的部分，除非这种机器具有类似于有机体的自我调节能力。

综合以上讨论，杜里舒的核心观点是类似于机器的系统仅仅是部分的集合，并不具备有机体的整体性(wholeness)特征，这说明除了物理化学定律以外，生物有机体中应该还有其他的因果因素(causal factor)——“隐德来希”(entelechy，也可译为“生机”)。“entelechy”一词源自亚里士多德，词源“en-telos”表示自身带有目的的东西，它包含在其控制下的过程所指向的目标。将“隐德来希”概念应用于生物有机体或胚胎的发育，杜里舒认为在发育的正常路径被干扰的情况下同样的发育目标可以通过不同的路径达到，该现象被杜里舒称为“等定性”(equifinality)——生物有机体的发育和行为在“隐德来希”层次体系(hierarchy)的控制之下，不同层次的“隐德来希”都来自以及服从于生物有机体的总体“隐德来希”。

杜里舒对隐德来希的描述对于当时的科学而言是超前的，他认为隐德来希并不是神秘的活力，而是一种非空间的(non-spatial)，但却又可以作用于物理化学过程所在空间的因果因素。区别于经典物理学的决定论，杜里舒指出既然非能量性(non-energetic)的隐德来希可以作用于物理过程，那么物理过程就不是完全决定性的。他认为有机体内的微观物理过程并不完全由机械因果关系决定，隐德来希可以通过影响微观物理过程的具体时间来暂停(suspending)它们，或在需要达到隐德来希的目的时释放它们。这种暂时中止无机物形成(becoming)的能力是隐德来希最重要的本体论特征。[[46]](#footnote-46)

通观活力论发展历程，活力论是在与机械论的抗争中诞生、成熟的。活力论的特征可以总结为以下几点：第一，生物(living)和非生物(nonliving)的本体论不连续性承诺，认为生命体具有非生命体不具备的生命原则；第二，活力论者提出的生命原则往往不能被物理化学定律解释，是作为指导生物有机体生存和发育的目的论原则；第三，活力论者认为生物有机体具有系统层级的特征，拒斥认识论和方法论层面的还原论而寻求自上而下的因果解释。活力论与机械论的核心区别在于活力论者拒绝将生物有机体(生命体)等同于惰性物质(dead matter)，认为生物有机体以及生命具有独特性、自主性和整体性，为此他们援引类似于古代有机自然观的活力概念。需要注意的是，近代以来生物学活力论者提出的活力并不完全脱离物质基础，但他们通常也无法给出活力的确切性质，这也是活力论被机械论者诟病为神秘主义并逐渐衰败的重要原因。

(3)活力论的衰落及其遗赠

正如上文所述，活力论者认为生命体与非生命体有本质区别，有机物与无机物之间具有一条无法跨越的鸿沟。随着有机化学、生物化学以及细胞学说的出现及发展，这条鸿沟逐渐消失，也带来了活力论的衰败。

拉瓦锡早在18世纪就成功地证明生命物质的基本组成主要是碳、氢、氧和氮，有机物与无机物并没有本质区别。1773年，罗埃尔(Hilaire Rouelle，1718—1779)发现尿素。1828年，维勒(Friedrich Wohler，1800—1882)在一篇论文中证明自己在将氰酸与氨结合或者通过氰酸银和氯化铵的双重分解，来生产氰酸铵时总会产生尿素。[[47]](#footnote-47)在此之前，尿素被认为是一种动物才具备的有机物质，而活力论者认为有机物质与无机物质是不可转化的。维勒的尿素合成打破了无机物与有机物之间的界限，表明有机物——作为生命物质主要组成成分，与无机物——作为非生物物质组成成分之间，没有根本性的差别，进而证明“活力论”的“有机化合物，只能通过生物细胞在一种特殊的力量‘生命力’的作用下产生”的观念，是错误的。

对于维勒的尿素合成之于“活力论”衰落的意义，长期以来科学界和哲学界给予高度评价。维基百科(Wikipedia)在有关《维勒尿素合成》(Wöhler Synthesis)的条目中评论道：“维勒的这个发现有重大的历史意义，它有力地证明了有机物是可以从无机物合成的，从而推翻了当时阻碍化学发展的生命力论”[[48]](#footnote-48)戴维·克莱因(David Klein)说道：“1828年，维勒将氰酸铵这种无机盐转化成了一种在尿中发现的有机物尿素，沉重打击了活力论。在随后的几十年时间里，人们又发现了其他例证，活力论的概念逐渐被否定。”[[49]](#footnote-49)

根据上述评价以及现在人们对维勒合成尿素意义的一般性认识，似乎在维勒合成尿素后的几十年间，化学家把维勒合成尿素的实验视作“划时代”的发现，标志着活力论的消亡以及有机化学作为化学分支的诞生。这被彼德·J. 拉姆伯(Peter J. Ramberg)称为“神话”，甚至在他的一项有关现代有机化学教材的调查中，他发现90%的教材都提到了维勒的这一发现对于活力论消亡的重大意义，创造了“宣告活力论终结的‘神话’”。[[50]](#footnote-50)

对于这一神话，拉姆伯做了详细分析，认为其可浓缩为三点：第一点是维勒用元素合成了尿素；第二点是合成物在定律不变的情况下统一了有机化学和无机化学；第三点是尿素合成摧毁或至少削弱了生物活力论。之后，拉姆伯根据其他人的科学史考察，发现以上三点都是站不住脚的。第一，维勒是否“用元素”合成尿素有争论，而且维勒尿素的合成在当时不被认为是人工合成的，因为原料中也许有“活力”；第二，早在合成尿素出现之前，化学家的实验操作就采纳了贝采尼乌斯的假说，即有机化学物质与无机化学物质应遵循相同的化学合成定律，而非维勒的尿素合成统一了有机化学和无机化学；第三，“活力论”不是关于单个对象的单一理论，而是关于生物组织系统的各种理论，涉及生命本质的一套看法。由于单个化合物的合成对组织系统的“活力论”几乎没有影响，所以，维勒和他的老师贝采尼乌斯在往来信件中就没有探讨尿素的合成对“活力论”的影响，早期的有机化学教材里也没有对维勒的尿素合成进行介绍，维勒尿素合成后活力论仍然继续存在于化学和生物学领域之中。[[51]](#footnote-51)考察酒石酸偏振现象的发现及其解释，支持上述论断。

1815年，比奥(Jean-Baptiste Biot，1774—1862)发现，在实验室里合成出来的酒石酸不能使光发生偏振(光波的横向振动偏向于某一方向)，而通过葡萄生产出来的酒石酸却能够使光偏振。这是什么原因呢？这种由相同的元素组成以及具有相同分子式的物质——同分异构体，为什么会有不同的光的性质呢？在当时，这只能通过“活力”来解释，从而就支持了“活力论”。

1848年，巴斯德(Louis Pasteur，1822—1895)对来自实验室合成的酒石酸进行分离，发现其中的酒石酸分为两种，一种沿一个方向偏振，另外一种沿相反方向偏振，呈现出左手性和右手性对称的形式。对于这种不对称的分子，巴斯德解释道，它们是由一种叫做“不对称力”的活力作用使然。对于酒精发酵，他也持有类似观点。

1894年，埃米尔·费雪(Emil Fischer，1852—1919)对发酵和酶的作用明确提出一种化学的、机械的解释，认为生物不对称性的来源是酶中的不对称现象，它和不对称分子就像锁和钥匙的关系。

弗朗西斯·杰普(Frances Japp，1848—1928)不同意费雪的观点，认为费雪的看法即使是对的，但是仍然没有解释不对称的起源，分子不对称的起源需要非物质诱因：“从生命一出现，一种指令性的力就开始作用，它让这位聪明的操作者可以按照自己的意愿选择结晶对应结构体，拒绝其不对称的异构体。”[[52]](#footnote-52)

上面的案例比较充分地说明，尿素的合成并没有终结活力论，在此之后活力论又存在了一段时间并存在关于此的争论。

既然如此，关于维勒的尿素合成之“神话”又是怎样产生的呢？拉姆伯参考他人的研究总结道：“在维勒去世之后也就是1882年开始，神话开始广泛传播，部分原因是为了验证有机化学具有了学科的理论自主性，不必再借用生物学或物理学的概念；部分是因为德国化学家希望强大的德国化学界(合成在德国化学界中处于核心地位)‘起源’自他们自己的国家。对于生物学家来说，在生理学家采用严格的机械论方法及化学或物理学的定量方法，剥开生物学‘伪科学’的一面(如活力论)以使其‘更科学化’的过程中，活力论被过分简化的神话形象起了不错的陪衬。”[[53]](#footnote-53)

不能说拉姆伯的上述分析没有一点道理，人工合成尿素事实上并没有完全扼杀活力论，但是，也不能就此完全否认维勒的尿素合成对于活力论的冲击作用以及人们利用其促使活力论消亡的过程中所起到的重大作用。而且，考察维勒之后的生物学、有机化学和生物化学的发展，尿素的合成也确实对活力论的衰落和消亡起到了推波助澜的作用。

19世纪中叶，以穆勒(Johannes Peter Müller，1801—1858)为首的生理学家致力于扫除生理学解释中的活力概念，统一生理学与其他物理科学，使得活力论进一步瓦解。

1861年，凯库勒(Friedrich Kekule，1829—1896)在出版的《有机化学教程》第一卷中，把有机化合物定义为仅仅是含有碳的化合物，从而首次把有机物看作是一种非生命力的存在。

1897年，毕希纳(Eduard Buchner，1860—1917)发现，原先作为活细胞生命过程的发酵，可以在细胞不在场的情况下发生。这表明生命中的某些无生命的物质可以从生命体中解析出来，执行生命的功能。这对当时研究生物学的人们的思想观念产生了革命性的冲击，表明生命过程即使没有生命，也有可能和无生命世界的现象一样，可以通过科学实验和观察寻求答案。这就为细胞化学的机械论研究做好了准备。

1901年，日本的高峰让吉(Jokichi Takamine，1854—1922)从肾上腺中分离出肾上腺素，发现它能够使血管收缩和血压上升。而且他还人工合成了这一物质。这对“活力论”又是一次打击。

1902年，贝利斯(William Maddock Bayliss，1860—1924)和斯塔林(Ernest Henry Starling，1866—1927)发现促胰腺素触发胰腺分泌消化液。他们把这些物质称为“激素”，也叫“荷尔蒙”。它们由躯体中的某一个腺体分泌，通过血液流动输送到躯体的特定部位的细胞中，以调节各种化学过程，进而影响生物的特定功能。

这就是生物化学，即通过化学反应及其过程来研究并解释生命功能和生命现象。如此，生命现象就由化学物质以及化学反应和过程所体现，生命被“祛魅”了。

1912年，洛布(Jacques Loeb，1859—1924)出版《生命的机械概念：生物学的文章》(*The Mechanistic Conception of Life: Biological Essays*)，体现了机械论对活力论的消解，活力论被归为形而上学假设而渐渐淡出人们的视野。

迈尔将活力论衰落的原因总结如下：第一，活力论越来越多地被看作是一个形而上学概念而不是科学概念；第二，生物有机体是由一种与无生命物质完全不同的特殊物质构成的信念逐渐失去支持；第三，所有活力论者试图证明非物质活力存在的努力都以失败告终；第四，新的生物学概念被用来解释曾作为活力论证据的现象。[[54]](#footnote-54)

对于最后一点，除了从上述有机化学、生物化学的发展中得到说明，也可以从细胞学说以及胚胎发育学说的推进中得到体现。

1665年，胡克用显微镜观察软木时，看到了像修道院里的一间间小室样的结构，他将此命名为“细胞”，但是，他没有想到他所看到的是生命的基本组成。

1831年，布朗(Robert Brown，1773—1858)发现细胞中心有一个小的暗色结构，并将此取名为“核”。但是，所有人包括布朗本人都不理解这些微观结构的意义。

1835年，帕金基(Jan Evangelista Purkinje，1787—1869)发现动物皮肤是由细胞构成的。这一发现并未受到更多人的关注，他也没有推进这一理论。

1838年，施莱登(Matthias Jakob Schleiden，1804—1881)提出，所有植物组织实际上都是由细胞组成的，这是所有植物的基本模块。1839年，施旺(Theodor Schwann，1810—1882)指出：所有动物组织也是由细胞组成的；卵是单个细胞，器官由此发育而来；所有生命都是由单个细胞开始的。19世纪40年代，柯里克尔(Rudolf Albert von Kölliker，1817—1905)证明精子也是细胞，神经纤维则是细胞的组成部分。

到此，生物的胚胎发育也就有了一个基本的概念：精子细胞和卵子相结合，之后再由细胞发育成各种生物的组织及其器官。至于弄清细胞如何发育(后称为“分裂”)，则是许多年之后的事情了。

米歇尔(Friedrich Miescher，1844—1895)于1869年在细胞核中观察到核酸的存在；列文(Phoebus Aaron Theodor Levene，1869—1940)于1909年首先发现核酸中含有糖，这就是核糖。1929年他又发现核酸中还含有另外一种糖——脱氧核糖。前者叫核糖核酸(RNA)，后者叫脱氧核糖核酸(DNA)。

19世纪80年代弗莱明发现了染色体。但此时没有人认识到它与遗传有关系，直到1911年摩尔根(Thomas Hunt Morgan，1866—1945)才成功地证明了染色体携带了遗传信息。之后，人们认识到染色体既含有DNA，也含有蛋白质，而蛋白质的结构更复杂，似乎更适合作为遗传物质的最佳对象。至于将DNA作为遗传物质的携带者，则是20世纪40年代的事情了。

概括上述生物学的研究历程：科学家首先在宏观解剖学层次上对生物体进行分离，以获得对系统、组织等的认识；然后通过光学显微镜和电子显微镜，在组织学层次上进行分析，以“看到”细胞器、微管结构的细节，甚至大分子本身；最后在化学层次上进行分析，以确定DNA的结构、性质等，提出“中心法则”，从分子水平上揭示遗传的特征。这种研究历程可粗略由图11.3所示。图中上面一排的放大倍数可通过光学显微镜获得，中间一排通过电子显微镜获得，下排所示的分子结构由物理实在的化学符号表示。

从上面的论述可以看到，机械论自然观在生物学中的贯彻不像在物理学和化学中那样迅速和坚定。这也是由这门学科研究对象的特点决定的。在牛顿之后，有一些科学家确实是将物理学中的力学概念应用到生命世界中，但是，许多生物学家反对这种纯粹的机械论方法。他们认为，生命物质不同于物理的和化学的物质，也不同于星球与岩石，似乎有某种“生命力”的存在。这就是所谓的“活力论”。不过，随着有机化学的诞生以及化学在生物学中的应用，这种观念受到冲击并最终被抛弃。



图11.3　细胞构件的相对大小[[55]](#footnote-55)

总之，通过上述机械自然观在生物学领域的贯彻，原先神秘的生物生命被“祛魅”为生命物质的组成成分——细胞、细胞核、染色体、核酸、基因等。作为物理的空间和化学分子及其结构的“基因”代替了“灵魂”“隐德来希”(希腊原文为entelecheia)、“普纽玛”(pneuma)、“阿契厄斯”(archeus)、“原型”(prototype)等众多有灵论、活力论的概念，成为遗传的基础，揭开了笼罩在生物遗传世界中的魔力迷雾。到此，“预成论”与“渐成论”的争论也才有定论。

在以上科学发展的意义上，玻尔兹曼(Ludwig Edward Boltzmann，1844—1906)于1886年在皇家科学院的一次讲演中直截了当地宣告：“如果你要问我，我们的世纪是钢铁世纪、蒸汽世纪，还是电气世纪，那么我会毫不犹豫地回答，我们的世纪是机械自然观的世纪。”1888年，汤姆逊(Joseph John Thomson，1856—1940)在回顾了19世纪物理学主要进展以后，也强调指出：19世纪物理学的这些进展，其“最引人注目的一个结果就是增强了用力学原理来说明一切物理现象的信念，促进了追求这种说明的研究”。他进而表述了他自己以及19世纪绝大多数科学家的那种共同信念：“一切物理现象都能够从力学的角度来说明，这是一条公理，整个物理学就建造在这条公理之上。”[[56]](#footnote-56)

(二)自然的“简单”与“简单性原则”

考察古希腊自然哲学家的思想，如泰勒斯的“水”、阿那克西美尼的“气”、毕达哥拉斯的“数”、赫拉克利特的“火”、德谟克利特的“原子”等，莫不把世界的本原归结为一种或几种物质或要素。这是物质构成上的简单性。

至于物质运动上的简单性，与古代人们对自然的认识有关。欧几里得在他的《反射光学》(Catoptrica)中根据光线在同一介质中沿直线传播的公设，证明了光线在镜面反射时入射角和反射角是相等的。后来亚历山大里亚城的希罗(Heron，公元62年左右，生平不详，又叫“赫罗”或“赫伦”)进一步证明，光线在镜面反射时所经过的路径是最短的一条。希罗把这个结论叫做最短路径和最少时间原理，并把它运用到凹和凸的球面镜的反射问题上。[[57]](#footnote-57)自那以后，一种根深蒂固的信念影响了许多物理学家和生物学家，这就是：大自然必定以最短捷的可能途径行动。公元6世纪，奥林匹奥多鲁斯(Olympiodorus)在他的《反射光学》中就说：“自然不做任何多余的事或者任何不必要的工作。”[[58]](#footnote-58)中世纪哲学家阿维罗伊和英国自然哲学家格罗塞特斯特(Robert Grosseteste，1175—1253)都相信，简单性是自然界的一个特征。格罗塞特斯特还认为，自然总是以数学上最短和可能最好的方式行动。[[59]](#footnote-59)

到了近代，古代本体论意义上的这种简单性原则被近代科学家继承并发扬。如牛顿把上述简单性原则作为一种信念置于众多法则之首，以至在他的名著《自然哲学之数学原理》中认为，“因此哲学家说，自然界不做无用之事，只要少做一点就成了，多做了却是无用；因为自然界喜欢简单化，而不爱用什么多余的原因以夸耀自己”[[60]](#footnote-60)。莱布尼兹(Gottfried Wilhelm Leibniz，1646—1716)则认为，上帝是以实现最大限度的简单性和完美性的方式来统治宇宙的，他所提出的“单子”概念集中体现了这一理念。他认为，构成世界万物的基础是不具广延的、无限的、不可分的、能动的精神实体——“单子”，“单子”所具有的“知觉”的清晰程度不同，造成了“单子”质的千差万别和“单子世界”从最低级的“单子”(具有“微知觉”的无机物和植物)到最高级的“单子”(上帝)的等级不同的序列。“单子”是能动的、不能分割的精神实体，是构成事物的基础和最后单位；单子是独立的、封闭的，没有可供出入的“窗户”，然而，它们通过神彼此互相发生作用，并成为一个连续性的和谐一致的整体，这是上帝在创造单子时就已预定了的和谐，其中每个“单子”都反映着、代表着整个世界。

既然在本体论的意义上自然是简单的，那么在认识自然时就应该遵循并体现简单性原则。关于此，最著名的当数中世纪经院哲学家奥卡姆的威廉了（William of Occam）。他坚信自然的简单性，认为“如无必要，勿增实体”(Entities should not be multiplied unnecessarily)，即当可以用少数几个原理或原则来说明事物的时候，就没有必要用许多的原理或原则来说明——“奥卡姆剃刀”(Occam’s Razor)。爱因斯坦也提出：“自然规律的简单性也是一种客观事实，而且正确的概念体系(scheme)必须使这种简单性的主观方面和客观方面保持平衡。”[[61]](#footnote-61)海森堡(Werner Karl Heisenberg，1901—1976)坚信：“我相信自然规律的简单性具有一种客观的特征，它并非只是思维经济的结果。如果自然界把我们引向极其简单而美丽的数学形式——我所说的形式是指假设、公理等等的贯彻一致的体系——引向前人所未见过的形式，我们就不得不认为这些形式是‘真’的，它们是显示出自然界的真正特征。”[[62]](#footnote-62)

这是从本体论意义上的简单性原则，走向方法论意义上的简单性原则和认识论意义上的简单性原则。主要指的是，在构建和评价科学理论时，要着眼于自然的简单性——自然的明晰性、线性、周期性、对称性、最优性等，运用尽可能少的基本概念、公理和公设，以及尽可能简单的数学语言、符号、方程等，来解释或预言尽可能广泛的经验事实和表象。此时，越简单的理论越正确。如对于黄铜棒，它的温度和它的长度之间有什么样的关系呢？要回答这个问题，我们的科学家首先要进行实验，获得相关数据，然后在此基础上，建构和选择科学理论来反映这种关系。

对于黄铜棒，可以这样进行实验：在室温为20℃时，设定棒的长度为1.0000米，然后加热棒，并且每隔5℃测量它的长度。由此可以得到黄铜棒的长度与温度之间的对应数值如表11.1所示。[[63]](#footnote-63)

表11.1　黄铜棒的长度与温度的对应数值

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 实验序列 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 温度/℃ | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 |
| 长度/米 | 1.0000 | 1.0001 | 1.0002 | 1.0003 | 1.0004 | 1.0005 |

在得到上述实验数据后，科学家就要建构相应的理论来说明这些数据。一般来说，可以这样建构：建立一个坐标系，以横坐标代表温度，以纵坐标代表长度，将上述所获得的实验数据标于坐标系中，如图11.4中“ⅹ”所示。根据构建理论的原则——理论与观察到的现象相一致，所构建理论的表征曲线应该通过这些数据点，这样的理论有多少呢？原则上可以有多个理论所对应的曲线通过它们，并且能够解释它们。典型的有图11.4中理论A、理论B和理论C三种。



图11.4　解释和检验一组实验数据的理论可以有多种[[64]](#footnote-64)

在上述三种理论中，理论A表征的图线解释了所有的被观察到的现象，通过了所有的实验数据点，预言了将来的情况，理论B、C也是这样。此时，哪一个理论是正确的呢？科学家一般会根据方法论意义上的简单性原则，即“自然是简单的，所构建出来的理论也应该具有综合简明性”，来选定理论A。

(三)自然的“还原”与“还原性原则”

哲学里“还原”(reduction)这个术语用来表示这样的思想：如果某一实际存在X还原为另一实际存在Y，那么在某种意义上Y优先于(prior to)X，也比X更基本，以至于X完全依赖于Y，或者X由Y构成。说X还原为Y通常暗示X只不过就是Y，或者X并不超出Y或者比Y多一点。

不言而喻，机械自然观就是一种还原论自然观，它认为，物质的世界可以还原为微粒和运动，包括“构成还原”和“运动还原”两种方式。

对于构成还原，如物质可以分为纯净物和混合物，纯净物可分为单质与化合物，单质又可分为金属、非金属和稀有气体，化合物又可分为有机化合物和无机化合物，之后它们还可以分为各种不同类型的物质。在所有这些物质中，有些是直接由分子构成的，有些是直接由原子构成的，有些是直接由离子构成的。分子可分为原子，原子可分为原子核和核外电子，原子核又可分为质子和中子，质子和中子又可分为各种类型的夸克。所有下一层次的存在要素都是上一层次存在的基础，并决定着上一层次的性质。对于运动还原，这是针对物质的运动而言的，即社会运动可以还原为生物运动，生物运动可以还原为化学运动，化学运动可以还原为机械运动，机械运动最后可以还原为力学运动。[[65]](#footnote-65)

由于科学家相信自然是可以还原的，所以他们在认识自然时就遵循还原论原则，对自然加以分离，不研究事物之间的内在关系，而去研究事物之间的外部关系；不通过认识整体来认识部分，不通过认识高层次的来认识低层次的，而是通过认识部分来认识整体，通过认识低层次的来认识高层次的。依据这一思路，学科之间可以呈现出如下的还原关系，即心理学—生物学—化学—物理学—力学，所有的自然现象最终都可以得到力学的解释。克里克(Francis Harry Compton Crick，1916—2004)就赞成这种观点，他说，我们可以希望有一个整体性的生物学能被更低的层次所解释，并且一直深入到原子的层面，任何东西都可能被物理学和化学所解释。[[66]](#footnote-66)

对生命体构件的科学分析以及遗传本质的研究路径，比较充分地说明了这一点。这种研究方式体现了生物学还原论，即只有通过对生命物质组成成分，如分子以及细胞本身的深层研究，我们才能充分理解生命。

自古以来，人们就对“种瓜得瓜，种豆得豆”的现象印象深刻，但一直不明白蕴含于其中的原理。直到1865年孟德尔(Gregor Johann Mendel，1822—1884)发现生物遗传学规律——分离定律和自由组合定律，关于这一点才有突破，即遗传物质能够独立存在，并在生物繁殖过程中连同其所随附的性质或功能遗传给后代。

但是，这一遗传物质是什么呢？1909年，约翰森(Wilhelm Ludwig Johannsen，1857—1927)，在《精密遗传学原理》一书中根据希腊语“给予生命”之义，将孟德尔提倡的遗传因子命名为“Gen”(德文)，英译为“gene”，中文称作“基因”。

基因存在于哪里？基因是什么呢？这是进一步需要回答的问题。

——1903年，萨顿(Walter Stanborough Sutton，1877—1916)提出遗传因子与染色体一一对应的假说；1910年，摩尔根表明基因存在于染色体上。

——1928年，格里菲斯(Frederick Griffith，1879—1941)利用肺炎链球菌与老鼠所进行的一系列生物学实验结果显示，细菌的遗传信息会由转型(或称转化)作用而发生改变，基因应该是一类特殊生物分子——DNA。

——1944年，艾弗里(Oswald Theodore Avery，1877—1955)和他的合作者把DNA与其他物质分开，单独直接研究各自的遗传功能，发现DNA是生命的遗传物质，蛋白质不是生命的遗传物质。

——1952年，赫尔希(Alfred Day Hershey，1908—1997)和蔡斯(Martha Chase，1927—2003)进行了更有说服力的噬菌体实验，得到了更牢固的结论：生命的遗传物质是DNA，基因是由DNA组成的决定遗传信息的结构单位。

从1944年到1952年，用了整整8年时间，全世界的科学家才接受了艾弗里的结论——生命的遗传物质是DNA。

问题是：DNA的结构是怎样的呢？它又是如何完成生物遗传功能的呢？

——1952年，弗兰克林(Rosalind Franklin，1920—1958)拍摄了DNA的X光衍射照片。

——1953年，沃森和克里克提出了DNA双螺旋结构模型，又称为“沃森-克里克DNA双螺旋模型”(Watson-Crick DNA double helix model)。“双螺旋结构模型”打开了分子生物学的大门，确立了核酸作为信息分子的结构基础，提出了碱基配对是核酸复制、遗传信息传递的基本方式，最终确定了核酸是遗传的物质基础。

之后，1958年，米西尔逊(Mattew Meselson，1930—)和福兰克林·斯塔尔(Franklin Stahl，1929—)发现了DNA半保留复制；1958年，克里克提出了分子生物学的中心法则——储存着信息的DNA本身可以复制，信息可以从DNA传递到RNA再到蛋白质，而不能反向传递；1966年尼尔伦伯格(Marshall Warren Nirenberg，1927—)和科拉纳(Har Gobind Khorana，1922—2011)完成了遗传密码；1970年，特明(Howard Martin Temin，1934—)和巴尔德摩(David Baltimore，1938—)从鸡肉瘤病毒(rous sarcoma virus，RSV)颗粒中发现了以RNA为模板合成DNA的逆转录酶，进一步补充了遗传信息传递的“中心法则”。

“中心法则”表明，DNA是生物遗传的基本物质，遗传信息以碱基序列的形式贮存在DNA分子中，再由亲代传给子代，并决定了蛋白质分子氨基酸组成和序列等，从而决定了生物体的性状。DNA分子可以自我复制，将遗传信息传递给下一代。DNA分子也可以转录成mRNA，mRNA再把遗传信息翻译成蛋白质，如此，生物的遗传特征通过DNA—RNA—蛋白质的传递得到基因表达(gene expression)。蛋白质分子说明着生物功能的原因，而DNA分子则说明着蛋白质的原因，这一过程可由图11.5表示。

中心法则是分子遗传学基本理论。它表明，DNA是遗传的基本物质，DNA遗传密码指导蛋白质的合成，而蛋白质则是执行细胞生理活动的主要物质。通俗地说，“中心法则”就是说：一种基因决定一种蛋白质，从而决定着一种生物功能。由此，生物性状或功能就被还原为DNA分子，这是“基因还原论”(genetic reductionism)；“基因还原论”导致生物的性状或功能由基因决定，这被称为“基因决定论”(genetic determinism)。



图11.5　DNA结构和遗传信息流[[67]](#footnote-67)

如此，生命现象就被还原为DNA的化学属性，生命成为一种复杂的化学系统，以DNA的特殊性质以及被编码的蛋白质分子为基础。“一切具有生命的事物(包括人类在内)，都能够根据它们的物质组成要素——构成生命的原材料——以及这些材料的化学性质得到完全解释。”[[68]](#footnote-68)“DNA以其密码为生命构建蛋白质提供必要的信息，而蛋白质作为遗传信息和大多数我们已知的复杂天然化学物质的产物，在生命中起着关键作用。因而，如果生命是一场戏，DNA就是剧作家，而蛋白质则是这出戏的演员，它们共同演绎着生命现象中所有显著的特征。”[[69]](#footnote-69)

(四)自然的“规律”与“决定性原则”

机械自然观是规律性的自然观。自然的规律性表明自然具有机械的确定性、固有的秩序性、决定性、必然性和单一因果关联性等。

自然规律性的观念自古就有。米利都学派的世界本原学说、赫拉克利特的世界之“火”、恩培多克勒的“四根说”、留基伯和德谟克利特的“原子论”，都含有世界由某些基本元素生成而来的含义，其中体现了某种趋势和规律。毕达哥拉斯的“宇宙音乐和谐”、柏拉图的“数学理念”以及“数学天文学”，包含了天上的世界具有数学规律的和谐性的内涵。至于亚里士多德，虽然坚持天上的世界与地上的世界的不同，一个完美，另外一个不完美，但是，他坚持自然的内在目的论，由此也就表达了世界上的万事万物的存在都有其内在的目的，最终导向宇宙最完美的存在，就此而言，自然是有目的从而也就是有规律的。卢克莱修试图通过证明物质世界中的所有行为都是纯自然的，自然是合法的和有规律的，来消除对神的任意和超自然行为的恐惧——毕竟，如果神是任意的，即神具有自由意志，那么他就是难以琢磨的，不能通过理性把握。而且，由于物质世界体现了神的意志，所以在这种情况下，自然也是没有规律的。这可以看作哲学意义上自然规律的早期表达，简称“哲学式自然规律”。

到了中世纪，神学自然观占据主导地位，上帝创世说成为人们的信条。上帝是完美的，由其创造的这个世界也是有目的的并体现上帝的完美，这种自然的目的性及其完美体现之一便是自然的规律性。鉴此，“自然是有规律的”，就成为“上帝是完美的”一个必然推论。这是神学意义上的“自然规律”，简称“神学式自然规律”，在此，自然的规律性是由上帝创造和决定的。

到了近代，新柏拉图主义盛行，追求天球的和谐以体现上帝的伟大，成为数学天文学家的不懈追求。哥白尼、第谷、开普勒是其杰出代表。他们的工作成果集中体现了天球运动的规律性。不仅如此，伽利略理想实验的提出和贯彻，更是将自然的规律性推进到地上的物理世界中，通过对不完美的物理世界的理想化实验处理，使之处于理想状态，从而符合某一数学规律性的表征。如此，开创了数学的物理学，从而也开创了用数学的定量化的而非哲学的定性的方式表达并体现自然规律性的先河。它表明，地上的物理世界是有规律的，这样的规律可以用数学公式来表示，简称“数学式自然规律”。

笛卡尔创立了机械自然观，强调世界(除人之外)就像一架机器。机器是规则的并按照某种规律运转，由此自然也是有规律的，自然的规律性成为机械的世界的必然属性。这种属性可以由实证性的微粒之间的作用数学地表达，如此，就从自然观的角度为自然的规律性奠定了哲学基础，并且也为自然规律性的实证性表达提供了本体论依据。它表明，自然的规律性是内在于自然之中的而非神造的，自然的规律性不单纯可以定性表达，更重要的是可以由数学定量地表达。由此所获得的自然规律简称“机械式自然规律”。

在“机械式自然规律”方面，牛顿的经典力学是典型代表。拉普拉斯推至极致。他看到牛顿力学不仅把天上和地上的物体的运动统一到力学原理之中，而且根据力学原理利用数学推导出其他自然现象，因此，他认为：“我们应该把宇宙的目前状态看作是它先前状态的结果，并且是以后状态的原因。我们暂时假定存在着一种理解力(intelligence)，它能够理解使自然界生机盎然的全部自然力，而且能够理解构成自然的存在的种种状态，……它在力学和几何学上的发现，加上万有引力的发现，使它能用相同的分析表达式去理解宇宙系统的过去状态和未来状态。把同一方法应用于某些其它的知识对象，它已能将观察到的现象归结为一般规律，并且预见到给定条件下应当产生的结果。”[[70]](#footnote-70)

这就是自然的规律性。自然的规律性预示着自然是具有普遍性、必然性和确定性的，这体现了自然的因果决定论。相信自然具有确定性的规律，在研究自然时就遵循因果决定性的原则，将对自然的研究焦点放在探求自然的决定性的规律上，成为近代科学诞生的前提。如果没有这一前提，在那样的历史阶段，人类就无法去认识自然。对事物之间因果性和规律性的坚信，以及对自然秩序和规律的存在和可理解性的坚定信念，是近代科学理性精神的灵魂，它指导并促成了近代科学革命的真正发生。爱因斯坦就说：“要是不相信我们的理论构造能够掌握实在，要是不相信我们世界的内在和谐，那就不可能有科学。这种信念是，并且永远是一切科学创造的根本动力。”[[71]](#footnote-71)开普勒行星运动三定律、伽利略自由落体定律、牛顿运动三定律以及万有引力定律、波义耳定律、菲涅耳-惠更斯原理、欧姆定律等莫不表明这一点。

将自然规律说推至极致，就是试图创立“大统一理论”，寻求对万物的决定性解释。牛顿的经典力学理论用万有引力将天上物体和地上物体的运动统一了起来，麦克斯韦的电磁学理论将电、磁统一了起来，爱因斯坦的狭义相对论将宏观低速的物体运动和宏观高速的物体运动统一了起来。自此，“根据较少的统治自然的力的规律去进行解释的模式，并最终达到一个统一的规律，成为物理学把世界看作是简单的核心”[[72]](#footnote-72)。爱因斯坦力图推进这方面的工作，但没有取得成功。在他去世后的二十多年里，格拉肖(Sheldon Lee Glashow，1932—)、温伯格(Steven Weinberg，1933—2021)和萨拉姆(Abdus Salam，1926—1996)相继在弱力和电磁力统一研究领域独立地做出重要成果。最终，于1970年正式形成了以杨-米尔斯(Yang-Mills)理论为基础的弱电统一理论，并在后来的实验中得到确证。之后，科学家们展开进一步研究，试图建立统一引力相互作用、电磁相互作用、弱相互作用和强相互作用之三种或四种基本作用的理论。如果做到了这一点，那么就可以依据这些大统一理论，说明自然界中所有层次物质的运动，推导出其他的所有的自然规律，以获得对世界的全部的和最终的理解。因为从现在看，上述四种基本相互作用可以看作自然界中所有事物相互作用的基本类型，成为自然界中所有事物运动的来源。

二、范式的坚守与反抗(一)：从“以太悖论”  
到“相对论”

近代科学的产生并非偶然，是多种因素共同作用的结果，机械自然观的诞生及其作用是其最为重要的因素之一。如果没有机械自然观，就不可能有近代科学方法的创新，从而也就不可能有近代科学革命，近代科学也就不可能产生。机械自然观对于科学革命以及18、19世纪科学的发展起着巨大的推动作用。这是近代科学革命史给我们的启发。不过，“正当机械论在19世纪的科学中取得节节胜利的时候，它却同时开始走向了衰落。可以说，机械论正是在它胜利的同时在为自己挖掘坟墓，并且正是在它取得了辉煌胜利的地方为自己挖掘了坟墓”[[73]](#footnote-73)。

(一)“场”的概念的提出及其对机械自然观的冲击

从1805年到1815年，牛顿研究纲领的影响达到顶峰，它体现在拉普拉斯和贝托莱(Claude Louis Berthollet，1748—1822)开拓出来的一片物理领域中。

到了19世纪20年代，拉普拉斯的牛顿研究纲领开始衰落。傅里叶(Baron Jean Baptiste Joseph Fourier，1768—1830)分别对两种被认为无法计算的流体(热和光)进行新的处理，从而创立了热传导的数学描述，但这并不能归于他所认为的关于热量性质的未经证实的假设，也就是所谓的热的可储存流体。

1820年，奥斯特(Hans Christian Ørsted，1777—1851)意外发现了电线中的电流使磁针偏转，过流导线对于磁极的作用力，既不在金属线元与磁针的连线上，也不在电流体的粒子与基本磁偶极子的连线上，而是与这些连线相垂直。而且，就在奥斯特宣布他的发现的当年，法国科学家安培(André- Marie Ampère，1775—1836)进一步发现：放在磁铁附近的载流导线或载流线圈也会受到力的作用而发生运动，即在载流导线或载流线圈之间也会发生力的相互作用。这种力是电磁力，它所展示的相互作用既不是吸引的，也不是排斥的，不能简单地归入“吸引”或“排斥”的机械论框架之中。在电与磁的相互作用发现之前，物理学家只知道一种力——中心力，即引力或斥力，自然界的一切力的相互作用只发生在物质粒子的连线上，其大小只与距离有关。

进一步地，1831年法拉第(Michael Faraday，1791—1867)发现电磁感应原理，即通过机械运动与磁的结合可以产生电流，这就是发电机的原理。1844年他提出场理论，引入“场”(field)的概念，指出电和磁的周围都有场的存在。而且，“为了从理论上说明产生感应电动势的原因，法拉第提出了‘力线’的观念，这个观念为阐明电磁领域中一系列定律和现象提供了一幅物理图像。这个图像不但能自然地解释静电或静磁的吸引和排斥，而且还能很自然地解释电流的磁效应。而当要解释电磁感应定律时，他又把回路中所产生的感应电动势与通过回路的磁力线数目的变化联系起来，认为后者正是前者的原因，强调‘形成电流的力正比于所切割的磁力线数’。法拉第的这些观念虽然都还比较朴素，而且在很大程度上只是定性的，但它在物理学史上却标志着一个革命性观念的产生”。法拉第倾向于他所说的力线和场是一种真实的、物理的实在，所以不需要以太来传播。“法拉第关于电磁场的创造性想象不但描绘了一幅不同于机械论的新的物理自然图景，而且还据此设想出电和磁的传播都是以波动方式进行的，并且还是一种‘横振动’(横波)。他对电和磁的理论的设想是‘打算去掉以太，而不是去掉振动’。法拉第的这些观念为后来麦克斯韦创建他的电磁场理论提供了方法和观念的基础。”[[74]](#footnote-74)

麦克斯韦(1831—1879)从1855年开始进行电磁现象及理论的研究，于1865年完成决定性的工作，在1873年完成《电磁理论》(*Treatise on Electricity and Magnetism*)一书，系统、全面、完整地阐述了电磁场理论。麦克斯韦刚开始赞同法拉第的力线和场的实在论，后来才将电力线、磁力线归为以太的一种状态。麦克斯韦认为，电和磁无法分开，电磁场实际上是由电流的振荡造成的，这个场从源头以恒定的速度向外辐射，其速率与光的速度一致。这是一个巧合，但是就是这一巧合使麦克斯韦想到，光本身一定也与振荡着的电荷有关，光就是电磁辐射，光也许就是由以不同速度振荡的电荷所引起的辐射。他认为，电磁辐射需要媒介，这和场一样，“以太”作为一种媒介弥漫于空间中，电磁波就在这一媒介中传播。在这一“以太模型”的基础上，麦克斯韦把众多科学家竞相发现的各种结果综合成一个完美的方程式——麦克斯韦方程式(Maxwell’s equations)，使经典物理学达到了顶点，实现了光、电、磁的统一。1886年，赫兹运用实验表明光就是一种电磁辐射。

对于法拉第和麦克斯韦来说，“场”既不是实体，也不是能量，而是一类特殊的物质，尽管这类物质看不见、摸不着，但却真实存在着。一个有质量的物体能够对另一个有质量的物体产生引力，一个带电的物体能够对另外一个带电的物体产生电力，一个具有磁性的磁体能够对周围相应物体产生磁力，等等，依靠的就是这种特殊的存在。对于这种存在，洛伦兹(Hendrik Antoon Lorentz，1853—1928)就认为，电磁“场”是一种独立的物理实在，它完全摆脱了力学的所有性质并与普通物质不一样；它不是建立在牛顿力学的原理框架之上，而是作为没有力学性质的“以太”，用来产生相应的电磁作用力；这打破了牛顿力学“超距作用”的传统观念，以至于能够给物理学提供概念基础的是电动力学，而不是力学。如此，“场”的自然观完全不同于机械自然观，电子以及电磁以太本体论的发展完全取代了19世纪物理理论界占统治地位的机械论理念，强烈冲击着机械自然观，最终导致机械自然观的衰落。[[75]](#footnote-75)

应该说明的是，“虽然19世纪90年代力学解释的原则受到了冲击，但力学(经常称为‘动力学’)的世界观，亦即假定运动着的物质粒子是决定物理实在的依据的所谓本体论仍占19世纪的主导地位。这里，术语‘本体论’是表示物理实在的基本构成的某种假设，它不同于特殊的假设或不同于实在的模型”[[76]](#footnote-76)。法拉第、麦克斯韦所提出的“场”的观念和电磁场理论，原则上是一种有别于机械论的，并可与之竞争的自然观或科学纲领。但是，在19世纪70、80年代以前，几乎所有的科学家，包括法拉第、麦克斯韦自己在内，都力图将场的概念、电磁场理论归于牛顿纲领之下，即力图把电磁场理论还原为力学，而不是相反。在这种情况下，一种真正地对机械论自然观造成冲击的概念“场”及其相关图景，在当时某些科学家的人为归约下，并未真正成为与机械论自然观相对抗的另一种自然图景。直到19世纪80年代末，当赫兹强调不能把电磁场方程归结为牛顿的运动方程时，才进一步提醒人们“场”的世界图景与机械论自然观的世界图景是不同的乃至独立的。至于“场”的世界图景是否比机械的力学图景更优越、更有前途，赫兹并没有明确表明。

(二)“迈克尔逊-莫雷实验”与“以太悖论”的产生

这种冲击首先出现在光学领域。惠更斯最先提出光的波动说，并且阐述了介质中光的传播的惠更斯原理。菲涅耳对此进一步研究，认为光不仅是波，而且是横波，这似乎否定了牛顿作为微粒的光的主要观念。他完善了惠更斯原理，两者的理论统称为“惠更斯-菲涅耳原理”。之后，托马斯·杨(1773—1829)根据光的衍射现象和干涉现象，复兴了光的波动理论，并且认为光是以横波的形式传播的。这样的传播，在他以及同时代的人看来，是需要媒介的，而且这样的介质是“以太”。

“以太”一词来自亚里士多德的“以太”，被认为是一种元素，它在月上区被发现。17世纪，笛卡尔、惠更斯等人将“以太”作为物体之间相互作用的媒介物；18世纪，菲涅耳等人用“以太”推导光束在运动物体中的速度，这一点与当时的波动的媒介传播理论是相一致的——波浪的运动是由水作为媒介而进行的，声波通过空气为媒介而传播，等等；到了19世纪，麦克斯韦用“以太”来解释电磁现象，“以太”成为负载电磁波和光波的共同介质，成为经典物理学不可缺少的概念。至此，作为媒介的“以太”就与亚里士多德的“以太”没有一点相似之处，它只是光、电磁传播的媒介，它比空气稀薄，而且比空气精微得多。

根据麦克斯韦的电磁理论，“以太”是存在的，并且假设电磁场方程在绝对惯性系中是严格成立的(在地球上近似成立)；在“以太”中光速各向同性，且恒等于C，而由伽利略变换可知在其他参照系中，光速非各向同性；假定太阳与以太固连，地球相对于以太的速度就应当是地球绕太阳的运动速度。如果存在以太，而且以太又完全不为地球运动所带动，那么，地球对于以太的运动速度就是地球的绝对速度。利用地球的绝对运动速度和光速在方向上的不同，应该在所设计的迈克尔逊干涉仪实验中得到某种预期的结果，从而求得地球相对于以太的绝对速度。[[77]](#footnote-77)

据此，麦克斯韦于1879年提出光速的一种测定方法：让光线分别在平行和垂直于地球运动的方向等距离地往返传播，平行于地球运动方向所花的时间将会略大于垂直方向的时间。

1887年，迈克尔逊(Albert Abrahan Michelson，1852—1931)和莫雷(Edward Williams Morley，1838—1923)依据上述原理设计了光速测定实验(又称“迈克尔逊-莫雷实验”，Michelson-Morley experiment)。通俗地说就是：如果充满宇宙的“以太”是静止的，那么地球在“以太”中运动时，在地球上看来，“以太”就像“风”一样，顺着“以太风”一起运动的光束会被“以太风”带着走，而逆着“以太风”的光束应该走得更慢。如果是这样，当地球穿过“以太”绕太阳公转时，在地球上与以太相对运动的方向一致的情况下测量的光速，应该大于在与以太运动的垂直方向测量的光速，根据“以太学说”，在不同的方向上测得的光速的数值应该是不同的。

1881年，迈克尔逊建造了一台干涉仪，可以把光束一分为二，它们相互垂直运行，而后再重新汇合。通过这一方式，就可以以极高的精度测量光束在顺着和逆着“以太风”这两种情况下的速度，具体见图11.6。

在图11.6中，整个装置可绕垂直的竖直轴转动，中间是半镀银镜，两边有两个反射镜M1和M2，互相垂直，M1与光源S在一条线上，反射镜到中间镀银镜的距离固定不变。从光源S发出的光经镀银镜分为两束，再经M1和M2反射后到达目镜T处。这两束光是相干光。假设地球相对于以太沿MM1运行，那么光经MM1来回的时间与光经MM2来回的时间就不相等，这两束光在M的中心点相遇时就有一定的相位差，因此从T处应该看到这两束光的干涉条纹。他们把仪器装在十分平稳的大理石上，并使大理石漂浮在水银槽上，可以平稳地转动，以便进一步提高实验的精度。

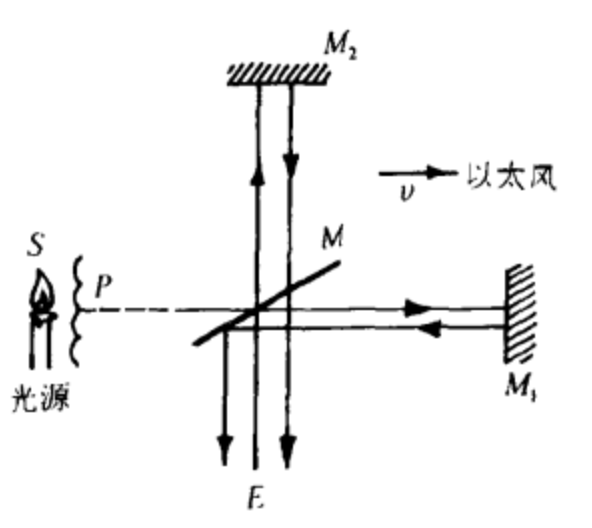


图11.6　迈克尔逊-莫雷实验[[78]](#footnote-78)

实验结果令迈克尔逊大吃一惊：光束分成两半后的速度并没有差别，这表明“静止以太假说”是错误的。

也许是迈克尔逊的实验结果错了。为了保证实验结果的正确性，1887年，迈克尔逊和莫雷一道改进实验仪器和实验设计进一步实验，结果仍然是两束光波返回光源的速度是一样的，即这两束光波以相同的时间返回，在不同方向上的光速并没有差异，“以太”似乎不存在。这就与麦克斯韦的电磁理论“以太是存在的”预设相矛盾，被称为“以太悖论”。

(三)洛伦兹提出“辅助性假说”，拯救“以太悖论”

根据电磁理论，“以太”是存在的，而根据迈克尔逊-莫雷实验，“以太”又似乎不存在。在这种情况下，“以太”究竟存不存在呢？如果它不存在，那么光作为一种波，在没有供其运行的媒介的情况下又是如何传播的呢？而且，上述实验结果也对牛顿的相对性原理“物体运动速度的大小取决于观察者的参照系”造成冲击，它表明不管以什么作为参照系，光速都是不变的。

洛伦兹对相关问题进行了深入思考。

洛伦兹于1870年进入莱顿大学，1875年获得博士学位，而迈克尔逊-莫雷实验完成于1887年，因此，在1887年之前，他的主要工作不是在“以太悖论”的背景下进行的，而是在“以太存在”的背景下展开的，即在“以太存在”的背景下研究相关问题。他大学学习的是物理学和数学，博士学位论文研究的主题是电磁理论在光学中的应用，博士研究生毕业之后致力于电磁理论的推广和发展工作。他在1875年就说：“麦克斯韦关于光和电磁的统一只是一个起点，根据自然界普遍存在电性，电磁论和分子论的结合很可能有助于完成物理学的所有分支的综合。”[[79]](#footnote-79)他是这样说的，也是这样做的，他以“以太的存在”为基础，将粒子(电子)与场统一起来，形成他的“综合电子论”或者“电磁自然观”：自然界中基本的物理实在就是电磁以太和带电粒子，这些带电粒子具有“原子性”，本身是由微小的实体——后来科学家发现的“电子”组成的，由此可以解释物体的电性质；电子在磁场中运动要受到力的作用，这种作用叫作“洛伦兹力”，由此可以推导出它的运动轨迹；物体之所以发光是由于原子内部电子的振动，当将光源放入磁场中，光源原子内的电子振动将发生改变，从而使电子的振动频率增大或减小，进而导致光谱线的增宽或分裂。

洛伦兹的上述理论正确吗？从当时的情况看，有一定的正确性。因为在1896年10月，他的学生塞曼(Peter Zeeman，1865—1943)发现，在强磁场中钠光谱的D线有明显的增宽，即产生“塞曼效应”，证实了洛伦兹的预言。塞曼和洛伦兹于1902年共同获得诺贝尔物理学奖。

从迈克尔逊-莫雷实验看，洛伦兹的上述理论有根本性的不足之处，即承诺了“电磁作用通过以太以光速传播”。

“以太”究竟存不存在？对此有两种选择：“(1)坚持‘以太假说’，放弃相对性原理。根据这一假说，由麦克斯韦方程组计算得到的真空光速是相对于ether(此时指绝对参考系)的速度；在相对于ether(此时又指空间)运动的参考系中，光速具有不同数值。换言之，就是光速可变，不变的是时间(或时间的量度与参照系无关)、空间(长度的量度与参照系无关)，并且时、空是互不相联系的。(2)坚持相对性原理，放弃‘以太假说’。伽利略相对性原理认为，一切彼此做匀速直线运动的惯性系，对于描写机械运动的力学规律来说是完全等价的，并不存在一个比其它惯性系更为优越的惯性系。”[[80]](#footnote-80)

对于洛伦兹，究竟是选择哪一种呢？鉴于他的教育背景，也鉴于当时麦克斯韦电磁理论的地位(1889年赫兹发现了电磁波，确证了该理论)，洛伦兹仍然坚信电磁理论是正确的，“以太”是存在的。在这种情况下，他所做的选择就是上述第一种，即“坚持以太假说，放弃相对性原理”。为了做到这一点，他想尽一切办法，修改辅助性假说，以拯救“以太悖论”。据统计，他前后共用了11条假说以便他的“综合电子论”能够拯救“以太悖论”。如他在1892年的一篇论文中提出了“在以太中运动的物体在运动方向上缩短”的假说——“收缩效应”，并对此这样解释：决定物体尺寸的分子力通过以太的传播就像通过电力的传播一样，由此造成干涉仪随着地球在以太中运动的方向上的那一臂缩短了。之后他又导出了“洛伦兹变换”关系式，再加上另外的多个假说，最后他“成功地”消除了地球通过以太运动产生的以太拖曳这一预期的效应，由此也就解决了“以太学说”同“迈克尔逊-莫雷实验”结果之间的矛盾。[[81]](#footnote-81)

事后有人评价洛伦兹的工作，为他惋惜，认为他敢于否定牛顿第三定律、质量守恒定律和相对性原理，却偏偏不愿放弃“以太”概念，坚持绝对的时空观；敢于提出“在以太中运动的物体在运动方向上缩短”的假说等，已经半只脚踏进相对论的门槛，却不愿再向前迈进一步，像爱因斯坦那样，创立相对论，完成“相对论革命”。

深入分析，上述评价有失公允。事实上，洛伦兹的上述表现无可厚非。从他进入大学的1875年到迈克尔逊-莫雷实验完成的1887年，前后长达13年的时间。这段时间“电磁理论革命”基本完成并且被科学共同体广泛接受，成为科学家研究所遵循的范式。洛伦兹也不例外，也必然将此作为研究范式，加以遵循，从而在出现反例(迈克尔逊-莫雷实验结果)时，不是立刻就否定旧的理论范式而创建新的理论范式，而是如拉卡托斯所说的那样，遵循麦克斯韦的电磁理论研究纲领，保护“硬核”——“以太模型”，想尽各种办法，提出诸多辅助性假说，修改保护带，以消解反常。[[82]](#footnote-82)

他的这种选择是有道理的。一个新理论在提出之时往往是不完善的，会遇到许许多多的反例，一旦出现反例，就否定此理论，则再好的理论也发展不起来。这点对牛顿的经典力学——“天王星的‘非正常运动’”是这样，对麦克斯韦的电磁理论——“迈克尔逊-莫雷实验”也是这样，不能因为“迈克尔逊-莫雷实验”与麦克斯韦的电磁理论的预设“以太”相矛盾，来否定麦克斯韦的电磁理论。

洛伦兹对迈克尔逊-莫雷实验“反常结果”的消解，从某种意义上既是对旧范式——电磁理论以及“以太模型”坚守下的常规研究，也是对旧范式下科学的危机——“反常”——“以太悖论”的消解。为了消解“以太悖论”以保持电磁理论不受损害，他提出了“以太施力但不受力，从而牛顿第三定律失效”“以太不动，干涉仪的臂在地球运动方向以α系数收缩(或称洛伦兹收缩)”等新的范式。这些新的范式相对于牛顿的经典物理学，是一次思想上的革命。只不过，这样的革命性的思想或论断在之后被证明是错误的而已。在科学史上这样的例子还有很多，“燃素说”之于“燃烧说”，“热质说”之于“热的传导学说”等莫不如此。这些都是失败的“科学革命”，但是，失败的“科学革命”仍然是“科学革命”。不能因为它们失败了，而抹杀它们革命性的特征以及对于科学发展的革命性意义。

必须注意，这样的革命不是“近代科学革命”意义上的那样的革命，即不是本书所称的“大写的科学革命”，而是“小写的科学革命”，即在总的机械观背景下的局部的科学革命。在这样的科学革命中，机械自然观的本质没有改变，对象的祛魅性、简单性、还原性、决定性的特征没有改变，方法论原则以及具体方法的应用也没有改变，改变的只是“保护带”的辅助性假说。考察爱因斯坦的“相对论革命”，也是如此。

(四)爱因斯坦消除“以太”概念，提出“狭义相对论”

与洛伦兹不同，爱因斯坦(1879—1955)于1900年才从大学毕业。此时，物理学已经危机四伏，迈克尔逊-莫雷实验的光速恒定、伦琴X射线和贝克勒尔元素放射性的发现等，无不给他留下深刻印象。大学毕业后，他到瑞士伯尔尼专利局工作，与科学共同体没有多少联系，也没有与洛伦兹等人接触，这使得他的出发点与洛伦兹的出发点有所不同，不是做第一种选择，即从电磁自然观出发去发展电磁理论，而是做了另外的选择。

第一，爱因斯坦接受了普朗克的“能量子”假设，并将此运用于光的运动中，提出“光量子”假设。而且，如果“光量子”假设是正确的，那么光就会像普朗克理论所描绘的那样，以分立的波包或量子形式传播，不需要任何媒介。如此，麦克斯韦电磁理论就可以在“没有‘以太’存在”的前提下成立。

第二，如果迈克尔逊-莫雷实验结果是正确的，则“地球相对于以太运动”的想法就不正确；如果这一想法不正确，并且麦克斯韦和洛伦兹的电动力学方程式是正确的，且在运动物体参考系中同样有效，那么就必须假定“光速不变”的概念。

第三，如果迈克尔逊-莫雷的实验结果、“以太”不存在以及麦克斯韦电磁方程式都是正确的，并且“在任何参照系下光速不变”，那么，爱因斯坦进一步研究得出结论：“质量、空间和时间全都跟着你的运动速度而变化。在旁观者看来，你运动得越快，你的质量也就越大，你占据的空间就越小，时间也过得越慢。你越是接近光速，这些效应就越显著。”[[83]](#footnote-83)这就是爱因斯坦的“尺缩钟慢”效应，也是“狭义相对论”(发表于1905年)的核心内涵。

与洛伦兹的相关理论相比，爱因斯坦的狭义相对论确实是正确的，确实是一次革命，但是，这并不意味着洛伦兹固守旧的范式，思想保守，不思创新，而是意味着不同的时代有不同的理论和实验以及对此理论和实验的不同的理想和信念，这些理想和信念对科学共同体以及对科学共同体中的一员有规范甚至定向作用。这就是范式的作用。范式“不仅对科学工作者的心理或知觉有定向作用，而且对科学共同体的工作也有定向作用”[[84]](#footnote-84)。由此，“罗伦兹[[85]](#footnote-85)在这一场革命中所持的观点是完全可以理解的；在科学革命期间，理论范式对在其中工作的科学家产生决定性的影响”[[86]](#footnote-86)。爱因斯坦相对于洛伦兹，不是天才之于庸才、英雄之于平民，也不是真理之于谬误，而是在不同范式下所进行的不同的科学创新活动。

爱因斯坦狭义相对论的创立毕竟是一次创新，必然会引发某些科学家的责难。X光的发现者伦琴就说，感到莫名其妙的是，为了解释自然现象，是否需要使用如此高度抽象的理论和概念。洛伦兹、迈克尔逊等人也对狭义相对论充满怀疑，甚至有一些科学家指责相对论“违背常识”“标新立异”“玩弄数学游戏”等。但是，进一步的实验表明，爱因斯坦的狭义相对论是正确的，而且是一场科学革命。

(五)相对论革命是一次“小写的科学革命”

爱因斯坦的相对论分为“狭义相对论”和“广义相对论”。对于“狭义相对论”，如上所述，应该是一次科学革命，只是这次革命与近代科学革命仍然不同，不是一次“大写的科学革命”，而是一次“小写的科学革命”。之所以这么说，原因分为以下两点。

第一，在牛顿经典力学“绝对时空观”那里，“绝对的空间，就其本性而言，是与外界任何事物无关而永远是相同的和不动的”[[87]](#footnote-87)；“绝对的、真正的和数学的时间自身在流逝着，而且由于其本性而在均匀地，与任何其它外界事物无关地流逝着。它又可以名之为‘延续性’”[[88]](#footnote-88)。时间、空间外在于客体对象及其运动而没有内在的关系，时间和空间是外在的、平直的、均匀的、非演化的、可逆的，时间和空间仅是描述客体对象呈现及其运动的工具；而在爱因斯坦狭义相对论“相对时空观”那里，虽然时间是相对的，并不总是以同样的速度流淌，运动的时钟走得慢，而且，在静止的观察者看来，物体运动得越快，在其运动方向上的长度就收缩得越厉害。但是，时间和空间仍然是外在于客体对象的，仍然是外在的、平直的、均匀的、非演化的、可逆的，时间、空间不能影响到客体对象的运动变化，只不过客体对象的运动状态会影响到时间、空间及其相关尺度的度量。比较这两种学说，有一个共同点，就是时间和空间同物质存在仅构成外部关系而无内在关联，而这一点是机械自然观的本质特征。

第二，爱因斯坦的狭义相对论并没有完全证伪牛顿的经典力学理论。牛顿的绝对时空观以及相应的力学定律仍然适用于宏观低速对象，只不过在宏观高速领域，要应用爱因斯坦的狭义相对论，后者把前者作为它的一个特例包含其中，即当物体运动的速度接近于“零”时，狭义相对论以渐近线的形式接近经典力学体系。[[89]](#footnote-89)进一步的问题是：爱因斯坦的“广义相对论”革命又是一次什么样的革命呢？

在提出狭义相对论之后，爱因斯坦思考这样一个问题：狭义相对论适用匀速直线运动，但当运动物体在加速、减速或者沿螺旋轨道转弯时，其时间和空间表现如何呢？这样的研究最终导致他于1916年进一步创立了广义相对论。

爱因斯坦认识到，他无法区分引力效应与加速效应之间的差别，因此放弃了引力是一种力的思想，代之以一种人为设想的方式，即我们观察的物体就是以那种方式在空间和时间里运动。[[90]](#footnote-90)三维空间(长、宽、高)和第四维(时间)共同组成所谓的时空连续体，即四维的时空流形(spacetime manifolds)。

此外，爱因斯坦引用“引力”这一概念是要说明非匀速直线运动的，但是，根据他的“电梯思想实验”，在理想电梯的参照系中，引力效果等效于处于加速运动的参照系中。由此，他抽象出等效性原理：一个相对于惯性系做匀加速运动的非惯性系与存在引力场等效。有了等效性原理这座桥梁，爱因斯坦就能够顺利地把狭义相对论的相对性原理从惯性系推广到非惯性系，即推广到任意参照系，从而建立了一组相对论方程式。根据此方程式，引力不再是一种力，而是一种空间弯曲的表现。“质量引起空间和时间的变形就导致了我们所谓的引力。引力的‘力’并不真正是恒星或行星等物体的特性，而是来自空间形状本身。”[[91]](#footnote-91)就此，牛顿的作为天体间吸引力的“重力”概念就是不恰当的，行星之所以围绕太阳做椭圆运动，或者物体落向地球，并不是被远处的力所作用，而是因为大质量(例如太阳质量)引起了时空弯曲，从而使行星的惯性路径绕其弯曲成椭圆。行星只是沿着附近太阳引起的空间弯曲运动，万有引力其实根本不是一种单独的力，只是时空本质的一个方面。“作为曾经最伟大的物理学家，牛顿的统治到此彻底地结束了。”[[92]](#footnote-92)

事实上，上述有关“时空弯曲”的预言已经得到了实验的检验，而且，爱因斯坦据此做出的三个预言——“水星近日点的进动”“引力场中的红移”“光线的引力偏折”，也得到了确证。所有这些表明爱因斯坦广义相对论是正确的。当然，这种正确不是绝对的，因为其检验蕴涵不具有必然性——如果爱因斯坦广义相对论是正确的，那么就应该有光线弯曲，而现在经过观测发现了光线弯曲，并不表明爱因斯坦广义相对论一定是正确的，只是表明爱因斯坦广义相对论得到了经验观察的支持。如果迄今为止没有出现反例，也只是表明至今所进行的观察或实验都支持广义相对论。正因如此，广义相对论得到了更多的支持。

分析爱因斯坦广义相对论中的时空和物质可知，时间、空间与物质有着紧密的关联，物质密度越大的地方引力场越强，黎曼空间的曲率越大，时间节奏的变化越慢，时空弯曲也越厉害。这表明物质对象自身的属性如组成、结构、性质会直接影响到时空属性，时空属性会随着物质对象存在方式的不同而不同，时空决定物质如何运动，物质决定时空如何弯曲，时空是非平直的、非均匀的、非演化的。时空的属性虽然与物质对象不可分离，但却并非物质对象的内在属性。

相对于牛顿的绝对时空观，爱因斯坦的相对论时空观是一次革命。但是，这样的革命仍然是一次局部的革命。应该指出的是，牛顿和爱因斯坦的时间都是一种运动(不含演化)的时间，并非事物本身的内在属性。在牛顿那里，时间一维地、均匀地流逝而与任何外在的事物无关，时间成了描述事物运动的纯粹抽象的外部框架。爱因斯坦的相对论中的时间与观察者的运动状态有关，而且会受物质分布的影响；它是被动的，虽与物体的存在不可分，并受物体运动的影响，但对于物体的演化来说，它仍然是外部的相对参量，是用来调整动力学机制的外部因素。因此，绝对时间和相对论的时间同物质存在仅构成外部联系，而不存在内在关联。这是时间的外在性。由于这种时间只与物体运动状态相联系，只是对机械物体运动的空间度量，没有深入到事物的内部，不具有生命性，因此，这仍然是一种机械论自然观背景下的时空观革命，是一种局部的革命、物理学科内的革命，是一次“小写的科学革命”，而不是全局意义上的对机械自然观的革命，即不是一次“大写的科学革命”。

与上述革命相反，在系统论、耗散结构理论中，时间更重要的性质不仅在于它是系统外的一种因素(运动的存在方式)，而且在于它本身就是系统内在的一种参量、一种动力，从而使得这样的时间具有内部性，成为“内部时间”。“内部时间”是系统的内部变量，是事物的内部属性。由它决定的熵区分了系统的过去和将来。一个系统由潜熵向熵的转化就是系统生命演化的动力，因此，系统所具有的“转化能力”本身就是系统生命的标志，而描述这一能力的参量“熵”乃是内部时间的函数。内部时间决定了系统的演化，与之相应的就是生命本身。时间在人和自然中，而不是人和自然在时间中。时间由系统演化的不可逆“动势”产生，时间的指针不是由机械运动带动，而是由生命演化带动，由此也使时间呈现出不可逆性。

虽然在现代许多科学理论中，时间的方向性无关紧要，即使时间倒流，牛顿力学、相对论、量子力学等也是成立的，因为在这些理论中，时间是可逆的。但是，一旦涉及生命性的事件，涉及热力学、化学、宇宙学、自组织理论等领域中的一些演化现象时，时间的不可逆性就表现得非常明显了。此时，引入内部时间就成为必然。内部时间是对称破缺和不可逆的，具有方向性，此方向与熵的变化方向一致，由此表示系统产生、发展和消亡的过程。其本征值不是确定物体的空间位置，而是对应系统演化阶段的状态或进化程度，它是一种不可逆的演化的时间。

如此，时间就具有了生命性，时间是“内时间”。相类似的思想也可以应用于空间中。这样的“内时间”和“内空间”就与有机整体性的自然相对应，是对机械自然观的整体性的反叛。这才是一次“大写的科学革命”。

概括而言，爱因斯坦的狭义相对论以“光速不变原理”(在真空中光速都是一样的)和“相对性原理”(运动或静止都是相对的)为前提，以“尺缩钟慢”为其具体体现，从而使得它与牛顿绝对时空观及其物质运动的“光速可变”“运动或静止是绝对的”观念不符；爱因斯坦的广义相对论以“广义协变原理”(在所有的参照系中所有的物理定律都是一样的)和“等效性原理”(加速度产生的效果与重力产生的效果没有区别)为前提，以“光线弯曲”“水星近日点进动”“引力场红移”等为其具体体现，从而使得牛顿绝对时空观之“重力不影响时间和空间”的断言不再成立。这些都是对牛顿绝对时空观的革命。它表明牛顿经典力学只适用于宏观、低速的对象而不适用于宇观、高速的对象。这是对牛顿经典力学的革命，表明牛顿经典力学真理性的相对性。然而，无论是爱因斯坦的狭义相对论还是广义相对论，都没有改变牛顿力学的核心信念——世界像一架机械，其运转是可以精确计算的，即没有改变机械自然观的核心内涵，改变的是对事件时空之关系的理解。就此，爱因斯坦相对论之于牛顿经典力学革命，只是一次“小写的科学革命”，而不是“大写的科学革命”。

三、范式的坚守与反抗(二)：从“黑体辐射”到“量子论”

(一)“黑体辐射”的研究与“旧量子论”的创立

“黑体辐射”这一概念首先是由基尔霍夫(Gustav Kirchhoff，1824—1887)于1860年首先提出的。所谓“黑体”(blackbody)，是指这样一类物体，在任何温度下，它将入射的任何波长的电磁波全部吸收，没有一点反射，也没有透射，而在相同温度下，它所发射出的热辐射比任何其他物体都强。1879年，斯蒂芬(J. G. Stephen，1835—1893)总结出黑体辐射总能量与黑体温度4次方成正比；1889年卢梅尔(Otto Richard Lummer，1860—1925)与卢本斯(H. Rubens，1865—1922)通过研究空腔辐射得出了黑体辐射光谱的实验数据。但是，使用实验数据找对应点的方法十分不方便，于是科学家们开始寻找一般公式。1893年，维恩(Wilhelm Carl Werner Otto Fritz Franz Wien，1864—1928)从电磁理论和热力学理论出发，得到一个位移公式——“维恩辐射能量分布定律公式”。由该公式得到的结果在短波波段同实验数据相符，而在长波波段与实验数据不符。1900年，瑞利(Lord Rayleigh，1842—1919)从统计物理学的角度提出了一个关于热辐射的公式。1905年，金斯(James Hopwood Jeans，1877—1946)修正了公式中的一个数值错误，此后该公式被称为“瑞利-金斯公式”。该公式在长波波段与实验数据相符，而在短波波段与实验数据不符。不仅如此，根据这一公式还推导出一个荒谬的结论：在短波紫外光区，理论值随波长的减少而很快增长，以致趋向于无穷大，即在紫色一端发散。这显然与实际不符，因为在一个有限的空腔内，根本不可能存在无限大的能量。

针对这种状况，当时的物理学家无法做出合理的解释。埃伦费斯特(Paul Ehrenfest，1880—1933)对当时的这种状况进行了分析，于1910年首次用“紫外灾难”来形容瑞利-金斯公式所面临的困难。

在国内，人们普遍认为“能量子”概念是由普朗克提出的，并且认为普朗克基于“紫外灾难”创立了相关理论。其实不是这样。“能量子”这一概念早在普朗克之前，就于1872 年由玻尔兹曼(Ludwig Edward Boltzmann，1844—1906)在研究热力学的过程中假设，只不过，他假设的是分子的动能的量子化。而且，普朗克在1900年之前的1894年就已经开始研究黑体辐射问题了，试图用一个公式来表示黑体辐射的实验数据。这项工作到了1900年有了结果。1900年10月7日，普朗克在与另外一位物理学家交流后，就给出了他的公式；在1900年10月19日，在德国物理学会举办的会议上，普朗克宣布了这一公式*E*=*hv*，其中，*E*是能量，*v*是频率，*h*是普朗克常量。这一公式被称为“普朗克公式”，是普朗克使用一种分列式对维恩公式和瑞利公式进行内插转化合并而成的。该公式能够很好地描述测量结果，但是并没有充分的理由，只是一个半经验公式。为了更好地从理论上解释这一公式，同年的12月14日，在德国物理学年会上，普朗克以“正常光谱中能量分布的理论”为题，提出了“能量子假说”，即在光波的发射和吸收过程中，发射体和吸收体的能量变化是不连续的，能量值只能以最小分量的整数倍一份一份地发射或吸收，这个最小的能量单位就叫“能量子”(energy quanta)。

由此可见，普朗克提出“能量子”概念并且将这一概念应用于黑体辐射研究中，不是在所谓的“紫外灾难”之后，而是在此之前的1900年。[[93]](#footnote-93)

“能量子”的概念表明，能量不是无限可分的，它也像物质一样，可以以粒子或波包的形式存在；能量只能以量子整数倍的形式发射，物体在低频下辐射比较容易，而在高频下辐射比较困难。这样就比较好地解决了维恩公式和瑞利公式所面临的问题。

“能量子”在刚提出来时，只是一个假说。尽管由这个假说推算出来的黑体辐射规律与观测事实很符合，但是，其所提出的“辐射过程是不连续的”与日常生活经验相违背，也与经典物理学的基本原理相对立。要接受这一假说，意味着就要放弃传统物理学中“物质运动绝对连续”的观念。这对于当时的绝大多数科学家来说，是难以接受的。如当时的金斯就拒不接受普朗克的能量子概念及其理论，以致于他于1905年还对瑞利公式进行修正从而产生出一个“瑞利-金斯公式”，1910年才最终认输。甚至连普朗克本人也对“能量子”概念表示怀疑。普朗克不能容忍“能量子假说”威胁经典物理学，试图把能量子假说纳入经典物理学的框架之中。1911年，他提出能量只有在释放时才是量子化的；1914年，他认为只有当振子同自由粒子碰撞从而导致能量变化时，能量才表现出不连续性。

现在我们知道，所有这些努力最终都以失败告终，就连普朗克自己，也在他晚年出版的《科学自传》中把他自己所经历的这15年徘徊称作一场“悲剧”。其实，这样的经历并非悲剧，只是普朗克把能量量子化作为一种方便的计算手段，没有赋予其真实的物理意义而已。这也说明，对于一个科学家来说，经过长期的学习和研究所铸就的认识的范式，是很难改变的，这种状况甚至对于范式的改变者自己也是如此。这比较充分地反映了新老科学家面对新的“范式”的态度，也部分体现了普朗克自己对自己表现的感悟。

与普朗克相反，爱因斯坦以叛逆者的形象出现，并于1905年利用“光量子假说”成功地解释了“光电效应”现象。事实上，在爱因斯坦做出这一解释之前几年，人们已经发现了“光电效应”的神秘现象：某些金属在光的照射下发射出电子，而且，1902年伦纳(Philipp von Lenard，1862—1947)发现，光强与发射的电子能量没有关系。为了解释这一现象，爱因斯坦接受并且引用了普朗克的“能量子”理论，提出“光量子理论”。普朗克认为，光以独特的“波包”形式辐射，而爱因斯坦指出，光还以“波包”形式传播，即在空间传播的光不是连续的，而是一份一份的，每一份叫一个“光量子”，它们看起来像“粒子”，简称“光子”(photons)，“光子”的能量*E*与光的频率*v*成正比，即*E*=*hv*。光的波长越短(频率*v*越高)，光量子所携带的能量越高，越容易激发出电子，否则，如果波长过长(频率*v*过低)，则不足以激发出电子。不仅如此，由于光的辐射和传播都是以波包形式进行的，也就是说一个特定的波长的光是由具有固定能量的量子组成的，当一个能量子轰击一个金属原子时，原子就会释放出一个具有固定能量的电子。虽然更亮的光含有更多的量子，能够引起更多的电子辐射，但是，由于每个量子所具有的能量是固定的，因此它不会引起所辐射出来的电子携带更多的能量。一句话概括，“光电效应”能否发生取决于光的频率而非光的强度。如此，爱因斯坦就在普朗克量子理论的启发下，针对光的经典理论的缺陷，提出了“光量子假说”，成功地解释了“光电效应”。其后，他又提出固体的振动能量也是量子化的，从而解释了低温下固体比热问题。

这是普朗克量子理论的第一次应用，主要针对的是“光电效应”，直接涉及的对象是“光子”，对于其中所涉及的原子以及原子以下的层次如电子是否也具有量子效应或特征，则没有具体阐述。关于这一点，到了玻尔(1885—1962)那里，有了具体体现。

玻尔的量子理论与其对卢瑟福(Ernest Rutherford，1871－1937)的“原子结构模型”的变革有关。

19世纪初，道尔顿提出了近代“原子论”，认为所有的物质都是由原子构成的。1895年末，伦琴宣布发现了一种新射线——“X射线”。1896年，贝克勒尔发现放射性现象。之后很快，居里夫人以及贝克勒尔和卢瑟福几乎同时发现铀放射出来的射线不止一种，一部分射线带正电，在磁场中向一方偏折，另外一部分射线带负电，向另一方偏折。卢瑟福把带正电的射线称为α射线(α粒子)，把带负电的射线称为β射线(β粒子)。1900年，维拉尔(Paul Ulrich Villard，1860—1934)在放射性辐射中又发现了第三种辐射，其具有不同寻常的穿透力，并且在磁场中一点也没有偏折，他称为γ射线。

X射线发现后，引起了J. J. 汤姆逊的强烈兴趣。他于1896年用阴极射线管做实验，发现电场能够使射线偏折。之后他进一步做实验，于1897年成功离析出一种“负粒子”——“电子”。电子的发现表明原子是可分的。基于原子整体是不显电性的，J. J. 汤姆逊于1898年提出原子结构的第一个模型“葡萄干-蛋糕模型”，即原子是一个球体，正电荷均匀地分布于这个球体中，带负电荷的电子像蛋糕中的葡萄干那样，分散嵌在球体的某些固定位置上，它们中和了正电荷，因此原子从整体上看是不带电的。

1909年，卢瑟福和他的助手盖革(Hans Geiger，1882—1945)用放射性物质放射出来的α粒子轰击金属箔片，发现大部分α粒子可以穿透金属箔或偏转一个很小的角度，只有少量的α粒子产生了很大的偏转，有的α粒子竟被反弹了回来。这样的实验结果明显与J. J. 汤姆逊的原子结构模型不符，因为，根据J. J. 汤姆逊的“葡萄干-蛋糕模型”，金属箔的原子中没有什么东西能使较重的α粒子发生大角度的偏转，除了极少量的α粒子会稍微偏转外，绝大多数α粒子一定能直接穿过金属箔。在这种情况下，卢瑟福于1911年初提出原子结构的“太阳-行星模型”——原子内部大部分空间是空虚的，原子中心有一个体积比原子小很多、质量较大且带正电荷的核，原子的全部正电荷都集中在这个核上，带有负电荷的电子则以某种方式分布于核外的空间中。

卢瑟福的“太阳-行星模型”成功地解释了α粒子实验现象，使人们对原子结构的认识深入了一步，然而，这一理论在当时也存在理论上的困难。按照经典物理学的理论，电子绕原子核运动需要原子核与电子间的静电吸引力，这个力使电子获得向心加速度。而根据电动力学理论，带电粒子获得加速度就要辐射电磁波，即电子绕核运动时就要以辐射形式放出能量，这样它自身的能量要逐渐减小，因而电子的运动轨道必将不断变小，最后“掉到”原子核中。

玻尔对上述“太阳-行星模型”理论的困难进行了研究。他认为，电磁理论不但已获得许多实验的支持，而且能够正确地指导发电机、电动机及其他电器的发明和应用，电磁理论本身应该是没有什么问题的。问题很可能出在其他方面。他受到普朗克“能量子”以及爱因斯坦“光量子”的启发，认为问题出在原子核外的电子上。他于1913年提出核外电子的运动轨道理论，认为核外电子并不能连续地发射辐射，只能以以特定大小的能量包量子的形式发射(或吸收)能量。这意味着它们必须保持在稳定的轨道上，而不能在任意轨道上运动。这也说明了原子在通常状态下是稳定的。当原子吸收能量或放出能量时，电子就会吸收或发射相应的能级差的能量。

玻尔的原子结构模型能够较好地解决原子的稳定性问题，也能成功地解释氢的发射光谱特征线分列的实验事实，在玻尔提出他的理论的第二年，德国的弗朗克(James Franck，1882—1964)等人进行了电子与水银原子碰撞的实验，发现水银原子只能从电子那儿接受特定数值的能量，从而证实了玻尔的假设。

但是，这并不意味着玻尔的原子结构模型就是完美的。这一模型不能解释光谱强度，不能确定光谱中的光子的数目，不能解释原子光谱的精细结构，不能说明具有两个以上电子的较复杂原子的光谱，也不能解释谱线在磁场中的分裂。更可怕的是，玻尔一方面把电子当作经典力学所描述的那样的粒子，采用了经典力学的确定性的轨道概念，另外一方面却把电子运动的能量变迁当作量子跃迁，将经典物理学和量子这两个不相容的理论混合在了一起。鉴此，当时许多知名度很高的物理学家对此持反对的或谨慎的态度。J. J. 汤姆逊反对这一理论，说它是将牺牲对原子结构的理解作为代价而得到俗不可耐的肤浅皮毛；卢瑟福对此尽管有些怀疑，但还是接受了；劳厄(Max von Laue，1879—1960)更是放了狠话：“假如玻尔的理论碰巧是对的话，我们将退出物理学界。”这也证明了普朗克所说的下面这段话的正确性：“一个新的科学真理的胜利并不是靠使它的反对者信服和领悟，还不如说是因为它的反对者终于都死了，而熟悉这个新科学真理的新一代成长起来了。”[[94]](#footnote-94)现在科学界把这一现象称为“普朗克现象”。

“普朗克现象”只是一般性的说法，并非普遍的现象。面对玻尔理论遇到的困难，阿诺德·索末菲(Arnold Johannes Wilhelm Sommerfeld，1868—1951)于1915年就把玻尔理论从两个方面加以扩充：其一是仿照行星运动规律，认为电子绕核运动不仅限于圆形轨道，而且也包括椭圆形轨道；其二是把相对论同玻尔理论结合起来，考虑到电子质量随电子运动速率的变化而变化的相对论效应，并用此成功地解释了光谱线的精细结构。

(二)“新量子论”的发展及其诠释

1. 电子的“波粒二象性”

自20世纪20年代之后，量子理论的发展与之前的“旧量子论”有很大的不同。这种不同开始于德布罗意(Louis de Broglie，1892—1987)。他对爱因斯坦的“光电效应”有深入研究。既然原来作为波的光在爱因斯坦这里可以作为粒子——“光子”而存在，而且光又具有“波粒二象性”(wave-particle duality)，那么作为“粒子”的其他粒子也可能有“波粒二象性”，即既是粒子也是波。而且，他根据爱因斯坦的质能方程式*E*=*mc*2所蕴涵的“质量和能量可以互换，具有等价性”，认为某些对象应该同时具有粒子(物质)和波(能量)的性质。1923年，德布罗意将光学现象与力学现象进行了深入比较，发现在几何光学中，光的运动服从光线最短路程原理，即费尔马(Pierre de Fermat，1601—1665)原理；在经典力学中，质点的运动服从力学的最小作用原理，即莫泊丢(P. Maupertuis，1689—1759)原理。这两个反映不同领域运动规律的原理，具有完全一致的数学形式。这促使德布罗意想到，既然被看作具有粒子性的光具有波动性，运用数学类比，可推断实物粒子也可能具有波动性。

如果实物粒子可能具有波动性，那么其波动性的大小如何呢？德布罗意力图解决这一问题。他认为，既然光的波长(*λ*)和动量(*p*)之间有如下关系：*λ*=*h*/*p*(*h*为普朗克常数)，那么像光那样具有波粒二象性的粒子的波长也应该遵循这一关系，如此一来，物质粒子的波长(*λ*)和动量(*mv*)之间也应具有同样的数学关系，即*λ*=*h*/*mv*。

由上述波长公式可计算，地球的波长约为3.6×1061厘米，该数值很难用仪器测得，这就是我们未能观察到宏观物体物质波的原因。可是对一个在1伏电位差的电场中运动的电子来说，其波长大约是107厘米。从理论上讲，这个波长就不能被忽视了。据此，德布罗意断言，电子应该既具有粒子的性质，也具有波动的性质。这样的预言在1925年得到实验的证实，表明设想为粒子的电子流以与光波相同的方式，产生了干涉图样，电子具有“波粒二象性”。

如果假设电子为粒子，并且如图11.7那样进行实验，那么在照相底片上就会出现电子“击打”的痕迹。



图11.7　作为粒子的电子[[95]](#footnote-95)

如果假设电子是波，并且如图11.8那样实验，那么在照相纸片上会留下光斑交织的图像。

为了进一步判定电子究竟是什么，科学家们进一步进行如图11.9所示的实验。该实验与前两个相比，只是加入了两个被动电子探测器，它们不会干扰电子。此时，如果电子是粒子，则电子探测器将不会同时报警；如果是波，则电子探测器将会同时报警。实验结果呈现为仅其中一个电子探测器报警，说明电子像粒子那样运动。另外，若我们给探测器安上开关，随着开关的开合，我们将看到波效应与粒子效应之间的转换。

电子究竟是什么？是“作为粒子的电子”，抑或两者都是？[[96]](#footnote-96)为了便于理



图11.8　作为波的电子[[97]](#footnote-97)



图11.9　用电子探测器做的两个狭缝的实验[[98]](#footnote-98)

解，薛定谔（Erwin Schrödinger，1887—1961）将微观量子现象与宏观事件联系起来，设计了著名的“薛定谔的猫”的思想实验。图11.10所示的是根据薛定谔的思想稍作修改的思想实验：光子枪每次可以发射一个光子，光束器让光子通过或被反射的概率均为50%，如果光子探测器A探测到了光子，毒药瓶将会被打开，导致小猫死亡；如果光子探测器B探测到了光子，则小猫安然无恙。



图11.10　薛定谔的猫[[99]](#footnote-99)

假设图11.10中包括小猫在内的所有实验装置都放在封闭的盒子里，我们看不到盒子里面的一切，盒子外有一个按钮可以控制光子枪发射光子。当我们按下按钮发射一个光子，则盒子中的猫是“死”还是“活”呢？它应该是既“死”又“活”，因为我们不知道哪个光子探测器记录了光子，也就是不知道盒子里发生了什么。所以对于此时的猫，是同时存在“死”和“活”这两种情况的。如此一来，作为量子效应的显现，猫处在“死”和“活”两种状态的叠加，这就是“量子叠加态”。

薛定谔创立了波动方程，对这一问题进行了探讨。他认为，电子的波动现象类似所谓的“驻波现象”，即不能像在海洋上自由传播的波浪，但可以像被限制在固定空间内的波一样，这点正如小提琴弦的振动被限制在小提琴弦的长度之内。在此基础上，他运用数学工具进行计算，建立了薛定谔方程，表明玻尔原子模型中电子的固定轨道，实际上是电子的电荷分布在其驻波上的峰值，即电子的电荷扩散到了整个波形中。

如果对薛定谔方程进行扩展，就必然得出一个电子的态可以由其他态叠加而成。这表现在两个方面：一个是“干涉现象”，正如在单光子的双缝干涉实验中，一个光子会同时通过两个缝而产生干涉，就像两列波叠加在一起。此时，光子既在这里也在那里吗？另外一个是“量子纠缠”，即量子系统由纠缠关系或结构束缚在一起，量子关联中的所有赖态属性绝不能还原为相互独立的单个量子系统的某些东西。

薛定谔本人对此也感到疑惑。如对于他的“薛定谔的猫”，爱因斯坦认为，猫不可能存在于死和活的两种叠加状态中，一定丢失了某种东西，如果是这样，则量子理论就是不完备的，量子理论没有抓住真实的实在。鉴此，需要增加一些东西(即隐藏的变量)，让理论回到与直觉的现实相一致的轨道上来。

问题是：如果不是这样，则又该如何解释量子理论呢？对此有不同的解释。

2. 哥本哈根诠释

哥本哈根诠释(Copenhagen interpretation)被称为量子力学的标准解释，鉴于哥本哈根学派内部的物理学家之间的观点各有不同，甚至大相径庭，下面针对他们的观点进行具体分析和评论。

玻恩(Max Born，1882—1970)并不完全赞同薛定谔的上述观点。他于1926年提出，薛定谔在方程中描述的并不是电子本身，而是电子可能的位置，即在任何给定位置上能够发现电子的概率。波函数的峰值，据推测与玻尔轨道的位置相对应，简单地表明在那里找到电子的可能性比在其他地方更大。玻恩的电子位置分布的概率论表明，对于电子，你所可能知道的只是它所处位置的概率。这是对牛顿以及机械自然观决定论原则的冲击。玻恩评论道：“从我们的量子力学的观点来看，在任何一个个别的情形里，都没有一个量能够用来因果地确定碰撞的结果；不过迄今为止，我们在实验上也没有理由相信，原子会具有某种内部特性，能够要求碰撞有一个确定的结果。或许我们可以期望，将来会发现这种特性(比如相位或原子的内部运动)，并且在个别的情形中把它们确定下来。或许我们应该相信，在不可能给出因果发展的条件这一点上，理论与实验的一致正是不存在这种条件的一个必然的结果。我自己倾向于在原子世界里放弃决定论。但是这是一个哲学问题，只靠物理学的论证是不能决定的。”[[100]](#footnote-100)

海森堡(Werner Karl Heisenberg，1901—1976)基于“为经验上可观察到的东西提供一种可行的数学解释”这一设想，于1927年提出了著名的“不确定性原理”(uncertainty principle)，又叫“测不准原理”(indeterminacy principle)。其核心内涵是：我们不可能同时精确地确定电子的位置和动量，这两个量被称为“共轭互补量”(conjugate amount)。

这是什么原因造成的呢？有人认为这是由我们所用的测量方法和仪器的不完备性所导致的，即在获得某一共轭量的同时，无法控制地干扰了粒子的运动，使得粒子失去展现另一互补共轭量的能力。海森堡就说：“观测在事件中起着决定性作用，并且实在因为我们是否观测它而有所不同。”[[101]](#footnote-101)“我们必须记得，我们所观测的不是自然的本身，而是由我们用来探索问题的方法所揭示的自然。”[[102]](#footnote-102)玻尔也指出：“在经典物理学的范围内，客体和仪器之间的相互作用可以略去不计，或者，如果必要的话，可以设法将它补偿掉，但是，在量子物理学中，这种相互作用却形成现象的一个不可分割的部分。因此，在原理上，真正量子现象的无歧义的说明，必须包括对于实验装置之一切有关特色的描述。”[[103]](#footnote-103)举例来说，在试图确定电子的位置时，实验者必须要使用强光照射它才能看到它，但是，在亚原子层面，光波将不可避免地对电子产生重大影响，并在你确定它的位置的那一刻改变电子的动量，如此，你就不可能同时确定电子的位置和动量，这就好像你试图通过向小猫喷射高压水柱来确定这只小猫的位置一样。[[104]](#footnote-104)如果是这样，则人类所获得的对电子的认识，就只是人类在仪器作用下对所能够认识到仪器对电子作用的系统的认识，至于这一认识背后电子的真实存在状态，我们永远也不能认识。

哈瑞(R. T. Harré，1927—2019)对这类仪器与研究对象之间的关系进行了分析，认为它们是“仪器-世界复合体”(apparatus-world complexes)，是一类“玻尔式人工物”(Bohrian artifacts)。在“仪器-世界复合体”中，仪器完全与世界混合在一起，仪器以及世界这两个组成部分都不能够从产生现象的现实中分离出来，导致的结果是“科学就是对仪器-世界复合体的研究”[[105]](#footnote-105)。对于此类研究所导致的现象，哈瑞称为“玻尔式现象”。“玻尔式现象既不是仪器的性质也不是由仪器所引起的世界的性质。它们是一种新的实体的性质：仪器与世界即仪器-世界复合体的无法分解的结合。”[[106]](#footnote-106)这种无法，就是无法“回推自然”(back inference to nature)[[107]](#footnote-107)，而只能是从自然的倾向性(disposition)、潜在性(potential)和可供性(affordances)[[108]](#footnote-108)做出解释。[[109]](#footnote-109)

如果是这样，当我们改进实验仪器及其实验操作后，原则上可以解决“不可控制的作用”，进而“回推自然”，获得对电子的本征状态的认识，此时，所测量出来的电子的位置和动量，可能就不会呈现出“测不准原理”所描述的现象。在这样的思想的指导下，科学家进行了量子非破坏性测量理想实验，结果表明，即使在获取某共轭量的同时，保证粒子的运动没有受到不可控制的干扰，即在装置不受不确定关系影响的情况下，仍然不能同时确定另一共轭量，即互补性仍然存在。[[110]](#footnote-110)

这样，不确定难题的存在就与仪器精密度、仪器对微观对象的作用无本质的、必然的关联，而与微观对象的互补性质有本质的关联。即微观对象的不完全确定性是由微观对象的本性决定的。[[111]](#footnote-111)微观对象如电子，在任何给定的时间都没有精确的位置和特定的动量。正是由于这一点，要想同时准确地确定这一对象的位置和动量是不可能的。照此，粒子的这一本性对人类关于微观对象的认识提出了原则性的限制，即人类原则上不能获得对微观对象的完全认识。因为微观对象的运动、变化、发展要遵循一定的自然规律，受到自身性质、结构的限制，它只能做它能做的事。[[112]](#footnote-112)这不是人类的认识能力所致，而是事物的本性使然。

在20世纪20年代，一些物理学家就持有这种观点。他们认为，在亚原子层次，事物的性质是不确定的，这种不确定不是人类认识上的不确定，而是事物本身的特性。

玻尔赞同海森堡的观点，认为就我们所观察到的电子的行为，事实上是我们在实验过程中操作电子成就的，如果没有这样的实验，我们就观察不到电子这样的行为，电子的存在是概率性的。他于1927年提出“互补原理”。主要内容是，在宏观的物体中，粒子和波是截然不同的，是不能共存的，但是，在量子世界中，它们是互补的。“因此，我们不应该问电子或任何其他亚原子实体是波还是粒子，我们应该问，它在什么时候和什么情况下表现得像波，什么时候和什么情况下表现得像粒子。”[[113]](#footnote-113)换句话说，电子既不是粒子也不是波，而是我们测量到的东西，如果我们不能通过实验和测量来确定粒子的位置和动量，那么我们就不能声称这些东西(位置和动量)是物理实在的不可否认的方面。

玻尔的上述观点，事实上是说，对于电子是否有波或粒子这样的独立的不依赖于其他系统的属性——“内禀属性”(intrinsic properties)，我们并不知道，我们知道的只是量子系统对于我们所做的实验的表现，即量子系统与测量仪器之间的相互作用所呈现出来的属性。这是量子系统的不可分离性。

另外，量子力学中相互关联的粒子，所拥有的特性是一种整体性质，无法用来描述单个粒子的性质，只能描述相互关联的粒子系统的整体性质。这表明量子系统是非定域的，它们的属性不存在于空间中的单个粒子上。非定域性表明，那种粒子与粒子之间的作用方式将以纠缠的作用方式代替，这种纠缠的作用方式是整体性的，不会随着距离的增加而消失，一定意义上体现了量子系统的不可分离性。因为量子理论表示的是相关系统的赖态属性之间的关联，这些关联并不依赖于系统的空间和时间距离，这就是“量子纠缠”。“正是在这个意义上，我们可以说，在经典物理学中看作是内禀性质的东西，在量子力学中必须被看成是物理系统之间的关联或结构属性。”[[114]](#footnote-114)如果是这样，则所具有的量子态的纠缠所导致的“赖态”以及“赖态属性”，就是其最基本的属性，而像“质量”和“电荷”这样作为个体性存在所具有的“内禀属性”就是“赖态属性”的产物。由于“赖态属性”以量子系统关系属性或结构属性为基础，其基本性的存在就是关系的存在或结构的存在。场就是这样的基本存在。这也是“量子场论”提出的缘由。

总之，在量子力学中，描述的只是物理对象之间的关系，而不是个体性的内禀属性，实体性的个体已经不是最基本的实在，最基本的实在是关系或者结构。

以上三点概括了量子力学的三个基本特征：非定域性、不可分离性、非个体性。其中非个体性是最基本的。当然，非个体性并非强调量子系统不存在个体性，而是强调量子系统的关系属性和结构属性。非个体性具体表现在量子系统属性的赖态属性及其相关性，也就是表现在量子态的纠缠关联上，这导致了量子系统的不可分离性。这种不可分离性使得量子系统及其属性具有非定域性。

3. 爱因斯坦的反驳与隐变量解释

对于量子力学，概括哥本哈根诠释的观点，总的是：量子力学的数学描述是通过波函数体现的，波函数本身就是由叠加状态构成的。在测量之前，量子实体如电子被波函数所代表，包含了两种状态(粒子性和波动性)的叠加状态。在测量进行时，包含了上述两种状态的叠加状态的波函数就“塌缩”成为新的波函数所代表的那样一种新状态，由此就产生了粒子性的或者是波动性的现象。至于测量之前，电子在哪里，电子的属性如何，不仅不知道而且还无法承诺。通俗地说，就是我们直到对电子进行了如此这般的测量之后，才知道电子具有粒子性或电子具有波动性，至于在此之前，电子是否真的具有粒子性或波动性，是否存在其他属性，不仅不可知，而且不确定。

爱因斯坦对上述观点并不赞同。他宣称：“相信有一个离开知觉主体而独立的外在世界，是一切自然科学的基础。”[[115]](#footnote-115)他曾形象地把哥本哈根诠释讥讽为“月亮在无人看它时不存在”，因为在现实世界中，“月亮在无人看它时仍然存在”，在测量发生之前，量子实体一定具有确定的属性，至于量子理论不能说明测量之前量子实体的属性，是其理论数学描述的不完备所致。应该创立新的量子理论，以取代原先的量子理论。它不仅包含原先的量子理论的内涵，而且还包含原先量子理论所没有的“隐藏的变量”，以根本性地反映实体的实在。他在1926年底写给玻恩的一封信中说道：“这个理论说了很多，但并没有真正让我们更接近‘旧理论’的秘密。无论如何，我相信他(上帝)不会掷骰子。”[[116]](#footnote-116)

为了说明量子理论的不完备性，1935年，爱因斯坦与波多尔斯基(Boris Podolsky，1896—1966)、罗森(Nathan Rosen，1909—1995)在《物理学评论》发表《量子力学所描述的物理实在是完备的吗？》一文。爱因斯坦试图通过一个思想实验推出测不准原理的矛盾，以证明量子力学的不完备性。他们将理论的完备性定义为“物理理论中的每个要素必须在现实中有对应的配对”。也就是说，一个完整的理论，必须在理论元素和现实元素之间一一对应。根据测不准原理，一个物体的位置测量得越准确，其动量就越不准确。爱因斯坦则质疑：不能精确测量电子的位置，是否意味着电子就没有精确的位置呢？原则上，海森堡的不确定性原理是可以解决的。当两个粒子在高能物理实验室中一起产生时，守恒定律允许我们从一个粒子的动量推断出另一个粒子的动量。原则上，我们可以直接测量其中一个粒子的位置，并通过测量另一个粒子的动量来推断同一粒子的动量。这样我们就可以知道特定粒子的位置和动量。[[117]](#footnote-117)这被简称为“EPR(The Elements of Physical Reality)论证”。

“EPR论证”的核心思想是，量子理论是不完备的，“物理实体的要素”(The Elements of Physical Reality)事实上没有被包含在量子理论中，应该发展一个完备的量子理论。

概括而言，爱因斯坦的总的观点是：第一，世界是可分离的，如果没有一个独立的空间存在物，就不可能有我们所熟知的物理思想。他把这一原则称为“分离原则”(separation principle)，并认为由于这一原则，每一事物都有其自身独有的基本属性——“内禀属性”。[[118]](#footnote-118)第二，由于事物之间相互独立的“分离原则”，事物是以个体性的方式存在的，这可称为“个体性原则”(the principle of individuality)。第三，世界上的相互作用都是定域作用，发生在某地的作用不能即时地影响到另外一个相距遥远的地方的对象，超距作用以及超光速现象不存在。这叫“定域作用原则”(the principle of local action)[[119]](#footnote-119)或“定域性原则”(the principle of locality)。简而言之，量子力学之所以得出“世界是非决定的”结论，是因为当前的量子理论不完备。

通常而言，玻尔的哥本哈根诠释认为当前的量子力学形式已经完备，而爱因斯坦则认为量子力学的形式体系并不完备，可以基于“分离原则”“个体性原则”“定域作用原则”等来改造量子理论，使之更加完备，对量子测量的整个过程给出完整的动力学的描述。

玻尔不同意量子力学的上述三个特征，与爱因斯坦展开了长期争论，一直持续到两人生命的最后一刻。爱因斯坦去世前还在为他的观点辩护。“爱因斯坦去世后多年，玻尔仍然在修改为了说服爱因斯坦所画的那幅插图。玻尔去世的那一天，他的黑板上画的就是那幅草图，他的内心深处从未中止过与他的老朋友的对话。”[[120]](#footnote-120)

正是上述争论以及“EPR论证”的启发，1952年玻姆(David Bohm，1917—1992)系统地提出他的“隐变量理论”。实际上，早在1932年，冯·诺伊曼(John von Neumann，1903—1957)在其《量子力学的数学基础》一书中，就系统探讨了是否可以通过引进隐变量，从而克服随机性，将量子力学改造为确定性的理论。这个隐变量的特性就在于，不同于一般变量，它无法通过实验直接测量，可以不受测不准原理的限制。最后，冯·诺伊曼给出的答案是“否”，也就是说不存在这样的隐变量理论，而且给出了数学证明。玻姆发现了冯·诺伊曼论证的漏洞，重新提出了隐变量理论。假设存在一个(迄今为止)不可观测的隐变量的世界(world of hidden variables)，进而构建了相应的理论，以因果决定论的方式重现了量子力学的所有结果，给出了单个实验过程中的详细物理图景。他认为，电子在本质上是粒子，具有确定的位置和动量，遵循严格的因果律，其所以呈现出非决定性(非确定性)，主要原因在于“量子势”(一种隐变量)的超距作用，改变了原先的状态。[[121]](#footnote-121)也就是说，电子的运动并非随机运动，而是受到波函数的引导，就像一块木板在海面上随洋流漂动，导波才是粒子运动的原因。

玻姆的隐变量理论提出后并未被大多数人所接受而成为标准的解释。究其原因，有两点：一是玻姆的数学不能证明比现有的量子理论数学更好；二是他的导波预设了相互独立的量子系统之间存在超光速的相互作用，这与相对论相矛盾。

爱因斯坦和玻姆的关于量子现象的评价和工作，体现了实在论的思想，即对仪器与对象之间的作用加以深入分析，超越实验现象描述层面，深入到现象背后的独立的存在，进一步认识它。如此，就从理论实在向现象实在，再向自在实在迈进。

4. 进一步的量子事实以及其他量子解释

根据EPR实验，量子理论是不完备的。根据“EPR悖论”，有充分的理由相信，光速是不可超越的，定域性是正确的，而如果定域性是正确的，那么偏振就是原先存在的，就此，量子力学就是不完备的理论。

1964年，约翰·贝尔(Jonh Bell，1928—1990)基于定域性假设提出了贝尔不等式以及相应的实验，结果表明量子理论与定域性假设之间是互不相容的——如果定域性假设是正确的，那么其所预测的实验结果与量子理论数学预测的实验结果之间不一致。由此，定域性假设可能是错的。

在贝尔之后的几十年里，许多物理学家努力去做贝尔开创的这类实验。在20世纪70年代后期和80年代早期，巴黎大学阿斯派克特(Alain Aspect)实验室完成了一系列实验，表明定域性假设与量子理论之间存在冲突，定域性假设是错误的。他们的实验思想如下：进行特定的实验设计，使得在一个探测器中发出的信号来不及到达另一个探测器中，除非那个信号传播的速度能够超过光速，这样就能保证所发生的这两个事件之间没有关系，呈现出定域性。[[122]](#footnote-122)但是，具体的实验结果表明两事件之间有联系。既然爱因斯坦的“光速不变”一般来说是不可能错的，那么就只有定域性这一假设错了，距离遥远的两个事件之间能够有某种影响，至于这样的影响是因果影响还是某种信息传递，有待进一步研究。

从上面的贝尔/阿斯派克特实验可以看出，进一步的实验事实是不支持定域作用的，也表明了爱因斯坦定域作用的错误。但是，这并没有解决量子理论哥本哈根诠释的完备性问题。“然而，正如我们所看到的，标准诠释的支持者接受了波函数坍缩的概念。据推测，坍缩出现在测量发生时，这使标准诠释的支持者面对与测量难题相关的问题时，无法给出很好的答案。在测量过程中，世界到底发生了什么？由于测量过程只是一个物理过程，与我们不算作测量的过程相比，在性质上没有什么不同，那么测量过程和非测量过程之间又有什么真正的差异呢？同样地，如果一切都是由量子实体组成的，那么测量设备与其所测量的量子系统之间又有什么真正的差异呢？微观世界与宏观世界之间又有什么真正的差异呢？这些问题都是对测量难题的不同描述，或者换个更好的说法，它们都是从不同角度来看待测量难题的。波函数的坍缩给标准诠释的支持者提出了难题，而这些支持者也确实无法很好地回答这些问题。”[[123]](#footnote-123)

也正因为标准的哥本哈根诠释和玻姆的“隐变量解释”存在这样那样的不足，有物理学家从另外的角度试图构建更加完备的量子理论。目前影响较大的有多世界诠释理论、动力学坍缩诠释理论、退相干诠释理论等。

根据多世界诠释理论，光子是存在叠加态的，而且这样的叠加态在被测量时并不坍缩，仍然继续。既然如此，为什么在测量过程中观察不到这种叠加状态呢？“答案是，你我是叠加态中一个态的组成部分，也就是说，你我都存在于叠加态的其中一个态里。你我恰巧存在于(或者，也许说我们是这个态的一部分更为合适)探测器A已探测到光子的态里，或者在薛定谔的猫的情境里，我们存在于死猫的态里。然而，由于没有(从来没有)出现过波函数坍缩，其他态仍然存在。在其他态里，有与你、我、探测器和猫等分别相对应的存在。(顺带提一下，并没有特别合适的词来指代这个概念，‘相对应的存在’可能是最贴近的描述了。)当我们听到探测器A发出‘哔’声时，与我们相对应的存在则听到了探测器B发出‘哔’声。当我们看到死猫时，与我们相对应的存在看到的则是一只活蹦乱跳的小猫。”[[124]](#footnote-124)

多世界诠释舍弃了波函数坍缩，从而也就避免了相应的测量难题。但是，它的下列假设是违反直觉的，也是难以理解的——你我以及周围无数事物所构成的世界是由无数叠加状态构成的，我们所见的世界并不是唯一的，是存在大量的平行世界。

对于其他更多的量子诠释理论，这里就不一一介绍。据不完全统计，讨论较多的解释可能多达二十几种，甚至更多。尽管如此，仍有很多物理学家在尝试新的方案，有关量子理论完备性的争论并未结束，量子理论是只描述物理对象之间的关系，还是只描述独立存在的对象的内禀属性，仍然存在争论。如对于量子纠缠，人们只知道其代表了一种非定域的关联性，但是这种关联究竟是为何能超越光速？其背后的机制是什么？至今物理学家仍未给出满意的解答。

(三)新旧“量子论”是一次“小写的科学革命”

1. “旧量子论”是一次“小写的科学革命”

比较经典物理学与普朗克、爱因斯坦和玻尔的量子理论，可以发现：在经典物理学中，能量和物质是连续变化的，就像小球沿着一面光滑的斜坡运动；而在他们提出的量子理论中，物质并不是连续变化的，而是依据其本身的能量大小，处在一定的能级之上，当物质从一个能级跃迁到另一个能级时，需要吸收或者辐射一定的能量，否则，这样的跃迁就不可能发生。

这是一种对牛顿自然观的变革。不过，这样的变革并没有完全否定牛顿经典力学的自然观，在宏观低速的对象上，牛顿的经典力学仍然是正确的。当涉及微观粒子或在微观尺度上解释事物时，就需要量子理论了。而且，更重要的是，对于上述各种量子理论，“从某种意义而言，它根本没有构成一个统一的理论，只是一些处理特定问题的特设(ad hoc)方法”[[125]](#footnote-125)。如此，这样的量子理论还不成熟，在学术界还存在争论，还没有形成统一的观点和理解，属于库恩所谓的“前科学”，不能把它看作是对牛顿经典理论的彻底变革，只能算作是一次不完整的、分支的科学革命，是一次“小写的科学革命”。这应该是学术界通常把普朗克、爱因斯坦和玻尔所提出的观点称为“旧量子论”的重要原因。

不仅如此，考察普朗克“能量子”概念的提出，与他使用分列式对维恩公式和瑞利公式进行内插转化合并而创立“普朗克公式”分不开的。该公式能够很好地描述测量结果，但是并没有充分的理由，只是一个半经验拟合的公式。就此而言，此公式是为了解决维恩公式和瑞利公式在解释黑体辐射实验结果中的不完备，与维恩公式、瑞利公式以及此后的瑞利-金斯公式没有本质上的差别。一句话，“能量子”概念的提出是经验拟合的特设性假设。

这是其一。其二，“能量子”概念确实是一个革命性的概念，其所提出的“辐射过程是不连续的”与日常生活经验相违背，也与经典物理学的基本原理不一致。要接受这一假说，意味着就要放弃传统物理学中“物质运动绝对连续”的观念。不过，这一概念并没有推翻机械论自然观之“机械”本质内涵，而是对此概念的丰富。

从表面看，爱因斯坦的“光量子”假说和玻尔的“原子结构模型”相对于原先的理论确实是一次革命，都是对经典力学理论的突破。但是，必须清楚，玻尔一方面把电子当作经典力学所描述的那样的粒子，没有波动性，采用了经典力学的确定性的轨道概念，另外一方面却把电子运动的能量变迁当作量子跃迁，将经典物理学和量子这两个不相容的理论混合在了一起。即它引发的是具体的科学理论层面的变革。

概括“旧量子力学”中的“量子”，其实是对相关物理量的“量子化”。 “量子概念”的提出以及“旧量子论”的创立，秉承了旧有的近代科学的哲学层面范式，革新了具体的科学层面的范式，是一次“小写的科学革命”而非“大写的科学革命”。

2. “新量子论”也是一次“小写的科学革命”

与“旧量子论”相对，从20世纪20年代开始，对微观粒子的研究有了进一步突破，物理学家创立了各种各样的量子理论，这统称为量子力学，又被人们称为“新量子论”。对于“新量子论”，现在人们普遍性地认为其是一次重大的科学革命，这似乎有一定道理。但是，如果深入挖掘量子力学的本体论、认识论和方法论，并且以本书“大写的科学革命”和“小写的科学革命”内涵来界定量子力学革命，则会发现量子力学不是一次“大写的科学革命”，似乎更像是一次“小写的科学革命”。

第一，“量子力学”所遵循的自然观以及方法论原则，与传统科学并没有什么本质差别。

量子力学研究的尺度是亚原子层面的，所遵循的研究路线仍然是与机械自然观下的近代科学相一致的，即沿着本体论的还原论路径，将物质还原为原子以下的层次——亚原子层次，而对此展开研究的。根据这样的还原，亚原子层次的存在应该是一个机械性的存在，而不是一个有机性的存在，是一个没有智能、意志和思维的存在，甚至应该是一个最简单、最接近世界本原的基本存在。就此而言，它的存在状态与机械自然观视域下的研究对象相一致，是一个机械式的存在。可以说，量子力学的研究就是以此为基础进行的，它采取的仍然是近代科学的认识论原则，如祛魅性原则、简单性原则、还原性原则、因果决定性原则，所采用的具体的认识方法，仍然是近代科学的实验方法和数学方法。这些方法论原则和具体方法的运用本身似乎没有过错，但是其产生是源于对宏观对象的认识，与宏观对象相对应和一致。当将此应用到微观亚原子层次时，就是在不知道对象存在不存在的情况下，以及在不知道对象是一个什么样的存在情况下，按照传统的近代科学方法去认识它。这就是“盲人摸象”，每个盲人心中各有一头大象，导致“大象非象论”。这也是目前量子力学解释的多义性、实验验证的不确定性等的原因。

第二，对亚原子层次的非机械性特征的量子力学诠释，是以实验的“制造”和数学的“建构”为根源的。

至于此为什么会呈现出非机械式的特征，如非定域性、不可分离性、非个体性，这可能不是其本身的特征，而是具有机械性特征的亚原子层次对象，在人类以及复杂的仪器作用下，呈现出的一种研究对象与研究者之间难以区分的复杂的状态。这样的复杂状态不是亚原子层次本身所固有的，而是人类为了获得对亚原子层次的认识，采取了各种各样的手段如实验的操作和数学的建构等产生出来的。如果没有这些实验的操作以及相关的数学建构，这些现象就不可能存在，就此而言，这些现象以及对现象的相应解释不是人类在实验室中发现的，而是人类在实验室中“制造”出来的和数学“建构”出来的。这样的“制造”和“建构”创造了亚原子层次认识的复杂性表象，从而也相应地导致了对获得的认识的各种各样的解释，结果是对亚原子层次对象的认识就不像传统科学那样具有可重复性、确定性、规律性以及真理性。这样的认识的真理性的缺乏，从根本上来说，是由对象的微观及其对此作用的宏观造成的。试想，如果人类有一天能够像在显微镜下观察并且操作细胞那样来“观察”并且“操作”亚原子层次的对象，那么，就很可能获得关于此对象的确定的、无疑的认识，也许到那时，我们可能会得到关于此层次对象的机械性的性质，而并非像现在的量子力学那样得到其非定域性、不可分离性和非个体性的性质，也才会获得确定性的、无疑的认识。

这样一来，量子力学的革命何在？量子实在的革命性特征——非定域性、不可分离性和非个体性，不是由科学家“发现”的，而是由他们“发明”的基础上，经过诠释而主观认为的。这样的诠释赋予了认识对象的非机械性、认识者与认识对象的二元不可分离性以及实验和数学方法的建构性，不过，这不是由世界的本原存在(亚原子层次本原存在以及人类与亚原子层次关系的本原存在，物自体)决定，而是由认识对象的本原存在的潜在性、复杂性、特殊性，以及人类的本原存在及其认识的局限性使然。

第三，随着量子力学的发展，理论的“建构”越来越强，离经验越来越远。

对于传统科学，理论的建构是建立在事实的基础上的。如果说早期量子力学的建构主要是建立在量子事实的基础上，而且量子力学本身也与经验紧密关联，那么到了弦论和圈量子引力论这里，基于事实的构建就几乎不可能了。因为，此时相关的研究已经深入到普朗克尺度，与之相应的普朗克能量的值极大达1022兆电子伏，而普朗克时间的值却极其微小为1042秒，获取与之相应的量子事实需要建造极大的粒子加速器，这从人力、物力、财力、技术等方面都难以达到要求，因此，相应的量子事实也就不能获得。

在这种情况下，弦论和圈量子力学的建立就更多地以先验的概念和理论的构建框架为基础。对于理论中的先验概念，主要是为适应理论需要所构建的，本质上属于先验的假设，如弦论中的弦、多维空间以及超对称等；对于理论构建的框架，“物理学家逐渐从经验研究，转向纯数学上的理性推理和对基础概念的带有哲学色彩的分析和讨论，物理学、数学和哲学再次携手一起研究新出现的问题。在这一阶段理论的发展中，经验的地位逐渐弱化，数学成为唯一的逻辑途径，数学和物理学之间的界限越来越模糊，可能的发展趋势为在数学和物理学分别走向统一的基础上，走向建立在物理学大统一基础上的数学大统一”[[126]](#footnote-126)。这样的理论建构方式是与传统的科学如传统物理学不一样的。传统的物理学是以经验事实为基础创立科学假说或理论，以便解释或预言科学事实，而量子力学的新发展则以先验概念为基础，以解释和预言理论范围内的科学事实，至于这样的科学事实能否被检测到，则另当别论。而且，数学在传统的物理学那里，更多的只是作为物理学家描述物理事实的工具，而在新发展起来的这里，则成为构建相关理论并进而引导物理事实的基石，这使得在普朗克尺度或者量子引力尺度内，弦论和圈量子引力论的理论描述脱离经验。弦论和圈量子引力论的理论人工建构性增强了，物质依赖性减弱了，弦论和圈量子引力论更多地成为人工科学理论。它表明量子力学(弦论和圈量子引力理论)的建构趋势是从经验建构到理论建构，从物理建构到数学建构。

它表明，人类只能通过建构(实验建构和数学建构)以获得对亚原子层次与人类认识系统所组成的复合系统的一种“纠缠”“叠加”式的认识。这样的认识具有关系性和建构性，由此呈现出来也就只能是关系实在论、建构实在论和结构实在论了，即反实在论了。反实在论的量子力学不容忽视，否则就很可能导致误解，即把一种对亚原子层次对象与人类认识系统不可分离的复合系统的认识诠释所体现出来的这一复合系统可能具有的非局域性特征、不可分离性特征以及非个体性特征，当作这一复合系统乃至量子实在的特征。这是我们必须要注意的。

第四，量子力学的检验也是呈现出越来越艰难的趋势。

从量子力学(特别是弦论和圈量子引力)的检验看，鉴于量子引力对象的特殊性，通过实验获取量子事实是异常困难的，那么，同样地，通过诸如此类的实验来检验相关的理论也是异常困难的。在这种情况下，有些物理学家提出还是应该更多地从理论自身的完备性以及理论与理论之间的一致性来评价。除此之外，还有些物理学家认为，应该更多地从量子引力理论内部的解释力和预言力来评价，而不是从基于量子事实的量子引力的解释力和预言力来评价。这样一来，科学理论的检验就成了科学理论自身内在逻辑一致性的评价，一旦超出这一范围，其合理性就不能保证。科学的真理观也就从“符合论”——一个信念和命题为真，当且仅当它与客观实在相符合，走向“一致论”(“融贯论”)——一个信念和命题为真，当且仅当它与其他背景理论和命题在逻辑上相一致，以及走向“实用论”——一个信念和命题为真，当且仅当它有“功用”或“效用”。

即使不考虑上面量子引力理论检验的困难，假设量子理论检验的实验能够进行，考虑到量子力学对象的特殊性以及实验过程的复杂性，也很难获得确定性的量子力学理论真理性检验。

如海森堡提出“测不准原理”，再进一步给予“误差-扰动诠释”。他认为，(a)电子在测量前具有确定的位置和动量，只是(b)在测量时不可控制地干扰了被测电子，从而(c)宏观地显示出电子不具有同时确定的位置和动量。其中(a)是关于电子的本体承诺，或命题假设；(b)是关于本体论承诺或命题假设的实验检验中的方法特征；(c)是关于实验结果，以宏观的人类可见的方式呈现。上述认识的真理性就在于对这三者的认定。例如，如果假设海森堡的上述“测不准原理”的“误差-扰动诠释”是正确的，那么就表明(a)、(b)、(c)都是成立的，只是由于在测量时不能消除不可控制的干扰，因此所获得的认识不是关于被认识对象(电子)的，而是关于被认识对象(电子)与仪器不可分离的作用所构成的系统的。相对于被认识对象的本体论承诺或命题假设，这样的认识就是无效的，不具有认识的真理性；相对于被认识对象与仪器不分离的作用所构成的系统，这样的认识就是有效的，具有认识的真理性，只是这样的真理性已经不是传统意义上的真理性了，即不是关于自然界中存在的自在对象或者可以还原为自然界中存在的自在对象的人工对象的真理性认识，而是关于实验仪器与潜在的自在对象之间经过不可分离的作用所呈现的对象的真理性认识。

这后一种认识的真理性已经把作为认识者的人不可分离地包含于要被认识的对象之中。问题是，作为认识者的人，如何判断自身对自身与潜在对象构成的不可分离的系统的认识的真理性呢？这是不能够的。这种情况类似于“提起靴袢以自立”。因此，关于此类认识的真理性，还是应该根据认识过程中所认识到的对象与要被认识的对象是否一致来判断。如果这样，则有关“测不准原理”检验的真理性如何呢？

关于这一问题的回答，与人们是否认同前文所述海森堡对“测不准原理”所作出的本体承诺(a)、方法特征(b)、认识结果(c)有关。如果人们认同海森堡本体承诺(a)、方法特征(b)、认识结果(c)，则认识到的对象是原先要被认识的对象与仪器构成的且在认识论上不可分离的系统，与要去认识的微观对象的目标不一致，相对于要去认识的微观对象，则这样的认识的真理性不能成立，这对应于表11.2中的“情形(1)”。对于其他情形，参见表11.2的情形(2)-情形(8)。表11.2表示的是在对海森堡本体承诺(a)、方法特征(b)、认识结果(c)不同的认同情形下，以“认识到的对象与要去认识的对象一致”为依据所判断的认识的真理性。其中“√”表示相应的理解与海森堡的上述相应陈述一致，“×”表示相应的理解与海森堡的上述相应陈述不一致。

表11.2　基于对海森堡“测不准原理”陈述的认同与否及其认识的真理性确定

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 情形 | 本体承诺(a) | 方法特征(b) | 认识结果(c) | 认识到的对象与要去认识的对象一致(认识真理性) |
| (1) | √ | √ | √ | 不一致，且(c)与(a)相悖，真理性不能确立 |
| (2) | √ | √ | × | 不一致，虽(c)与(a)相符，真理性不能确立 |
| (3) | √ | × | × | 一致，且(c)与(a)相符，真理性能够确立 |
| (4) | × | × | × | 一致，但(c)与(a)相悖，真理性不能确立 |
| (5) | × | × | √ | 一致，且(c)与(a)相符，真理性能够确立 |
| (6) | × | √ | √ | 不一致，虽(c)与(a)相符，真理性不能确立 |
| (7) | √ | × | √ | 一致，但(c)与(a)相悖，真理性不能确立 |
| (8) | × | √ | × | 不一致，且(c)与(a)相悖，真理性不能确立 |

根据表11.2，理论上有8种关于“测不准原理”真理性检验的情形，其中只有情形(3)和情形(5)这两种情形能够确立相关认识的真理性，其他情形下都不能确立相关认识的真理性。而且，更为重要的是，在确立真理性的两种情形中，被检验的仅仅是认识结果与本体承诺之间的相符，至于本体承诺本身是否可知，则不能确定。

这后一种情况与玻尔“互补性原理”体现出来的认识论内涵紧密相关。对于玻尔来说，电子或者同时具有确定的位置和动量，或者同时不具有确定的位置和动量，这是确定的，但是，不确定的是，我们不能事先认识到电子具有或者不具有确定的位置和动量，只有等到我们采取了具体的测量，才知道由电子微观系统与宏观仪器系统不可控制的相互作用具有或不具有确定的位置和动量。这样，通常所说的“电子同时不具有确定的位置和动量”，事实上指的是电子微观系统与宏观仪器系统不可控制的相互作用系统不具有确定的位置或动量。这点对于“电子是粒子还是波”也是如此。玻尔就说：“诸如‘我们不能同时知道一个电子的位置和动量’的陈述，立即会引出原子客体的这两种属性的物理实在性问题，对于这个问题，只能这样来回答：一方面要参考对时空协调的明确使用，另一方面要明确对动力学守恒定律的使用的互斥条件。”[[127]](#footnote-127)

这涉及量子力学一个根本性的认识论问题：“事物本身究竟是什么样子”是不可知的，可知的是某些概念框架以及实验系统。这有点类似于康德认识论，即物自体本身是不可知的，人类是利用“先天综合判断”来认识我们的世界的，对于认识论层面背后的本体论承诺，则不关心。如此，科学认识走向了反实在论，其具体体现可以是经验建构论，也可以是工具论或结构实在论。

这种反实在论的分析表明，量子力学所认识的系统——量子系统，事实上是人类所欲认识的潜在对象(未知对象或假设对象)，与人类为了获得该对象的认识所施加的操作系统(实验操作和数学建构)，所构成的一个在认识论上不可分离的复杂系统；量子力学所揭示的所谓的量子系统的属性以及相关的蕴涵，如不可分离性及其内禀属性，非定域性及其赖态属性，非个体性及其关系属性等，不是就所要认识的认识对象而言的，而是就量子系统而言的，而且这样的而言不是自明的，而是诠释而成的。这样的特性和属性不是我们的认识者预设了认识对象具有这样的特性和属性，从而再运用相应的方法论原则认识了这样的特性和属性，而是我们的认识者在认识认识者和认识对象(建构出来的)的过程中，揭示出了它们所组成的不可分离的系统可能具有这样的特性。就此，我们不是以某种自然观变革为基础，从而揭示了对象具有这样的自然观蕴涵，而是在建构一个潜在对象的基础上，获得了人与认识对象所构成的不可分离的复杂系统所可能具有的自然观。这样的自然观不是认识对象所内禀的，而是人类对对象的建构所赋予的，是不能离开人的。就此，爱因斯坦的定域实在论是站不住脚的，而结构实在论有一定道理。曹天予(T. Y. Cao)就说：“关系结构哲学基于态的纠缠关联，对于量子系统的不可分离性、非定域性和非个体性的强调，把传统实在论关注形而上学的对象个体转移至对象涉身其中的关系结构，看到了关系结构在科学理论发展中的连续性，对于应对库恩和劳丹的反实在论挑战具有重要意义。但是，另外，关系结构哲学对于相关属性的强调，对于内禀性质的回避或否定，容易陷入关于结构的数学柏拉图主义和关于粒子的现象主义。因此，一个实在论者应有的态度是在传统实在论和关系结构哲学之间保持必要的张力，把一个越来越精制化的数学关系网看作是一种了解物理实在的方式。这样，我们所拥有的相关属性或是关系知识就是关于组分结构在整个结构关系网中所占据的位置和它们所扮演的功能的某种关系知识，而不是关于它们的内禀性质的精确知识。”[[128]](#footnote-128)法兰奇(Steven French)和莱德曼(James Ladyman)也说，在量子时代，我们对于科学理论的本体论蕴涵，认识的只是物理结构、数学结构和动力方程那样的东西，这些东西是关系实在，而个体客体不过是这样关系中一些能自我支持和比较持久的东西。[[129]](#footnote-129)也正因为这样，在量子力学领域，确定性的、唯一的、不容置疑的理论不能获得，量子理论层出不穷，竞争理论此起彼伏，关于量子力学的争论普遍存在，对量子力学的接受成了某些科学家之间诠释、商谈、妥协乃至决裂的结果。

这种状况非常类似于霍根在《科学的终结——用科学究竟将这个世界解释到何种程度》一书中所说的，随着科学的发展，科学的前沿已经变得越来越集中在那些我们永远也不可能观测到或检验到的探索性概念上，检验新想法的手段越来越落后于我们的新思想激增的能力，科学知识将变得更不可靠，由此，人们将以一种非经验的、纸上谈兵的方式去追求科学，从而使得科学成为反讽性科学，科学走上了一条渗透多重人文因素的危险道路，科学终结了。[[130]](#footnote-130)

量子力学的这种状况引起了某些科学家的不满，他们以弦理论和多世界理论为例，认为当今物理学内部越来越多地呈现出一种趋势，就是基于理论检验的困难的增加，而淡化或放弃理论的实验检验，尤其是理论的证伪。对于这一点，有学者认为是错误的，必须改正。[[131]](#footnote-131)

事实上，“改正”并非易事。这涉及人类的智力水准与被认识对象难度之间的关系。有学者就认为，对量子力学基础的真正解释很可能超出人类的认知能力。如果是这样，那么量子力学基础可能永远超出任何人的理解能力。我们没有原则性的方法来辨别那些东西是什么，因为我们必须比我们自己更聪明，才能界定我们自己理解的界限。也许有一天我们会创造出一台比我们更聪明的量子计算机，它也许能够告诉我们哪些科目不需要费心去理解，但是，前提是我们必须首先找到一套可以如此简单地表达量子规则的基础。[[132]](#footnote-132)

这给我们提出了一个非常严肃的问题：人类究竟在多大意义上能够实现对亚原子层次，尤其是普朗克尺度对象的真理性认识？在这条道路上，人类究竟能够走多远？这也告诉我们，近代科学革命之路并非一目了然的平坦之路，有许多本体论的问题、方法论的问题和认识论的问题需要我们探讨，有许多具体的科学认识难题需要我们克服。

鉴于上述分析，量子力学认识对象本体论预设是机械的，认识论预设是认识对象与认识者是分离的且是真理性追求的，方法论预设是祛魅的且是机械还原的，这些都与近代科学相一致。也正因为如此，至于其认识结果呈现出异于近代科学的一面，则是由其研究对象的微观以及人类认识能力的有限造成的，就此而言，其认识结果的各种革命性的呈现，并不是真正的革命性呈现，而是特殊对象在人类有限的认识前提下呈现出的不成熟的认识状态。

在这种情况下，量子力学革命就不是“大写的科学革命”，也不是一次成功的、完整的科学革命。就后一方面，有学者就说：“量子力学之所以具有革命性，是因为它推翻了看起来如此显而易见且被经验充分证实的科学概念，而这些科学概念被认为是毫无疑问的，但这是一次不完整的革命，因为我们仍然不知道量子力学将引领我们前进的方向，甚至也不知道为什么它必须是真的！”[[133]](#footnote-133)

鉴此，对于量子力学的哲学思考及其出路反思就显得非常重要。李·斯莫林(Lee Smolin，1955—)在2006年一篇文章中认为，物理学在过去30年里取得的进展比18世纪以来的任何可比时期都要少。他将此部分归咎于对弦理论的痴迷，但他认为，在现代理论物理学的研究方式上，还有其他系统性的障碍。最重要的障碍是，大多数现代物理学家未能对他们的工作进行哲学思考，这阻碍了创新，因为相关的量子力学研究涉及时间、空间、测量或因果等概念的深层次理解，这只能通过哲学深思来推进。关于这一点，还不如许多现代物理学的伟大先驱，如爱因斯坦、玻尔、海森堡和薛定谔等。他们不仅技术娴熟，而且受过广泛的人文教育，对哲学有着浓厚的兴趣，他们科学研究中的关键性突破来自于科学中哲学意义的深刻探求。[[134]](#footnote-134)

牛顿是近代科学革命的集大成者。在牛顿之后，近代科学革命并没有停止，而是在近代科学革命所创立的机械自然观范式之下，运用一定的方法论原则和具体的方法，继续向前推进。这点体现于18、19世纪乃至20世纪科学的研究中。这可以算作“近代科学革命的推进”。尽管在这样的推进过程中，也出现过一些“反常”，冲击着机械自然观和经典物理理论，但是，科学家首要做的仍然是提出“辅助性假说”以消解“反常”，由此也使得这种科学革命还不是“大写的科学革命”，而是“小写的”、分支式的、局部性的科学革命。

1. 肖显静：《环境·科学——非自然、反自然与回归自然》，北京：化学工业出版社，2009年，第46页。 [↑](#footnote-ref-1)
2. [美]理查德·德威特：《世界观：科学史与科学哲学导论》(第2版)，李跃乾、张新译，北京：电子工业出版社，2014年，第312页。这段话在2020年出版的《世界观：人人必须要懂的科学哲学与科学史》(原书第3版)([美]理查德·德威特著，孙天译，北京：机械工业出版社)中，被译者删去了。 [↑](#footnote-ref-2)
3. 刘大椿：《科学技术哲学导论》(第2版)，北京：中国人民大学出版社，2005年，第78页。 [↑](#footnote-ref-3)
4. 并非所有启蒙运动的思想家都是唯物主义者。伏尔泰的“上帝”、孟德斯鸠的“自然法”、卢梭的“良知”等，都表明他们没有“把物质看作是唯一的实体”。卢梭就说：“一听他们的话，人们岂不明白他们都是一群江湖骗子？一个说并不存在实体，一切都是表象；另一个说除了物质以外，便没有别的实体，除了人以外，就没有其他的神。”(参见[法]让-雅克·卢梭：《卢梭全集》(第4卷)，李平沤译，北京：商务印书馆，2012年，第409页。) [↑](#footnote-ref-4)
5. [英]柯林武德：《自然的观念》，吴国盛译，北京：商务印书馆，2018年，第8页。 [↑](#footnote-ref-5)
6. [英]彼德·迈克尔·哈曼：《19世纪物理学概念的发展——能量、力和物质》，龚少明译，上海：复旦大学出版社，2000年，第34页。 [↑](#footnote-ref-6)
7. Riskin J. The defecating duck, or, the ambiguous origins of artificial life. Critical inquiry, 2003, 29(4): 599-633. [↑](#footnote-ref-7)
8. [法]拉·梅特里：《人是机器》，顾寿观译，北京：商务印书馆，2017年，第114页。 [↑](#footnote-ref-8)
9. [法]拉·梅特里：《人是机器》，顾寿观译，北京：商务印书馆，2017年，第21页。 [↑](#footnote-ref-9)
10. Beer G, Darwin C. On the Origin of Species. New York: Oxford University Press, 2008: 360. [↑](#footnote-ref-10)
11. Wuketits F M. Organisms, vital forces, and machines: classical controversies and the contemporary discussion ‘reductionism vs. holism’// Paul H-H, Wuketits F M(eds.). Reductionism and Systems Theory in the Life Sciences. Dordrecht: Springer, 1989: 12. [↑](#footnote-ref-11)
12. [美]理查德·德威特：《世界观：现代人必须要懂的科学哲学和科学史》(原书第3版)，孙天译，北京：机械工业出版社，2020年，第432页。 [↑](#footnote-ref-12)
13. [英]怀特海：《过程与实在》(修订版)，杨富斌译，北京：中国人民大学出版社，2013年。 [↑](#footnote-ref-13)
14. [法]德日进：《人的现象》，范一译，北京：北京联合出版公司，2014年。 [↑](#footnote-ref-14)
15. 转引自[美]理查德·德威特：《世界观：现代人必须要懂的科学哲学和科学史》(原书第3版)，孙天译，北京：机械工业出版社，2020年，第433-437页。 [↑](#footnote-ref-15)
16. [美]理查德·德威特：《世界观：现代人必须要懂的科学哲学和科学史》(原书第3版)，孙天译，北京：机械工业出版社，2020年，第437页。 [↑](#footnote-ref-16)
17. 雷尔(Peter Hanns Reill)把18世纪的活力论称为“启蒙时代活力论”(Enlightenment Vitalism)，以区别于其他活力论类型，并认为其构成启蒙运动知识领域的一部分。(参见：Reill P H. Vitalizing Nature in the Enlightenment. University of California Press, 2005: 12-13.)沃尔夫也使用启蒙时代活力论的表述，但他指的是蒙彼利埃活力论。(参见Wolfe C T. Models of organic organization in Montpellier vitalism. Early Science and Medicine, 2017, 22(2-3): 229-252. )沃尔夫的启蒙时代活力论概念也可以包含在雷尔的概念之内。 [↑](#footnote-ref-17)
18. 值得注意的是，这里之所以将“organism”译作“有机体”，不是就“organism”现在在中文语境中的含义而言的，而是考虑到“organism”在中文翻译中的一贯翻译——“有机体”。事实上，在斯塔尔那里，“organism”(“有机体”)表示的是具有有机本质的生物，而不是现在中文语境中所表示的作为有机整体性的生命性的生物。为了区别这两者以及进一步区别它们与机械自然观背景下的生物，笔者将具有机械论本质的生物称作“生物”，将具有活力论本质的生物称作“生物有机体”，将具有有机论本质的生物称作“有机生物”。 [↑](#footnote-ref-18)
19. Cheung T. Regulating agents, functional interactions, and stimulus-reaction-schemes: the concept of “organism” in the organic system theories of Stahl, Bordeu, and Barthez. Science in Context, 2008, 21(4): 495-519. [↑](#footnote-ref-19)
20. Rehmann-Sutter C. Biological organicism and the ethics of the human-nature relationship. Theory in Biosciences, 2000, 119(3-4): 334-354. [↑](#footnote-ref-20)
21. Greco M. Vitalism now–A problematic. Theory, Culture & Society, 2021, 38(2): 47-69；Nicholson D J. Organism and Mechanism: A Critique of Mechanistic Thinking in Biology, 2010. [↑](#footnote-ref-21)
22. Mayr E. What is the meaning of “life”?//Bedau M A, Cleland C E. The Nature of Life: Classical and Contemporary Perspectives from Philosophy and Science. New York: Cambridge University Press, 2018: 88. [↑](#footnote-ref-22)
23. Cooper M. Rediscovering the immortal hydra: stem cells and the question of epigenesis. Configurations, 2003, 11(1): 1-26. [↑](#footnote-ref-23)
24. 转引自[美]雷·斯潘根贝格、黛安娜·莫泽：《科学的旅程》(插图版)，郭奕玲、陈蓉霞、沈慧君译，北京：北京大学出版社，2008年，第189页。 [↑](#footnote-ref-24)
25. [美]雷·斯潘根贝格、黛安娜·莫泽：《科学的旅程》(插图版)，郭奕玲、陈蓉霞、沈慧君译，北京：北京大学出版社，2008年，第189页。 [↑](#footnote-ref-25)
26. Gambarotto A, Nijssen. Vital Forces, Teleology and Organization：Philosophy of Nature and the Rise of Biology in Germany. Cham: Springer, 2018: 22. [↑](#footnote-ref-26)
27. Quarfood M. Kant on biological teleology: Towards a two-level interpretation. Studies in History and Philosophy of Science Part C: Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences, 2006, 37(4): 735-747. [↑](#footnote-ref-27)
28. 关于“Bildungstrieb”一词的翻译，国内有多种，有学者将此译作“形成驱力”(参见邓南海：《生命之可能性的先验根据：作用因与目的因——康德的生命科学方法论思想研究》，《自然辩证法通讯》，2007年第2期，第25-31页，第110页。)，有学者将此译作“构形的驱动”(参见罗久：《自然中的精神——谢林早期思想中的“自然”观念探析》，《科学技术哲学研究》，2012年第2期，第77-82页。)，有学者将此译作“构造冲力”(参见赵斌、李宏科：《前达尔文时期生物学思想中的梯度观念》，《科学技术哲学研究》，2014年第6期，第17-23页。)有学者将此译作“塑形力”(参见鲍永玲：《沙夫茨伯里的“内在形式”说及其对德国教化观念的影响》，《安徽师范大学学报(人文社会科学版)》，2018年第2期，第44-49页。)。 [↑](#footnote-ref-28)
29. Lenoir T. Kant, Blumenbach, and vital materialism in German biology. Isis, 1980, 71(1): 77-108. [↑](#footnote-ref-29)
30. Wolfe C T. Vitalism in Early Modern Medical and Philosophical Thought//Jalobeanu D, Wolfe C T(eds). Encyclopedia of Early Modern Philosophy and the Sciences. Cham: Springer, 2021. [↑](#footnote-ref-30)
31. Wolfe C T, Terada M. The animal economy as object and program in Montpellier vitalism. Science in Context, 2008, 21(4): 537-579. [↑](#footnote-ref-31)
32. Jardine N. *Naturphilosophie* and the Kingdoms of Nature//Jardine N, Secord J, Spary E(Eds.). Cultures of Natural History. Cambridge: Cambridge University Press, 1996: 232. [↑](#footnote-ref-32)
33. Reill P H. Vitalizing Nature in the Enlightenment. California: University of California Press, 2005: 200. [↑](#footnote-ref-33)
34. Gambarotto A. Vital Forces, Teleology and Organization. Cham: Springer, 2018: 90. [↑](#footnote-ref-34)
35. Steigerwald J. Rethinking Organic Vitality in Germany at the Turn of the Nineteenth century//Vitalism and the Scientific Image in Post-Enlightenment Life Science, 1800-2010. Dordrecht: Springer, 2013: 68. [↑](#footnote-ref-35)
36. Normandin S, Wolfe C T. Vitalism and the scientific image: an introduction//Normandin S, Wolfe C T. Vitalism and the Scientific Image in Post-Enlightenment Life Science, 1800-2010. Dordrecht: Springer, 2013: 8. [↑](#footnote-ref-36)
37. Normandin S. Claude Bernard and an introduction to the study of experimental medicine: “physical vitalism,” dialectic, and epistemology. Journal of the history of medicine and allied sciences, 2007, 62(4): 495-528. [↑](#footnote-ref-37)
38. Normandin S, Wolfe C T. Vitalism and the scientific image: An introduction//Normandin S, Wolfe C T. Vitalism and the Scientific Image in Post-Enlightenment Life Science, 1800-2010. Dordrecht: Springer, 2013: 8. [↑](#footnote-ref-38)
39. Sander K. Landmarks in Developmental Biology 1883–1924: Historical Essays from Roux’s Archives. Springer Science & Business Media, 2012: 36. [↑](#footnote-ref-39)
40. Windle B C A. What is life: a study of vitalism and neo-vitalism. Sands, 1908: 139. [↑](#footnote-ref-40)
41. Allen G E. Mechanism, vitalism and organicism in late nineteenth and twentieth-century biology: the importance of historical context. Studies in History and Philosophy of Science Part C: Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences, 2005, 36(2): 261-283. [↑](#footnote-ref-41)
42. 《鲁克斯的青蛙卵实验》(1888年)。来源：https://www.mun.ca/biology/scarr/4270\_ Roux\_experiment.htm. [↑](#footnote-ref-42)
43. Sander K. Shaking a concept: Hans Driesch and the Varied Fates of Sea Urchin Blastomeres//Landmarks in Developmental Biology 1883–1924. Berlin: Springer, 1997: 29-31. [↑](#footnote-ref-43)
44. Smith E T. The vitalism of hans driesch. The Thomist: A Speculative Quarterly Review, 1955, 18(2): 186-227. [↑](#footnote-ref-44)
45. https://www.mun.ca/biology/scarr/4270\_Driesch\_experiment.html. [↑](#footnote-ref-45)
46. Sheldrake R. Three approaches to biology Part-II. Vitalism.Theoria to Theory, 1980, 14: 227-240. [↑](#footnote-ref-46)
47. Wöhler F. Ueber künstliche Bildung des Harnstoffs. Annalen der Physik, 1828, 88(2): 253-256. [↑](#footnote-ref-47)
48. 维勒尿素合成[Z/OL]//维基百科，自由的百科全书. (2022-07-13)[2022-08-25]. https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E7%BB%B4%E5%8B%92%E5%B0%BF%E7%B4%A0%E5%90%88%E6%88%90&oldid=72660456.此处生命力论同活力论，同样可见维基百科（活力論[Z/OL]//维基百科，自由的百科全书. (2022-07-07)[2022-08-25]. https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E6%B4%BB%E5%8A%9B%E8%AB%96&oldid=72542300.） [↑](#footnote-ref-48)
49. Klein D R. Organic Chemistry. Hoboken: John Wiley, 2012: 2. [↑](#footnote-ref-49)
50. Ramberg P J. The death of vitalism and the birth of organic chemistry: Wöhler’s urea synthesis and the disciplinary identity of organic chemistry. Ambix, Taylor & Francis, 2000, 47(3): 170–195. [↑](#footnote-ref-50)
51. 彼德·J. 拉姆伯(Peter J. Ramberg)：《神话7 维勒在1828年合成尿素，粉碎了活力论，有机化学从此诞生》//［美］罗纳德·纳伯斯、［希］科斯塔·卡波拉契：《牛顿的苹果：关于科学的神话》，马岩译，北京：中信出版集团，2018年，第68-77页。 [↑](#footnote-ref-51)
52. Paolo palladino, Stereochemistry and the nature of life: mechanist, vitalist, and evolutionary perspectives, Isis, 1990: 44-67. [↑](#footnote-ref-52)
53. 彼德·J. 拉姆伯(Peter J. Ramberg)：《神话7 维勒在1828年合成尿素，粉碎了活力论，有机化学从此诞生》//［美］罗纳德·纳伯斯、［希］科斯塔·卡波拉契：《牛顿的苹果：关于科学的神话》，马岩译，北京：中信出版集团，2018年，第68-77页。 [↑](#footnote-ref-53)
54. Mayr E. What is the meaning of “life”?//Bedau M A, Cleland C E. The Nature of Life: Classical and Contemporary Perspectives from Philosophy and Science. New York: Cambridge University Press, 2018: 94. [↑](#footnote-ref-54)
55. [德]弗里德里希·克拉默：《混沌与秩序——生物系统的复杂结构》，柯志阳、吴彤译，上海：上海科技教育出版社，2000年，第18页图1.6。 [↑](#footnote-ref-55)
56. 转引自李醒民：《激动人心的年代：世纪之交物理学革命的历史考察和哲学探讨》，成都：四川人民出版社，1983年，第28页。 [↑](#footnote-ref-56)
57. [美]M. 克莱因：《古今数学思想》(第二册)，石生明等译，上海：上海科学技术出版社，2014年，第163-164页。 [↑](#footnote-ref-57)
58. [美]M. 克莱因：《古今数学思想》(第二册)，石生明等译，上海：上海科学技术出版社，2014年，第164页。 [↑](#footnote-ref-58)
59. 肖显静：《环境·科学——非自然、反自然与回归自然》，北京：化学工业出版社，2009年，第46-48页。 [↑](#footnote-ref-59)
60. [英]牛顿：《牛顿自然哲学著作选》，王福山等译，上海：上海译文出版社，2001年，第3页。 [↑](#footnote-ref-60)
61. [美]爱因斯坦：《爱因斯坦文集》(第1卷)，许良英、李宝恒、赵中立等编译，北京：商务印书馆，2017年，第317页。 [↑](#footnote-ref-61)
62. [美]爱因斯坦：《爱因斯坦文集》(第1卷)，许良英、李宝恒、赵中立等编译，北京：商务印书馆，2017年，第320页。 [↑](#footnote-ref-62)
63. Kosso P. Reading the Book of Nature: An Introduction to the Philosophy of Science. Cambridge: Cambridge University Press, 1992: 43. [↑](#footnote-ref-63)
64. Kosso P. Reading the Book of Nature: An Introduction to the Philosophy of Science. Cambridge: Cambridge University Press, 1992: 44. [↑](#footnote-ref-64)
65. 肖显静：《环境·科学——非自然、反自然与回归自然》，北京：化学工业出版社，2009年，第48页。 [↑](#footnote-ref-65)
66. 肖显静：《环境·科学——非自然、反自然与回归自然》，北京：化学工业出版社，2009年，第48-51页。 [↑](#footnote-ref-66)
67. 吴庆余：《基础生命科学》(第2版)，北京：高等教育出版社，2006年，第4页图1-5。 [↑](#footnote-ref-67)
68. [美]斯蒂芬·罗思曼：《还原论的局限：来自活细胞的训诫》，李创同、王策译，上海：上海译文出版社，2006年，第2页。 [↑](#footnote-ref-68)
69. [美]斯蒂芬·罗思曼：《还原论的局限：来自活细胞的训诫》，李创同、王策译，上海：上海译文出版社，2006年，第2页。 [↑](#footnote-ref-69)
70. [法]D. 拉普拉斯：《论概率》，李敬革、王玉梅译，《自然辩证法研究》，1991年第2期，第59页。 [↑](#footnote-ref-70)
71. [美]爱因斯坦：《爱因斯坦文集》(第1卷)，许良英、李宝恒、赵中立等编译，北京：商务印书馆，2017，第520页。 [↑](#footnote-ref-71)
72. Barrow J D. Is the world simple or complex?//Williams W. The Value of Science. Boulder: Westview Press, 1999: 85. [↑](#footnote-ref-72)
73. 林定夷：《近代科学中机械论自然观的兴衰》，广州：中山大学出版社，1995年，第186页。 [↑](#footnote-ref-73)
74. 林定夷：《实在论与电磁场理论》，《自然辩证法通讯》，1995年第4期，第16页。 [↑](#footnote-ref-74)
75. [英]彼德·迈克尔·哈曼：《19世纪物理学概念的发展——能量、力和物质》，龚少明译，上海：复旦大学出版社，2000年，第115页。 [↑](#footnote-ref-75)
76. [英]彼德·迈克尔·哈曼：《19世纪物理学概念的发展——能量、力和物质》，龚少明译，上海：复旦大学出版社，2000年，第9页。 [↑](#footnote-ref-76)
77. 赵克：《科学革命：一种流行的神话》，《科学学研究》，2012年第9期，第1284-1285页。 [↑](#footnote-ref-77)
78. 张功耀. 《相对论革命》. 湖南教育出版社, 1999年，第74页。 图3-5。 [↑](#footnote-ref-78)
79. R. 麦科马奇：《罗伦兹和电磁自然观》，董光壁译，《自然科学哲学问题丛刊》，1985年第1期，第32页。 [↑](#footnote-ref-79)
80. 赵克：《科学革命：一种流行的神话》，《科学学研究》，2012年第9期，第1285页。 [↑](#footnote-ref-80)
81. [英]彼德·迈克尔·哈曼：《19世纪物理学概念的发展——能量、力和物质》，龚少明译，上海：复旦大学出版社，2000年，第114页。 [↑](#footnote-ref-81)
82. [英]伊姆雷·拉卡托斯：《科学研究纲领方法论》，兰征译，上海：上海译文出版社，2005年。 [↑](#footnote-ref-82)
83. [美]雷·斯潘根贝格、黛安娜·莫泽：《科学的旅程》(插图版)，郭奕玲、陈蓉霞、沈慧君译，北京：北京大学出版社，2008年，第327页。 [↑](#footnote-ref-83)
84. 邱仁宗：《科学方法和科学动力学》，上海：知识出版社，1984年，第104页。 [↑](#footnote-ref-84)
85. 此处的“罗伦兹”事实上就是本书中的“洛伦兹”，“罗伦兹“是本段引文作者的称呼。 [↑](#footnote-ref-85)
86. 桂质亮：《比较研究：罗伦兹与爱因斯坦——科学革命期间理论范式的影响》，《同济医科大学学报(社会科学版)》，1990年第1期，第23页。 [↑](#footnote-ref-86)
87. [英]牛顿：《牛顿自然哲学著作选》，王福山等译，上海：上海译文出版社，2001年，第27页。 [↑](#footnote-ref-87)
88. [英]牛顿：《牛顿自然哲学著作选》，王福山等译，上海：上海译文出版社，2001年，第26页。 [↑](#footnote-ref-88)
89. 库恩在《科学革命的结构》一书中不同意这种观点。他认为二者的物理蕴涵(比如质量的不变与可变性)截然不同，所以不能由爱因斯坦的理论来进行常规的推导得到牛顿的理论，或者由此得到的不是真正的牛顿的理论，因为蕴涵不同。([美]托马斯·库恩：《科学革命的结构》(第四版)，金吾伦、胡新和译，北京：北京大学出版社，2012年，第86-87页。)这种观点有一定道理。不过，如果不考虑这一点，而由爱因斯坦狭义相对论定律，是可以推导出牛顿的理论的。 [↑](#footnote-ref-89)
90. [美]雷·斯潘根贝格、黛安娜·莫泽：《科学的旅程》(插图版)，郭奕玲、陈蓉霞、沈慧君译，北京：北京大学出版社，2008年，第328页。 [↑](#footnote-ref-90)
91. [美]雷·斯潘根贝格、黛安娜·莫泽：《科学的旅程》(插图版)，郭奕玲、陈蓉霞、沈慧君译，北京：北京大学出版社，2008年，第328页。 [↑](#footnote-ref-91)
92. John Henry. A Short History of Scientific Thought. New York: Palgrave Macmillan, 2012: 287. [↑](#footnote-ref-92)
93. 曹则贤：《黑体辐射公式的多种推导及其在近代物理构建中的意义(Ⅲ)》，《物理》，2022年51卷，第1期，第37-42页。 [↑](#footnote-ref-93)
94. 转引自[美]托马斯·库恩：《科学革命的结构(第四版)》(第2版)，金吾伦、胡新和译，北京：北京大学出版社，2012年，第127页。原文出自：Planck M. Scientific Autobiography and Other Papers. Gaynor F(trans.). 1949: 33-34. [↑](#footnote-ref-94)
95. [美]理查德·德威特：《世界观：现代人必须要懂的科学哲学和科学史》(原书第3版)，孙天译，北京：机械工业出版社，2020年，第333页图26.1。 [↑](#footnote-ref-95)
96. 事实上，对于上述实验，所谓的“作为粒子的电子”和“作为波的电子”，并不意味着我们在实验中观察到了电子，而是表明如果电子是那样的一种存在——潜在的存在，那么会产生照相底片上的那样一种显在。 [↑](#footnote-ref-96)
97. [美]理查德·德威特：《世界观：现代人必须要懂的科学哲学和科学史》(原书第3版)，孙天译，北京：机械工业出版社，2020年，第334页图26.2。 [↑](#footnote-ref-97)
98. [美]理查德·德威特：《世界观：现代人必须要懂的科学哲学和科学史》(原书第3版)，孙天译，北京：机械工业出版社，2020年，第336页图26.4。 [↑](#footnote-ref-98)
99. [美]理查德·德威特：《世界观：现代人必须要懂的科学哲学和科学史》(原书第3版)，孙天译，北京：机械工业出版社，2020年，第361页图27.2。 [↑](#footnote-ref-99)
100. 转引自关洪：《科学名著赏析：物理卷》，太原：山西科学技术出版社，2006年，第251页。 [↑](#footnote-ref-100)
101. [德]海森堡：《物理学与哲学》，北京：商务印书馆，1984年，第19页。 [↑](#footnote-ref-101)
102. [德]海森堡：《物理学与哲学》，北京：商务印书馆，1984年，第24页。 [↑](#footnote-ref-102)
103. [丹麦]玻尔：《尼耳斯·玻尔哲学文选》，[戈革](http://www.baidu.com/link?url=-_m2Mn3zLtsujf1XVvmN9cs1jDxTI0C2_94r6B69RHxQrVbbmyiX8j9nTZlCBraS" \t "_blank)译，北京：商务印书馆，1999年，第233页。 [↑](#footnote-ref-103)
104. Henry J. A Short History of Scientific Thought. New York: Palgrave Macmillan, 2012: 288. [↑](#footnote-ref-104)
105. Harré R. The materiality of instruments in a metaphysics for experiments//Radder H. The Philosophy of Scientific Experimentation. Pittsburgh: University of Pittsburgh Press, 2003: 29. [↑](#footnote-ref-105)
106. Harré R. The materiality of instruments in a metaphysics for experiments//Radder H. The Philosophy of Scientific Experimentation. Pittsburgh: University of Pittsburgh Press, 2003: 31. [↑](#footnote-ref-106)
107. 所谓“回推自然”，根据哈瑞的观点，有两种情况：一种情况是“作为自然系统驯化版本的物质模拟”(material models as domesticated versions of natural systems)的仪器。这些仪器是一种自然地发生的物质设置的物质模拟。相关例子如用于做实验的果蝇群体等。对于此类模拟，在仪器和自然设置之间并不存在本体论的不同，仪器和程序的选择保障了这种同一性，因为仪器就是自然发生的现象以及物质设置的某种版本，在其物质设置中，现象发生了。另外一种情况是仪器作为“因果地关联于世界的工具”(apparatus as models of the systems in the world)。这类工具是因果地由自然的过程影响的，工具中的变化是物质世界的相应状态的效应，典型的如温度计。对于这两类仪器，它们与对象的作用机制清楚明白，能够进行进一步分析，而得到仪器与对象作用之前的对象的状态或者仪器与对象作用之后对象的状态。 [↑](#footnote-ref-107)
108. 可供性(affordance)是吉布森(James J. Gibson)提出的一个概念(可以说是造出)，是他开创的生态学的视知觉论(相对于其他认知学派比如格式塔，那么可用“直接认知论”这个词)的一个重要内容。affordance(可供性)是afford(提供、给予、承担)的名词形式，环境的“可供性”是指这个环境可提供给动物的属性。吉布森用来解释可供性的例子是这样的：如果一块地表面接近水平而不是倾斜的，接近平整的而不是凸起或凹陷的、充分延伸的(与动物的尺寸相关)，并且地表面的物质是坚硬的(与动物的重量相关)，那么，我们可称为基底、场地或地面，它是可以站上去的，可以让四足或两足动物站立其上行走和跑动的，而不像水表面或沼泽表面之于一定重量的动物那样是可沉陷的。在此列出的四项属性——水平、平整、延伸和坚硬，是该地表面的物理属性，可以用物理学的度量衡去衡量，但是一旦涉及特定动物的支撑可供性，就必须与动物关联才能被衡量。如此，这四项属性就不单纯是抽象的物理属性了，它们与特定的动物特定的姿势和行为相关。进一步的分析表明，环境的“可供性”既不像物理属性那样是一种客观属性，也不像价值和意义那样是一种主观属性，它看上去是既主观又客观。吉布森认为“可供性”跨越了主观和客观的二分法，既是物理的也是心理的，它同时指向环境和观察者。 [↑](#footnote-ref-108)
109. Harré R. The materiality of instruments in a metaphysics for experiments//Radder H. The Philosophy of Scientific Experimentation. Pittsburgh: University of Pittsburgh Press, 2003: 34-38. [↑](#footnote-ref-109)
110. Englert B G, Scully M O, Walther H：《物质和光的二象性》，郭凯声译，《科学》，1995年第4期，第30-36页。 [↑](#footnote-ref-110)
111. 肖显静：《作为客体的科学仪器》，《自然辩证法通讯》，1998年第1期，第22页。 [↑](#footnote-ref-111)
112. 肖显静：《作为客体的科学仪器》，《自然辩证法通讯》，1998年第1期，第22页。 [↑](#footnote-ref-112)
113. Henry J. A Short History of Scientific Thought. New York: Palgrave Macmillan, 2012: 291. [↑](#footnote-ref-113)
114. 李宏芳：《量子理论对于哲学的挑战》，《学习与探索》，2010年第6期，第14页。 [↑](#footnote-ref-114)
115. [美]爱因斯坦：《爱因斯坦文集》(第1卷)，许良英、李宝恒、赵中立等编译，北京：商务印书馆，2017年，第213页。 [↑](#footnote-ref-115)
116. [美]爱因斯坦：《爱因斯坦文集》(第3卷)，许良英、赵中立、张宣三编译，北京：商务印书馆，2017年，第469页。 [↑](#footnote-ref-116)
117. Einstein A, Podolsky B, Rosen N. Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? Physical Review, 1935, 47(10): 777-780. [↑](#footnote-ref-117)
118. Howard D. Einstein on locality and separability. Studies in History and Philosophy of Science Part A, 1985, (16): 179-180. [↑](#footnote-ref-118)
119. Einstein A. Quanten-mechanik Und wirklichkeit. Dialectica, 1948, 2: 320-324. [↑](#footnote-ref-119)
120. [美]雷·斯潘根贝格、黛安娜·莫泽：《科学的旅程》(插图版)，郭奕玲、陈蓉霞、沈慧君译，北京：北京大学出版社，2008年，第338页。 [↑](#footnote-ref-120)
121. [英]戴维斯、布朗：《原子中的幽灵》，易心洁译，长沙：湖南科学技术出版社，1992年，第21-22页。 [↑](#footnote-ref-121)
122. 所谓“定域性”是指，“发生在一个地点的事件，不能对发生在另一地点的事件产生影响，除非两个地点之间存在某种联系或通信”。并且，这两件事发生的时间差，必须不小于光穿越两地所需的时间。由此进一步引出了“爱因斯坦定域性”，即“发生在一个地点的事件无法影响发生在超距处的另一个事件”。也就是说，一个事件无法以超过光速的速度去影响另一个事件。对于以上所述的定域性，贝尔-阿斯派克特实验已经表明两个事件可以发生超距作用，产生超光速的影响，也就是说“爱因斯坦定域性”是错误的。至于“信息定域性”，即“发生在一个地点的事件，不能用来向一个在远处的地点传递信息”，并没有实验表明它是错误的，也就是没有办法超光速传递信息。这一点很重要，因为，严格来讲，“相对论只表明那些可以用来传递信息的比光速还快的影响是不可能存在的”，因此，目前并没有实验与相对论产生矛盾。(以上内容出自[美]理查德·德威特(Richard DeWitt)：《世界观：现代人必须要懂的科学哲学和科学史》(原书第3版)，孙天译，北京：机械工业出版社，2020年。) [↑](#footnote-ref-122)
123. [美]理查德·德威特：《世界观：现代人必须要懂的科学哲学和科学史》(原书第3版)，孙天译，北京：机械工业出版社，2020年，第382-383页。 [↑](#footnote-ref-123)
124. [美]理查德·德威特：《世界观：现代人必须要懂的科学哲学和科学史》(原书第3版)，孙天译，北京：机械工业出版社，2020年，第380页。 [↑](#footnote-ref-124)
125. John Henry. A Short History of Scientific Thought. New York: Palgrave Macmillan, 2012: 287. [↑](#footnote-ref-125)
126. 高策、乔笑斐：《后真相时代的科学哲学——物理学哲学的视角》，《中国社会科学》，2019年第2期，第29页。 [↑](#footnote-ref-126)
127. Bohr N. On the notions of causality and complementarity. Dialectica, 1948, 2(3-4): 312-319. [↑](#footnote-ref-127)
128. Cao T Y. Structural Realism and the Interpretation of Quantum Field Theory. Synthese, Springer, 2003, 136(1): 7-16. [↑](#footnote-ref-128)
129. French A. Remodelling structural realism: quantum physics and the metaphysics of structure. Synthese, 2003, (136): 38. [↑](#footnote-ref-129)
130. [美]约翰·霍根：《科学的终结——用科学究竟将这个世界解释到何种程度》，孙雍君、张武军译，北京：清华大学出版社，2017年修订版。 [↑](#footnote-ref-130)
131. Ellis G, Silk J. Defend the integrity of physics. Nature, 2014, 516(12): 321-323. [↑](#footnote-ref-131)
132. Peacock K A. The Quantum Revolution: A Historical Perspective. London: Greenwood Press, 2008: 173. [↑](#footnote-ref-132)
133. Peacock K A. The Quantum Revolution: A Historical Perspective. London: Greenwood Press, 2008: xv. [↑](#footnote-ref-133)
134. Smolin L. The Trouble with Physics: The Rise of String Theory, the Fall of a Science, and What Comes Next. New York: Houghton Mifflin, 2006. [↑](#footnote-ref-134)