第十章　近代科学革命的集成

——微粒说、数学与实验相结合

近代科学革命的进行并非一蹴而就，而是经历了之前所述的三种转变：一是从“抽象的数学理念”到“具体的数学实在”；二是从“泛灵的经验”到“激扰的实验”；三是从“自然的附魅”到“自然的祛魅”。H. 弗洛里斯·科恩曾形象地将此三次转变概括为：从“亚历山大的”(“亚历山大里亚的”)到“亚历山大加”(“亚历山大里亚加”)的转变，从“精确的观察”到“发现的-实验的”的转变，从“雅典的”到“雅典加”的转变。这种转变，在开始的一段时间里是自行发展的，到了17世纪下半叶，“一直把各种自然认识形式彼此隔离的墙体在一定程度上已经被拆除。虽然三种形式都在自行发展，但历史上第一次出现了富有成效的结合”[[1]](#footnote-1)。惠更斯、波义耳、牛顿是这种结合的先驱者，由此将数学、微粒说和实验结合起来。

一、惠更斯：将运动微粒说与数学相结合

伽利略将“亚历山大里亚的”自然认识方式应用于物理学，创立了数学物理学，成为“亚历山大里亚加”；笛卡尔提出了机械自然观并将此用于自然认识，发展了“雅典的”自然认识方式，成为“雅典加”。但是，在他们那里，这两种认识自然的方式是割裂开来的，将它们结合起来并用于物理学研究的是惠更斯(1629—1695)。

惠更斯何以能够实现上述两种认识自然的方式的综合呢？这与他的经历有关。一方面，惠更斯于1629年出生在荷兰海牙的一个有名望又富裕的家庭，他的父亲介绍他与笛卡尔等哲学家频繁交流，由此，他受到笛卡尔机械自然观的影响。在他从事研究工作的初期，他把机械自然观仅仅作为一种启发思维的方式而不是用来说明问题的基本原理，但是，在他迁居巴黎之后，他就开始强调严格的机械证明的重要性，认为任何现象都必须由机械过程来说明其起因，否则就不能算作对事物有效的认识。另一方面，他于1645—1647年在莱顿大学修读法律和数学，他先是接受了“亚历山大里亚的”自然认识方式，并且天才地完善了阿基米德的工作，但是在熟悉了伽利略对运动现象的研究之后不久，就转向了“亚历山大里亚加”的阵营。[[2]](#footnote-2)

这两方面的经历，使得他日后能够将这两种认识自然的方式加以综合，并且运用到他的科学实践中。他的研究遍及物理、数学、天文学等多个领域，在摆钟的发明、天文仪器的设计等诸多方面都有突出成就。1657年，他设计的摆钟获得了专利权；1659年，他出版了《土星系统》(*Systema Saturnium*)一书；1673年，他完成了弹簧钟表的设计，并发表了《摆动的时钟》(“*Horologium Oscillatorium*”)一文，给出了向心加速度公式和单摆周期公式；1678年，他在法国科学院的会议上宣读了《光论》一书；1690年，他正式出版了《光论》(*Traité de la lumière*)一书，全面阐释了光的波动说思想；等等。荷兰学者博斯曾这样评价惠更斯：“在从韦达、笛卡尔到牛顿、莱布尼兹之间，他是最伟大的数学家；在伽利略之后与牛顿之前，他占据着力学领域的至高地位；他在天文学、时间测量和光理论方面的工作具有开创性意义。”[[3]](#footnote-3)

(一)“雅典加”与“亚历山大里亚加”的第一次综合

H. 弗洛里斯·科恩具体描述了惠更斯从1652年到1656年，以“球的碰撞问题”为诱因完成的这种综合。[[4]](#footnote-4)对于这种综合，即将“雅典加”与“亚历山大里亚加”结合在一起，在惠更斯之前从来没有他人这样进行过，在研究碰撞问题时，惠更斯历史上第一次贯彻实施。

17世纪的人们相信运动来源于上帝，是上帝创造了物质并使其处于运动之中，惯性原理是机械论哲学的基础，因此就不需要任何东西来保持物体的运动。只有在物体发生碰撞时，运动才会从一个物体传递到另一个物体，而运动本身是不灭的，因此碰撞问题至关重要。[[5]](#footnote-5)

|  |
| --- |
|  |
| 图10.1　碰撞中产生的冲击力作用[[6]](#footnote-6) |

对于这个问题，早在惠更斯之前，就有不少人研究过。伽利略就曾经利用图10.1所示的装置来研究碰撞中产生的冲击力作用。天平右端Ｗ是重物，左端Ａ和Ｂ是用小管相连的两个小桶，Ａ的底部有活门可以启闭，先闭活门使两方平衡。若将活门开启，水还未达到Ｂ时，天平应向哪边偏斜？伽利略起初认为，冲击力应使天平向左偏斜，但实际结果却恰恰相反。现在我们知道，由于水在到达B之前，处于小管中之时，这一小部分水是处于“失重”状态的，所以这段时间天平会向右倾斜。但当时由于知识的局限性，伽利略无法对其进行解释。

对此，笛卡尔等人也展开了对碰撞问题的研究。在他1644年的《哲学原理》中，笛卡尔提出过七条碰撞定理，但是这些定理大多是不正确的或者表述不清楚的。笛卡尔宣称：当一个小球碰上一个大球时，小球会以相同的速度弹回，而大球则留在原地不动。如果用两个悬挂在细绳上的弹子球做试验，我们将会发现，大球肯定也会运动。“笛卡尔以完美的雅典方式由他的第一原理导出了他的碰撞定律——这预先赋予了它们以确定性。但与此同时，他很清楚自己关于弹子球的大多数定律是失效的。只不过在他看来，这根本没有关系。在他的涡旋世界中永远都有碰撞发生，但这种碰撞从来都不纯粹，因为毕竟所有微粒都同时在运动。”[[7]](#footnote-7)

以“亚历山大里亚加”的框架来看，弹子球其实是一次实验检验，表明笛卡尔的观点根本站不住脚。但惠更斯极具革新性地主张，如果有两套规则，而且在弹子球桌上已经发现，其中一套与经验直接冲突，另一套与经验相当接近，那么就暗示第一套错了，应暂定第二套规则是对的，由此，惠更斯对“亚历山大里亚加”进行了重要的完善。

伽利略的运动的相对性表明，无论是小球碰大球，还是大球碰小球，这两种情况都是一样的，只不过需要改变参考系。但是在笛卡尔看来，哪个球碰哪个球关系甚大，虽然他也推导过运动的相对性原理，但是，在此过程中他没有想到这一点。于是，惠更斯开始借助这条运动的相对性原理，来寻找能使弹子球手满意的新的碰撞定律。

惠更斯对其碰撞规则的推导并不只是基于这种对运动的相对性原理的运用。起初，他在推导时曾试图运用“碰撞力”这个概念。他假定在速度传递的瞬间，一球对另一球施加了一个力使之弹回，但他很快就放弃了这种想法。在更仔细地思考之后，他认为“力”这个概念太过模糊，转而从微粒说与数学相结合的角度来考察这一问题。“他大体上知道世界是由遵循着某些运动定律的微粒构成的，而这些定律必须能用数学来表达。但无论是这些定律本身，还是表达这些定律的精确机制，都不能由一种关于世界构造的先入之见推导出来，更不要说确定地推导出来了。关于我们就这种或那种机制所作的结论，我们最多只能称‘有可能’。”[[8]](#footnote-8)这样一来，他就摆脱了魔法世界中隐秘的吸引力和排斥力，不需要用笛卡尔的漩涡理论来解释事物的运动，更不用像伽利略那样不涉及微粒，而是将微粒说与数学结合了起来，也就是将“雅典加”和“亚历山大里亚加”结合了起来。“惠更斯认为自己的任务便是将两者的方法调和起来，而且不是以耶稣会士炮制大杂烩的那种肤浅方式，而要像笛卡尔那样从运动微粒出发，然后像伽利略那样进行数学处理。”[[9]](#footnote-9)这就是惠更斯的“机械论的数学化”。

以“圆周运动向心力”为例，惠更斯的“机械论的数学化”就是：“从机械论中以太的离心趋势或离心力出发，引入细腻的数学规划程序，先将离心力的概念量化，再透过有效的运算分析，合理推导并诠释出伽利略落体运动的和谐关系。这种创新与彻底的数学方法，不仅解除了数学观和机械论冲突的鸿沟，并在论证过程中将此两种不同的思考模式交互使用，获得许多有意义的成果。这种将原本差异甚大的两种思潮圆满结合——先分析力作用情形，然后使用数学运算，最后寻找出和谐的形式结果的方法，从此一直沿用至今。”[[10]](#footnote-10)在惠更斯建立圆周运动理论之后，很快又将其应用于物理钟摆。他分析了钟摆摆动的过程以及特征，提出“摆动中心”的概念，并得出了单摆周期的公式——T=2π√(*L*/*g*)，他所提出的向心加速度公式和摆动中心概念，为牛顿建立万有引力定律和后人研究复摆创造了条件。

(二)光的波动说：惠更斯原理

笛卡尔首先提出了关于光的本性的两种假说：光是类似于微粒的一种物质；光是一种以“以太”为媒质的压力。胡克(1635—1703)发展了笛卡尔的观点，认为光是单个的、穿过媒质的脉冲。胡克把光类比为小石块投入水后在水面形成的环状波，明确提出光是一种振动。[[11]](#footnote-11)

惠更斯扬弃了笛卡尔和胡克两人的观点，提出了光的波动学说。他虽然受笛卡尔的影响很大，是机械自然观的支持者，认为一切自然现象都可以用机械运动来解释，但对笛卡尔的思想保持质疑，而不是全盘接受。例如，笛卡尔认为人们在认识事物时可以达到十分精确的程度，以把握绝对的真理，惠更斯却认为在研究自然时，完全的精确性是不可能达到的，不可能把握绝对的真理，存在一定程度的或然性，而且，这种或然性与哲学家们的直觉紧密相关。笛卡尔强调理性主义，认为经验是靠不住的，而惠更斯则赋予经验和实验以重要的检验理论的作用，当用假定的原理论证了的东西与实验所产生的现象完全一致时，尤其是当这些现象大量存在时，他就认为假定的原理是成立的，否则，假定的原理就成为一个或然性的东西，就有可能是错误的。

牛顿的看法与胡克不同，提出光的粒子说，即光是一种物质，由粒子组成，并以粒子的形式向外传播。对于光的传播，惠更斯公开反对牛顿把光的本性归因于光所具有的粒子性。他认为光的微粒说与观察到的现象相矛盾，光应该是一种运动。“光线可以交叉而不会互相干扰，而微粒流却无法避免互相干扰。此外，光从光源向四面八方传播出去；例如，如果太阳持续发射微粒以填充它所照亮的球体，那么太阳的物质会逐渐消散，其尺寸也会逐渐减小。因此，光不可能是微粒。由于光是一种机械现象，所以它必定是一种经由介质来传播的运动。”[[12]](#footnote-12)“毫无疑问，光是某种物质的运动，因为如果考虑光的产生，我们注意到在地球上，光主要是由火和火焰引起的，它们无疑包含着快速移动的微粒，因为它们能够熔解和熔化其他一些非常坚实的物体；或者如果考虑光的结果，我们看到，当光(比如被凹面镜)聚焦时，它能像火一样燃烧，也就是说能把物体的各个部分分开，这肯定暗示光是运动，至少在所有自然结果的原因都以机械论方式来构想的真正的哲学中是如此。我认为必须做到这一点，否则我们就不能指望理解物理学中的任何东西。”[[13]](#footnote-13)

既然在惠更斯看来，牛顿的光的微粒说是错误的，光是一种运动，那么，光是一种什么样的运动呢？或者换句话说，光是如何传播的呢？在此，惠更斯继承并发展了笛卡尔的微粒说，进一步发展胡克的思想，将光与声音进行类比，认为光应该以另外某一种形式传播，以此创立并说明他的光的波动学说。

他认为，自然界的事物由不同层级的粒子构成，同级粒子的形状和质量大致相等：第一级粒子构成物体或空气，粒子之间有空隙，运动速度很慢；第二级粒子形成以太，它充满空间，作为物体之间所有作用力的中介；第三级粒子是磁现象的载体；第四级粒子是充满地球周围的极细微的流体媒介，它绕地球做快速的运动，可以毫不费力地穿过物质的孔隙，它是重力产生的原因。

不仅如此，受到笛卡尔“光是一种以‘以太’为媒质的压力”的观念的影响，惠更斯对“以太”与光的关系做了重新解释。他认为，“以太”是一种具有理想硬度的有弹性的微粒，光波的形成是由发光体振动着的微粒把脉冲传递给附近的以太微粒，然后以太微粒相互碰撞，产生振动，将接收到的脉冲传递给与其接触的其他粒子，由此将光脉冲一点一点地传播出去。他认为，每个以太微粒本身并不发生永久性的位移，但作为整体的以太媒质却能够同时向四面八方传播行进的脉冲。他指出，单独一个子波太弱小以致不可能被察觉出是光，但是，当许多子波合在一起互相加强时，其运动就足以形成光波。惠更斯把子波相互加强的地方称为波前，他指出从一亮点扩散开来的波前呈球形，亮点是球的中心。“在一已知波前上的所有的点，都可以看作产生次级球面波的子波源，它们仍以在该媒质中的波速向前传播，其包络形成新的波前。”[[14]](#footnote-14)这就是“惠更斯原理”，见图10.2。



图10.2　惠更斯原理[[15]](#footnote-15)

根据图10.2可知，ACE是一束光，从A点发出的波前上的诸多*b*点和*d*点分别构成了一个新的次波波源，新的波前DCF由所有这些次波波前共同构成。假定A是一个点光源，BG是暗屏HI上的一个开口，则以ACB内各个点为中心(即次波波源)传播开来的球面波，会产生一个以A为中心的包络波前CE。球形波面上的每一点(面源)都是一个次级球面波的子波源，子波的波速与频率等于初级波的波速和频率，此后每一时刻的子波波面的包络就是该时刻总的波动的波面，结果是光是一种波动，在介质中以球面波的形式直线传播，介质中任一处的波动状态是由各处的波动决定的。

“惠更斯原理”的作用重大。在“惠更斯原理”的基础上，光学家不仅推导出了光的直线传播定律、光反射定律和光折射定律，还解释了光的干涉和晶体的双折射现象。“惠更斯原理”最精彩的运用是对冰洲石双折射现象的解释。惠更斯设想在晶体中有寻常光和非寻常光两种光线，它们遵循不同的传播规律，寻常光在任何方向传播的波速相同，而非寻常光在某个方向(晶体对称轴方向)上的传播速度与另外方向上的传播速度不同，从而使得寻常光的光波波前是球面，而非寻常光的波前是椭球面。经过计算，他完美地解释了冰洲石双折射现象，并预言了光线在非天然面上的折射性质。之后，这一预言得到了实验的证实，表明惠更斯理论的解释是正确的，也使得《光论》成为惠更斯一生最杰出的著作。

(三)惠更斯与牛顿光学思想的异同

从上面的论述可以看出，惠更斯之所以提出光的波动说，与他综合运用微粒说与数学紧密相关。在机械论自然观的统治下，他重新解释了“以太”与光的关系。而且，惠更斯在《光论》中还将笛卡尔的以太漩涡说扩展为球面以太漩涡说，提出了著名的惠更斯原理，通过对光本性的解释进一步表明了他的机械论自然观。同时惠更斯认为：“真正的哲学把一切自然现象的原因都看成力学原因。我认为，正是应该这样。不然，你就根本别希望理解任何物理现象。”[[16]](#footnote-16)不仅如此，惠更斯始终将“亚历山大里亚加”的数学思想应用于他的光学研究中。他认为，培根是存在欠缺的，因为他只懂实验而不懂数学，从而也就不懂数学对于物理学研究的重要性，只有伽利略具有这两种能力，能够将数学与实验结合起来，依靠测量和推理来创立构建理论。由此他把实验与数学结合起来，这一点是他成功的关键。[[17]](#footnote-17)因此，“惠更斯作为一名数学家，并不是一个抽象理论和方法的人，他倾向于使用这些理论和方法来解决问题，最好是物理问题。”[[18]](#footnote-18)“惠更斯的数学在更现代的意义上被应用到真实的物体上，而不是抽象的谜题。”[[19]](#footnote-19)“惠更斯更相信严谨的数学推理的力量和丰富的想象力，而不是普通工匠纯粹的经验主义。”[[20]](#footnote-20)由此他将几何学应用于现实的事物“光”中，完成了他的《光论》。

惠更斯光的波动学说具有重要意义。“惠更斯一直以来被称作伽利略的真正继承者、完美的笛卡尔主义者，也是一个巧妙地在弗朗西斯·培根经验主义与笛卡尔理性主义之间采取折中策略的人。”[[21]](#footnote-21)“在反射和折射光线的有限范围内，惠更斯发现了物理光学的一部分，其中数学有效地整合了光的性质及其观察到的行为。开普勒已经意识到，对光线的数学描述也应该反映它的物理性质，但是并没能成功地从它的‘原因’(cause)中推导出折射的‘量度’(measure)。笛卡尔曾明确阐述过光的机械性质，但由于他是在物质本体论而不是其运动中寻求数学方法，因而未能成功地将他的图景(picture)进行数学化。牛顿可以将光粒子的运动数学化，但是这却无法与他通过实验建立起来的有色射线特性的数学理论自洽。与惠更斯相平行的是，牛顿研究了物理光学的其他部分，其中，实验被用作探索新的光现象和建立其数学性质的启发式工具。通过这种方式，他将光学的数学科学扩展到了颜色的特性上。惠更斯则将其扩展到光学定律的机械论原因。通过将伽利略的运动科学应用于以太微粒(ethereal particles)的运动，惠更斯创造了十七世纪最完整的数学物理学形式。”[[22]](#footnote-22)

当然，惠更斯原理还是比较粗糙的：第一，整个波动理论存在的基础是宇宙中充满了“以太”，以太能渗入物体内部，且随着物体的不同而有所改变，对于具有如此弹性的“以太”介质，是难以想象的；第二，在当时的实验条件下，对波的理解存在困难；第三，波的假设并不涉及波的波长、振幅、相位、周期等特性，还不能解释细微得多的光的衍射现象；第四，明暗相间条纹的出现，也表明各点的振幅大小不等，对此惠更斯原理就更无能为力了；第五，由惠更斯原理还会推导出倒退波的存在，这一推导显然是错误的。

但是，惠更斯原理的次波假设是先进的，体现了人类对光学现象的一个近似认识，奠定了近代光学的波动理论的基础。后来菲涅耳对惠更斯光学理论做了发展和补充，创立了“惠更斯-菲涅耳原理”——面上的任意一点都可以看作是新的振动中心，它们发出球面次波，这些次波是相干的，它们在空间某一点的相干叠加决定了该点的振动。这一原理“可以解释和描述光的干涉现象和光束通过各种形状的障碍物时所产生的衍射现象。在现代波动光学中，菲涅尔把相位和振幅考虑在内，使这一原理更加完善，能解释许多光学现象及波动现象，它对光的折射、干涉和衍射现象的解释，广泛出现在各种光学教材中”[[23]](#footnote-23)。

由上面的论述可见，笛卡尔首先提出了光有微粒性和连续性(连续的压力)，胡克改进了笛卡尔关于光的“连续压力”的说法并提出“光是脉冲”(光波的概念开始发展)，而后惠更斯继承了光的波动性并抛弃微粒性，牛顿则继承了光的微粒性并抛弃光的波动性。

比较惠更斯和牛顿的光学思想，两者有共同点：他们都信奉17世纪后期兴起的粒子论，只不过，惠更斯认为光是通过匀质的、均匀的弹性粒子以太来传播的一种脉冲或波动，而牛顿认为光由粒子组成，以粒子的形式向外传播。两者都是粒子哲学的产物，都是受当时流行的机械论观点影响的结果。

这表明惠更斯和牛顿的光学思想之间有共同的思想基础。但是，这两者之间也是有所不同的。

首先，惠更斯在笛卡尔“假想的物理学”的基础上建立了演绎的物理学，他认为要建立完备的物理学体系，所有自然现象都要运用机械运动分析，然后再建立理论，而牛顿则在建立科学理论和科学原则中不构造假说，直接在现象的基础上建立科学理论，例如在处理颜色实验的时候就是利用这种方法，在处理“力”的概念的时候强调了这一点。牛顿把吸引力概念当成了《原理》的核心概念。然而，机械论哲学明确排除任何类型的超距作用。牛顿如何来调和这种明显的矛盾呢？牛顿在《原理》中声称，力只不过是描述物体如何偏离惯性运动的数学表达。在附加于《原理》后来版本的“总释”中的一段著名的话中，牛顿写道：“迄今为止我们已经用重力解释了天体及海洋的种种现象，但还没有把这种力量归于什么原因。……我还没有能力从现象中导出重力的那些属性的原因，我也不杜撰假说。因为凡不是从现象中推导出来的任何说法都应被称为假说；而假说，无论是形而上学的还是物理学的，是关于隐秘性质的还是力学的，在实验哲学中都没有位置。……对我们来说，知道重力确实存在，并且按照我们已经说明的那些规律起作用，还可以用它来广泛解释天体和海洋的一切运动，这就足够了。”[[24]](#footnote-24)[[25]](#footnote-25)[[26]](#footnote-26)

其次，牛顿反对笛卡尔主义哲学的假说是为寻求更大的真实性，而惠更斯则是为寻求更大的可能性，惠更斯建立在笛卡尔自然哲学基础上的光学理论，依赖的基础是无从论证的假设性的物质——以太，从现象归纳演绎出的科学理论都只是在可能的范畴内，而牛顿的工作大多是对实际现象的描述，或者是描述性实验，所建立的科学理论都是从实验中归纳演绎得到的，是确定性的，不存在不确定的基础条件。

最后，惠更斯建立的是光的波动理论，而牛顿所提出的则是合适(fit)原理，发展了光的微粒说，牛顿不赞成波动说的理由是光的波动说不能很好地解释光的直线传播这一事实，同时，对光的偏振现象也不能解释，惠更斯提出的关于光的波动说赖以成立的前提是宇宙中有以太的存在。[[27]](#footnote-27)“在牛顿《光学》第二编中牛顿环的发现使牛顿触到了光的周期性的门槛，为后人完善对光本性的认识打下了基础；虽然惠更斯可能看过牛顿写的这部分光学实验，但可能由于他对这方面知识不熟，而且，他所认识的光波是某种类似于声波的纵波(疏密波)，因而在光的波动说的建立时对波相位和周期没有涉及，只建立了初级的光的波动理论。”[[28]](#footnote-28)也许因为持波动说观点的科学家们将光波看作一种纵波，无法解释当时发现的光的偏振现象，再加上牛顿的巨大威望，所以，惠更斯的波动说在与牛顿的光的微粒说的竞争中渐居下风，这种状况直到19世纪初托马斯·杨(Thomas Young)的“双缝干涉实验”的实施才得以改变。

二、波义耳：将机械论的微粒说与实验相结合

波义耳(1627—1691)出生于英国贵族家庭，学过医学，之后研究化学，成为著名的化学家。“他坚定地拥护一种机械论哲学版本(‘机械论哲学’一词实际上是波义耳创造的[[29]](#footnote-29))，即他所谓的微粒说[[30]](#footnote-30)。”[[31]](#footnote-31)他也“喜欢自称为一个培根主义的经验论者”[[32]](#footnote-32)，“他曾在自己著作的前言中多次声称，他曾经强忍着不去阅读笛卡儿和伽桑狄的著作，以免受到他们体系的诱惑”[[33]](#footnote-33)。在波义耳看来，“只有化学才能为机械论自然哲学提供一种建立在实验基础上的物质理论”。[[34]](#footnote-34)波义耳将机械论的“微粒说”与“实验”结合起来了吗？他为什么要将机械论的“微粒说”与“实验”相结合？他为什么不将“元素说”与“实验”相结合？他如何将机械论“微粒说”与“实验”相结合？他将机械论的“微粒说”与“实验”相结合有何意义？

(一)波义耳将机械论的“微粒说”与“实验”结合起来了吗？

R. A. 霍尔(R. A. Hall)和M. B. 霍尔(M. B. Hall)[[35]](#footnote-35)对波义耳的硝石(硝酸钾)“重整化(复原)实验”(the redintegration experiment)展开研究，认为波义耳的实验与他的机械论解释之间关系紧密。[[36]](#footnote-36)

M. B. 霍尔认为，波义耳的机械论哲学建立在实验的基础上，是一个完整的和发展良好的理论，既是理性的，也是经验的，足以解释所有物质的性质；波义耳的科学成就和他的机械论哲学之间，存在着一种亲密而富有成效的关系。[[37]](#footnote-37)

安德鲁·派尔(Andrew Pyle)赞同上述观点，认为波义耳在气动学方面的工作给予机械论的解释以力量，照亮了化学学科的发展，是机械论哲学的又一次胜利。[[38]](#footnote-38)

克莱里库齐奥(A. Clericuzio)对R. A. 霍尔和M. B. 霍尔的上述观点展开了批判，认为在脱硝基过程中，波义耳根据微粒的化学属性说明了硝酸钾的“复原”，而没有做出从机械论的原则推演的任何努力；波义耳和斯宾诺莎之间的争论事实上是一位严格的化学家与一位严格的机械论哲学家之间的争论。[[39]](#footnote-39)

查尔默斯(Alan Chalmers)认为M. B. 霍尔和安德鲁·派尔的观点失之偏颇。他指出，尽管波义耳忠于机械论哲学，但是，在波义耳的机械论哲学和他的科学之间的连接远非亲密的和富有成效的，波义耳科学上的成功是独立于他的机械论的微粒说的；当波义耳出于压力要为自己的观点辩护时，就转向实验结果而不是机械论哲学。结果是，波义耳科学上的成功并没有为他的机械论哲学提供经验上的支持。[[40]](#footnote-40)

萨金特(R. M. Sargent)对上述问题进行了深入细致的研究，结论是：波义耳坚持实验与思辨哲学(运动微粒的自然哲学)的相互作用(相互制约)，曾经两次各分七点简明扼要地概括了他的这种观点：“一是实验对思辨哲学的用处，包括：补充和纠正我们的感官；提出一般的和特殊的假说；对解释进行说明；化解疑问；确证真理；反驳谬误；为有启发性的研究和实验及其熟练完成提供线索。二是思辨哲学对实验的用处，包括：设计全部或主要依赖于原理、概念和推理的哲学实验；设计工具(无论是力学的还是其他的)研究和试验；改变或改进已知的实验；帮助估计什么在物理上是可能的和可行的；预测一些尚未尝试的实验的结果；确定可疑的、看起来并不明确的实验的界限和原因；精确地确定实验的条件和关系，如重量、尺寸和持续时间等。”[[41]](#footnote-41)

萨金特的工作似乎没有受到更多人的关注，倒是查尔默斯的“波义耳之实验与微粒说之间没有互助关系”的观点，受到了安斯蒂和安德鲁·派尔两位学者的质疑。安斯蒂认为，波义耳实验研究不是为了把某一现象或性质还原为微粒的具体结构而寻求经验证据，他关心的是用微粒的或机械的属性对实验现象或性质做出与经验相符合的“理智解释”。机械论哲学有其自身的“启发性的结构”(heuristic structure)，这驱动并主导着波义耳的实验程序(experimental programme)，波义耳的大多数(即使不是全部)实验工作都被认为与机械论哲学相关联。波义耳能够通过两方面的假定——一是假定所有的性质最终都能够归结为一组选择的机械的性质，二是假定所有自然现象的解释都能够根据机械的操作以及仅仅诉诸那些熟悉的性质，去确定任何现象的可能解释范围。……因此，波义耳的实验并非有自己的生命，而是根据机械论哲学被清楚地指导和理解。他对托里拆利实验等的考察和解释，都表明了这一点。[[42]](#footnote-42)

安德鲁·派尔持有与萨特金相似的观点。他指出，波义耳的机械论哲学与科学成就之间是相互支持的。波义耳在气动学和化学方面的科学成就取决于他的机械论哲学，而且为他的机械论哲学提供支持。作为机械论原则与实验现象解释之间“中间假说”的“微粒假说”，在实验研究中具有独特的方法论作用：“微粒结构”作为现象的“次级原因”(subordinate causes)，用于实验现象的经验解释，类似于培根对经验现象原因的所谓“倒序说明”，有助于对“根本原因”进行经验研究。[[43]](#footnote-43)例如，“空气泵实验”虽然没有明确给出“空气弹性”的微粒机制，但是，基于“空气机械弹性”假说，能够经验性地解释空气的重量、压力和真空等现象。

在同一年(2002年)同一期刊上，查尔默斯对上述两位学者的质疑给予了回应。他认为，“机械”有两种含义——机械论哲学家意义上的严格的“机械”和常识意义上的“机械”，波义耳的实验科学是通过机械类比而富有成效地获得信息的，其中“机械”的含义与机械论哲学意义上的严格的“机械”含义毫无关系，而与常识意义上的“机械”含义相符。安斯蒂和安德鲁·派尔以常识意义上的“机械”的含义对此加以质疑是不恰当的。[[44]](#footnote-44)

2009年，查尔默斯对他原先的观点作了进一步的论述。他认为，在波义耳的实验科学中所涉及的“中间因素”，如空气的重力和弹力，从经验上说是可得到的，而终极机械微粒则不能。正因如此，波义耳的实验科学并没有得益于其机械论哲学的指导，而他的科学实验的成功也没有为其机械论哲学提供重要的支撑。与亚里士多德主义的自然学说一样，“机械论微粒说”是形而上学的，并不具有波义耳所谓的“更理智、更明晰”的优势。他甚至说，波义耳的实验科学成就与其说是得到了机械论的帮助，不如说经受住了机械论的干扰。机械论与实验科学无关，甚至有害于科学。[[45]](#footnote-45)

H. 弗洛里斯·科恩对上述问题进行了思考，认为波义耳的微粒说与实验之间有一种相互限制的关联：“这种关联使得此前作为普遍教条的微粒思想变成了假说和其他辅助手段的来源。”[[46]](#footnote-46)

从上述争论可以看出，关于机械论哲学或微粒说与实验之间的关系，概括起来有三种：一是“无助论”，以查尔默斯为代表；二是“单向有助论”，以安德鲁·派尔为代表；三是“双向有助论”，以霍尔等为代表。谁是谁非，需要我们深入分析。

(二)波义耳为什么要将机械论的“微粒说”与“实验”相结合？

1. 出于上帝的旨意，通过“微粒说”与“实验”认识自然

波义耳认为，上帝不仅是物理世界的创造者而且还是管理者，从而使得这个世界像一架机器那样运转。波义耳也想把“自然”一词从古代和中世纪的讨论和那些模糊不定的用法中解救出来，通过新的二元论来定义它——自然既非实体的聚集，亦非不可预见之力的神秘施予者，而是一个机械定律系统，当它被构造的时候，它被看作一个本原，由于这个本原，物体按照造物主规定的运动定律活动和变化。……他将用宇宙机制(cosmical mechanism)来表达他所说的整个自然，它包含伟大宇宙体系所属物质的所有机械属性(形状、大小、运动等)。[[47]](#footnote-47)波义耳认为，世界的本原是由微粒构成的，粒子有大小和形状，本身没有运动能力，是上帝在造物之时将它们置于运动之中；上帝凭借其意志直接作用于微粒之上，并且直接赋予微粒以能力以及相互作用，使得宇宙成为一台设计精良的“钟表”。[[48]](#footnote-48)[[49]](#footnote-49)由此，微粒说就与宗教神学的上帝旨意相符合。

对于这个机械般的世界，波义耳指出，人类有责任去认识它，这也是上帝赋予人类的使命。波义耳认为：基督教福音书实际上包含和展现了人的赎罪的全部秘密，为了灵魂的得救，我们有必要认识它。微粒哲学或机械论哲学力图从惰性的物质和位置运动中推导出一切自然现象。但是，不管是基督教的基本教义，还是关于物质和运动的能力和效果的学说，它们至多只是……由上帝的产物构成的巨大的宇宙体系中的一个轮子……似乎都只是这个普遍假说的成员。这个假说的对象，他认为就是上帝的本质、目的和作品，它们是可以由我们在生活中来发现的。[[50]](#footnote-50)这段话事实上是说：以微粒说来认识这个机械般的世界，这是人类的责任，也是灵魂得救的途径；上帝创造人类并且赋予人类相应的责任以认识上帝创造世界的伟大，从而体现上帝的全知全能。

对于波义耳来说，上帝的全知全能不能被人类通过认识自然迅速明了。具体来说，通过微粒说来认识自然就是不能完全确定的，还需要实验佐证。波义耳说道：“对于这类作品[完整的躯体或生理系统]，如果其作者(就大部分而言)是敏锐而好奇的人，那么他们或许大有用处，而不是用似是而非的解释来完成他们的智慧。因为一方面，他们的作者，要想使他们的新观点好起来，要么必须带来新的实验和观察，要么就必须考虑以新的方式考虑那些已知的东西，从而使我们注意到他们以前没有注意到的东西，而另一方面，不管读者是否喜欢所提出的假设，他都不会因为好奇心而兴奋地去尝试一些事情，这些事情似乎是他的新学说的结果，可能会因为它们被证明是成立或反对的实验而建立或推翻它。”[[51]](#footnote-51)由于“对自然界的认识依赖于我们对世界的经验而无法理性地先验于经验而取得”[[52]](#footnote-52)，因此，需要进行实验以获得各种各样的关于自然对象的认识。“在方法论上，波义耳以下述方式赋予实验以崇高的地位：自然哲学家通过实验与观察来阅读自然之书，由此了解上帝深置于自然过程中的确凿信息——上帝的暗示；而在一时找不到明确的上帝启示及暗示之处(实际上，前沿的科学探索之处大都缺乏这类启示与暗示)，则要‘用理智来衡度真理’，并用实验来校准人类易谬的理智。”[[53]](#footnote-53)这就从“神学意义上确立实验在自然哲学中的地位，并将其自然哲学又称为‘实验哲学’”[[54]](#footnote-54)。“对波义耳来说，就像对培根一样，实验科学本身就是一项宗教的工作。”[[55]](#footnote-55)

通过微粒说认识世界是重要的。波义耳在《机械假说的卓越性》(*Excellency of the Mechanical Hypothesis*)的结尾明确地说道：“[T]智慧且勤勉的现代博物学家和数学家们，愉快地把它们(机械原理和解释)应用在一些曾被认为具有神秘性质的困难领域上(流体静力学、光学的实用部分、射击学等)。极为可能的是，当这一哲学被更深入地研究和进一步完善后，它将被发现可用于解决更多的自然现象。因此，如果机械论哲学继续以近年来的发展速度来阐释物质，那么毋庸置疑，公正无偏见的人们，总有一天会认为这种方法很有价值，因为它既符合自然规律，又能适用于许多自然现象。”[[56]](#footnote-56)

2. “第二凝结物”由“第一凝结物”形成，与化学实验过程有着更加紧密的关联

波义耳机械论的微粒说思想主要来自两本书：一本是创作于17世纪50年代晚期，出版于1666年的《根据微粒哲学的形式与性质的起源》(*The Origin of Forms and Qualities According to the Corpuscular Philosophy*)；另外一本是出版于1674年的《关于机械假说的优点和依据》(*About the Excellency and Grounds of the Mechanical Hypothesis*)。

根据波义耳机械论自然观，这个世界是由十分微小的微粒组成的，当微粒与物体结合或分离时，因为要与物体中的孔洞(pores)相适应，其大小和形状也会发生变化。如果其中微粒的运动和结构产生变动，物体会发生变化而获得新性质。可感的物体是由许多不可感的微粒结合而成的，微粒的摆置方式和顺序使物体产生一定的排列和配置，构成物体的特殊纹理(texture)[[57]](#footnote-57)，规定着物体的性质，使得物体呈现出颜色、气味、味道等可感性质。物体及性质的产生、毁灭和变化均是微粒结构的变化。化学反应仅仅是粒子的重组，并且所有化学性质都取决于运动中的物质粒子。[[58]](#footnote-58)[[59]](#footnote-59)

对于波义耳来说，构成世界的微粒有大小、形状和运动(或静止)的机械属性，微小而不可感知。对于那些理论上可分而用自然的方法几乎不可分的微粒，称为“自然的最小量”(natural minima)或“自然始基”(prima naturalia)。物质世界的所有现象都可以而且应该根据以“原始情感”(primary affections)为特性的“自然最小量”的微粒的排列和运动来解释、追溯或简化，这些不可见微粒的排列和运动被称为“纹理”，它们对物体的可观察属性负责。

进一步地，作为“自然的最小量”的微粒并非静止不动，它们可以紧密凝结形成相对稳定的“星团”(clusters)。这些“星团”是“第一凝结物”(prima mixta)，也是基本的物质(fundamental matter)，具有严格的机械论属性，对应于基本的微粒(fundamental corpuscles)。它们仍然不能被感知并且不能用自然的办法分开，但是，它们具有独特的且不变的形状与大小，具有不可穿透性(impenetrability characteristic)和“原始情感”，能够运动。

“第一凝结物”以其大小、形状、运动以及“原始情感”造就事物，形成“第二凝结物”。对于波义耳来说，事物的性质是由“第一凝结物”、其他各级“微粒”的结构，以及由逐级凝结形成的物体的整体微粒结构(其中包括物体内部的孔隙)决定的，即由各级微粒特定的机械属性和结构决定的。

“第二凝结物”与“第一凝结物”是不同的。“物质是由许多均匀的小微粒组成的，这些小微粒结合在一起形成更大的微粒，这些大微粒则构成了化学所处理的物质和物体。我们在物体中观察到的所有差异都必定来自于次级凝结物(即构成物体的有效微粒)在形状和运动上的差异。”[[60]](#footnote-60)这就是说，在化学变化或实验过程中，“第一凝结物”相对于“第二凝结物”更加稳定，也更加根本，与实验现象或者事物的性质没有直接的关联，而“第二凝结物”则与实验现象或事物的性质有直接的关联，因此，可以作为直接的原因用来解释和说明实验现象，而实验所得到的结果也更多、更紧密地与“第二凝结物”及其特征相关联。

3. “微粒说”需要实验的支持，实验给予日常意义的微粒说更多支持

波义耳是如何捍卫机械论哲学的呢？他希望对物质实在的终极本质，即表象背后的实质做出解释，即像古人一样，借鉴可观察世界的知识，抽象它的各个方面，并将其转化为基本原理。具体而言就是，他主张这些原则的可解性，试图通过与可观察的宏观领域的类比，提出关于微观领域的似乎合理的(plausible)主张。这些主张援引了不可观测粒子的形状、大小和运动，必然超出了直接的可观察属性，从而使得关于这些不可观察粒子的论述并不必然合理。而且，将物体的性质从可观察的领域向不可观察领域扩展外推，也不是必然的，如对于自由落体定律，对轻的和重的物体来说，都是不变的，但是，不能说它就同样适用于波义耳的自然的最小量，因为此时它没有重量。

这就是说，通过宏观/微观类比所得出的各种各样的微粒说并不是完全确定的，需要进一步的实验为其辩护。在一篇关于《多种独特性质的机械起源或产生》(“*Mechanical Origin or Production of Divers* *Particular Qualities*”)的文章中，波义耳特别评论了事实与他的机械哲学之间的关系。在他看来，我们可以通过诉诸实验来支持“微粒学说”(corpuscular doctrine)，以至于提出可能的微粒机制来解释现象或使其与机械哲学相兼容。他反复声称，他在化学领域中颇受青睐的实验如硝石实验，就为他的微粒说提供了支持；他还早在《形式与性质的起源》(*“Origin of Forms and Qualities”*)一文中就明确指出：“那些热爱真正学问的人，希望通过特定实验来重回新哲学的学说，而我已经尽力为他们提供了所需的经验。”[[61]](#footnote-61)

对于实验给予机械论微粒说的支持，查尔默斯有不同的看法。如前所述，他认为机械论哲学分为两种：一种是严格意义上的精确的机械论哲学，它以微粒的大小、形状、运动以及“原始情感”来解释实验，与事物变化的根本原因或第一原则相对应；另外一种是日常意义上的朴素的机械论哲学，它与钟表、手表、标杆以及机器相对应，以其组织部分之间的相互作用来解释实验，与事物变化的中间原因或从属原理相对应。波义耳的实验所涉及的物质的性质更多地涉及的是诸如重力、弹力、材料的反射和折射属性等，而不是仅涉及原始情感，因此，这类实验就不能给予严格意义上的机械论哲学以充分的支持，而只能给予日常意义的相互的机械论哲学以支持。[[62]](#footnote-62)

应该说，查尔默斯的主张有一定道理。斯宾诺莎与波义耳之间关于硝石(硝酸钾)“重整化(复原)”实验的争论说明了这一点。

事实上，这场争论并非直接在斯宾诺莎与波义耳之间展开，而是在斯宾诺莎和奥尔登堡(Oldenburg)之间的通信中展开，只是，奥尔登堡对波义耳观点的阐述是在与波义耳协商后提出的，代表了波义耳的观点。在这些实验中，波义耳将炽热的木炭混入硝石，将其转化为“固定硝酸盐”(碳酸钾)，然后再通过加入硝石精(硝酸)将其复原。斯宾诺莎批判波义耳并没有证实这一过程的真正机械原理，并试图弥补这一缺陷。他认为硝石和硝石精实际上是由同一种物质组成的，其区别在于构成硝石精的基础物质能够快速运动。波义耳拒绝去推测一个精确的机制，他声称已经证明了硝石可以在“固定硝酸盐”和硝石精中被分解和重新产生，并极力主张，诉诸实体形式并不可行。(斯宾诺莎对后一点并不感兴趣，他已经把否定实体形式视为理所当然了。)[[63]](#footnote-63)

除了上述原因外，波义耳将“微粒说”与“实验”结合起来的另外一个重要原因是，他怀疑他之前各种“元素说”之作为本原性的“元素”是否在所有的有关物体的实验中都得到验证。一旦进一步的实验结果是否定的，那么，就不能将原先的这些作为本原性的“元素”作为最终微粒，而必须以其他种类的微粒作为基本存在来说明各种实验现象，或以各种各样的实验来确证所提出的各种各样的微粒说。关于这一点，将在下一部分详细论述。

(三)波义耳为什么不将“元素说”与“实验”相结合？

对于这种怀疑，波义耳指出，它们或者是实验上的(主要针对的是炼金术士、医药化学学派等)，或者是概念上的(主要针对的是亚里士多德主义者的学者)，或者是神学意义上的(主要针对的是神学观念)。“如要用短短的一句话来归结我所要谈的全部理由，那我只能这样告诉你，任何一个命题，无论它如何著名，如何重要，只要它尚未为毋庸置疑的证据证明为真，那么，从哲学上讲，我就有充足的理由去怀疑它。如同往常一样，如果我能揭示，人们用于说明元素存在的那些理由并不能令那些勤于思考的人们满意，那我就敢于认为我的怀疑是一种合理的怀疑。”[[64]](#footnote-64)

1. 基于实验事实，“元素说”之本原性“元素”并非存在于所有物体中

波义耳说道：“我从开始便一直抱有某种怀疑，亦即怀疑通常的那些要素可能并不像人们所相信的那样是一些普遍而广泛的要素，并不能从化学操作中一一得出，因此，对我来说，既要注意到种种为怀有偏见的人们所忽视的、看起来与炼金术学说不太协调的现象；又要设计出一些可能为我反对该学说提供依据的，且并不为许多现在仍然活着的、从事化学事业或许要比我更久、对于某些特殊过程可能要比我更有经验的人们所熟知的实验，倒算不得什么难事。”[[65]](#footnote-65)基于这样的思想，波义耳结合相关实验，对“元素说”作了一番考察和评论。

波义耳说道：“首先，我认为，在何种程度以及何种意义上，才应当将火视为真正的且是万能的分析结合物的工具，这可能恰恰还是一个有待质疑的问题，而不论庸俗化学家们曾作过怎样的证明或训示。”[[66]](#footnote-66)“其次，我发现，存在着某些结合物，看起来似乎以任何强度的火都可以从这些结合物中分离出盐或硫或汞，但这种可能却从来就不曾被实现过，更不用说要将所有这三要素一起分离出来。”[[67]](#footnote-67)“下一项，我们着手考虑，仅只使用火，有些分析要么完全不能进行，要么不能很好地完成，而利用其他方法却能够完成。譬如将金和银融为一体后，让精制人员或金匠们利用火法分析来分离金银，这使他们倍感棘手，毫无疑问，他们只能勉勉强强地将它们分开。”[[68]](#footnote-68)“我将要提出第四点理由以支持我的第一类思考，这就是，火即便有时能将某种物体分解成稠性各不相同的种种物质，但通常情况下并不能将其分成种种实体性的要素，而只是重组其成分形成种种新的结构，由此产生的种种凝结物，无疑有着新的性质，但仍然不外乎是复合物性质。”[[69]](#footnote-69)“第五，上述实验促使我认为，很难证明，除了火以外，再也找不到其他任何物体或办法，能够将凝结物分解成数种匀质物质，而这些物质如同用火分离得到或产生的那些物质一样，无疑应称为是凝结物的元素或要素。”[[70]](#footnote-70)

根据以上五点，波义耳事实上是说，除了将“火”作为手段之外，还可以运用其他手段达到分析结合物的目的。根据以往的经验，用“火”对结合物进行分析，还不能从所有物质中分离出本原性的“盐”或“硫”或“汞”，至于同时从同一物质中分离出这三种本原性的元素，就更未见。这说明，在很多时候用“火”分析结合物，并不能得到本原性的元素；而且，通过除“火”以外的其他方法，也可以得到这些元素。

在这样的基础上，波义耳最后得出结论：“须知，此后我还将会证明，化学家们通常称之为物体的盐、硫、汞的那些物质，并不像他们所想象的那样以及他们的假说所要求的那样是一些纯一的、元素性的物质。”[[71]](#footnote-71)

这样的证明体现在波义耳的水培植物(如烟草、绿薄荷、南瓜等)、黄杨木的蒸馏实验中。通过这两个实验，波义耳得到与已有判断相矛盾的结论。[[72]](#footnote-72)

第一个矛盾，与水培植物(如烟草、绿薄荷、南瓜等)的蒸馏实验有关。由此实验得到的馏出物是一些黏液、一些焦臭的精、少量的油以及某种波义耳认为可以转变为盐和土的残渣，而非范·赫尔蒙特认为的水。而且，对于其中的黏液馏出物，波义耳发现，它们之间存在很大的差异，并且它们都具有独特的味道，而非人们所说的淡而无味。

第二个矛盾，与黄杨木的蒸馏实验有关。他通过实验发现，如果将气味强烈的酸味液体馏出物称作盐，那么这种盐是与已知的三大类盐(酸味的盐、含碱的盐和含硫的盐)不同的一种新盐。原因是，已知的三大类盐彼此之间都不能相安无事地共存，而黄杨木的这种盐却分别能与已知的三大类盐和睦共存且不发生异常现象。还有，黄杨木气味强烈的液体馏出物是酸的，而盐是咸的。如果称这种气味强烈的酸味液体馏出物为精，波义耳发现，这种精，除了有一种其他物质的精常有的强烈的、焦臭气味之外，还有一种酸味，他怀疑这种精不是由一种而是由两种不同的物质组成。于是，他进一步去分离这种精，得到了一种气味强烈，但一点也不酸的精，它与没有去掉酸味的精之间有很多不同的性质。波义耳还对多种树木进行蒸馏，他发现所得的精之间有很大的区别。不仅如此，波义耳还发现，葡萄在不同状态下蒸馏出的精也不同。[[73]](#footnote-73)

这就是说，根据波义耳的相关实验，并不能保证世界上的万事万物最终都有“四元素说”“三元素说”“五元素说”之各种各样的本原性的“元素”存在，传统“元素说”将世上万物的最终存在定于几种本原性的“元素”是错误的。

当然，对于这几种元素是否物质性地存在，波义耳并不否认，他否认的是把这些物质作为万事万物的本原性的“元素”。波义耳说道：“我想，你大概猜得出我这样争辩的意思，也想得到我总不至于可笑到如此地步，竟然会否认土、水、汞和硫这些物体的存在：我将土和水视为宇宙(或者毋宁说地球)的一些组成部分，而不是所有混合物的组成部分。而且，虽然我不会武断地否认有时可能会从某种矿物甚至是金属中得到某种流动的汞或可燃物，但我无需承认在这种情况下得到的流动的汞或可燃物即是上述意义上的元素。”[[74]](#footnote-74)

2. 基于“‘凝结物’是多种多样的”思辨，“元素”也应该是多种多样的

波义耳说道：“就我当时所运用的那些元素概念而言，我想再次指出，如果我们姑且认为下述假定是合理的，这一假定就像我当时曾作过的假定一样，是说一种元素是由彼此完全相同的众多的微粒构成的，而这种微粒又是由质料的极其微小的粒子所构成的某种微小的第一凝结物组成的，那么，我们设想上述第一聚集体的种数可能远远不止三个或五个便绝无荒谬可言。因此，我们便无须假定，在我们所探讨的每一复合物中，都恰好能够找出三种如上所述的原始凝结物。”[[75]](#footnote-75)

根据波义耳的上述话语，每一种元素都与同一种微粒凝结成的第一凝结物对应，第一凝结物多种多样，因此，元素也应该多种多样，有的结合物可能由两种元素组成，有的结合物可能由三种、四种、五种乃至更多的元素组成。“所以，按照这一见解，就不可能给一切类别的复合物的元素指定确定的种数，因为有些凝结物可能是由较少的元素组成的，还有些凝结物又可能是由较多的元素组成的。而且，按照这些原则，就的确可能存在着这样的两类结合物，其中一类可能并不含有组成另一类结合物的全部元素中的任何一种。”[[76]](#footnote-76)

这就是说，组成万事万物最终的元素有多种，也可能完全不同。“由于元素可能不止五六种，而且一物体所具有的那些元素亦可能不同于另一物体所具有的那些元素，因此，某些再混合物的分解可能导致某些新种类的结合物的产生，因为一些以前并未聚集在一起的元素可能会发生结合。”[[77]](#footnote-77)

综合上面的论述，波义耳似乎是说，存在于一切事物之中作为世界本原的那几种特定的“元素”是不存在的，而存在的应该是多种多样的作为微粒的“第一凝结物”的“元素”，这样的“元素”多种多样，可以作为每一种事物之根本。波义耳就说：“须知，正如一种语言的每一个单词无不是由数目相同的一组字母组成未见得就合乎语言的本性一样，说一切由元素组成的物体都是由数目相同的一组元素复合而成，也未见得合乎我们的这个正因为多姿多彩才显得完美无缺的大千世界的本色。”[[78]](#footnote-78)

3. 从神学上看，造物主无须只用少数几种“元素”创造世界

波义耳说道：“人们想到元素的存在，可能出自这样的一些考虑，简单地划分一下，不外乎有两类。其一是说，造物主在构成那些被看做是结合物的物体时必须使用元素作为砌块。另一是说，结合物的分解表明造物主早已将元素复合成了结合物。”[[79]](#footnote-79)

对于上述这两类考虑，波义耳认为都是存在欠缺的。“因为同一团质料无须通过与任何外部物体发生复合，起码它无须通过与元素发生复合，就可以赋予形形色色的形式，从而可被(成功地)转变成许许多多的不同物体。又因为质料纵然拥有多种不同的形式，但从根本上讲都不过是水而已，而且它在历经如此之多的转变过程中，从未被还原成其他的那些被说成是结合物的要素和元素的物质中的任何一种，这当然要把剧烈的火除开在外，火本身并不能将物体分解成绝对简单或绝对基本的物质，而只是将其变成一些新的复合物；所以，我要说，既然是这样的话，那我实在看不出有什么理由非要相信存在着这样的一些原始而简单的物体，说造物主正是用这些物体作为先在的元素才得以复合出一切其他物体。我实在看不出我们为什么不能设想，造物主只须以各种方式对那些被认为是结合物的物体的微小部分施行改造作用，即可以令这些物体相互造成它们自己，而无须将质料化作那些所谓的简单物质或匀质物质。”[[80]](#footnote-80)

由上面的叙述可以看出，波义耳怀疑各种“元素说”之本原性的“元素”存在乃至质疑“元素说”。这点由波义耳的下面一段话作为佐证：“我现在所谈的元素，如同那些谈吐最为明确的化学家们所谈的要素，是指某些原始的、简单的物体，或者说是完全没有混杂的物体，它们由于既不能由其他任何物体所混成，也不能由它们自身相互混成，所以它们只能是我们所说的完全结合物的组分，它们直接复合成完全结合物，而完全结合物最终也将分解成它们。然而，在所有的那些被说成是元素的物体当中，是否总可以找出一种这样的物体，则是我现在所要怀疑的事情。”[[81]](#footnote-81)

不过，值得注意的是，化学界乃至科学史界在很长一段时间内只注意到上面一段话的前半部分，而没有重视后半部分，认为波义耳提出了科学的、近代的元素定义，甚至恩格斯在《自然辩证法》(1925年第一次出版)中认为，波义耳“把化学确立为科学”[[82]](#footnote-82)。

对上述状况首先进行质疑的是博厄斯(Marie Boas)。他于1950年发表《作为理论科学家的波义耳》一文，指出波义耳不仅仅是一个实验主义者，因为他的目的是通过实验来证实物质的微粒理论。在这篇文章的脚注中，博厄斯简单地提到：“现代读者常常没有注意到，波义耳最终是要怀疑任何基本元素的存在的。”[[83]](#footnote-83)1954年，博厄斯在《机械哲学的建立》一文中再次指出：“波义耳对元素的定义看似令人吃惊的近代化，但是实际上不是真的近代。人们对波义耳定义的讨论常常没有注意到一个基本事实，那就是这个看似正确的定义促使波义耳怀疑任何基本物质的存在。”[[84]](#footnote-84)即波义耳提出元素的定义，目的是怀疑符合其定义的元素的存在。1966年，博厄斯再次明确地指出，波义耳否认了元素的存在。[[85]](#footnote-85)他的这一观点终于得到科学史家的普遍认同。1952年，库恩根据自己对波义耳微粒哲学的分析，惊讶于过去的人们怎么会常常认为“波义耳提出了科学的元素定义”。他指出：“是时候纠正过去相关文献的错误了。”[[86]](#footnote-86)

关于这一点，根据克莱里库齐奥1994年的研究，英国皇家学会的医学研究员考克斯(Coxe)和法国巴黎科学院化学研究员莱默里、霍姆伯格(Homberg)和杜哈梅尔(Du Hamel)都提到了波义耳的物质理论观点，并且说到波义耳反对元素学说，甚至其中某些人还表示赞同波义耳的这个观点并加以传播。[[87]](#footnote-87)

如果波义耳怀疑乃至否定“元素说”，那么，就可以理解他为什么不将“元素说”与“实验”结合起来，而是将“微粒说”与“实验”结合起来了。

(四)波义耳如何将机械论的“微粒说”与“实验”相结合?

1. 将实验从哲学的统领中解放出来，把化学确立为科学

考察传统的炼金术士、巫术士和医药化学家的实验，虽然基于的元素各有不同，但是，在波义耳看来，却具有以下一系列共同特点。

第一，万事万物都是由这些元素构成的，它们是世上万事万物的始基。这些元素并非没有生命、没有精神和没有灵魂，而是有其内在的本质和自身的倾向，正是这些本质和倾向引导并决定着炼金术士、巫术士、医药化学家等进行实验，“激扰自然”，产生新的物质，以达到制得贵金属、治疗疾病等目的。

第二，这些实验都是以无法解释(验证)的亚里士多德的“实体的形式”(substantial form)来解释事物的性质的，即事物除了具体化的质料外，还有使该事物“是其所是”的形式(form)，这样的形式是事物运动变化的内在原因，就是它赋予事物的性质或特性。[[88]](#footnote-88)如此，在传统的实验者那里，各种“元素说”是最基本的，是上述各种实验的理论基础，正是它们作为先验的真理，成为不容怀疑的教条，指导并且规定着各种实验的设计、实施及其实验结果的解释和检验，而它们自身不用解释和检验。结果是，作为哲学的各种“元素说”就成为实验的先导统领着实验，而实验反而为上述各种“元素说”背书，并成为各种神秘方术的代名词，“现象被压入了概念所提供的模子当中”[[89]](#footnote-89)。

这就是当时化学的状况：实验没有从哲学的理论中独立出来，实验的进行不是去提出理论并且检验理论，而是去体现或实现哲学的“元素说”观念，实验没有获得独立地位，它仅仅作为哲学的“元素说”的“婢女”去实现“元素说”的理念，为“元素说”服务。这虽然在一定程度上推动了化学的发展，甚至也推动着冶炼术和医药化学为人类服务，但是，“在1600年，化学家的分析是理论上的而不是实际的”[[90]](#footnote-90)，它并没有作为一门独特的、实证性的近代自然科学学科出现。韦斯特福尔(Richard S. Westfall)的下面一段话很好地概括了这一点——“化学作为一门独特科学几乎不存在。就化学是一种独特的事业而言，它一般不被认为是科学。另一方面，就化学是科学的一部分而言，化学又不是一种独特的事业。化学家们认为自己的学科是一门服务于医学的技艺，即致力于制造药物。”[[91]](#footnote-91)

波义耳认识到了当时化学所处的状况。他说：“那些称颂抽象理性的人在言语上赞美理性，就好像它是自足的，而我们则是在实效上赞美理性，我们把理性交予物理经验和神学经验，告诉理性如何请教它们并从中获得信息；后一种人比前一种人更能为理性提供有用的服务，因为前一种人只是恭维理性，而后一种人却能用正确的方式来改进它。”[[92]](#footnote-92)

他是这样说的，也是这样做的。他不以理论的教条规定实验，而是把理性交于物理经验；他遵从机械论哲学，通过实验否定“元素说”之某些元素作为事物本原(最终存在)，并且通过大量实验来研究物质的性质和结构，然后再运用微粒说解释实验，确实将实验从哲学之中，以及将理论(微粒说)从先验之中，独立了出来。波义耳曾写道：“我们在物理学、力学、化学和医学领域中最有用的概念，并不是从基本原理衍生出来的，而是源于从基本原理衍生出来的中间理论、概念和规则，这实际上是说，实验科学能够独立于机械论哲学的指示而卓有成效地进行研究。”[[93]](#footnote-93)

就此，他改变了当时化学的状况，不以传统哲学统领和裁决实验，而以物质性的实验及其实验检视保证实验过程及其结果的真实，获得客观经验，再进一步构建微粒假说解释实验以校验微粒说，从而将化学确立为科学，创立近代化学。

2. 寻找与实验紧密关联的“中间原因”或“次级原因”，将更为重要

对于机械“微粒说”与“实验”之间的关系，波义耳就说：他的主要目的是通过实验向大家表明，几乎一切种类的特性——其中大多数没有得到学界的阐明就留了下来，或者一般地把它们称为不可理解的物质(实体)形式(但他自己知道其实并非如此)——“都可以机械地产生，这些性质中的大多数都没有得到经院学者的解释，或者被泛泛地归于我所不了解的某些无法理解的实体形式；我所谓的物质动因是指只有凭借物质自身各个部分的运动、大小、形状和设计(contrivance)才会运作的东西(我把这些属性称为物质的机械属性)。”[[94]](#footnote-94)据此，波义耳是说，通过实验可以机械地呈现事物的现象和性质，对于它们，不可通过实体的形式来解释，而可以通过各种微粒的机械属性来阐明现象发生的原因。

任何现象(包括实验现象)的发生都有原因，也都需要解释。对于波义耳来说，这样的原因和解释，存在一个“量表或一系列的原因”和相应的“解释程度”。[[95]](#footnote-95)在自然原因的范畴内，最高级的原因是真正的机械原因，源于物质的最小微粒或原子的运动，以原始情感作为其特性，最根本的解释是由这些原因所引起的；最低级的原因是最直观、最具体，也是最易懂的原因，例如可以用重量(重力)来解释石块的下落。高级原因和低级原因之间形成了一个“原因量表”，根本解释与非根本解释之间造成了“程度差异”，两者之间存在着某种对应。“事实上，在事物的特定结果和最普遍的原因之间，常常存在着许多次要的原因，因此留下了一个很大的领域，使人们能够发挥自己的勤勉和理智，从更普遍和常见的因素中推断出事物的性质以及它们之间的中间原因(如果我可以这样称呼它们的话)。”[[96]](#footnote-96)例如，我们可以通过气压来解释气压计中的汞含量，通过空气的弹性(弹力)和重力来解释气压，通过构成微粒的弹性来解释空气的弹性，以此类推，直到达到最高级，即通过普遍存在的物质组分的形状、大小和运动解释微粒的弹性。至此，就可以由机械论哲学——最终的物质微粒的形状、大小和运动来解释实验的现象。

通过高级原因解释事物是重要的。波义耳认为：“拒绝或轻视所有不是从原子或其他不可观察的物质微粒的形状、大小和运动中直接推导出来的解释是倒退的”，并敦促那些坚持机械程序的人，“承担比他们想象的更艰巨的任务”。[[97]](#footnote-97)

但是，进一步通过中间原因乃至低级原因来解释事物也重要，因为通过高级原因解释事物是很难达到的，实验科学中的解释通常需要诉诸“从属原则”和“中间原因”。波义耳说：“知道事物的性质是如何从物质中最小部分的原始情感推导出来的，这是一种好处，也是令人满意的地方；然而无论我们是否意识到，如果我们知道它们所组成的这个或那个的主体性质，以及它是如何作用于其他的物质，或是由它们所带来的，我们都可以在没有上升至原因量表顶端的情况下，完成重大时刻的事情，例如，如果没有对特定的物质进行仔细的检查，恐怕即使是最知识渊博的沉思者，也从来不会找到先验的先例。”[[98]](#footnote-98)他进一步指出：为了要阐明一个现象，赋予它一个普遍有效的原因是不够的，我们还必须明确表明那个一般的原因产生这个拟定效果的具体方式。如果一个人，只想弄清楚一只手表的现象，仅满足于知道它是一个钟表匠制造出来的机械，那么，他必定是个很迟钝的研究者，因此他就对如下这些东西一无所知：发条、齿轮、摆轮和其他零件的结构和接合，以及它们相互作用、协调起来使表针指出正确时间的方式。[[99]](#footnote-99)

在此情况下，波义耳努力寻找与实验紧密相关的“从属原则”和“中间原因”。他将重力、发酵(fermentation)、弹性和磁性列为从属原则和中间原因。他明确提出，他那个时代的大部分科学，包括他自己的化学和气动学，都应该被视为“中间原因”的知识，而不是首要的原因——机械论的原因。对于这些原因，波义耳认为它们虽然不能对实验现象给出最终的和最根本的解释，但是，这样的解释能够被实验所证实，因而也更加真实和有用。波义耳就说：“在自然事物的从属或中间原因或理论中，可能有许多：一些或多或少地偏离了基本原理，但每个原则都能够给人一种令人愉悦和有益的指导。为了区别起见，我们可以把这些称为宇宙学、流体静力学、解剖学、磁学、化学和其他现象的原因，因为这些原因相较自然现象的普通和初始原因更加直接(按我们估量事物的方式)。”[[100]](#footnote-100)

3. 从还原论的到非还原论的化学本体论出发，以获得更加充分的对实验的解释

查尔默斯认为，从某种意义来说，波义耳是通过还原论来解释可观察物体的一系列属性的。他认为，对于这些属性可分为两类：一类是可感知特性(波义耳术语中的“感知特性”)，如颜色和气味；另外一类，如温度或弹性，则取决于物体的机械粒子如何相互作用。对于前一类可感知特性，可以通过机械粒子(即仅以形状、大小和运动为特征的粒子)对我们感官的作用引起的反应来解释。如对于某个特定环境中的物体的颜色，是由构成它们的微粒结构同构成光的微粒结构相互作用的结果，以及在这些情况下光与我们的眼睛(它们本身是由机械粒子组成的一种特殊排列)的相互作用的结果。对于后一类特性，波义耳认为，它们与人类能否感知无关，而均可以用机械粒子及其运动来解释。如一个物体的温度取决于组成它的微粒运动的相对活力，而硝酸溶解黄金的能力则归因于构成这两种物质的机械粒子的形状和运动之间的关系及其相互作用。[[101]](#footnote-101)

考察我国学者对波义耳硝石(硝酸钾)的“复原实验”的微粒说的解读[[102]](#footnote-102)，似乎正是如此。

这一实验分成了三个部分，首先是硝石的分解，即在熔融的硝石中投入炽热的木炭，木炭发出闪光并爆发，持续加热至木炭不再反应，得到“固定硝石”(氧化钾)，并收集发出的棕红色雾气(波义耳称之为硝石精)，将雾气导入水中，得到硝石精溶液；然后是硝石的复原实验，既可以将固定硝石加水溶解并滴定硝石精溶液，将产物蒸发结晶后，得到可与炽热的木炭反应且闪光爆发的硝石，也可以直接在前一步得到的固定硝石上滴加硝石精溶液至反应结束，在湿润的盐表面撒上炽热的木炭，同样产生闪光爆发，证明得到了复原的硝石；最后，前文的“固定碳酸盐”(鞑靼盐)和“硝石精”溶液(镪水)亦可反应制备硝石。这一实验表明，“初级凝结物”可以通过燃烧、蒸馏等过程产生各种不同的组合，最后又复归原来的“初级凝结物”。

我国学者对波义耳的上述实验所作的微粒说解释进行了概要性解读，见表10.1。

表10.1　“硝石复原”实验的微粒论解释[[103]](#footnote-103)

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 现象或性质 | 可感现象或可感性质 | 微粒论解释 |
| 冷、热 | 硝石感觉起来是冷的，然而它所含的精和碱却能相互剧烈反应产生热 | 热是微粒多样而迅速的扰动，扰动持续热就持续，且随其增长和消退 |
| 声音 | 伴随溶液发泡和沸腾，有声音。噪音消失后，热仍持续 | 声音产生于液体微粒快速而不规则运动对周围空气的高速扰动 |

续表【除掉！连接上表】

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 现象或性质 | 可感现象或可感性质 | 微粒论解释 |
| 颜色 | 固定硝石显示蓝绿色，加入酸精之后消失。硝石分解产生红色雾气，红雾进入溶液后消失 | 光被物体的微粒排列反射入眼睛，光被微粒结构修正而产生颜色，物体颜色改变说明微粒排列改变 |
| 气味 | 硝石精有刺激性气味，与固定硝石反应时气味更浓烈，而硝石却没有气味 | 实验中有气味的物质被激烈扰动，更大地释放出难闻的蒸汽 |
| 味道 | 硝石精酸性特别强，固定硝石有不同于硝石精的刺激性。硝石却没有味道 | 没有分析具体原因 |
| 可燃性 | 硝石精和固定硝石都不能燃烧，但硝石却能爆炸性地剧烈燃烧 | 没有分析具体原因 |
| 干湿性 | 硝石很干，但硝石精挥发后，却变成一种不会因冷却而凝结的液滴 | 没有分析具体原因 |
| 挥发性 | 硝石精具有很强的挥发性，而硝石加热也不能挥发 | 流动性变化源于微粒结构改变。逃逸性的部分与不活泼的部分相结合，物质的挥发性受到限制 |
| 液体扰动 | 将铁片投入硝石精中，液体逐渐产生烫手的热；硝石精中放入一小块指甲花，则没有类似扰动；硝石精中放入白色树胶，产生热，树胶变成发黄的油状物 | 液体与铁的微粒和孔洞(pores)相会，铁明显改变液体各部分及新的结合物的运动，这些能动部分相互穿透、加热，铁的微粒密集四散，也进入快速的不规则运动，产生大量的热 |
| 发泡、沸腾 | 固定硝石的溶液加入硝石精，可见液体中盐的微粒相互推动。鞑靼盐溶液中加镪水，产生小气泡无数 | 发泡现象的原因是两种液体的冲突和扰动。大量小气泡产生于很多小盐粒与酸精的结合与冲突 |
| 能动性 | 硝石固体没什么反应能动性，但当各部分分解后，挥发性的和碱性的微粒从固体上解离，获得相应能动性 | 各组分能动性有差异，不同性状的组分凝结进物体微粒纹理中；能动性微粒被释放后，具有能快速运动的结构 |
| 腐蚀、溶解 | 硝石精腐蚀银但不能腐蚀金，固定硝石的溶液可溶解油状物，而酸精不能 | 没有分析具体原因 |
| 酸碱性 | 镪水溶解矿物，固定硝石能使其沉淀：固定硝石溶解油状物后加硝石精析出 | 没有分析具体原因 |
| 空气在硝石复原中所起到的作用 | 硝石精加入固定硝石溶液，在空气中冷却逐渐生成硝石晶体。而除非充分暴露空气中，鞑靼盐加锢水得到的盐却无晶体形状。推测空气可能为盐的微粒进入晶体提供媒介，使其聚集成适应其结构的晶体形状 | 媒介允许和时间充分，硝石微粒倾向于排列成完美晶体。缺乏空间或凝结过快，微粒因为重量作用而沉淀为无定形粉末。空气中富含地面蒸汽和活性射流，可能有助于晶体的形成 |
| 硝石内服的安全性 | 硝石晶体粘附的硝石精，可用水洗去，硝石精腐蚀珊瑚或珍珠后可得缓和 | 用溶媒制备药剂时，溶媒可能结合，性质得到 缓和 |

从表10.1可以看出，波义耳认为，硝石的性质更确切的是源于它的粒子的形状，这种粒子又由组成硝石的两种物质的粒子组成。波义耳运用微粒说，将热、声音、颜色以及气味、溶解、挥发性、腐蚀性等现象和性质的原因，解释为微粒的机械属性如微粒运动、排列的改变等，而对于那些他还不能给出合理的机械论解释的性质，如味道(涉及微粒与感官的作用)、可燃性、酸碱性(涉及不同物质微粒结构的相互作用)等，就不给出具体的解释了，以留待以后的实验探索者回答。

分析上述波义耳利用微粒说对实验的解释，原则有二：“一是将物体性质与物体微粒的结构关联起来，二是以不同物体之不同微粒及孔隙之间的空间适配性——用他的话来说就是‘钥匙与锁’的关系——来解释金属在硝酸中的溶解等化学反应过程。”[[104]](#footnote-104)如此，就将使得微粒说获得解释实验结果的意义。

不过，也有学者持有不同观点。玛丽娜·保拉(Marina Paola Banchetti- Robino)就认为，微粒是分等级的，有“一阶凝结物”和“二阶凝结物”(ﬁrst-order and second-order corpuscles)。“二阶凝结物”由“一阶凝结物”形成但又不同于“一阶凝结物”，对于“一阶凝结物”，可以以还原论的机械论属性对待之，而对于“二阶凝结物”则应该以非还原论的化学属性讨论之。这就是波义耳的复杂的化学本体论，它要比精确的还原论以及笛卡尔的机械论哲学，提供更加令人满意的对化学现象的理解。这点体现于波义耳和斯宾诺莎之间的关于硝石(硝酸钾)的重整化的争论上(参见前言)。[[105]](#footnote-105)

4. 更多地从实验以及“中间原因”或“低级原因”来解释，为实验结果辩护

这点比较充分地反映在17世纪60—70年代发生于英格兰的波义耳与霍布斯关于空气泵的实验争论中。

波义耳经过做长时间的空气泵实验，于1660年发表论文《关于空气的弹性与其效应的物理实验》，得出“真空是存在的”结论。这一结论遭到霍布斯的质疑。他认为波义耳的气泵接收器是被某种微小的物质而非大颗粒的空气所填满，并把压力归因于这种微小物质的循环。他还批判波义耳将弹性归因于空气，却又无法对其进行解释。依据机械哲学家霍布斯的观点，将弹性归因于空气等于承认空气可以自行运动。[[106]](#footnote-106)

波义耳以多种方式对上述质疑做出了回应，所有这些都涉及他认为可以通过实验确定的“事实”。对于真空存在的可能性，以及他的真空接收器(evacuated receiver)和气压计中水银上方的空间是否构成真空，他没有表明自己的立场。他认为这样的问题是“形而上学的”，因为其不易进行实验研究。他声称他的真空接收器相对而言是真空的，并且能够提供一系列的实验证据来证明这一说法。[[107]](#footnote-107)他坦率地承认，他在描述空气的弹性时虽然提出空气的微粒类似于微小弹簧，但是他并没有进一步阐述空气微粒的内部构造及其与空气弹性之间的关系，即他没有对空气的“弹性”作出机械解释。他坚持认为，他已经通过实验证明了空气具有弹性，并且可以用它来解释气压计的行为以及使用气泵和其他方法所揭示的各种现象。

霍布斯与波义耳的这一争论，与其各自持有的哲学观念紧密相关。对于霍布斯，他在本体论上持有唯物主义和一元论的自然哲学观念，认为世界是充满物质的，真空是不可能的；在认识论上持有形式化的几何学的普遍的知识优先于实验的事实认识，事实知识有可能是错的；在方法论上指出波义耳的空气泵实验并不严密，存在漏气现象。而对于波义耳，如前文所述，他认为，实验是独立的且实验事实由其自身实践证实，机械论哲学可以解释但不可裁决实验事实，实验事实的真实性由其自身实践决定。

最终，波义耳在这场争论中取得了胜利。霍布斯的观点被后人遗忘，波义耳的成功被后人赞许，人们普遍认为这是由波义耳科学实验的客观性结果决定的。

到了20世纪80年代，史蒂文·夏平(Steven Shapin)与西蒙·沙弗尔(Simon Schaffer)从科学知识社会学的角度，对这一问题进行了探讨。他们认为，这一争论不是发生在科学共同体内部，而是发生在科学共同体内部和外部之间，由此，这一争论就不单纯涉及科学实验及其检验——自然，还涉及社会层面，社会层面是决定这一争论成败的关键。他们认为，霍布斯之所以在这次争论中落败，不是波义耳已经获得了牢不可破的“真空”实验事实，而是如下原因：一是波义耳把自己塑造成科学家的形象，并且成为皇家学会会员，拥有共同实验研究纲领的赞同者，而霍布斯拒绝加入皇家学会；二是波义耳掌握着皇家学会期刊《科学》的发表权，后来拒发霍布斯的反对文章；三是波义耳主张自然哲学家要远离有争议的“市民哲学”(civic philosophy)，让事实说话，以此建立自身秩序，而霍布斯认为只有确立科学、宗教、社会政治一体化的“外显哲学”(demonstrative philosophy)，即通过一种精确的几何推理，才能保证一种整体上的可靠性和牢固性，带来真正的秩序。如此，霍布斯契合于政治上的专制独裁主义，而波义耳通过以实验、观察所获得的事实为基础的归纳，符合民主政治的理想，迎合了当时的社会需要。总之，在那样一个时代，实验知识远不是自明的和自主的，自然因素对于科学知识的生产也不是强制性的裁决力量，社会因素在其中起着十分重要的作用。[[108]](#footnote-108)

夏平与沙弗尔的上述观点揭示了社会因素在科学发展中的作用，这是有一定道理的。但是，考虑到波义耳更多的是从“中间原因”乃至“低级原因”来解释实验结果，而霍布斯更多的是从“根本原因”或“最终原因”来论证实验结果，波义耳战胜霍布斯最终主要靠的仍然是实验实践以及对实验的“中间原因”或“低级原因”的探求和解释。

(五)波义耳将机械论的“微粒说”与“实验”相结合有何意义？

根据以上的论述，波义耳否定了亚里士多德学者哲学推理式的先验的自然观——“元素说”以及“内在目的论”的真理性，代之以机械论的“微粒说”来解释世界；抛弃了传统炼金术士、医药化学家以及金属冶炼家们以先在的“四元素说”“三元素说”“五元素说”的演绎推理统领并裁决实验的“哲学式科学”，而走向实验先在的并以实验为基础建构并审度相关微粒说的“实证式科学”；提出了“第一凝结物”“第二凝结物”的概念，并以“中间原因”以及“低级原因”的探求，给出了实验现象以及物质性质的“二阶解释”，进而从“哲学式科学”的原理式的自然观理论形态，走向“实证式科学”的原理式的自然观理论形态与概念式的命题理论形态之中间形态——“准科学定理”或“准科学规律”形态，使得化学成为科学实验与科学理论的结合体。

如此，波义耳将有事实根据的自然观代替哲学推理式的先验的无事实根据的自然观，将实验独立出来，并且将建构出来的微粒说来解释实验，避免了传统“元素说”对事物的解释以及在其基础上的实验的随机性(不确定性)，使得相关微粒说解释和实验实践具有确定性。这是机械论的微粒说的胜利，也是独立的实验实践的胜利，更是波义耳的微粒说与实验实践相结合的胜利。正是这样的胜利，使得化学从原来神秘的先验的理论统领经验之路走向后验的实验实证之路，也使得化学成为独立的科学。

历史上的科学史家给予波义耳以很高的评价。法国科学史家萨韦里安(A. Savérien)称赞波义耳，说他使化学与物理学统一了起来，或者至少与物理学联系了起来，教给化学家以一种可理解的方式谈论化学。[[109]](#footnote-109)英国化学家沃特森(Robert Watson)宣称波义耳的各种著作和实验极大地促进了英国理性化学的引入。[[110]](#footnote-110)化学家、炼金术士普赖斯(James Price)称赞波义耳是可敬的英国哲学化化学之父。[[111]](#footnote-111)博厄斯经过研究指出，波义耳不仅证明了化学对医药和实用技艺是有用的，而且还证明了化学对自然哲学也是有用的；波义耳通过化学阐述自然哲学，在当时是非常激进的做法；波义耳可能是第一个把化学当作自然哲学的一个分支来处理的人，他成功地从机械论哲学之微粒说来解释物体的化学性质。[[112]](#footnote-112)玛丽娜·保拉说道，我们对结构解释的关心，是当代化学强调微观结构的一个功能。不过，在波义耳那里，对结构解释的讨论，将作为案例研究，用于阐明我们当代关注的主题早就有深刻的历史来源，而且，化学史能够本质地影响到当代化学哲学的议题。[[113]](#footnote-113)

上述评价有一定道理。当然，受时代的影响、科学发展以及个人的局限，波义耳的许多科学思想并不是纯粹的，而是复杂的。

第一，波义耳曾经多次提出，世界上的许多现象不能单用机械论来解释，源于上帝的活性和运动能力，才是其运动变化的最根本原因。“波义耳强烈反对摩尔关于天使和‘自然精气’(或朝着某些目的运作的附属的精神存在)的学说，以及用它们来解释内聚力、虹吸、重力等吸引现象。”[[114]](#footnote-114)他也完全相信这些现象以及其他定性现象能在一种微粒说的或机械论的基础上得到解释，虽然他并未试图解释这些问题。但是，“与莱默里和梅奥一样，波义耳的化学在其机械论外表背后保留了来自帕拉塞尔苏斯主义传统的大量遗存”[[115]](#footnote-115)。如波义耳认为，酸精是硝石的活的成分的具体体现，空气中包含的“活性射流”(seminal effluvia)参与了硝石的结晶；波义耳同意，金属生长在土中，而且是“雄性要素”(范·赫尔蒙特的术语)产生了它们。这体现了活力论与炼金术传统的“种子”(通过在“转化”中加入“种子”来完成转化)对他的影响。这也说明，波义耳虽然批判了活力论、目的论等观点，但并没有完全质疑它们的有效性。这也是他热衷于炼金术的原因之一。

第二，波义耳基于机械自然观否定了亚里士多德学者、炼金术士、医药化学家、冶炼金属者等“元素说”之“实体形式”的元素的存在，也基于实验否定了上述“元素说”之本原性的几种“元素”的存在，但是，他并没有明确否定“元素说”的核心内涵，只是可能把这样的“元素”归于多种多样的“自然的最小量”凝结成的“第一凝结物”。如果是这样的话，说他“创立了科学的元素概念，把化学确立为科学”有一定道理，因为基于波义耳的实验实践之贯彻，体现了物质化学鉴别的思想，最终目标是达到他的“元素”定义的状态——“不能分解的状态”，只不过这样的元素种类有多种而不是原先的“元素说”的三种、四种或五种。

第三，深入考察波义耳的微粒说与实验之间的结合可以发现，正是实验之于微粒说的相对独立，以及基于实验的“中间原因”或“低级原因”的、非根本的对“第二凝结物”等的具体的解释，把基于机械论自然观的实验与基于实验的微粒说结合了起来。这可能导致两方面的结果：一是实验之于微粒说的依赖要比微粒说之于实验的依赖更少；二是基于“中间原因”或“低级原因”更加具体的机械论的解释对实验的支持，要比基于“根本原因的”更加抽象的微粒说的解释对实验的支持更多。如此，就在传统的“哲学式”科学之自然观与观察事实之间加进了一个中间层次——基于中间原因的更为具体的微粒说，这是科学假说或科学理论的前身，一定意义上将科学理论与实验关联了起来。应该说，这是波义耳将化学确立为科学的最重要的方面。

需要指出的是，“波义耳的代数解题能力以及数学应用的能力与他的神学、语言、公共事务、实验哲学、医学以及化学一样好”[[116]](#footnote-116)。他也不是不知道数学对于自然科学(自然哲学)的作用，他曾指出，没有学过数学的人是不能发现自然界事物的许多性质和用处的。既然如此，他为什么不将数学与实验结合起来，将实验推进到定量阶段？最主要原因是他觉得在他那一时代，走向实验更重要：第一，人们习惯于在较少的观察和实验的情形下提出普遍性的假说(公理或原则)，结果这些假说(公理或原则)最终被新的进一步的观察和实验所否决[[117]](#footnote-117)，鉴此，他决定从自身做起，进行实证性的实验研究[[118]](#footnote-118)；第二，数学证明有点过于接近从先验原理推理的方法，实验证明比数学证明更有说服力[[119]](#footnote-119)；第三，相对于数学文献，绅士和商人都更容易从实验文献中受益。[[120]](#footnote-120)

三、牛顿：将运动微粒说、实验与数学相结合

惠更斯将微粒说与数学结合起来，波义耳将微粒说与实验结合起来，他们是在1655—1684年完成的，“从而使运动微粒摆脱其幻想性特征”[[121]](#footnote-121)，推动了科学的发展。至于牛顿，科恩就说，1665—1668年是牛顿著名的“奇迹年”，他独立于惠更斯完成了第四种转变，即微粒说与数学的结合；1669—1679年，他通过与波义耳和胡克的思想交流，参与了第五种转变，即微粒说与实验的结合；1684—1687年，思想已经成熟的牛顿完全独立地做出了第六种转变，即数学与实验的结合，创立了他的运动定律和万有引力定律。[[122]](#footnote-122)由此，牛顿就在上述工作的基础上，最终实现了微粒说、数学与实验的大综合。

(一)将微粒说与数学方法结合起来

牛顿在大学读书时，就阅读了当时一些机械论哲学家如笛卡尔、霍布斯、波义耳等的著作，并且吸收了他们的思想。

1675年，牛顿在提交给皇家科学院的论文《对光的特性进行解释的假说》(“*Hypothesis Explaining the Properties of Light*”)中，根据机械自然观，对光的特性如“牛顿环”做了解释。他认为，一种由微观粒子组成的流体——以太充满整个空间，其密度的大小改变了穿过它的光粒子的运动方向。不仅如此，牛顿还用以太去解释其他的人类现象和自然现象，如感觉、肌肉运动、物体的内聚力和重量等。对于地球上的物体下落运动，牛顿认为，这是由于地球是由凝聚的以太构成的，以太在地球中的凝聚必然会使以太朝向地球连续地运动，从而使整个物体向下运动并使它们具有重量，而太阳中以太的凝聚也引起类似的运动，结果使行星在它们各自的轨道上围绕太阳运转。这是万有引力定律的雏形。

不过，当时也存在着一些“以太”假说和传统机械论哲学不能解释的现象，如“水与酒相溶却不与油相溶”。考虑到这些，牛顿在1687年出版《自然哲学之数学原理》(*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*)一书时，就正式用微粒之间的作用力代替了他早期所假想的以太。他在1704年出版的《光学》(*Opticks*)一书中，补充了吸引力和排斥力以取代他的以太思辨：“物体的微粒是否具有某种能力、效能或力量呢？凭借这些，它们能对远处的东西产生作用，不仅能作用于光线使之反射、折射和弯曲，而且也能彼此之间互相作用而引起为数众多的自然现象？众所周知，物体能通过重力、磁力和电力的吸引而互相发生作用，这些事例显示出了自然界的意向和趋势。但是，除此之外还可能有更多种类的吸引力。因为自然界本身是和谐一致的。”[[123]](#footnote-123)

根据上述思想，牛顿对所发生的各种类型的现象进行了解释。他认为，把酸泼到铁屑上产生热和沸腾的现象，是由于微粒间的相互吸引碰撞，而将食盐溶于水，整个溶液都是咸的，是由于微粒间的排斥作用；物体的内聚性和毛细作用显示了吸引力，而气体的膨胀则是排斥力的结果。而且他还认为，这种“力”的大小与距离成反比。

这样一来，牛顿的机械论哲学就有了与传统机械论哲学不同的一面——使用数学方法对光学、力学等自然现象进行解释。在16世纪，机械论哲学家为了解释磁现象，被迫创造出了一种神秘的、不可见的机制用以解释磁力的吸引。而牛顿赋予这种机制以磁吸引力，它是在一定的距离内作用的力。如此一来，牛顿使机械论哲学更趋完善，从而也使得在“力”概念基础之上计算力的大小成为可能。“通过增加除物质和运动以外的第三个范畴——力，他试图使数学力学和机械论哲学相协调。对他来说，力从来不像文艺复兴时期自然主义的共感和反感那样是一种隐秘的质的作用。他把力置于一种精确的力学背景下，力通过它所产生的动量来衡量。”[[124]](#footnote-124)

如牛顿曾经做过一个实验，尝试对毛细作用中的力进行定量分析，见图10.3。实验原理是：抬起A端，此时，橙汁的重力抵消着毛细吸引力，两个力保持平衡，由此就可以测量毛细吸引力了。具体步骤如下：选择两块大约2英尺(1英尺＝30.48厘米)长的玻璃片，一端互相接触，另一端先隔开一段很小的距离，再使一滴橙汁与两片玻璃相接触；抬起A端，测量玻璃片之间的距离以及橙汁与玻璃片的接触面积，最后根据被提拉的橙汁的重量和相关数据计算出其中的毛细吸引力。



图10.3　对毛细吸引力的测量[[125]](#footnote-125)

(二)将数学方法与实验方法结合起来

不可否认，自然数学化倾向肯定是17世纪最新颖、最重要的科学思潮。然而，与之对应的还有另外一种思潮，就是更少自然的数学化，更多的观察和实验。这是由古希腊原子论激发出来的，到了近代，伽桑狄、罗贝瓦尔(Gilles Personne de Roberval，1602—1675)、波义耳是其中的杰出代表，他们都用这种更加谨慎和更加稳妥的微粒哲学去对抗伽利略和笛卡尔的那种泛数学主义。在笛卡尔那里，物质是具有同种本质的微粒，而在波义耳这里，物质是由各种不同的微粒形成的。

这种对抗从历史的角度看，并非没有道理。笛卡尔的反对者就认为，笛卡尔试图通过那些没有被验证的且在当时也不能被验证的物质微粒说来解释宏观现象，是不恰当的，因为他忽视了经验、精确程度和测量实验等在事物解释过程中的作用，让科学隶属于形而上学。

可以说，牛顿看到了笛卡尔的这种不足，试图将两者统一起来。笛卡尔认为物质实体的本质属性是广延即空间，而广延又是与精神实体的属性——思维相独立、相平行并且互不干涉的，因此，笛卡尔试图将科学还原为几何学，以建立普遍的科学。但对牛顿而言，所有这些都是错误的：空间与物体并不是一类东西；无限并非完满；广延与心灵是紧密相连的；物质的本质并非只包括广延，还包括不可入性和强度；广延和空间并不依靠物质而存在。

与笛卡尔的世界不同，牛顿的世界不再只是由两种成分(广延与运动)构成，而是由三种成分组成：一是物质，这种物质是由彼此分离的、坚硬的、不变的但互不相同的、无限多的微粒组成；二是运动，它并不影响微粒的本质，而仅把微粒在无限的、同质的虚空中传递；三是空间，即那种无限的同质的虚空，微粒(以及由此构成的物体)在其中运动，但不对其产生任何影响。至于引力，它并不是牛顿世界的一个构成要素。它要么是一种超自然的力量(上帝的行动)，要么是上帝制定自然之书的句法规则的一种数学结构。[[126]](#footnote-126)引力将物质、运动和空间结合在一起。

这就是牛顿的绝对时空物质观。与笛卡尔的两种成分世界观相比，多了一个成分，即构成物质的微粒。这也决定了他的研究路线与笛卡尔的不同。笛卡尔试图将“广延性”这种关于物体“真实性质”的直觉观念作为演绎论证的前提，试图从这种超验的原理出发，推导出一系列基本的物理学定律。牛顿反对这种唯理论的科学方法，认为科学认识应该像伽利略所做的那样，从定量观察和实验入手，从中获得准确的观察数据，再经过数学分析和处理获得相应的数学表达式。牛顿认为，物理世界是一个可感觉的世界，且由那些可感性质来表征，在把这个世界还原到数学定律时必然要强调那些性质。他在《自然哲学之数学原理》中就说：“由于古代人[帕普斯(Pappus，3—4世纪人)告诉我们的那样]在研究自然事物方面，把力学看得最为重要，而现代人则抛弃实体形式与隐秘的质，力图将自然现象诉诸数学定律，所以我将在本书中致力于发展与哲学相关的数学。……由于手工技艺主要在物体运动中用到，通常似乎将几何学与物体的量相联系，而力学则与其运动相联系，在此意义上，理性的力学是一门精确地提出问题并加以演示的科学，旨在研究某种力所产生的运动，以及某种运动所需要的力。……因此，我的这部著作论述哲学的数学原理，因为哲学的全部困难在于：由运动现象去研究自然力，再由这些力去推演其他现象。”[[127]](#footnote-127)

牛顿的自然哲学数学原理与笛卡尔哲学相比，更加注重观察也更加数学化。“对牛顿而言，绝不存在开普勒、伽利略尤其是笛卡儿所相信的那种先验的确定性，即世界彻彻底底是数学的，更不相信通过已经臻于完美的数学方法便能完全揭示世界的秘密。世界就是现在这个样子，如果能在其中发现严格的数学定律，那当然很好；如果不能，我们就必须试图扩展数学，或者屈从于其他某种不太确定的方法。”[[128]](#footnote-128)这就是说，牛顿不像传统的柏拉图主义者那样，用已有的数学原理去“拯救”自然现象或实验结果，以使之与数学原理相符合，而是在揭示和分析各种物理现象的过程中，引导出相关的数学原理。如此，他把自己严格限定在“对事物的表面”的知识的追求上，把研究自然的数学模式以及自然力的数学定律当作目标，而且，为了能够用数学来精确地处理，他将科学严格建立在实验与实验观测数据的基础之上。“在牛顿看来，科学只包括阐述自然的数学行为方式的那些定律——这些定律可以从现象中清楚地推导出来，可以在现象中严格证实——任何进一步的东西都必须从科学中清除出去，这样一来，科学就成了一个关于物理世界活动的绝对确定的真理体系。通过把数学方法与实验方法紧密结合在一起，牛顿相信他已经把数学方法完美的精确性与实验方法对经验始终如一的关注牢固持久地结合起来。科学是对自然进程精确的数学表述。” [[129]](#footnote-129)

由此可以看出，牛顿是经验的和实验的运动以及演绎的和数学的运动的继承者，将数学方法与实验方法综合了起来。“在牛顿那里，“自然之书”是用微粒符号和微粒语言写成的，这一点同波义耳一样；然而，把它们结合在一起并赋予文本意义的句法却是纯粹数学的，这一点又同伽利略和笛卡儿一样。”[[130]](#footnote-130)

(三)将实验方法与微粒说结合起来

众所周知，牛顿进行了大量的光学、力学实验，并且提出了光的微粒说来解释实验。他认为，光是由以极大的速度移动的微粒组成的，光线运动所呈现的折射性、反射性以及所呈现出来的颜色，都与这种微粒的运动有关。光微粒的运动需要充满空间的、精细的“以太”为媒介，以太密度的变化会导致在以太中传播的光微粒的方向的改变，从而导致了反射、折射等现象；而发光体所发出的光的粒子流进人的眼睛，就会冲击视网膜引起视觉，产生出光的各种颜色。

不过，值得注意的，牛顿还进行了大量的炼金术实验，甚至时间长达30年，从大约1669年开始延续到他1696年离开剑桥赴任造币厂厂长之前。对于他的炼金术实验，是如何设计和贯彻的呢？是否如他的光学实验那样，以机械的微粒说为哲学基础呢？

多伯斯(B. J. T. Dobbs)1975年对此做了专门研究。她通过解读牛顿炼金术的实验笔记以及凯恩斯(J. M. Keynes，1883—1946)所藏标号为Keynes MS18[[131]](#footnote-131)的牛顿手稿等文献后，认为牛顿炼金术活动分为两个时期：第一个时期为1669—1675年，牛顿主要依据“传统炼金术”展开工作，体现于她所重构的牛顿这一时期炼金术实验的基本轮廓中——第一项是湿法制汞，第二项是干法制汞，第三项是制备“星锑”，第四项是制作“哲人网”(The Net，一种由星锑与铜制得的合金)，第五项是制备汞齐(利用“星锑”制备“哲人汞”，实为由锑与银、金、汞融合制得的低熔点的汞齐)，等等；第二个时期是在1675年及其之后，牛顿试图从传统炼金术转向寻求传统炼金术与机械论哲学的统一。[[132]](#footnote-132)

多伯斯对牛顿炼金术的上述分期值得商榷。事实上，在牛顿之前，就有波义耳在炼金术与机械论哲学的交汇方面做了大量的工作并取得了重要进展。甚至，纽曼(W. R. Newman)认为，在波义耳之前，斯塔克也曾尝试用他在哈佛学院里学到的理性思维与陈述方式来改造炼金术。[[133]](#footnote-133)而且，霍尔早在1958年就指出，牛顿的物质理论直接导源于波义耳的微粒哲学，而且终期一生。[[134]](#footnote-134)

除了物质理论外，牛顿的光学、炼金术的实验均以波义耳的工作为直接起点和基础，因为牛顿在其学生时代后期就广泛阅读波义耳的著作，如《论形式与质料的起源》(1666年)以及《怀疑的化学家》(1661年)。

这样一来，“牛顿在其青年时代即从整体上接受了波义耳对自然哲学的理解。像波义耳一样，牛顿也持有唯意志神学立场，也采用了类似微粒哲学的粒子-微粒论，也将炼金术研究视为其整体自然哲学研究的一个内在的、重要的组成部分；而且，在其长达数十年的炼金术研究中，他也侧重于嬗变实验，侧重于炼金术的宇宙论思考，而在当时化学与炼金术的主流方向医药化学或称医药炼金术上却缺乏深入的研究。”[[135]](#footnote-135)

第一，牛顿与波义耳一样，相信一切物质在理论上是可以相互转化的，否则，他们不会有炼金术信念并且将此贯彻到炼金术的实践中。牛顿在《原理》第一版“假设Ⅲ”中明白地陈述了他的炼金术信念：“每一种物体均可嬗变为任何另一种物体，可以具备一切中间程度的性质。”[[136]](#footnote-136)所谓“中间程度的性质”指的是通过炼金术或化学操作改变了物体的组成微粒的结构而获得的性质，它是由最小粒子所组成的种种其他层次的微粒的性质，但不是最小粒子所具有的性质。如对于牛顿，1692年在皇家学会《哲学学报》上发表了《论酸的性质》一文(其写作时间远早于其发表时间)，陈述酸的微粒在大小上介于水与土质微粒之间，且既可与水的微粒结合，又可与土质微粒结合，因而具有介于水与土质微粒性质之间的性质。[[137]](#footnote-137)至于最小的微粒，它的性质在改变微粒结构的炼金术过程中一直保持不变，因而它在类别上属于物体的普遍性质。也正因为如此，在《原理》第二版中，牛顿将此转变为“哲学推理的规则”之“规则Ⅲ”：“物体的特性，若其程度既不能增加也不能减少，且在实验所及范围内为所有物体所共有，则应视为一切物体的普遍属性。”[[138]](#footnote-138)这样的转变不是对《原理》第一版中“假设Ⅲ”的否定，而是对“假设Ⅲ”炼金术信念的强化处理。

第二，在炼金术研究进路上，牛顿与波义耳有所区别：“波义耳通过考虑微粒的形式(微粒的结构与孔隙)、微粒形式之间的适配性以及作用剂的渗透性筛选炼金术作用剂，而牛顿在炼金术实验中逐渐确信此路不通，从而将注意力转向微粒间的作用及作用剂的腐蚀性，并从此角度出发筛选炼金术作用剂。”[[139]](#footnote-139)由此，牛顿对波义耳微粒哲学作了修正，提出了粒子与粒子之间存在着力的作用的概念。在《光学》“疑问31”中，牛顿写道：“强水[硝酸]能溶解银而不溶解金，王水则溶解金而不溶解银，是否可以说，强水[的微粒]已细微到既足以钻进银又足以钻入金中去，但却缺少使它钻进金中去的吸引力；而王水[的微粒]则细微到足以钻进金也足以钻入银中去，但却缺乏使它钻进银中去的吸引力呢……”[[140]](#footnote-140)

第三，对于炼金术与化学之间关系的处理，牛顿和波义耳都面临着相似的状况，近代化学研究的范式还没有形成，炼金术还受到很多人的青睐，以金属嬗变为主题的相关研究往往以炼金术的名义展开，某些化学的研究还需要借用炼金术的语言来表述，从而呈现出一种炼金术-化学混合在一起的状态，带有明显的炼金术性质。牛顿在《论酸的性质》一文中就以酸为例，概括性地陈述了他的微粒哲学以及相应的炼金术研究纲领，“一切物体都由可相互吸引的粒子形成：最小粒子的种种结合体可称为对应于第一级组成的种种粒子，由第一级组成粒子形成的种种组合体或集聚体可称为种种第二级组成粒子，以此类推，直至形成最后一级组成粒子。水银和王水都能渗入金或锡的最后一级组成粒子之间的孔隙之中，但却不能进一步渗入其他级别的组成粒子之间的孔隙；这样讲是因为，倘若某种溶媒能进一步地涌入其中，换句话说，倘若金的第一级组成粒子，甚或是第二级组成粒子能被离解，那么，这种金属就可被转变成一种液体，起码也会变得更柔软一些。又，倘若能使金发酵或腐败，就可能将金转变成其他的任何一种物体。锡或任何其他物体亦同此理”[[141]](#footnote-141)。

总之，牛顿的炼金术研究是以波义耳的微粒哲学以及炼金术实验为其工作的起点的，呈现出机械论哲学基础上的炼金术特征。这是与传统炼金术不同的，鉴此，对于牛顿的炼金术实验，我们再不能以传统的炼金术实验来看待它，从而将此等同于传统的炼金术实验，对此加以贬斥，或者将此视作旁门左道，打入冷宫，或者将此视作与牛顿的其他成功的科学实践相悖。对于牛顿的炼金术，应该将此看作与牛顿的其他实验如光学实验、力学实验、化学实验一样，都是基于机械论的微粒哲学进行的，尽管牛顿的机械论哲学观念还不彻底。就此而言，多布斯的下面一段话还是恰当的：“过去数十年中，一些历史学家一直不愿对牛顿炼金术正眼相看，并对牛顿炼金术一定与其公开阐述过的物质理论存在着内在联系这种见解嗤之以鼻。而现在我们知道，牛顿将炼金术作为一个至关重要的祛码，以弥补古代以及那时原子论的种种不足，这些不足涉及内聚性与活性、生命与生长以及上帝的支配与庇佑。牛顿在炼金术、神学、形而上学以及观察方面的探索，促使他逐渐形成了他关于物质的性质以及同物质相关的种种动力的最后结论。”[[142]](#footnote-142)

当然，对牛顿炼金术的正名，并不是要肯定牛顿的炼金术，毕竟，牛顿的炼金术从大前提上看是错误的，因此，据此实验是不能得到想要的结果的，炼金术一定程度上延缓了化学革命。但是，对牛顿的炼金术的机械论解释以及对化学的炼金术的说明，一定程度上能够促进炼金术的消亡以及化学的诞生及其发展，就此而言，炼金术-化学的存在有其进步意义。

(四)将微粒说、数学方法与实验方法综合起来

牛顿将微粒说、数学方法与实验方法综合起来，这样的综合不仅与力的概念和运动定律的提出有关，也与万有引力定律的创立不无关系。波义耳运用实验限制微粒说的思想也影响到了胡克。胡克认为，微粒一直在振动，如果这些微粒的振动彼此和谐，就很容易混合甚至结合为一个物体，否则就会因不和谐而彼此分开。胡克就说：“这些微粒具有同样的大小、形状和质量，将会结合在一起或者说共舞，不同种类的微粒将会被抛出或挤出；同类的微粒，就像许多张力相同的弦一样，和谐一致地一起振动。”[[143]](#footnote-143)如此，根据微粒振动来说明相关现象就成为胡克研究工作的核心。

但是，胡克在应用上述原则解释生命自发活动现象时遇到了障碍。“并非自然界中的所有活动都可以用无生命的运动微粒来解释，还必须有别的东西在起作用。至于这种别的东西是否能够最终归结为无生命微粒的一种机制，这是胡克后来提出的核心问题，但他对此提出的看法并不一致。”[[144]](#footnote-144)在这种情况下，有些时候，他认为自然现象是纯粹物质的，但另一些时候，他又持有完全相反的看法——物质和运动是两种基本本原，物质是“雌性的或母性的本原，它没有生命，是一种完全缺乏主动性的力量，直到仿佛被第二种本原[即运动]受孕为止”。[[145]](#footnote-145)他把这第二种本原直截了当地称为“精气”(spiritus)，这也是对斯多亚学派的普纽玛的拉丁文表述。“这种语言使我们经由笛卡尔严格的微粒理论，回到了解释中包含着太多‘精气’和魔法的范·赫尔蒙特和帕拉塞尔苏斯。这是因为，一方面要使用一种丰富的以太，其中普纽玛和世界灵魂在与精细物质争夺优先地位，而另一方面，对自然的解释不能使生命世界的自发活动停止。”[[146]](#footnote-146)

牛顿同样注意到了这种状况。通过系统地研究整个炼金术文献和他亲手做的数百个炼金术实验，牛顿坚信：“即使是自然界中的‘生长作用’(vegetativen Wirkungen)也不能仅仅归因于微粒的运动。”[[147]](#footnote-147)1669年，他写了一篇题为《论金属的生长》(“*Uber die Vegetation von Metallen*”)的总结性论文(和往常一样只为私用)。它清楚地表明，牛顿和之前的胡克一样，早已超越了能够与正统微粒哲学相容的界限。“‘微粒的机械组合或分离’不足以解释自然界中的活动，‘我们必须求助于某种更遥远的原因’。”[[148]](#footnote-148)

一开始，牛顿试图在与普纽玛和世界灵魂紧密关联的精细物质——“以太”中寻找这种原因。他甚至说道：“也许自然界的整个架构就是以太被一种发酵本原凝聚起来。”[[149]](#footnote-149)他开始猜测，是否需要一种非常薄而精细的以太，这样行星就可以通过以太，以免受阻力的影响而减速；而且也需要它异常坚硬，从而在系统中没有松弛，能够以惊人的速度传播光。但是到了1679年，“继续进行的以太思辨使牛顿确信，如果沿着这种道路走下去，含糊性是不可避免的。渐渐地，他开始猜测，在他的化学和炼金术实验中几乎触手可及的物质精细结构中，有力在起作用”[[150]](#footnote-150)。

根据上述思想，在牛顿的经典力学中就有两个命题：

(1)所有的物理现象都可以用组成粒子之间的引力和斥力来解释。

(2)所有的现象都可以用渗透整个宇宙的活性细微流体(active subtle fluids)或以太来解释。

乍眼一看，上述两个命题似乎是不相容的，但是对于牛顿来说，两者还是相容的。对于粒子，如果它们之间的斥力足够强大，就可以使得粒子之间的距离变远，以致满足刚性的要求，导致一个粒子的轻微运动会立即影响周围的粒子。对于一个由极微小的粒子组成的以太来说，它与其他原子相比很小，彼此相距甚远，而且中间是真空，具有合适的稀薄度，因此对穿过它的行星没有抵抗力。这样，就可以解释自然界中所有的现象。在牛顿那里，对以太的进一步思考，是将实验与微粒说结合起来进行思考和行动的结果。问题是：相关的“力”究竟是什么呢？有一个什么样的机制和规律可以界定呢？对此，胡克与牛顿之间的通信成为该项研究推进的契机。

1679年末，胡克给牛顿去信，询问牛顿是怎样看待他的以下理论的：利用一条惯性路线和一种将一个物体吸向另一个物体中心的力来研究行星的运动。显然，这次请教对牛顿发展自己的轨道力学具有非常重大的意义。牛顿回信搪塞道，他因忙于其他事务而多年很少考虑哲学了。但他还是在信中提出了一个关于地球日常自转的“怪念头”：当一个物体从空中落到地球上时，地球的日常自转并不会让物体落到正下方的那一点(这与一般人的观念相左)，而会让物体落在它原来位置的前面(即东侧)。胡克收到这封信后，给予了积极回应，他称根据他假定的惯性运动以及向心引力，牛顿描述的是一个物体下落时会划出一个椭圆的轨迹，而不是一个螺旋的轨迹。牛顿无法接受胡克对他的纠正，回信指出，即使没有阻力，物体也不会以椭圆路线下落，而会“在其离心力与重力交替压倒彼此的过程中进行或升或降的循环运动”。这已经是1680年的事了。之后，胡克再次回应，称他原来就假定物体的重力总是与其到引力中心的距离的平方成反比，只是这样的物体的运动会划出什么样的路线呢？在这里，胡克向牛顿提供了研究直线运动惯性与向心引力之间的新动态关系的关键线索。接着，胡克向牛顿提出了一个相关的问题：由开普勒第一定律可知天体的运行轨道是椭圆，那么如何将平方反比定律与天体的运行轨道联系起来呢？胡克告诉牛顿，他毫不怀疑牛顿轻易就会算出这个曲线到底是什么，它有什么特性，并提出这个比例的物理原因。虽然牛顿后来指责胡克无能，不愿继续与他通信，但牛顿后来还是向哈雷(Edmond Halley，1656—1742)承认，他与胡克的这次交流引发了他对天体力学的重新思考。的确，大约就是这个时候，牛顿迈出了重大的一步：用开普勒第二定律来证明一个沿着椭圆轨道运行的物体遵循引力平方反比定律。[[151]](#footnote-151)

不仅如此，牛顿还与皇家天文学家弗拉姆斯蒂德(John Flamsteed，1646—1719)进行了一系列的通信。这些通信对于牛顿深化其天体运动的思考意义重大。1680年11月初，天文学家观察到一颗大彗星，而且在随后的12月，夜空中又出现了一颗彗星。弗拉姆斯蒂德于12月15日告诉牛顿，他曾经预测11月出现的那颗彗星将会再次出现，所以他提前几天就开始寻找这颗彗星，并且终于再次发现了它。弗拉姆斯蒂德告诉哈雷，那颗彗星是一颗毁灭的行星，被太阳吸进了自己的涡旋。他说那颗彗星被吸到太阳前面的时候在太阳北极引力的作用下偏离了自己原来向南的路径，但同时太阳涡旋也使得这颗彗星侧向运动……。牛顿无法接受弗拉姆斯蒂德的观点，于1681年2月末对其展开批判。他说，虽然他可以想象太阳会持续不断地吸引彗星，使彗星偏离原先的轨道，但是，太阳对彗星的吸引永远都不会使彗星的运动径直朝太阳方向运行。况且，太阳涡旋只会将彗星推离太阳。牛顿提出，解决这些问题的唯一方法，就是设想彗星转到太阳的另一面去了，承认太阳会发出一种向心引力，使行星沿着曲线运行，而且这种引力不是磁力。因为磁石(天然磁体)在高温下会失去磁力。更重要的是，就算太阳的吸引力像一块磁铁，且彗星像一块铁，弗拉姆斯蒂德还是没有解释清楚太阳怎么会对彗星从吸引突然转向排斥。牛顿在致弗拉姆斯蒂德的信中说到，那种vis centrifuga或“离心力”在近日点“超过了”引力，从而使彗星不顾太阳的吸引而倒退开去。离心力就是一个沿着轨道运行的物体离开吸引体的趋势(或程度)。虽然牛顿后来舍弃了离心力的概念，但是持续不断的引力这一概念却成为他后来《原理》中所论述的更成熟的天体动力学的基石。[[152]](#footnote-152)

应该说胡克的猜想对于牛顿创立万有引力定律意义重大。不过，胡克只是提出了猜想，将此猜想转化为严格意义上的科学的是牛顿。提出假说是一回事，用数学和实验确证假说则是另一回事。胡克提出“把原本和匀速直线运动的天体维持在椭圆轨道上的是一种与距离的平方成反比的力”的猜想后，一直没有公开他的证明，甚至声称他当时还不想暴露这一证明，除非弄清楚其他任何人都无法给出这一证明。鉴此，1684年8月，哈雷去剑桥求教牛顿，想请牛顿解决这一问题。这一行动最终促成了1687年牛顿的《自然哲学之数学原理》的出版。

在这本著作中，牛顿提出了万有引力定律，并对此作了解释：任何物体的运动都是在力的作用下进行的，这样的力是构成物体的微粒之间的作用力，而不是他早期假想的以太。世界上的万事万物都是由微粒构成的，每个物体内部的微粒都会对其他任何微粒施加一种引力，而且这种引力集中于物体的中心或质点。物体的质量越大，构成它的微粒的数量越多，引力就越强。引力的强度与距离的平方成反比。

根据万有引力定律，不仅能够推得开普勒第三定律，而且还能够解释行星围绕太阳的一系列运动现象以及潮汐现象，所有这些都得到经验的证实。从万有引力定律的提出和检验看，它不仅遵循了机械论哲学——微粒说，把这样一种哲学用于对事物现象的解释中，而且还根据“力”的概念，推导出规律性的数学公式以描述这种现象，再进一步根据观察实验等来检验这一数学公式。如此，就把微粒学说、数学和实验结合了起来，完成了科学的大综合。

考察牛顿完成科学综合的过程，在个人层面，与胡克和哈雷的介入有关；在建制层面，与英国皇家学会有关；在学术交流层面，与期刊和通信有关；在思想观念与理论层面，与牛顿自身此前参与过第四种转变和第五种转变有关。相较于牛顿，惠更斯一直停留在意义明确、简单直观的运动微粒机制上，缺乏培根式的混合——实验与微粒说的结合，因此，他虽然于1675年在他的笔记中引入了一种新的力的概念，但是，并没有往前更进一步；胡克没有受过系统的数学训练，缺乏数学的严格性和思想的规范，因此，他虽然在1679年做出了天才般的猜想，但是仍然没有给出数学论证，提出万有引力定律。“要想发现万有引力定律，仅有胡克或惠更斯是不够的，只有两者的混合胡更斯(Hookgens)才可能成功。这种要求只有牛顿才能满足。”[[153]](#footnote-153)

四、牛顿的后机械论哲学及其研究纲领的贯彻

只有牛顿能够发现万有引力定律而不是胡克、惠更斯抑或他人，究其原因这与牛顿提出万有引力的概念以及其所遵循的研究纲领有关。

(一)基于后机械论哲学，提出万有引力概念

牛顿为什么能够提出万有引力概念呢？这与他坚持并且发展机械论哲学有关。

根据机械论哲学，上帝创造了粒子和原子，这些粒子和原子具有一定的大小、形状、运动和不可分割性等几种基本的属性，其他所呈现出来的性质或者现象，是由各种各样的粒子或原子按照上帝设定的自然定律运动或碰撞(推、拉或挤压等)而产生的，其中存在着各种各样的碰撞力等接触力，没有接触就没有力，没有接触及其作用的发生，即没有其中所蕴含的“时间绵延”，就没有力。

但是，在牛顿这里，万有引力之“引力”不是上述粒子或原子之间的推、拉或挤压，而是一个瞬时的超越距离限制的作用。这种作用是如何发生的呢？

牛顿认为，在机械论体系中，上帝不仅创造了粒子或原子，而且还创造了那些比粒子更高级的精神层次的“施动者”(causal agents)——“引力”，这些“引力”是非物质的因果性的“施动者”，它们并不存在于粒子之中，也不存在于粒子相互碰撞或物体相互碰撞的作用力之中，而是存在于上帝在造物之时所赋予物的一种非物质的(精神性的)因果性施动者之中，正是它依据完美对称的数学方程式，让自然以似自然律的方式作用并导致了粒子运动。[[154]](#footnote-154)

比较牛顿的自然哲学与传统的机械论哲学，牛顿坚持了其最基本的内涵——粒子及其粒子之作用后的现象，但是，他又引入了非物质的(精神性的)因果“施动者”，就此来看，他非常类似于开普勒，似乎回到开普勒和其他新柏拉图主义者那里。“他的自然哲学以一种不同寻常的和富有成效的方式综合了机械论的和新柏拉图主义哲学的理论成分。”[[155]](#footnote-155)就此，舒斯特把牛顿的自然哲学称为“后机械论自然哲学”。[[156]](#footnote-156)

进一步的问题是：牛顿为什么采用了后机械论自然哲学？他又是如何通过后机械论自然哲学提出万有引力概念的？这涉及牛顿的个人生平以及制度的、社会的、宗教的、政治的等因素。

20世纪70年代，学者曼纽尔(Frank Manuel)在《牛顿的肖像》(*A Portrait of Isaac Newton*)中依据弗洛伊德(Sigmund Freud，1856—1939)的精神分析学，结合牛顿的人生经历，对此进行了分析。他认为，牛顿之所以能够提出万有引力，是出于潜意识结构的有意识表达。一是牛顿是个遗腹子，出生于旧历1642年的圣诞节，从未见到过自己的父亲，由此，牛顿潜意识地认为自己是上帝之子，上帝赋予其特别的才能，以揭示上帝的秘密；二是在牛顿出生3年后，他的母亲就改嫁了，他是由他的外祖母抚养长大的。他经常梦中看到他的母亲几乎总是站在那里，但是他却没有办法“触及”。牛顿与他母亲之间这种奇特的关系，使他的心理升华为一种有意识表达，即万有引力。[[157]](#footnote-157)

从牛顿的人生经历以及万有引力这种非物质的(精神性的)“施动者”特征来看，上述分析比较有趣，亦有一定道理，不失为一个视角。但是，从影响牛顿思想的各种可能因素如生平、制度、社会等广阔背景来看，分析牛顿为什么会成为一名后机械论自然哲学家，以及如何在这种自然哲学的框架内提出万有引力概念，这些都是必不可少的。

舒斯特认为，牛顿于1661年进入剑桥大学三一学院之后，就接触到了机械论哲学。只是在大学里，机械论哲学思想是以非正式的方式传播的。牛顿接受了这一思想，但是他在技术和科学层面以及神学层面，并不完全信奉这一思想，而是对此展开冷静的批判。如牛顿认为，根据机械论哲学，镜子表面也是由粒子构成的，因而是“粗糙”的，当入射光线以一定角度照射到此镜面时，光的微粒将与镜面上的微粒发生不可控制的碰撞，从而不可预见地向四面八方散射，而不会发生直线性的反射现象。如此，机械论哲学是无法解释光的反射定律的。为了解释反射定律，牛顿认为，镜面上的粒子形成的物理平面是参差不齐的，但是这些粒子在很短的距离内发射少许斥力，从而在其上形成一个很薄但完全平直的数学平面；入射光线也是由光粒子构成的，这些光粒子在一定距离内也发射少许斥力；当光线照射到镜面时，光粒子的斥力场与镜面粒子的斥力场发生非物理的精神的相互作用，结果是出现一条紧密的反射光线，并且入射角与反射角相等[[158]](#footnote-158)，具体情形见图10.4。



图10.4　牛顿的答案：短程力场的相互作用[[159]](#footnote-159)

由此，牛顿通过对短程斥力这一概念的建构，比较充分地解释了光的反射现象，并用一种数学的简明性表达了这一现象。“牛顿的观点是机械论的，但除了机械论之外还有其他东西，因为他担心机械论哲学的技术性，所以添加了这些非机械论的动因和作用力。”[[160]](#footnote-160)这也是舒斯特称牛顿的自然哲学为“后机械论自然哲学”的原因。

其实，根据舒斯特的考察，牛顿之所以持有后机械论哲学思想还有其理论来源。在17世纪60年代，牛顿在剑桥与两个人过往甚密，他们是摩尔(H. More，1614—1687)和卡德沃思(R. Cudworth，1617—1688)。这两个人都是剑桥新柏拉图主义者，生活在英国的不稳定时期(17世纪50年代和60年代，英国经历了内战、革命、处死国王和政府的更替、宗派主义的暴动事件，以及最后1660年斯图亚特王朝的复辟)，出于担心天主教徒的动乱，也出于希望1660年斯图亚特王朝的复辟的社会的安定，他们选择反对天主教徒和清教徒的哲学观点，远离亚里士多德哲学，拒斥巫术过度的狂热以及自然巫术的不理智形式，投入到机械论哲学的怀抱。不过，他们也反对无神论的极端机械论，也有点不相信纯粹形式的机械论[[161]](#footnote-161)。他们认为：“我们是机械论者，但是我们也认同上帝以其仁慈之心把某些非机械性的、精神的力量放入自然之中，这就使得自然现象不仅由纯粹的机械原因所致，而且也显现了上帝的能力和仁慈。”[[162]](#footnote-162)

上述剑桥新柏拉图主义者的政治观点以及自然哲学思想，给牛顿留下了深刻印象，也成为牛顿建构自己后机械论自然哲学思想的理论框架和形而上学背景。

上面的阐述表明，诸如万有引力这样的概念，并不是在自然界中发现的，也不是从纯粹的观察事实中归纳推理出来的；它是非物质的精神性的“施动者”，我们永远也观察不到它；它是牛顿在后机械论自然哲学的框架内建构出来的，建构这一概念的目的是解释观察到的现象。就此而言，“万有引力”概念及其“万有引力定律”就是一个历史的建构，这种建构扎根于复杂的历史研究模式和历史条件之中；就是一个复杂的“文化”集成，而不完全是“自然”的镜像。至于舒斯特所称的“万有引力完全是一个历史的建构”以及“科学理论是复杂的‘文化’集成，而不是‘自然’的镜像”，[[163]](#footnote-163)太绝对了，值得商榷。

不容怀疑的是，牛顿之所以提出“万有引力”，是因为他把神秘主义融入了机械自然观中。“我们在牛顿的作品中看到的是机械论的思想与深厚的神秘主义思想的完美融合。”[[164]](#footnote-164)这种融合是如何发生的呢？

开始，牛顿是用笛卡尔的方法思考相关问题的。他接受了笛卡尔的假设，认为行星之所以保持在稳定的轨道上运转，是由于两种力的平衡作用：一种是从中心向外的离心力，另外一种是从中心向内的向心力。根据笛卡尔的漩涡理论，月球绕地球旋转产生的离心力被不断下降的粒子流(ever-descending streams of particles)所抵消，因为粒子流产生向心力，将月球推向地球。对于地球上的任何物体如苹果，没有受到离心力的足够作用，无法抵消下降粒子的力，就会按照向心力下落。至于他本人其后所宣称的——在那时，他就提出了万有引力的普遍原理——我推断，将行星维持于它们轨道上的力，必定与行星至它们的环绕中心之距离的平方成反比，则未可信。

对于上述笛卡尔假说的正确性，笛卡尔自己从来没有尝试过进行数学论证。牛顿在他的“奇迹年”(1665—1666年)运用精湛的数学技巧似乎论证了它，即维持行星在其轨道上运转的力与地球表面的力是相同的，符合同一种规律。

虽然如此，牛顿这里所称的“力”还是与笛卡尔的“力”仍然不同。笛卡尔的“力”表示的是物质之间的相互碰撞或撞击而导致运动，当笛卡尔主义者要解释诸如重力和磁力这类神秘的力(forces)或力量(powers)时，他们不得不求助于有关螺旋线粒子(screw-threaded particles)的细节性想象。而在牛顿那里，他受炼金术、巫术和宗教信仰等的影响，还保留着自然的神秘主义思想。

牛顿在炼金术上所花的时间远远超过他花在数学和物理学上的时间。他是一个狂热的炼金术的信奉者。他信奉炼金术并非要把铅转变成金子，而是要找出物质运动和活动的神秘来源。1675年，他把他的《解释光的特性的假说》论文寄给皇家学会。[[165]](#footnote-165)在这篇文献中他写道：“也许整个自然界不过是某些缥缈的精灵或蒸汽的种种情景，它们好像是通过沉淀凝结起来的，很像水蒸气在水中凝结起来的样子，或者是呼出的气体，虽然不那么容易凝结，但却变成了更粗糙的物质；凝结成各种形状；起初是由造物主直接的手创造的；从那以后，由于大自然的力量，通过指令，增加和繁殖，成为一个完全的模仿者的复制品所设定的原生质体。因此，也许所有的事物都起源于以太……光和以太相互作用。”[[166]](#footnote-166)这样的描述充分体现了牛顿的炼金术思想以及神秘主义思想，促使牛顿得出结论，即物质粒子之间一定存在着相互吸引与相互排斥的力。

如果没有胡克和哈雷，也许牛顿还不能那么快地把他在炼金术中所持有的这一思想扩展到宇宙学中。胡克在阅读开普勒的《新天文学》之后得出结论：行星之所以围绕确定的轨道运行，不是像笛卡尔所说的那样依靠离心力和向心力的平衡，而是行星在一个与太阳和行星之间的距离平方成反比的引力的作用下，使得惯性的切向运动弯曲成一个封闭的轨道。17世纪70年代末，胡克写信给牛顿，询问他对这一理论的看法。牛顿给予了回答并交流看法。之后哈雷于1684年参与进来，促使牛顿进一步思考这一问题，最终提出万有引力定律。韦斯特福尔认为，在此之前，牛顿认为吸引力和排斥力只存在于炼金术的语境中，即物体的微小粒子之间的微力，多亏了胡克和哈雷，促使他认识到这些力与整个物理学有关，包括宇宙学。[[167]](#footnote-167)

在1687年出版的《自然哲学之数学原理》一书中，牛顿说道：“我希望能用同样的推理方法从力学原理中推导出自然界的其他许多现象。因为有许多理由使我猜想，这些现象都是和某些力相联系着的，而由于这些力的作用，物体的各个粒子通过某种还不知道的原因，或者相互接近而以有规则的形状彼此附着在一起，或者互相排斥而彼此分离。正由于我们还不知道这些力是什么，所以直到现在哲学家对自然界的探讨都以失败而告终，但是，我希望本书所奠定的原理将对这种或某些更正确的哲学方法提供一些线索。”[[168]](#footnote-168)

从上面的一段话中可知，牛顿是机械自然观的贯彻者，但是，由他的“我们还不知道这些力是什么”可知，这样的力——重力或万有引力以“超距”的形式作用，是神秘的。他说：“现在，我们可以加上一些关于某种最‘微妙的精神’的东西，这种精神弥漫并隐藏在所有的物体之中；通过这种力和作用，物体的微粒在近距离相互吸引，如果是连续的，就会凝聚在一起；电体的作用距离更大，同时排斥和吸引邻近的微粒；光被发射、反射、折射、弯曲并加热物体；所有的感觉都是兴奋的，动物的身体在意志的命令下运动，也就是通过这种精神的振动，沿着坚实的神经纤维相互传播，从感觉器官到大脑，从大脑到肌肉。但是这些事情不能简单地用几句话来解释，我们也没有足够的实验来精确地确定和论证这些电的和弹性的精神所遵循的法则。”[[169]](#footnote-169)

牛顿为何能够接受这样的神秘的“力”？除了上面所述的原因外，还与牛顿对笛卡尔力的学说的批判性考察紧密相关。

根据笛卡尔的相关理论，如果下降的粒子流将物体推向地球的说法是正确的，那么我们就会认为物体的表面积是一个相关因素，但是，牛顿的万有引力定律表明两个物体之间的万有引力与物体的质量成正比，因此，万有引力应该是由物体的最深处或中心处发出并传递到遥远的地方。牛顿在他的《自然哲学之数学原理》第二版中补充道：“可以肯定的是，它(万有引力)一定缘于一个深入太阳和行星中心的原因，而且没有丝毫减少；它所起的作用不是根据它所作用的粒子的表面的量，而是根据它们所包含的固体物质(the solid matter)的量，并把它的功效从四面八方传播到极远的地方。”[[170]](#footnote-170)

而且，巫术传统对牛顿也有很大的影响。巫术师们经常被迫承认他们不知道某物是如何运作的(因为它是神秘的或隐秘的)，但是，他们声称他们可以通过实验证明它确实这样运作。牛顿继承了这一思想，认为对于万有引力和磁力，也可以宣称它们是事实，理由是它们可以很容易地通过实验研究或者通过数学分析来详细地论述。这点也是当时英国皇家学会的做法，可以被看作是向自然巫术传统的回归。

总之，“牛顿的成就在于将机械论哲学与存在神秘的力(forces)和力量(powers)的信仰相结合。当然，他对存在这些神秘的力的信仰源于他自己在炼金术方面的工作，也源于英国自然哲学中一个源远流长的传统，这一传统始于威廉·吉尔伯特，弗朗西斯·培根使之在哲学上受到尊敬，并被英国皇家学会奉为经典。这是一个传统，在这种传统中，身体被假定藏有秘密或具有隐藏的力量，可以通过实验来证明和研究，即使它们永远无法用机械学术语来解释”[[171]](#footnote-171)。

也许正是牛顿提出的万有引力概念如此地奇怪，具有非机械的超距作用，以至于当时一些重要的机械论哲学家如惠更斯并不认为万有引力是真实的，也不认为牛顿的后机械论自然哲学是可以接受的。但是，随着牛顿经典力学应用的成功，即通过牛顿三大运动定律和万有引力定律，不仅可以推导出伽利略的落体定律、笛卡尔的惯性原理以及开普勒的行星运动三定律，而且还能够解释潮汐现象、彗星的运动、地球的形状等，越来越多的人认为牛顿的后机械论自然哲学是正确的，牛顿的万有引力是存在的并且是正确的，从而沿着他开创的研究纲领向前迈进。

但是，牛顿的万有引力定律也不是不可置疑的。从现代物理学的观点看，任何作用都不可能瞬间发生，因为任何物质的运动速度都不可能超过光速，就此，牛顿万有引力定律所蕴含的“引力超距作用”有可能是不存在的。

(二)从运动现象分析自然之力，再从自然之力证明其他现象

伽利略、笛卡尔的工作虽然奠定了机械论自然观的基础，但还不足以使力学真正确立起来，主要原因在于他们对与物体运动相关的“质量”“动量”“惯性”“力”等基本概念的认识，还存在着较大的模糊和混乱，还不能将引起物体运动变化的原因归结为力的作用，也不能通过这种力来解释物质的运动。

牛顿接受了上述概念词项，并赋予它们以清楚的含义。如分析牛顿的“力”的概念，并不是一个像文艺复兴时期自然主义中“爱”和“憎”一样含糊的、起决定性作用的词，也不完全是那种解释碰撞作用的“一个物体对另一个物体的压力”，而是改变物体机械运动状态的、能够精确度量的力学上的一种物理量。牛顿通过在物质和运动基础上加上一个新的范畴“力”，在伽利略的数学传统中引入笛卡尔的微粒间的相互作用，从而将数学力学和机械论哲学综合了起来。力的概念使自然科学达到了一个前所未有的水平，并从此成为科学实证的范例。

明晰这些概念的意义非常重大。原因是：“他不仅对力、质量、惯性等概念作了精确的数学运用；而且还为时间、空间、运动等旧术语赋予了新的含义，这些术语在牛顿之前并不重要，而现在却变成了人们思维的基本范畴。”[[172]](#footnote-172)“牛顿利用了像力和质量这样的模糊术语，但赋予它们一种作为‘定量的连续体’(quantitative continua)的精确含义，使得通过运用这些术语，物理学的主要现象变得可以用数学来处理。”[[173]](#footnote-173)根据牛顿的观点，他的理想是最终证明，一切自然现象都可以按照数学力学来说明。

概念明晰只是牛顿建立他的研究纲领的第一步。在此基础上，牛顿提出了他的核心研究纲领：“从运动现象来考察自然之力，然后根据这些自然之力去论证其他现象。”[[174]](#footnote-174)这可以分为三个主要步骤：“首先是通过实验对现象进行简化，从而把握和精确定义现象的那些定量变化的特征及其变化方式。后来的逻辑学家实际上忽视了这个步骤，但显然正是以这种方式，牛顿精确地确定了光学中的折射和物理学中的质量等一些基本概念，并且发现了关于折射、运动和力的更加简单的命题。第二步是对这些命题进行数学阐述(通常要借助于微积分)，使得这些原理在出现它们的任何量或关系中的运用能够在数学上得到说明。第三步是进一步作精确的实验，以便（1）证实这些推论可以应用于任何新的领域，并把它们归结为最一般的形式；（2）如果现象比较复杂，就要查明可作定量处理的任何额外原因(在力学中是力)是否存在并确定它们的值；（3）如果这些额外原因的本性依旧模糊，那么就要拓展我们目前的数学工具，以便能更有效地处理它们。”[[175]](#footnote-175)通俗地说就是，首先通过观察或实验，根据“自然的一致性(或简单性)原则”“同因同果的线性因果决定性原则”“物体属性的普遍性原则”“归纳主义的原则”，从现象中推出普遍的规律，获得运动现象-科学事实，然后再假设承载此现象的物质是由某种微粒构成的，从运动现象出发努力分析并发现这种微粒之间存在着某种力，这种力及其现象有一定的性质及大小，可由一定的数学方程来表示，最后通过这种数学方程来预言或解释其他的运动现象，而且，也可以通过种种其他的现象来证实该数学理论的正确。

牛顿在他的著作中很好地贯彻了他的研究纲领。他在其经典名著《自然哲学之数学原理》中清楚地定义了涉及物质运动的“质量”“动量”“惯性”“时空”等基本概念，提出了运动三定律和万有引力定律，构建起了严谨的经典力学体系。而且他开始把表面看来并非力学现象的“自然界的其余现象”与“力学原理”联系起来，要从力学原理中导出它们。他明确地把热看作是物体微粒的振动，并且以此为基础，假定物体微粒间的斥力与距离成反比，从力学原理中推导出波义耳定律(虽然此定律是由波义耳运用实验发现的)；他将微粒说作为光学理论的基础，把光学还原为力学，借助于微粒说，运用力学机制来推导出包括折射定律在内的许多光学定律，建立起了近代科学中第一个光学理论。可以说，牛顿借助于力学还原论实现了科学史上的一次大统一，通过事物之间的万有引力，将天上物体的运动与地上物体的运动统一了起来。

这是一种从现象到理论的科学研究方式，是牛顿所坚守的。牛顿宣称他不杜撰假说。牛顿做出的这一宣称是有原因的。这种原因与牛顿当时受到的责难以及当时“假说”的内涵有关。

在牛顿1664年、1666年以及1672年进行了他的光学实验并提出相应的光学理论之后，帕迪斯(Ignatius Pardies，1636—1673)称牛顿的论文是“一种最巧妙的假装”“一种非凡的假说”。他说，如果它是真的，那么它就会颠覆光学的基础。对此，牛顿认为这不是一种侮辱，他回应道：“我不认为可敬的神父把我的理论称作假说是不适当的，因为他不熟悉它。但是，我的意图却大相径庭，因为它似乎只包含了光的特性。光的特性现在已经被发现了，我认为证明它们很容易。如果我不把它们当作真的，那么我宁可人们把它当作徒劳、空洞的推测，也不愿意人们承认它是一种假说。”[[176]](#footnote-176)

这就是说，牛顿认为他的理论是真的、正确的，不应该用“假说”来称呼。实际上，在中世纪，假说有三种不同的含义：一是逻辑学的，如“人终有一死，苏格拉底是人，所以苏格拉底必死”；二是数学的，如托勒密的“地心说”和哥白尼的“日心说”，它们是基于不同的假说做出的论证，对于此假说，不在于它是否真实，而在于它是否产生准确的结果；三是实证意义上的，即相关的假说的真实性很重要，假说提出后必须要经受观察或实验的检验以判别其真伪，如果通过了实验检验，则是真的，成为理论，否则就是假的，成为假说。[[177]](#footnote-177)根据这三种含义，牛顿拒绝用“假说”来称呼他的光学理论，也就有情可究了。至于他为何“不构想假说”，倒是值得进一步深究，毕竟“假说-演绎方法”是科学普遍的方法。

(三)牛顿研究纲领在18世纪的贯彻

基于机械论哲学，牛顿运用其相应的研究纲领，创立了经典力学。这具有重大的意义：一是将天上和地上物体的运动统一了起来；二是把人们对机械运动(位置变动)的认识从运动学水平提高到了动力学的水平；三是把对物体运动状态的描述从变化的结果提高到了对变动过程的认识；四是把原来被看作是孤立的力学事件联系起来形成一个因果的链条。

或许是牛顿科学的巨大成功，牛顿之后，他所坚持的自然观以及以机械的方式解释世界的科学思想路线，被许多科学家接受，成为他们行动的指南。这一时期的科学都是在牛顿的研究纲领下进行的，都被“牛顿化”(Newtonized)了。为了进一步“合理地”贯彻牛顿机械论纲领，18世纪的许多杰出的科学家们力图构建隐藏在现象背后的某种假想实体，并赋予这种实体以纯机械的(力学的)性质，以便对复杂的自然现象做出统一的机械论解释。具体而言就是，比照牛顿力学中把具有质量的客体作为力学的实体来加以研究的方法，提出各种粒子学说，并假设粒子间具有各种作用力，从而解释自然现象，由此出现了广泛使用“力”这一概念的现象。

在力学上，为了说明膨胀现象，提出了膨胀力；在光学上，为了说明光的折射现象，提出了折射力。

在热学上，18世纪波尔哈夫( Hermann Boerhaave，1668—1738)提出热质说；之后18世纪60年代，布莱克(Joseph Black，1728—1799)提出比热的概念；1798年，伦福德(Rumford，1753—1814)提出热动说，认为在钻孔的过程中，钻孔机的机械运动转变成了热，热是运动的一种形式——热动说，这一学说70多年后才被接受。

在电学上，1600年吉尔伯特在他的《论磁》一书中区分了磁和电；萨克森地区马德堡的盖里克(Otto von Guericke，1602—1686)做了摩擦带电现象；到了18世纪，带电玻璃球和棍棒成为风靡欧洲的娱乐用具，有的吸引，有的排斥，而且当时的科学家提出电流体说；1729年，格雷(Stephen Gray，1666—1736)发现了导电现象；1745年左右，荷兰与波美拉尼亚的发明家分别发明了莱顿瓶；1752年，本杰明·富兰克林(Benjamin Franklin，1706—1790)做了闪电的放电实验；1785年，库仑(Charles-Augustin de Coulomb，1736—1806)提出了“库仑定律”，之后不久，进一步提出磁力也符合平方反比定律。

在化学上，1697年，斯塔尔(Georg Ernst Stahl)提出“燃素说”，1779年，拉瓦锡提出他的“燃烧学说”；若弗鲁瓦(Étienne François Geoffroy，1672—1731)18世纪初提出“亲合力表”，开始用“力”来解释化学现象。

在生物学上，为了说明生命现象，提出了活力、生命力和消化力，等等。

考察牛顿研究纲领在18世纪的上述应用，是以本体论的微粒以及微粒间的力的作用为哲学基础的，由此有学者将此称为18世纪思辨哲学体系。具体内涵见表10.2。

表10.2　18世纪思辨哲学体系[[178]](#footnote-178)

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 代表人物 | 主要作品 | 核心观点 |
| 赫尔曼·波尔哈夫(Herman Boerhaave，1668—1738) | 《化学实验法则》(*Institutiones et experimenta chymicae*，1724年) | 认为火是自然界膨胀活动的原因，并且包含在所有物质中。所以，物质的引力遵循牛顿的万有引力定律，但也包含着一种斥力，是由它的内在之火赋予的 |
| 斯蒂芬·黑尔斯(Stephen Hales，1677—1761) | 《植物的静电》(*Vegetable Staticks*，1727年) | 接受了牛顿的观点，认为气体的粒子必须互相排斥，并试图从气体的排斥粒子和其他物体的吸引粒子之间的相互作用来解释化学过程 |
| 约翰·罗宁(John Rowning，1701—1771) | 《简明自然哲学体系》(*Compendious System of Natural Philosophy*  ，1735年) | 认为粒子在不同距离上交替地相互吸引和排斥，以此来解释硬度和柔软度、凝聚力和液化、弹性等 |
| 戈温·奈特(Gowin Knight，1713—1772) | / | 他试图证明所有成熟的现象都可以用两个简单的主动原则来解释，即吸引和排斥(1748年) |
| 罗杰·约瑟夫·博斯科维奇(Roger Joseph Boscovich，1711—1787) | 《自然哲学理论》(*A Theory of Natural Philosophy*， 1758年) | 论证说，物体不是由物质构成的，而是仅由具有惯性并具有一定边界吸引力的几何点构成(接近到几何点)，当吸引力转换为排斥力时(并产生坚固感) |
| 约瑟夫·普利斯特列(Joseph Priestley， 1733—1804) | 《关于物质与精神的论述》(*Disquisitions on Matter and Spirit*，1777年) | 将博斯科维奇的理论引入了英国，并用它论证了世界并没有分为被动物质和主动精神，但该物质是活跃的，具有吸引力和排斥力 |
| 布赖恩·希金斯(Bryan Higgins，1737—1820) | 《关于……火与光……以及其他化学哲学主题的实验和观察》*(Experiments and observations relating to… the matter of fire and light… and other subjects of chemical philosophy*)，1786年 | 认为物质粒子坚硬且呈球形，并被火气包围，其结果是粒子可以表现出吸引力和排斥力 |
| 詹姆斯·赫顿(James Hutton，1726—1797) | 《关于自然哲学的不同主题的论文》(*Dissertation on Different Subjects in Natural Philosophy*，1792年) | 认为关于两种物质的争论，即引力的吸引物质和排斥的太阳物质(后者在光、火和电中最清楚地表现出来)甚至暗示着惯性是由物质的吸引力和排斥力的平衡产生的 |

从表10.2所呈现的18世纪代表人物的主要作品题目以及核心观点可见，这一时期的科学是科学与哲学、实证与思辨的结合，实证的研究是以观察、实验、测量为基础的，思辨的解释是以寻找现象背后的原因为策略。这种策略在当时作为某种自然现象暂时还不知道原因的代名词，作为用来说明自然现象的权宜之计，是允许的，甚至是有益的，为非力学领域整理科学材料，说明有关自然现象，深化科学研究的工作，提出科学假说，创立科学理论，创造了条件，但是，上述这种寻找现象背后原因的策略应用显得呆板、教条、机械，假想的成分很重。如果固守这种力的说明方法而不进一步去探讨有关现象背后的真实原因，就很有可能抹杀不同自然现象之间质的差别，阻碍认识的进步。科学史上燃素说之于燃烧学说、热质说之于热动说，就说明了这一点。

这里以燃素说到燃烧学说的转变为例，说明这一问题。

某些物质加热后是可以产生燃烧现象的。针对这一现象，自古有各种各样的说法。17世纪，作为炼金术士的贝克尔(Johann Joachim Becher，1635**—**1682)指出，所有的物质都是由空气、水和三种土构成，这三种土分别为油脂土(terra pinguis)、水银土(trerra mercurialis)和石头土(terra lapida)。17世纪后期，斯塔尔(1660**—**1734)把贝克尔的油脂土改称为燃素(phlogiston)，并把它说成是一种强有力的“火焰、炽热、白热、热的”流体，当物体燃烧、锻炼或以其他形式变化时，就会释放或者消耗这种流体。

燃素论者在用燃素说解释燃烧现象时认为，一切与燃烧有关的化学变化都可以归结为物体吸收燃素和释放燃素的过程。煅烧金属，燃素从中逸去，金属变成了煅渣；煅渣与木炭共燃时，它们又从木炭中吸取燃素，重新变成金属。在燃素论者看来，物体中含燃素越多它燃烧起来就越旺，如油脂、炭黑、硫、磷就是富含燃素的物质；反之，如石头是不含燃素的物质，就不会燃烧。

鉴于大多数化学现象似乎可以用燃素说得到说明，燃素说在它流行的一百多年里被绝大多数科学家相信，以至于他们或花费很大精力投入到寻找燃素的工作中去，或用燃素说牵强附会地解释与燃素说相矛盾的燃烧现象。

比如说，如果化学家把燃素看作是一种物质，那它就应该具有重量。但是，在煅烧金属时，金属是要释放燃素的，为什么失去燃素后所得的煅渣重量反而增加了呢？有人认为，燃素应具有一种负重量(或“正轻量”)，它具有不被吸向地心、反其方向而上升的性质。不过，这一点违反了万有引力定律。

再比如说，根据燃素说，空气是一种元素，燃素是一种可以构成火的元素，一切物体都含有燃素，既然如此，为什么燃素离开空气后就不能起作用了呢？胡克曾提出了这样的见解：空气仿佛是一种溶剂，燃素只有通过空气的溶解才能从物体中释放出来。但后来的实验发现，空气中有一部分气体不能助燃，并会使动物窒息，被称作“浊气”，既然空气是燃素的溶剂，那为什么有的能自燃(“可燃空气”)，有的则不能助燃(“浊空气”)，可见空气不可能是一种元素，而只能是一种含有不同成分的混合物。

1755年，布拉克(J.Black，1728—1799)发表了《关于钱石、生石灰和其他碱性物质的实验》的论文，得到了一种具有重量的气体。它可以和碱性物质相结合而被固定，他称为“固定空气”。“固定空气”具有不助燃和使动物窒息等性质，它可能由煅烧石灰石而得。“固定空气”的不助燃性质正好与“燃素”的助燃性质相反，煅烧石灰石过程中各种物质的重量变化似乎表明“燃素”的不存在。不过，需要说明的是，布拉克本人并没有能够收集到这种气体，也没有提出相关的新假说。

1766年，卡文迪什(Henry Cavendish，1731**—**1810)做了一个新奇的实验，他把锌片和铁片扔进稀盐酸或硫酸里，金属片突然大冒气泡，放出气体，该气体一遇火星就立刻燃烧以至爆炸。我们现在知道这是较活泼的金属与酸发生置换反应，生成了氢气，氢气在点燃的情况下与氧气发生爆炸反应生成了水。但是在当时，人们还没有氢气这一概念。人们所有的较深厚的信念就是燃素说。燃素说的信徒们根据燃素说对此现象做出了解释。他们认为，金属片和酸作用时，金属被分解为燃素和灰烬，放出来的气体就是燃素，燃素导致了剧烈燃烧的反应。他们高喊“燃素找到了”，高兴得沸腾了起来。其实发现的这种气体并非燃素，而是一种人类历史上从未认识到的气体——氢气。

1774年，英国化学家普利斯特列(Joseph Priestley，1736—1813)，在加热氧化汞后得到了一种新气体，它能够使点燃的蜡烛大放光芒。这是什么原因呢？我们知道，这是普利斯特列制得的氧气与蜡烛中的成分发生化学反应的结果。如果当时普利斯特列能客观地分析问题，是有可能正确地揭开燃烧之谜的。然而他是燃素说的信奉者，相信燃烧就是损失燃素，于是从燃素论的观点出发，完全错误地解释了自己的实验，说新气体是不含燃素的，是一种失燃素的空气，它具有极强的吸收燃素的本领，因而在燃烧中有极强的助燃能力。一旦碰到蜡烛，便贪婪地从蜡烛中吸取燃素，既然燃素大量释放，所以燃烧便非常旺盛，因此将这种气体命名为“脱燃素空气”。就这样，普利斯特列被传统的燃素学说所束缚，对实验结果做了错误的解释；走到了真理的面前，却当面错过了它。

最终摆脱传统思想的束缚，找到燃素说错误的根源，揭示出燃烧和空气的真实联系的，是法国科学家拉瓦锡。

拉瓦锡在研究燃烧现象时，特别注重重量的测定。他善于运用天平，并将此作为研究化学变化的有力工具。1774年他用锡和铅做了著名的金属煅烧试验。他把精确称量过的锡和铅分别放在曲颈瓶中，将其封闭后，准确称量金属与瓶的总重量，然后加热，使铅、锡变为灰烬。他发现加热前后总重量没有变化，但是，金属经煅烧后重量却增加了。这说明所增之重既非来自火中，亦非来自瓶外的任何物质，只可能是金属结合了瓶中部分空气的结果。同时他发现把瓶打开时空气冲了进去，瓶和金属煅灰的总量因此而增加了，所增加的重量和金属经煅烧后增加的重量恰好相等，这说明金属煅烧时与空气中的某一成分发生了作用。那么，是空气中的什么与金属结合了呢？最有说服力的当然就是设法从金属煅灰中直接分解出这种气体来。

然而，他的实验一开始并没有取得成功。正在拉瓦锡遇到困难的时刻，来访的普利斯特列将自己的关于加热氧化汞而得到一种特殊空气的实验，告诉了拉瓦锡。拉瓦锡立即想到，这可能是他预想的在还原金属煅灰时会产生的那种空气。他按照自己的想法做了实验：加热汞让它生成煅灰，然后再加热煅灰使其还原。结果是，生成煅灰时所吸收的特殊空气和还原煅灰时所得到的特殊空气的重量正好相等。把这一部分特殊空气同不参加反应的其他空气混合后，正好就是普通的空气。他断定，这一部分特殊的空气参加了燃烧过程的化合。

拉瓦锡对待他的燃烧学说十分谨慎，在1772**—**1777年的几年中，他又做了大量的燃烧实验，例如使磷、硫黄、木炭、钻石燃烧；将锡、铅、铁煅烧；将许多有机化合物燃烧；等等。他对燃烧以后所产生的和剩余的气体也一一加以研究。然后对这些实验结果进行归纳和分析。1774年，拉瓦锡将他的论文《燃烧概论》提交给皇家科学院院刊，但直到1778年才被刊载。1779年，他建议将这种气体命名为principe oxygine(即“氧”)，该词来自希腊语，意思是“可构成酸类”(成酸元素)。

就此，拉瓦锡把燃素从燃烧中驱逐了，用真实的原因解释了燃烧的本质。其要点如下：燃烧时放出光和热；物体只有在氧存在时才能燃烧；空气是由两种成分组成，物质在空气中燃烧时，吸收了其中的氧而加重，所增加之重恰为其所吸收的氧气之重；一般的可燃物质(非金属)燃烧后通常变为酸，氧是酸的本原，一切酸中都含有氧元素。

为什么拉瓦锡会挣脱燃素说的束缚，完成近代化学革命呢？这与他的科学理性批判精神、创新意识和系统定量研究方法是分不开的，他首先冲破燃素说并坚决主张：假如有“燃素”这样的东西，我们就要把它提取出来看看；假如的确有的话，在他的天平上就一定能察觉出来。他以敏锐的目光洞察了燃素说错误的要害在于把虚幻的燃素当作客观存在的物质实体。他坚定地认为“燃素是假想的、不必要的东西”，可燃物质的燃烧根本不是燃素的释放，而是与氧发生化合反应，氧才是假想的燃素的真实对立物。这样他就摆脱了错误理论的束缚，用正确理论解释了实验的结果。

当然，拉瓦锡燃烧学说的鉴定还与他把系统的、严格的定量方法引入化学实验的研究之中密切相关，定量方法的应用使化学研究的基本方法(实验方法)发生了质的飞跃。他一再强调：“除了事实之外我们什么都不必相信：事实是自然界给我们提供的，不会诓骗我们。我们在一切情况下都应当让我们的推理受到实验的检验，而除了通过实验和观察的自然之路之外，探寻真理别无他途。”[[179]](#footnote-179)

他是这样说的也是这样做的。在运用天平进行精确的科学测量的基础上，他首次全面阐述了质量守恒定律。当时对该定律的正式陈述为：“我们可以将此作为一个无可争辩的公理确定下来，即在一切人工操作和自然造化之中皆无物产生；实验前后存在着等量的物质；元素的质和量仍然完全相同，除了这些元素在化合中的变化和变更之外什么事情都不发生。实施化学实验的全部技术都依赖于这个原理。我们必须永远假定，被检验物体的元素与其分析产物的元素严格相等。”[[180]](#footnote-180)“拉瓦锡用经过称量的不可反驳的证据证明物质虽然在一系列化学反应中改变状态，但物质的量在每一反应之终与每一反应之始却是相同的，这可以从重量上寻找出来。”[[181]](#footnote-181)这就是拉瓦锡的化学反应前后质量守恒定律，即进行化学反应的每一反应物的质量可以改变，但是反应物的质量总和与生成物的质量总和相等。根据这一质量守恒定律，拉瓦锡还设想出以下表述方式：葡萄汁=碳酸+酒精，即把参加发酵的物质和发酵后的生成物列成一个代数式，再逐个假定方程式中的每一项都是未知数，然后逐个算出它们的值。这样一来既可用计算来检查人们的实验，又可用实验来验证人们的计算。显然，这是现代化学方程式的雏形。拉瓦锡的上述贡献，对化学反应过程的系统研究产生了不可估量的深远影响。

1783年，拉瓦锡在他的论文《对燃素的思考》中仔细地对“燃素说”进行了分析。“他证明，用燃素理论解释一些实验时，引出了许多矛盾和前后不协调的地方。对不同的化学家来说，燃素意味着不同的东西，而且随着情况的变迁，它的意思也不断改变。有时候它是一种物质，有时候是一种原则；有时候它有重量，有时候又没有；有时候它是热，有时候是火，有时候又成为火精(principle of fire)。为了满足逻辑上一致性的要求，拉瓦锡证明在定量化学中完全用不着燃素理论。”[[182]](#footnote-182)

上述燃素说到燃烧学说的转变，是拉瓦锡将定量方法应用到化学中的结果，由此确立了质量守恒定律，应该是一次科学革命。它把人们长久未能解释的燃烧之谜揭开了，使过去在燃素说形式上倒立着的化学正立过来，第一次建立了科学的化学反应理论，彻底割断了化学与炼金术的联系，从此，结束了化学上百年的混乱局面，奠定了现代化学的基础，形成了化学史上的一次重大革命。这次革命不仅是18世纪化学中最伟大的成就，而且也是对过去整个化学这门学科的一次系统总结，是对从波义耳到布拉克、卡文迪什和普利斯特列的气体化学之集大成。它不仅促进了化学的变革，也促进了那个时代人们的世界观、方法论的变化与进步，并对人类当时及以后的生产和生活产生了重大影响。拉瓦锡因而被誉为“现代化学之父”。

I. B. 科恩对拉瓦锡的燃烧学说的创立进行了研究，认为拉瓦锡是第一位将自己的科学研究称作“革命”的人，[[183]](#footnote-183)并且认为这样的革命是科学革命的范例，通过了鉴别科学革命的所有检验。[[184]](#footnote-184)如果我们把燃素说看作常规科学下的旧范式，那么拉瓦锡发现天平增重就是发现了常规科学的这一“反常”现象。之后，为了解释这一“反常”现象，拉瓦锡创立氧化学说。氧化学说是一个新范式，新范式取代旧范式，化学革命结束。就此来说，I. B. 科恩的上述观点有一定道理。

不过，国内外学者有不同看法。西格弗里德(Robert Siegfried)指出，氧与燃素在本体论上并没有什么不同，燃烧仅仅是从失去燃素的过程变为增加氧气的过程。[[185]](#footnote-185)任定成认为，氧化说与燃素说处于同一个传统之内。[[186]](#footnote-186)霍姆斯(Frederic Holmes)指出，普利斯特列的“燃素”不仅仅建立在燃烧之上，而且还用来解释腐烂、呼吸等的过程，它与拉瓦锡的氧的燃烧学说，是两种竞争的学说，而非新的和旧的两种范式；燃烧学说取代燃素说，不是新旧范式的更替，而是竞争假说的选择。[[187]](#footnote-187)冯翔、袁江洋认为，燃素说与氧化说均遵循元素论化学的要素原则，氧气与燃素均承担可燃性的性质。[[188]](#footnote-188)克莱因(Ursula Klein)指出，与燃素说相比较，氧化说的本体论并不具有革命性，而且两者都是在亲合力化学的框架下来解释相关现象的，因此这是一场“没有发生的革命”。[[189]](#footnote-189)

分析上述各位学者的观点，有一个共同点，就是通过否定氧气之于燃素的本体论地位，来否定氧气之于燃素的范式差异，再进一步否定燃烧学说之于燃素说的范式变迁以及革命性。事实上，这种否定是不恰当的，是没有区分“哲学式范式”和“科学式范式”以及“大写的科学革命”和“小写的科学革命”的结果。对于氧气和燃素，它们是具体化的科学概念；而对于燃烧学说以及燃素说，它们也是具体化的科学理论。这些都是具体化的、个别的“科学式范式”，而不是抽象化的、普遍的“哲学式范式”。从氧气到燃素以及从燃烧学说到燃素说这种范式的转变，是“科学式范式”的转变，属于“小写的科学革命”。它们不是“大写的科学革命”，因为它们都同样受惠于牛顿的研究纲领，都是以机械论哲学为基础的，都是以一种看不见的微粒来解释已经看到的现象。

对于这种“小写的科学革命”，由于所变革的不是抽象的哲学层面上的范式，而是具体的科学层面的范式，科学层面范式的革命不是彻底的、根本性的，也不是不可通约的，而是科学家依据已经形成的“哲学式的科学范式”，在具体的科学研究过程中完成。这种“小写的科学革命”的可以表现为科学的自我纠正。关于此，可由图10.5表示。



图10.5　从燃素说到燃烧学说的范式转换[[190]](#footnote-190)

说到这里，有一个问题需要澄清：牛顿的研究纲领出现后，是否笛卡尔的研究纲领就衰落了呢？在18世纪，至少是在18世纪上半叶，情况不是这样的，当时笛卡尔的哲学影响广泛，而牛顿的影响则实际上仅限于英国。到了18世纪，牛顿的影响增大，牛顿的支持者认为牛顿要比笛卡尔更加正确和伟大。他们认为牛顿体现了进步的、成功的现代科学的理想，牛顿很清楚科学的局限性，并将它严格建立在能做精确数学处理的实验与实验观测数据的基础之上，而笛卡尔却是试图使科学隶属于形而上学，用那些关于物质结构和行为的、未经证明且不可能得到证明的幻想的假说来取代经验、精确性和测量。这样一来，牛顿一方就代表着真理，而笛卡尔一方则代表着主观的谬误，不仅不合时宜，而且反动和虚妄。这种观点受到笛卡尔的支持者的反对，他们认为笛卡尔的学说也是正确的。

柯瓦雷对上述现象进行了分析，认为争论双方是在按照普鲁塔克(Plutarchian，约公元46—120)[[191]](#footnote-191)的方式来比较笛卡尔和牛顿，并使两者对立。丰特奈勒(Monsieur de Fontenelle)认为：“这两位伟人的体系极为相反，但在某些方面很相像。他们都是第一流的天才，生就超常的理解力，都适合做知识王国的奠基者。作为出色的几何学家，他们都注意到有必要把几何学引入物理学，因为他们都把自己的物理学建立在几何学的发现之上，而这些发现几乎可以说是他们自己做出的。但其中一位野心勃勃地想立即找到万物的本原，试图通过清晰而基本的观念来掌握第一原理，然后他可能就没有更多事情可做，而只能降低到自然现象的层面去追寻必然的因果联系；另一位则更加小心谨慎或者说谦逊，他从掌握已知现象入手去寻求未知的原理，而且只有在它们能被一连串因果关系产生出来时才肯承认。前者从他认为是清楚无误的东西出发去寻求现象的起因，而后者则从现象出发去寻找其背后的原因，无论它是清楚的还是模糊的。前者所主张的自明的原理，并不总能使其找到现象的真正原因，而现象也并不总能使后者获得足够明显的原理。使这两个人止步不前的各自探索道路上的边界，并不是他们本人理解力的边界，而是人类自身理解力的边界。”[[192]](#footnote-192)正是在这样的比较的基础上，他指出，只有在对笛卡尔的学说进行了旷日持久的斗争之后，牛顿的物理学，或者其自称的自然哲学，才在欧洲获得了普遍认可；笛卡尔的科学对我们来说完全属于过去，而牛顿的科学虽然已经被爱因斯坦的相对论和当代的量子力学所超越，却仍然有生命力。[[193]](#footnote-193)

牛顿的功绩是巨大的。韦斯特福尔给予其很高评价：“人人都承认艾萨克·牛顿在科学史特别是17世纪科学史上的地位。牛顿的成就不仅是里程碑式的，代表着人类理智的最高成就之一，而且也将17世纪科学的主要流派汇聚起来，解决了科学革命尚未解决的一些重大问题。”[[194]](#footnote-194)“如果说他的工作总结了17世纪的科学革命，那么它也开创了18世纪的物理科学。在牛顿那里，机械论自然哲学从根本上得到修正，变得更加复杂，在接下来两个世纪里为西方世界的科学思想提供了框架。”[[195]](#footnote-195)

总之，从17世纪下半叶开始，科学进入到了一个新的历史时期，从大约1655年到1684年，又发生了第四种、第五种革命性转变。第四种革命性转变主要是微粒说与数学的结合，由惠更斯和牛顿实现；第五种革命性转变主要是微粒说与实验的结合，由波义耳、胡克和牛顿实现。正因为牛顿参与了这两种革命性转变，所以能够最终于1687年实现第六种革命性转变，即在结合数学与实验的基础上实现微粒说、数学与实验的大综合。在此之后，科学就是沿着这样的道路向前迈进的。就此，“从历史上说，牛顿也许已经完成了科学革命，从内容和方法上说，这场革命一直持续到今天”[[196]](#footnote-196)。

1. [荷]H. 弗洛里斯·科恩：《世界的重新创造：近代科学是如何产生的》，张卜天译，长沙：湖南科学技术出版社，2012年，第145页。 [↑](#footnote-ref-1)
2. [荷]H. 弗洛里斯·科恩：《世界的重新创造：近代科学是如何产生的》，张卜天译，长沙：湖南科学技术出版社，2012年，第176页。 [↑](#footnote-ref-2)
3. [Gillispie C C. Dictionary of Scientific Biography. NewYork: Charles Scribner’s Sons, 1981, (6): 597-613.](http://scholar.cnki.net/result.aspx?q=Treaties%20on%20Light,%20Great%20Books%20of%20the%20Western%20world,%20Hortimer%20J) [↑](#footnote-ref-3)
4. [荷]H. 弗洛里斯·科恩：《世界的重新创造：近代科学是如何产生的》，张卜天译，长沙：湖南科学技术出版社，2012年，第175-179页。 [↑](#footnote-ref-4)
5. 李丹、韩静：《惠更斯及其碰撞理论》，《物理教学探讨》，2008年第15期，第3-7页。 [↑](#footnote-ref-5)
6. 罗腊春：《德高望重的惠更斯》，《物理学通报》，2015年S1期，第121-123，129页。 [↑](#footnote-ref-6)
7. [荷]H. 弗洛里斯·科恩：《世界的重新创造：近代科学是如何产生的》，张卜天译，长沙：湖南科学技术出版社，2012年，第176页。 [↑](#footnote-ref-7)
8. [荷]H. 弗洛里斯·科恩：《世界的重新创造：近代科学是如何产生的》，张卜天译，长沙：湖南科学技术出版社，2012年，第178页。 [↑](#footnote-ref-8)
9. [荷]H. 弗洛里斯·科恩：《世界的重新创造：近代科学是如何产生的》，张卜天译，长沙：湖南科学技术出版社，2012年，第178页。 [↑](#footnote-ref-9)
10. [美]理查德·韦斯特福尔：《近代科学的建构：机械论与力学》，张卜天译，北京：商务印书馆，2020年，第88-89页。 [↑](#footnote-ref-10)
11. 方在庆、黄佳：《从惠更斯到爱因斯坦：对光本性的不懈探索》，《科学》，2015年第3期，第30-34页。 [↑](#footnote-ref-11)
12. [美]理查德·韦斯特福尔：《近代科学的建构：机械论与力学》，张卜天译，北京：商务印书馆，2020年，第72页。 [↑](#footnote-ref-12)
13. [美]理查德·韦斯特福尔：《近代科学的建构：机械论与力学》，张卜天译，北京：商务印书馆，2020年，第72页。 [↑](#footnote-ref-13)
14. 梁昌洪. 广义惠更斯原理[J]. 电子学报, 2008, 36(12): 2439-2444. [↑](#footnote-ref-14)
15. [荷]惠更斯：《光论》，蔡勖译，北京：北京大学出版社，2007年，第14页。 [↑](#footnote-ref-15)
16. 转引自俞成：《经典物理巨匠——惠更斯》，《中学物理教学参考》，1995年第12期，第44-46页。 [↑](#footnote-ref-16)
17. Elzinga A. Huygens’ theory of research and descartes’ theory of knowledge I. Journal for General Philosophy of Science, 1971, 2(2): 174-194. [↑](#footnote-ref-17)
18. Bos. Huygens and mathematics//Dijksterhuis F J. Lenses and Waves: Christiaan Huygens and the Mathematical Science of Optics in the Seventeenth Century. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004: 257. [↑](#footnote-ref-18)
19. Dijksterhuis F J. Lenses and Waves: Christiaan Huygens and the Mathematical Science of Optics in the Seventeenth Century. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004: 257. [↑](#footnote-ref-19)
20. Dijksterhuis F J. Lenses and Waves: Christiaan Huygens and the Mathematical Science of Optics in the Seventeenth Century. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004: 259. [↑](#footnote-ref-20)
21. Dijksterhuis F J. Lenses and Waves: Christiaan Huygens and the Mathematical Science of Optics in the Seventeenth Century. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004: 9. [↑](#footnote-ref-21)
22. Dijksterhuis F J. Lenses and Waves:Christiaan Huygens and the Mathematical Science of Optics in the Seventeenth Century. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004: 260-261. [↑](#footnote-ref-22)
23. 徐林燕：《[牛顿与惠更斯光学思想的比较研究](http://www.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?filename=1013247131.nh&dbname=cdmdtotal&dbcode=cdfd&v=)》，广西民族大学硕士学位论文，2013年，第27页。 [↑](#footnote-ref-23)
24. Isaac Newton, The Ppincipia, trans. I. Bernard Cohen and Anne Whitman, assisted by Julia Budrnz(Berkeley and Los Angeles: University of Canifornia Press), P.943. [↑](#footnote-ref-24)
25. 玛格丽特·J. 奥斯勒“在此声明中，牛顿并非完全坦诚，因为他已经提出了神学的、形而上学的和物理的等各种假说来解释引力吸引和他在整个自然界中观察到的其他吸引和排斥。然而，牛顿说他还没有能力发现重力或其他吸引的原因，这暗示寻求这样一种原因是合理的。那样一来，重力并不像广延、不可入性和硬度那样是物体的一种第一性质。……” [↑](#footnote-ref-25)
26. 玛格丽特·J. 奥斯勒认为，牛顿的这一声明并非完全坦诚，因为他已经提出了神学的、形而上学的和物理的等各种假说来解释引力吸引和他在整个自然界中观察到的其他吸引和排斥。具体内容参见[美]玛格丽特·J. 奥斯勒：《重构世界：从中世纪到近代早期欧洲的自然、上帝和人类认识》(张卜天译，长沙：湖南科学技术出版社，2012年，第182-183页)。 [↑](#footnote-ref-26)
27. 徐林燕：《[牛顿与惠更斯光学思想的比较研究](http://www.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?filename=1013247131.nh&dbname=cdmdtotal&dbcode=cdfd&v=)》，广西民族大学硕士学位论文，2013年，第39页。 [↑](#footnote-ref-27)
28. 徐林燕：《[牛顿与惠更斯光学思想的比较研究](http://www.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?filename=1013247131.nh&dbname=cdmdtotal&dbcode=cdfd&v=)》，广西民族大学硕士学位论文，2013年，第39-40页。 [↑](#footnote-ref-28)
29. 对于波义耳之于机械论哲学(mechanical philosophy)一词的创立和使用，学界也有不同的观点。彼得·安斯蒂(Peter Anstey)认为“机械论哲学”一词是由亨利·摩尔(Henry More，1614—1687)在笛卡尔哲学的背景下首先引入的。(Anstey P. The Philosophy of Robert Boyle. London: Routledge, 2000: 153-154.)不过，是波义耳对这一概念作了深入细致的阐述，一定程度上使这个术语成为更为广泛的概念。 [↑](#footnote-ref-29)
30. 考察科学史家对波义耳机械论哲学方面的研究，所用的词语也很多，除了机械论哲学之外，还有微粒哲学和微粒说。他们一般没有将此加以区分，而当作同样的东西使用。而且考察波义耳本人对这两个词语的使用，也当作同样的东西。鉴此，在本书的撰写和叙述过程中，为了尊重所引文献作者各自的用法，所用词语若无特别说明，可将它们在相同的意义上加以理解。而且，也为了本书研究需要，一般情况下用“微粒说”表示之。 [↑](#footnote-ref-30)
31. [美]玛格丽特·J.奥斯勒：《重构世界：从中世纪到近代早期欧洲的自然、上帝和人类认识》，张卜天译，长沙：湖南科学技术出版社，2012年，第146页。 [↑](#footnote-ref-31)
32. [美]理查德·韦斯特福尔：《近代科学的建构：机械论与力学》，张卜天译，北京：商务印书馆，2020年，第88页。 [↑](#footnote-ref-32)
33. [美]理查德·韦斯特福尔：《近代科学的建构：机械论与力学》，张卜天译，北京：商务印书馆，2020年，第88页。 [↑](#footnote-ref-33)
34. [美]理查德·韦斯特福尔：《近代科学的建构：机械论与力学》，张卜天译，北京：商务印书馆，2020年，第89页。 [↑](#footnote-ref-34)
35. 此处的M. B. 霍尔(M. B. Hall，1919—2009)即后面的博厄斯((Marie Boas)，博厄斯(Marie Boas)1959年及以前以玛丽·博厄斯写作，1959年与A. R. 霍尔(M. B. Hall)成为夫妻后改名为M. B. 霍尔(M. B. Hall)，并且以M. B. 霍尔写作。 [↑](#footnote-ref-35)
36. Hall R A, Hall M B. Philosophy and natural philosophy: Boyle and Spinoza//Braudel F (ed.). Mélanges Alexandre Koyré II: L’aventure de l’esprit. 1964: 241-256. [↑](#footnote-ref-36)
37. Hall M B. Robert Boyle on Natural Philosophy: An Essay with Selections from His Writings. Bloomington, London: Indiana University Press, 1966: 57. [↑](#footnote-ref-37)
38. Pyle A. Atomism and its critics: problem areas associated with the development of the atomic theory of matter from democritus to Newton. Ph.D. Thesis, University of Bristol, 1982: 609. [↑](#footnote-ref-38)
39. Clericuzio A. A redefinition of Boyle’s chemistry and corpuscular philosophy. Annals of Science, 1990, 47: 561-589. [↑](#footnote-ref-39)
40. Chalmers A. The lack of excellency of Boyle’s mechanical philosophy. Studies in History and Philosophy of Science Part A, 1993, 24(4): 541-564. [↑](#footnote-ref-40)
41. 转引自[荷]H. 弗洛里斯·科恩：《世界的重新创造：近代科学是如何产生的》，张卜天译，长沙：湖南科学技术出版社，2012年，第181-182页。Sargent R M. The Diffident Naturalist, Robert Boyle and the Philosophy of Experiment. Chicago: The University of Chicago Press, 1995: 164. [↑](#footnote-ref-41)
42. Anstey P R. Robert Boyle and the heuristic value of mechanism. Studies in History and Philosophy of Science Part A, 2002, 33(1): 157-170. [↑](#footnote-ref-42)
43. Pyle A. Boyle on science and the mechanical philosophy: a reply to Chalmers. Studies in History and Philosophy of Science Part A, 2002, 33(1): 171-186. [↑](#footnote-ref-43)
44. Chalmers A. Experiment versus mechanical philosophy in the work of Robert Boyle: a reply to Anstey and Pyle. Studies in History and Philosophy of Science Part A, 2002, 33(1): 187-193. [↑](#footnote-ref-44)
45. Chalmers A. The Scientist’s Atom and the Philosopher’s Stone: How Science Succeeded and Philosophy Failed to Gain Knowledge of Atoms. Dordrecht: Springer Netherlands, 2009: 97-122. [↑](#footnote-ref-45)
46. [荷]H. 弗洛里斯·科恩：《世界的重新创造：近代科学是如何产生的》，张卜天译，长沙：湖南科学技术出版社，2012年，第182页。 [↑](#footnote-ref-46)
47. [美]埃德温·阿瑟·伯特：《近代物理科学的形而上学基础》，张卜天译，北京：商务印书馆，2018年，第174页。原文出自：The Works of the Honourable Robert Boyle, Birch edition, 6 Vols, London, Vol.Ⅴ, 1672: 177. [↑](#footnote-ref-47)
48. Boyle R. The Works. Vol.3. Birch T (Ed.). Georg Olms Hildesheim Reprinted in Germany, 1965: 15-31. [↑](#footnote-ref-48)
49. 袁江洋：《探索自然与颂扬上帝——波义耳的自然哲学与自然神学思想》，《自然辩证法通讯》，1991年第6期，第40页。 [↑](#footnote-ref-49)
50. [美]埃德温·阿瑟·伯特：《近代物理科学的形而上学基础》，张卜天译，北京：商务印书馆，2018年，第193页。。原文出自：The Works of the Honourable Robert Boyle, Birch edition, 6 Vols, London, Vol.Ⅳ, 1672: 19. [↑](#footnote-ref-50)
51. Boyle R. The Works of Robert Boyle. Vol. 8. Hunter M, Davis E B(eds.). London: Pickering and Chatto, 2000: 12. [↑](#footnote-ref-51)
52. [美]罗伯特·金·默顿：《十七世纪英格兰的科学、技术与社会》，范岱年、吴忠、蒋效东译，北京：商务印书馆，2009年，第26页。 [↑](#footnote-ref-52)
53. [英]波义耳：《怀疑的化学家》，袁江洋译，北京：北京大学出版社，2007年，第8页。 [↑](#footnote-ref-53)
54. 袁江洋：《论玻意耳-牛顿思想体系及其信仰之矢》，《自然辩证法通讯》，1995年第1期，第44页。 [↑](#footnote-ref-54)
55. [美]埃德温·阿瑟·伯特：《近代物理科学的形而上学基础》，张卜天译，北京：商务印书馆，2018年，第191—192页。 [↑](#footnote-ref-55)
56. 转引自Boyle R. The Works of Robert Boyle. Vol. 8. Hunter M, Davis E B(eds.). London: Pickering and Chatto, 2000: 114. [↑](#footnote-ref-56)
57. 有些学者将此译作“织构”，笔者认为译作“纹理”更好。 [↑](#footnote-ref-57)
58. Boyle R. The Works. Vol.3. Birch T(ed.). Georg Olms Hildesheim reprinted in Germany, 1965: 15-31. [↑](#footnote-ref-58)
59. 袁江洋：《探索自然与颂扬上帝——波义耳的自然哲学与自然神学思想》，《自然辩证法通讯》，1991年第6期，第40页。 [↑](#footnote-ref-59)
60. [美]理查德·韦斯特福尔：《近代科学的建构：机械论与力学》，张卜天译，北京：商务印书馆，2020年，第89页。 [↑](#footnote-ref-60)
61. Boyle R. The Works of Robert Boyle. Hunter M, Davis E B(eds.). London:Pickering and Chatto, 2000: 296. [↑](#footnote-ref-61)
62. Chalmers A. The Scientist’s Atom and the Philosopher’s Stone: How Science Succeeded and Philosophy Failed to Gain Knowledge of Atoms. Dordrecht: Springer Netherlands, 2009: 117. [↑](#footnote-ref-62)
63. Chalmers A. The Scientist’s Atom and the Philosopher’s Stone: How Science Succeeded and Philosophy Failed to Gain Knowledge of Atoms. Dordrecht: Springer Netherlands, 2009: 109. [↑](#footnote-ref-63)
64. [英]波义耳：《怀疑的化学家》，袁江洋译，北京：北京大学出版社，2007年，第189页。 [↑](#footnote-ref-64)
65. [英]波义耳：《怀疑的化学家》，袁江洋译，北京：北京大学出版社，2007年，“对后一文的序文”，第11页。 [↑](#footnote-ref-65)
66. [英]波义耳：《怀疑的化学家》，袁江洋译，北京：北京大学出版社，2007年，第29页。 [↑](#footnote-ref-66)
67. [英]波义耳：《怀疑的化学家》，袁江洋译，北京：北京大学出版社，2007年，第32页。 [↑](#footnote-ref-67)
68. [英]波义耳：《怀疑的化学家》，袁江洋译，北京：北京大学出版社，2007年，第37页。 [↑](#footnote-ref-68)
69. [英]波义耳：《怀疑的化学家》，袁江洋译，北京：北京大学出版社，2007年，第41页。 [↑](#footnote-ref-69)
70. [英]波义耳：《怀疑的化学家》，袁江洋译，北京：北京大学出版社，2007年，第41页。 [↑](#footnote-ref-70)
71. [英]波义耳：《怀疑的化学家》，袁江洋译，北京：北京大学出版社，2007年，第42页。 [↑](#footnote-ref-71)
72. 冯晓华、王金凤：《植物蒸馏与波义耳的怀疑》，《山西科技》，2018年第4期，第46-48页。 [↑](#footnote-ref-72)
73. 冯晓华、王金凤：《植物蒸馏与波义耳的怀疑》，《山西科技》，2018年第4期，第47页。 [↑](#footnote-ref-73)
74. 转引自[美]玛格丽特·J. 奥斯勒：《重构世界：从中世纪到近代早期欧洲的自然、上帝和人类认识》，张卜天译，长沙：湖南科学技术出版社，2012年，第146页。原文出自：Boyle R. The Sceptical Chymist; or, Chymico-physical Doubts & Paradoxes, Touching the Spagyrist’s Principles Commonly call’d Hypostatical, As They Are Wont to Be Propos’d and Defended by the Generality of Alchymists(1661), in The Works of Robert Boyle, ed. Michael Hunter and Edward B. Davis, 14 vols. (London:Pickering and Chatto, 1990), 2: 345. [↑](#footnote-ref-74)
75. [英]波义耳：《怀疑的化学家》，袁江洋译，北京：北京大学出版社，2007年，第93页。 [↑](#footnote-ref-75)
76. [英]波义耳：《怀疑的化学家》，袁江洋译，北京：北京大学出版社，2007年，第93-94页。 [↑](#footnote-ref-76)
77. [英]波义耳：《怀疑的化学家》，袁江洋译，北京：北京大学出版社，2007年，第109页。 [↑](#footnote-ref-77)
78. [英]波义耳：《怀疑的化学家》，袁江洋译，北京：北京大学出版社，2007年，第184页。 [↑](#footnote-ref-78)
79. [英]波义耳：《怀疑的化学家》，袁江洋译，北京：北京大学出版社，2007年，第189页。 [↑](#footnote-ref-79)
80. [英]波义耳：《怀疑的化学家》，袁江洋译，北京：北京大学出版社，2007年，第223页。 [↑](#footnote-ref-80)
81. [英]波义耳：《怀疑的化学家》，袁江洋译，北京：北京大学出版社，2007年，第188页。 [↑](#footnote-ref-81)
82. 恩格斯：《自然辩证法》，于光远等译编，北京：人民出版社，1984年，第28页。 [↑](#footnote-ref-82)
83. Boas M. Boyle as a theoretical scientist. Isis, 1950, 41(3/4): 261. [↑](#footnote-ref-83)
84. Boas M. The Establishment of the mechanical philosophy. Osiris, 1952, 10(10): 412-541. [↑](#footnote-ref-84)
85. Hall M B. Robert Boyle on Natural Philosophy: An Essay with Selections from His Writings. Bloomington, London: Indiana University Press, 1966: 67-72. [↑](#footnote-ref-85)
86. Kuhn T S. Robert Boyle and structural chemistry in the seventeenth century. Isis, 1952, 43(1): 12-36. [↑](#footnote-ref-86)
87. Clericuzio A. Carneades and the Chemists: A Study of the Sceptical Chymist and Its Impact on Seventeenth Century Chemistry. Hunter M(ed.). Robert Boyle Reconsidered. Cambridge: Cambridge University Press, 1994: 79-90. [↑](#footnote-ref-87)
88. 转引自[荷]爱德华·扬·戴克斯特豪斯：《世界图景的机械化》，张卜天译，北京：商务印书馆，2018年，第626-627页。出自Boyle, The origin of Forms and Qualities, Works Ⅲ: 37. [↑](#footnote-ref-88)
89. [美]理查德·韦斯特福尔：《近代科学的建构：机械论与力学》，张卜天译，北京：商务印书馆，2020年，第78页。 [↑](#footnote-ref-89)
90. [美]理查德·韦斯特福尔：《近代科学的建构：机械论与力学》，张卜天译，北京：商务印书馆，2020年，第77页。 [↑](#footnote-ref-90)
91. [美]理查德·韦斯特福尔：《近代科学的建构：机械论与力学》，张卜天译，北京：商务印书馆，2020年，第77-78页。 [↑](#footnote-ref-91)
92. [美]埃德温·阿瑟·伯特：《近代物理科学的形而上学基础》，张卜天译，北京：商务印书馆，2018年，第168页。原文出自：The Works of the Honourable Robert Boyle, Birch edition, 6 Vols, London, Vol.Ⅴ, 1672: 540. [↑](#footnote-ref-92)
93. 转引自Chalmers A. The Scientist’s Atom and the Philosopher’s Stone: How Science Succeeded and Philosophy Failed to Gain Knowledge of Atoms. Dordrecht: Springer Netherlands, 2009: 108. 原文出自Boyle (1990, Vol. ix, f40, reel 5, frame 250). [↑](#footnote-ref-93)
94. [美]埃德温·阿瑟·伯特：《近代物理科学的形而上学基础》，张卜天译，北京：商务印书馆，2018年，第170—171页。原文出自：The Works of the Honourable Robert Boyle, Birch edition, 6 Vols, London, Vol.Ⅴ, 1672: 13. [↑](#footnote-ref-94)
95. Boyle R. The Works of Robert Boyle. Vol. 2. Hunter M, Davis E B(eds.). London:Pickering and Chatto, 2000: 21. [↑](#footnote-ref-95)
96. Boyle R. The Works of Robert Boyle. Vol. 2. Hunter M, Davis E B(eds.). London: Pickering and Chatto, 2000: 23. [↑](#footnote-ref-96)
97. 转引自Chalmers A. The Scientist’s Atom and the Philosopher’s Stone: How Science Succeeded and Philosophy Failed to Gain Knowledge of Atoms. Dordrecht: Springer Netherlands, 2009: 97-122. 原文出自Boyle (1990, Vol. viii, f166, reel 5, frame 168). [↑](#footnote-ref-97)
98. Boyle R. The Works of Robert Boyle. Vol.2. Hunter M, Davis E B(eds.). London: Pickering and Chatto, 2000: 21. [↑](#footnote-ref-98)
99. [美]埃德温·阿瑟·伯特：《近代物理科学的形而上学基础》，张卜天译，北京：商务印书馆，2018年，第175—176页。原文出自：The Works of the Honourable Robert Boyle, Birch edition, 6 Vols, London, Vol.Ⅴ, 1672: 245. [↑](#footnote-ref-99)
100. 转引自Chalmers A. The Scientist’s Atom and the Philosopher’s Stone: How Science Succeeded and Philosophy Failed to Gain Knowledge of Atoms. Dordrecht: Springer Netherlands, 2009: 97-122. 原文出自Boyle (1990, Vol. ix, f40-41, reel 5, frame 250). [↑](#footnote-ref-100)
101. Chalmers A. The Scientist’s Atom and the Philosopher’s Stone: How Science Succeeded and Philosophy Failed to Gain Knowledge of Atoms. Dordrecht: Springer Netherlands, 2009: 100. [↑](#footnote-ref-101)
102. 陈仕丹、袁江洋：《波义耳的“硝石复原”实验与化学微粒论》，《自然辩证法通讯》，2018年第10期，第4页。 [↑](#footnote-ref-102)
103. 陈仕丹、袁江洋：《波义耳的“硝石复原”实验与化学微粒论》，《自然辩证法通讯》，2018年第10期，第4页。 [↑](#footnote-ref-103)
104. 陈仕丹、袁江洋：《波义耳的“硝石复原”实验与化学微粒论》，《自然辩证法通讯》，2018年第10期，第4页。 [↑](#footnote-ref-104)
105. Banchetti-Robino M P. The ontological function of first-order and second-order corpuscles in the chemical philosophy of Robert Boyle: the redintegration of potassium nitrate. Found Chemistry, 2012(14): 221-234. [↑](#footnote-ref-105)
106. Hobbes. Dialogus physicus//Shapin S, Schaffer S. Leviathan and the Air-Pump: Hobbes, Boyle, and the Experimental Life. Princeton: Princeton University Press, 1985: 254-255. [↑](#footnote-ref-106)
107. Boyle R. The Work of Robert Boyle. Vol.2. Hunter M, Davis E B(eds.). London: Pickering and Chatto, 2000: 87. [↑](#footnote-ref-107)
108. Shapin S, Schaffer S. Leviathan and the Air-Pump: Hobbes, Boyle, and the Experimental Life. Princeton: Princeton University Press, 1985. [↑](#footnote-ref-108)
109. Saverien A. Histoire des Philosophes Modernes. Paris: Impr. de Brunet, 1768: 63-92. [↑](#footnote-ref-109)
110. Watson R. Chemical Essays. Cambridge: J. Archdeacon for T. and J. Merrill et al., 1781: 31-32. [↑](#footnote-ref-110)
111. Price J. An Account of Some of the Experiments on Mercury, Silver and Gold. Oxford: Clarendon Press, 1782: 2. [↑](#footnote-ref-111)
112. Boas M. The establishment of the mechanical philosophy. Osiris, 1952, 10: 412-541. [↑](#footnote-ref-112)
113. Banchetti-Robino M P. The function of microstructure in Boyle’s chemical philosophy: ‘chymical atoms’ and structural explanation. Foundations of Chemistry, 2019, 21: 51-59. [↑](#footnote-ref-113)
114. [美]埃德温·阿瑟·伯特：《近代物理科学的形而上学基础》，张卜天译，北京：商务印书馆，2018年，第174页。原文出自：The Works of the Honourable Robert Boyle, Birch edition, 6 Vols, London, Vol.Ⅴ, 1672: 192, ff. [↑](#footnote-ref-114)
115. [美]理查德·韦斯特福尔：《近代科学的建构：机械论与力学》，张卜天译，北京：商务印书馆，2020年，第90页。 [↑](#footnote-ref-115)
116. Hall M B. Robert Boyle on Natural Philosophy: An Essay with Selections from His Writings. Bloomington, London: Indiana University Press, 1966. [↑](#footnote-ref-116)
117. Hunter M, Davis E(eds.). The Works of Robert Boyle. Vol.2. London: Pickering, 1999: 20-21. [↑](#footnote-ref-117)
118. Agassi J. The Very Idea of Modern Science: Francis Bacon and Robert Boyle. Dordrecht: Springer, 2013. [↑](#footnote-ref-118)
119. Sargent R M. Learning from experience: Boyle’s construction of an experimental philosophy. Hunter M(ed.). Robert Boyle Reconsidered. Cambridge: Cambridge University Press, 1994: 57-78. [↑](#footnote-ref-119)
120. Hall M B. Robert Boyle on Natural Philosophy: An Essay with Selections from His Writings. Bloomington, London: Indiana University Press, 1966. [↑](#footnote-ref-120)
121. [荷]H. 弗洛里斯·科恩：《世界的重新创造：近代科学是如何产生的》，张卜天译，长沙：湖南科学技术出版社，2012年，第175页。 [↑](#footnote-ref-121)
122. [荷]H. 弗洛里斯·科恩：《世界的重新创造：近代科学是如何产生的》，张卜天译，长沙：湖南科学技术出版社，2012年，第175页。 [↑](#footnote-ref-122)
123. 转引自[美]玛格丽特·J. 奥斯勒：《重构世界：从中世纪到近代早期欧洲的自然、上帝和人类认识》，张卜天译，长沙：湖南科学技术出版社，2012年，第178页。原文出自Isaac Newton, Opticks; or, A Treatise of the Reflections, Refractions, Inflections & Colours of Light, repr. from the 4th ed. (1730), with a foreword by Albert Einstein, introduction by Sir Edmund Whittaker, and preface by I. Bernard Cohen, New York: Dover, 1952: 375-376. [↑](#footnote-ref-123)
124. [美]理查德·韦斯特福尔：《近代科学的建构：机械论与力学》，张卜天译，北京：商务印书馆，2020年，第170页。 [↑](#footnote-ref-124)
125. [美]理查德·韦斯特福尔：《近代科学的建构：机械论与力学》，张卜天译，北京：商务印书馆，2020年，第170页。图8.1对毛细吸引力的测量。 [↑](#footnote-ref-125)
126. [法]亚历山大·柯瓦雷：《牛顿研究》，张卜天译，北京：商务印书馆，2016年，第16-17页。 [↑](#footnote-ref-126)
127. [英]牛顿：《自然哲学之数学原理》(彩图珍藏版)，王克迪译，北京：北京大学出版社，2018年，序言第3-6页。 [↑](#footnote-ref-127)
128. [美]埃德温·阿瑟·伯特：《近代物理科学的形而上学基础》，张卜天译，北京：商务印书馆，2018年，第210—211页。 [↑](#footnote-ref-128)
129. [美]埃德温·阿瑟·伯特：《近代物理科学的形而上学基础》，张卜天译，北京：商务印书馆，2018年，第225页。 [↑](#footnote-ref-129)
130. [法]亚历山大·柯瓦雷：《牛顿研究》，张卜天译，北京：商务印书馆，2016年，第16页。 [↑](#footnote-ref-130)
131. 牛顿留下了大量的炼金术手稿。1936年之前，牛顿的这些手稿未曾公开，也没有被科学史家用于研究。1936年，封存200多年的牛顿炼金术与神学手稿于英国索斯比拍卖行被公开拍卖。凯恩斯是其最大的买主之一。他为牛顿的这些手稿分类编号。其中Keynes MS18是他为牛顿的某一手稿材料所编的号。之后，科学史家针对这些手稿展开相关研究。 [↑](#footnote-ref-131)
132. Dobbs B J T. The Foundation of Newton’s Alchemy, or, “The Hunting of the Greene Lyon”. Cambridge: Cambridge University Press, 1975:230. [↑](#footnote-ref-132)
133. Newman W R，Principe L M. Alchemy Tried in the Fire: Starkey, boyle, and the Fate of Helmontian Chymistry. Chicago: University of Chicago Press, 2002: 91-155. [↑](#footnote-ref-133)
134. Hall M B. Robert Boyle and the Seventeenth-Century Chemistry. Cambridge: Cambirdge University Press, 1958. [↑](#footnote-ref-134)
135. 袁江洋：《牛顿的炼金术：高贵的哲学》，《自然科学史研究》，2004年第4期，第288-289页。 [↑](#footnote-ref-135)
136. Newton I. Cohen I B, Whitman A.ed.The Principia: Mathematical Principles of Natural Philosophy..Berkeley: University of California Press,1999: 795(note bb). [↑](#footnote-ref-136)
137. Dobbs B J T. The Foundation of Newton’s Alchemy, or, “The Hunting of the Greene Lyon”. Cambridge: Cambridge University Press, 1975: 228. [↑](#footnote-ref-137)
138. 牛顿：《自然哲学之数学原理·宇宙体系》，王克迪译，武汉：武汉出版社，1992年。 [↑](#footnote-ref-138)
139. 袁江洋：《牛顿的炼金术：高贵的哲学》，《自然科学史研究》，2004年第4期，第294-295页。 [↑](#footnote-ref-139)
140. 牛顿：《光学》，周岳明等译，北京：科学普及出版社，1988年。 [↑](#footnote-ref-140)
141. 转引自袁江洋：《牛顿的炼金术：高贵的哲学》，《自然科学史研究》，2004年第295页。原文出自Newton I. The Correspondence of Isaac Newton. vol.3, 1688-1694. Turnbull H W. Cambridge: Cambridge University Press, 1961: 205-212. [↑](#footnote-ref-141)
142. Dobbs B J T. Newton’s Alchemy and his theory of matter. Isis, 1982, 73(269): 311. [↑](#footnote-ref-142)
143. Hooke R. Micrographia. London, 1665(2005): S.15. [↑](#footnote-ref-143)
144. [荷]H. 弗洛里斯·科恩：《世界的重新创造：近代科学是如何产生的》，张卜天译，长沙：湖南科学技术出版社，2012年，第185页。 [↑](#footnote-ref-144)
145. 转引自[荷]H. 弗洛里斯·科恩：《世界的重新创造：近代科学是如何产生的》，张卜天译，长沙：湖南科学技术出版社，2012年，第185页。出自Herry J. Robert Hooke, the incongruous mechanist//Hunter M, Schaffer S(eds.). Robert Hooke. New Studies. Woodbridge 1989: 151. [↑](#footnote-ref-145)
146. [荷]H. 弗洛里斯·科恩：《世界的重新创造：近代科学是如何产生的》，张卜天译，长沙：湖南科学技术出版社，2012年，第185-186页。 [↑](#footnote-ref-146)
147. [荷]H. 弗洛里斯·科恩：《世界的重新创造：近代科学是如何产生的》，张卜天译，长沙：湖南科学技术出版社，2012年，第186页。 [↑](#footnote-ref-147)
148. 转引自[荷]H. 弗洛里斯·科恩：《世界的重新创造：近代科学是如何产生的》，张卜天译，长沙：湖南科学技术出版社，2012年，第186页。出自Westfall R S. Never at Rest: A Biography of Isaac Newton. Cambridge: Cambridge University Press, 1980: 307. [↑](#footnote-ref-148)
149. 转引自[荷]H. 弗洛里斯·科恩：《世界的重新创造：近代科学是如何产生的》，张卜天译，长沙：湖南科学技术出版社，2012年，第187页。出自Newton I. The Correspondence. Vol.1. 1661-1675. Cambridge, 1959: 364. [↑](#footnote-ref-149)
150. [荷]H. 弗洛里斯·科恩：《世界的重新创造：近代科学是如何产生的》，张卜天译，长沙：湖南科学技术出版社，2012年，第187页。 [↑](#footnote-ref-150)
151. [英]罗布·艾利夫：《牛顿新传》，万兆元译，南京：译林出版社，2015年，第88-91页。 [↑](#footnote-ref-151)
152. [英]罗布·艾利夫：《牛顿新传》，万兆元译，南京：译林出版社，2015年，第91-94页。 [↑](#footnote-ref-152)
153. [荷]H. 弗洛里斯·科恩：《世界的重新创造：近代科学是如何产生的》，张卜天译，长沙：湖南科学技术出版社，2012年，第193页。 [↑](#footnote-ref-153)
154. [澳]约翰·A. 舒斯特：《科学史与科学哲学导论》，安维复主译，上海：上海科技教育出版社，2013年，第409页。 [↑](#footnote-ref-154)
155. [澳]约翰·A. 舒斯特：《科学史与科学哲学导论》，安维复主译，上海:上海科技教育出版社，2013年，第410页。 [↑](#footnote-ref-155)
156. [澳]约翰·A. 舒斯特：《科学史与科学哲学导论》，安维复主译，上海:上海科技教育出版社，2013年，第415页。 [↑](#footnote-ref-156)
157. Manuel F E. A Portrait of Isaac Newton. London: Frederick Muller Limited. 1980: 23-35. [↑](#footnote-ref-157)
158. [澳]约翰·A. 舒斯特：《科学史与科学哲学导论》，安维复主译，上海：上海科技教育出版社，2013年，第420-422页。 [↑](#footnote-ref-158)
159. [澳]约翰·A. 舒斯特：《科学史与科学哲学导论》，安维复主译，上海：上海科技教育出版社，2013年，第422页，图22.4。 [↑](#footnote-ref-159)
160. [澳]约翰·A. 舒斯特：《科学史与科学哲学导论》，安维复主译，上海：上海科技教育出版社，2013年，第422页。 [↑](#footnote-ref-160)
161. [澳]约翰·A. 舒斯特：《科学史与科学哲学导论》，安维复主译，上海：上海科技教育出版社，2013年，第423-424页。 [↑](#footnote-ref-161)
162. [澳]约翰·A. 舒斯特：《科学史与科学哲学导论》，安维复主译，上海：上海科技教育出版社，2013年，第424页。 [↑](#footnote-ref-162)
163. [澳]约翰·A. 舒斯特：《科学史与科学哲学导论》，安维复主译，上海：上海科技教育出版社，2013年，第429页。 [↑](#footnote-ref-163)
164. Henry J. A Short History of Scientific Thought. New York: Palgrave Macmillan, 2012: 150. [↑](#footnote-ref-164)
165. 牛顿的这篇论文当时没有通过英国皇家学会的审稿，理由是皇家学会拒绝这种仅仅基于想象猜测的假设性解释的东西，而强调处理不可否认的事实。他们想让所有人相信，他们只强调事实，拒绝“假说”。牛顿并不知道这一点，从而造成投稿后被拒的结果。 [↑](#footnote-ref-165)
166. 转引自Henry J. A Short History of Scientific Thought. New York: Palgrave Macmillan, 2012: 154. [↑](#footnote-ref-166)
167. Westfall R S. Never at Rest: A Biography of Isaac Newton. Cambridge: Cambridge University Press, 1980. [↑](#footnote-ref-167)
168. 转引自[美]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16-17页。 [↑](#footnote-ref-168)
169. Schlagel R H. Three Scientific Revolutions: How They Transformed Our Conceptions of Reality. New York: Humanity Books, 2015: 62-63. [↑](#footnote-ref-169)
170. 转引自Henry J. A Short History of Scientific Thought. New York: Palgrave Macmillan, 2012: 153. [↑](#footnote-ref-170)
171. Henry J. A Short History of Scientific Thought. New York: Palgrave Macmillan, 2012: 151. [↑](#footnote-ref-171)
172. [美]埃德温·阿瑟·伯特：《近代物理科学的形而上学基础》，张卜天译，北京：商务印书馆，2018年，第21页。 [↑](#footnote-ref-172)
173. [美]埃德温·阿瑟·伯特：《近代物理科学的形而上学基础》，张卜天译，北京：商务印书馆，2018年，第20页。 [↑](#footnote-ref-173)
174. 转引自Henry J. A Short History of Scientific Thought. New York: Palgrave Macmillan, 2012: 152. [↑](#footnote-ref-174)
175. [美]埃德温·阿瑟·伯特：《近代物理科学的形而上学基础》，张卜天译，北京：商务印书馆，2018年，第219—220页。 [↑](#footnote-ref-175)
176. 转引自[英]戴维·伍顿：《科学的诞生：科学革命新史》(上册)，刘国伟译，北京：中信出版社，2018年，第421页。 [↑](#footnote-ref-176)
177. [英]戴维·伍顿：《科学的诞生：科学革命新史》(上册)，刘国伟译，北京：中信出版社，2018年，第423-425页。 [↑](#footnote-ref-177)
178. Henry J. A Short History of Scientific Thought. New York: Palgrave Macmillan, 2012: 166, Box 14.2. [↑](#footnote-ref-178)
179. [法]拉瓦锡：《化学基础论》，任定成译，北京：北京大学出版社，2008年，“序”第4页。 [↑](#footnote-ref-179)
180. [法]拉瓦锡：《化学基础论》，任定成译，北京：北京大学出版社，2008年，第46页。 [↑](#footnote-ref-180)
181. [法]拉瓦锡：《化学基础论》，任定成译，北京：北京大学出版社，2008年，导读第11页。 [↑](#footnote-ref-181)
182. 转引自[美]托马斯·L. 汉金斯：《科学与启蒙运动》，任定成、张爱珍译，上海：复旦大学出版社，2000年，第111页。 [↑](#footnote-ref-182)
183. [美]科恩：《科学中的革命》(新译本)，鲁旭东、赵培杰译，北京：商务印书馆，2017年，第349页。 [↑](#footnote-ref-183)
184. [美]科恩：《科学中的革命》(新译本)，鲁旭东、赵培杰译，北京：商务印书馆，2017年，第349页。 [↑](#footnote-ref-184)
185. Siegfried R. Lavoisier and the phlogistic connection. Ambix, 1989, 36(1): 31-40. [↑](#footnote-ref-185)
186. 任定成：《论氧化说与燃素说同处于一个传统之内》，《自然辩证法研究》，1993年第8期，第30-35页。 [↑](#footnote-ref-186)
187. Holmes F. The "Revolution in Chemistry and Physics": overthrow of a reigning paradigm or competition between contemporary research programs? . Isis, 2000，91(4):735-753. [↑](#footnote-ref-187)
188. 冯翔、袁江洋：《判决性检验：拉瓦锡化学革命研究》，北京：科学出版社，2015年，第90-92页。 [↑](#footnote-ref-188)
189. Klein U. A Revolution that never happened. Studies in History and Philosophy of Science, 2015, 49: 80-90. [↑](#footnote-ref-189)
190. [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157页。标题为笔者所加。 [↑](#footnote-ref-190)
191. 普鲁塔克是西方史学史上第一个具有明确、自觉的比较意识，并成功地将比较方法运用到历史研究的史学家。他在《亚历山大传》第一章里比较了历史与传记的基本区别，并进一步认为，历史叙述人民与英雄的业迹，而传记则描写人物的性格。 [↑](#footnote-ref-191)
192. 转引自[法]亚历山大·柯瓦雷：《牛顿研究》，张卜天译，北京：商务印书馆，2016年，第70-71页。原文出自：Monsieur de Fontenelle. The Elogium of Sir Isaac Newton//I. B. Cohen(Ed.). Isaac Newton’s Papers and Letters on Natural Philosophy. Cambridge: Harvard University Press, 1958: 457-45. [↑](#footnote-ref-192)
193. [法]亚历山大·柯瓦雷：《牛顿研究》，张卜天译，北京：商务印书馆，2016年，第71-72页。 [↑](#footnote-ref-193)
194. [美]理查德·韦斯特福尔：《近代科学的建构：机械论与力学》，张卜天译，北京：商务印书馆，2020年，第165页。 [↑](#footnote-ref-194)
195. [美]理查德·韦斯特福尔：《近代科学的建构：机械论与力学》，张卜天译，北京：商务印书馆，2020年，第165页。 [↑](#footnote-ref-195)
196. [荷]H. 弗洛里斯·科恩：《世界的重新创造：近代科学是如何产生的》，张卜天译，长沙：湖南科学技术出版社，2012年，第209页。 [↑](#footnote-ref-196)