

学校的理想装备

电子图书·学校专集

校园网上的最佳资源

世界近代中期科技史


e-BOOK
内部资料 非卖品

内容提要

近代中期是人类历史上的一个伟大时代，随着资产阶级革命在西方各国取得的胜利、工业革命的风暴，科学技术也得到了迅速发展。本书介绍了经典力学、物理学、天文学、数学、化学、地质学、生物学等基础科学在西方的发展情况，介绍了各学科中的代表人物及其成就，同时也介绍了以蒸汽动力技术为主体的技术科学的发展情况，说明了这时期科学技术的发展对于后世科学技术发展的影响。对于这一时期中国科学技术的发展以及落后的原因，本书也进行了介绍和探讨。

一、概 述

世界近代中期，在西方指的是 1640 年英国资产阶级革命至 1812 年维也纳体系的建立时期，在中国指的是鸦片战争以前的清朝。

从 15 世纪下半叶到 18 世纪末，是人类历史上一个极其伟大的时代。在这个时期，资本主义成长壮大并取得了胜利，新兴资产阶级为取得自己的统治地位进行了不屈不挠的斗争。在这场斗争中，首先是以新文化运动来反对封建主义的意识形态，其中包括用科学的力量反对宗教。14 世纪至 16 世纪末的文艺复兴就是新兴的资产阶级反对神权统治、宗法制度、禁欲主义和蒙昧主义的一场激烈的、深刻的思想较量，它对于解放人们的思想具有极为重要的意义，也为自然科学的进步鸣锣开道，扫除障碍。近代自然科学正是在这场斗争中为自己争得了独立的地位，并有了自己独立的实践基础——科学实验，从此以后，自然科学就取得了系统的、日益迅速的发展，进入了近代自然科学蓬勃发展的新时期。

英国资产阶级革命扫荡了科学技术发展道路上的障碍，同时，英国的大学教育、科学社团以及英国皇家学会等对英国近代科学的发展也起了很大作用，因此，这一时期的早期以英国的科学技术发展最为兴隆，并带动了整个西方科学技术的发展。以后，法国的近代科学也开始发展起来，随着科学社团及巴黎科学院的成立，到 18 世纪中纪，法国近代科学出现了繁荣的局面，而源于近代科学的法国启蒙运动和哲学思潮又推动了法国的科学进程，法国大革命之后的国民政府和拿破仑的统治又为科学的发展提供了一个轻松的环境，使得法国在实验科学、技术科学和应用科学方面在 18 世纪末与 19 世纪初成为处于领先地位的国家。德国近代科学虽说发展较晚，但也产生了莱布尼茨、康德、拉格朗日等一大批具有成就的科学家，同时兴起的自然哲学思潮也对德国 18 世纪末及 19 世纪科学技术的发展产生了极其重大的影响。即使是在殖民地的北美，也出现了像富兰克林这样成就卓著的科学家。这一时期的中国虽有近代科学的萌芽，但却由于专制统治以及闭关政策，使得中国科学技术仍然停留在古代科学技术发展的老路上，并没有突破中国传统科学结构的局限，因此在科学技术的发展过程中被远远地抛在了后面。

牛顿力学的形成是这一时期所取得的最重大的科学成就，它是人类认识自然历史上的第一次大飞跃和理论大综合，并对以后科学的发展产生了极为重大的影响。

二、牛顿和经典力学体系的建立

1. 牛顿的青少年时代

牛顿（1642~1727年），出生在英国中东部林肯郡的格兰瑟姆镇附近的沃尔索普小村庄，在他出生的前两个月，他的父亲去世，牛顿成为一个遗腹子。当牛顿还不满两岁时，他的母亲嫁给一个牧师，牛顿只能靠他的外祖母和舅舅抚养。牛顿刚满六岁时，他的外祖母即把他送进镇公立小学，12岁时，牛顿考入镇文科中学。

在英国资产阶级革命以后，中小学教育也有了相应的改革，已经开始进行现代科学的启蒙教育，这些科学启蒙教育主要包括手工制作和一些初步实验。少年牛顿开始表现出对机械发明有明显的兴趣，他造了一架水钟、一个风磨，由坐在里面的人驱动着车子和其他玩具。这种科学的启蒙教育，显然使牛顿受到了最初的科学熏陶。

对于英国近代科学史来说，17世纪60年代是值得纪念的年代。尽管由于斯图亚特王朝的复辟，暴风骤雨式的资产阶级大革命已经成为过去，但是，科学本身并没有停止前进的步伐。在60年代初，英国近代科学史上出现了两件值得纪念的大事，其一，在格雷山姆学院的基础上，英国皇家学会于1660年筹建，1662年正式创立。从此，英国出现了一个富有生命力的新的科学团体。其二，青年牛顿带着成为占星术士的梦想，于1661年6月考入剑桥大学三一学院。

剑桥大学位于伦敦北部远郊的剑桥镇。早在1209年，人们就在这里创建了这所大学。剑桥大学虽然比牛津大学建校要晚，但自文艺复兴运动兴起以后，逐渐以数学和自然科学的教学与研究著称。特别是英国数学家巴罗（1630~1677年）执教于剑桥大学之后，进一步加强了剑桥大学的这种发展趋向。

牛顿进入剑桥大学后，因家境困难，所以只得当工作减费生，即边学习、边打杂，同时还得侍候富家子弟，这样可减收学费，而且还可以免费供应午餐。正是在这种困顿的环境中，牛顿开始了他的大学生涯。

从一个农民的遗腹子到一个剑桥大学的减费生，这些家庭的不幸与社会的不平虽然在牛顿的青少年时代投下了阴影，但也砥砺了他的求知欲与探索精神。这种欲望与精神无疑是使牛顿后来成为科学巨人的重要因素。

在剑桥大学学习初期，牛顿开始广泛地阅读和研究哥白尼、刻卜勒、伽利略、笛卡尔、费尔玛、华里斯和培根等人的天文学、力学、光学、数学和哲学著作。特别是刻卜勒的天文学与光学著作，笛卡尔的数学与哲学著作，对青年时代的牛顿产生了深刻的影响。

1664年，牛顿大学毕业，被选拔为三一学院的研究生。同年，牛顿又经过考试被选为巴罗教授的助手。但是从第二年年年初开始，一场大瘟疫席卷英国。1665年夏，仅伦敦一地就有3万人死于瘟疫。人们纷纷逃离城市，躲到乡下。消息传到剑桥，师生一逃而空，牛顿也因此回到老家。

回到乡村之后，牛顿开始进行多学科的研究，他一面阅读和研究包括刻卜勒的《论火星的运动》在内的许多科学名著，一面进行潮汐、落体、透镜等现象的观察。与此同时，他还任在天文学和数学的研究中，着重研究了当时人们极为关注的瞬时速度问题和曲线的切线问题。从1665年8月到1667年

3月，在乡下不到两年的时间里，牛顿孕育了一系列重大科学发现的萌芽：万有引力、光的色散现象、微积分。虽然这些科学思想的萌芽直到后来才完全成熟，但他们的种子正是在这一时期萌发的。也正是从这里开始，青年牛顿正式踏上了他的伟大科学航程。而早期近代科学的面貌，也即将由此而焕然一新。

1667年3月，牛顿回到剑桥，获硕士学位，同年即被选为三一学院的研究员。在巴罗教授之后，1669年，年仅28岁的牛顿成为剑桥卢卡斯讲座（剑桥大学三一学院1663年创办的专以自然科学为基本内容的讲座，巴罗为首任数学教授）的第二任首席数学教授。从1670年起，牛顿正式开课，根据剑桥大学对卢卡斯讲座的教学内容的规定，牛顿主讲的的教学内容是光学、数学和力学。牛顿并不善于教学，一方面可能因为他讲授的内容过于高深，而学生们首要关心的是那些能很快给自己带来功利的课程；另一方面也可能因为他的教学不甚生动，据说牛顿曾为此在教学内容的通俗化和教学方法的生动性方面下过功夫，但收效甚微。同时，牛顿曾以做教学广告的方法来招揽学生，但来听他课的学生仍是甚少。虽然他并不是成功的教员，但在解决疑难问题方面，却远远超过别人。

2. 万有引力定律

(1) 万有引力定律的发现

牛顿1666年初回故乡逃避瘟疫，在研究刻卜勒的行星运动三定律的基础上，着重研究过刻卜勒的天体引力思想，使牛顿产生了万有引力思想的最初萌芽。

刻卜勒的行星运动三定律对行星环绕太阳的运行作了定性与定量的描述。正是在行星运动三定律的论证中，刻卜勒继承和发展了吉尔伯特的以磁力为基础的天体引力理论。刻卜勒的这一引力理论最初见于他在1609年发表的《论火星的运动》一书中，后来又集中地反映在他于1619年发现的行星运动第三定律及其有关论述中。可是，刻卜勒行星运动三定律只能说明行星在怎样运动，而不能说明行星为什么这样运动。这样，进一步探索天体运动的力学规律，特别是进一步探索天体运动的力学原因也就成为摆在数理天文学家面前的新课题。刻卜勒提出了这一问题，但他未能最终解决这一问题。

在研究刻卜勒的行星运动三定律的同时，牛顿也研究了伽利略的惯性原理和落体定律。伽利略的惯性原理和落体定律，可以说是最早用原理和公式描述出来的地上物体的运动规律。在研究伽利略的运动力学理论之后，牛顿感到，伽利略与刻卜勒一样，虽然说明了地上的物体在怎样运动，而不能说明它们为什么这样运动。因此，进一步探索地面物体运动的力学原因，也是当时的力学家所面临的新课题。伽利略提出了这一问题，但他未能最终解决这一问题。

在研究刻卜勒的行星运动三定律与伽利略的惯性原理和落体定律的基础上，牛顿试图寻求天上的天体运动与地面的物体运动的统一的力学原因。为此，牛顿对天体的力学现象与地面的力学现象进行了广泛的观察与思考。据说苹果落地的现象曾给他以思考这一问题的灵感，这个故事是一个未经证实的故事：据说牛顿正坐在一棵苹果树下思考地球的引力问题，这时刚好有个苹果从树上掉下来，这一现象使牛顿立即想到了万有引力。这则轶事是伏尔

泰（1694～1778年）在1730年访问英国时听说的，此后这则轶事就带着传说的色彩传遍世界。但真正把牛顿引向万有引力定律的，却是刻卜勒的天体力学与伽利略的地面力学在相互综合过程中所产生的理论思维力量。在试图从刻卜勒的天体力学与伽利略的地面力学中寻求世界的统一的力学原因时，牛顿曾设想了一个理想实验，站在一个很高的塔顶上，向与地面平行的方向抛射出一块石子，那么这块石子必然呈抛物线下落，而下落的原因，正是出于地球的引力。如果塔顶无限高，石子被抛射的速度愈快，它就射得愈远。这时石子下落的抛物线曲率也就会愈来愈接近地球的曲率。当抛射速度达到一定的速度，石子就会像月球那样环绕地球运行。

牛顿的这一理想实验，伽利略在《关于托勒密和哥白尼两大世界体系的对话》中也曾设想。也许牛顿正是从伽利略的这一理想实验中得到了最初的启发。所不同的是，伽利略局限于地面物体的力学现象，未能把地球的引力引向月球的运行轨道及其力学原因，而牛顿在这一相同的理想实验中，却把地球的引力从地面物体的力学现象引伸到天上物体的力学现象，认识到月球环绕地球运行的作用力，正是来源于地球的引力，“如果没有这样一种力的作用，月球就不能保持在它的轨道上运动。如果这种力太小，就不足以使月球偏离它的直线运动，如果这种力太大，就会使它偏离太大而把它从轨道上拉下而落向地球。这种力必须大小相当，而数学家的任务就是要找出这种正好能使一个物体在一定轨道上以一定速度运行的力”。在认识到月球环绕地球运行的作用力来源于地球的引力之后，牛顿随即想到，行星环绕太阳运行的作用力，同样来源于太阳的引力。

能把力学视野从地面延伸到天上，并随之寻求地面物体运动与天上物体的统一力学原因，这正是牛顿高于伽利略的地方。

牛顿的理想实验虽然只是一种设想中的理想实验，但它却是立足于实实在在的在地面和天体的力学现象基础之上的。而这些力学现象又根基于伽利略的地面力学与刻卜勒的天体力学成果之中。正是在综合刻卜勒与伽利略两人的力学成果的基础上，终于使牛顿在1666年产生了万有引力思想的萌芽。

有了万有引力思想的萌芽之后，牛顿即在同年着手进行力学计算，以验证他的引力理论。他根据刻卜勒的行星运动第三定律，初步计算出了行星所以能在轨道上绕日运动的引力定律，即引力的平方反比定律： $F = \frac{1}{r^2}$ 。

这一定律说明，“使行星保持在它们轨道的力，必定要和它们与它们绕之而运行的中心之间的距离的平方成反比例”¹。

为了证实引力平方反比定律的正确性，牛顿以月球绕地球的运行为例进行了计算。当时，月球的大小、速度、轨道半径已被观测出来。这样就可以先计算出月球在轨道上的向心力。然后，再根据引力的平方反比定律计算出地球对月球的引力，亦即地表的重力。如果月球的向心力与地球的引力两者相等，那就说明月球的向心力确实来自于地球的引力。这样，引力的平方反比定律即可由此得到验证，而关于地面物体运动与天上物体运动的统一力学原因的万有引力，也同样可由此得到证实。

牛顿相信他的证实万有引力的方法是正确的，可是，当他完成一系列的计算之后，在把使月球保持在它轨道上所需的力和地球表面的重力进行比较

¹ [美]H. S. 塞那：《牛顿自然哲学著作选》，上海人民出版社1974年版。

时，发现两者只是近似相等。因此牛顿在返回剑桥大学之后，未敢发表他的理论，甚至也未敢声张他的发现。

1673年，荷兰著名科学家惠更斯（1629~1695年）根据摆的运动实验与圆周运动实验，推算出了向心力定律，向心加速度公式 $a = \frac{V^2}{R}$ 。牛顿研究了惠更斯的向心力定律之后，感到它很像自己的引力平方反比定律的一个推论。为此，牛顿再次着手进行万有引力定律的研究。

1683年，牛顿的好友、著名天文学家哈雷（1656~1743年）在研究刻卜勒的行星运动第三定律时，也发现了向心力的平方反比定律，不过他证明不出来。因此，哈雷在与胡克（1635~1703年）、格雷山姆学院的天文学教授雷恩（1632~1723年）的一次聚会中，将这一问题提了出来。当时，胡克与雷恩都在研究引力问题。所以胡克当即表示，他能证明月球的向心力与地球的引力关系。可是，哈雷和雷恩在看了胡克的证明之后，都对胡克的证明不满意。哈雷表示要继续寻求新的科学证明。

与此同时，牛顿在万有引力定律的研究中取得重大进展。其一，他积极吸取了当时最新的天文观测成果。1682年，法国天文学家皮卡特（1620~1682年）对地球半径进行了精确的测算，这就使牛顿获得了他所急需的地球半径的精确数据，以便克服由原来地球半径数据不精确所造成的计算中的误差。其二，他对原来的计算方法进行了重大改革，把地球与月球同时看作力学中的两个质点。

在取得上述两大进展的基础上，牛顿又进行了一系列新的计算。结果发现，月球对地球的向心力与地球对月球的引力相等。这一发现证明，月球在轨道上的向心力，确实来自地球的引力。这样，万有引力定律：

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

也才算真正发现了。其中 m_1 和 m_2 为两个质点的质量， r 为两个质点之间的距离， G 为引力常数。牛顿在确立万有定律公式时，已明确了引力常数的存在，不过他当时未能确定引力常数的精确值。直到1798年，英国著名的物理学家和化学家卡文迪许（1731~1810年）才运用他的精巧的扭秤实验，测出这一常数的精确值为 6.67×10^{-8} 达因·厘米²·克⁻²。

从1666年萌芽，到1683年结束，经过长达17年的努力，地面物体运动与天上物体运动的统一力学原因，终于被牛顿发现了。

由于万有引力定律的发现，牛顿实际上已经解决了两个天体在相互引力作用的运动力学问题，即二体问题。根据万有引力定律，两个在相互引力作用下的天体，当他们相互之间的距离远远大于他们的直径时，这两个天体就可以被看作两个质点。这样，天体力学中的最基本的二体问题，也就由于万有引力定律的发现而得到了完全的解决。

牛顿发现万有引力定律并解决二体问题之后，并没有立即发表他的成果。1683年，当哈雷因不满意胡克对引力定律的数学证明时，才到剑桥大学去找牛顿商讨这一问题。这时，牛顿才向哈雷透露，他已经解决了引力定律的证明问题。与此同时，牛顿还向哈雷作了关于万有引力证明的简要说明。1684年，牛顿在剑桥大学作了题为《论天体运动》的公开讲演，万有引力定律的发现才首次公之于众。同年年底，当牛顿开始写作他的《自然哲学的数学原理》时，即把万有引力定律写入这一著作之中。

万有引力定律的发现，给经过刻卜勒修正了的哥白尼的日心学说，特别是给刻卜勒的行星运动定律提供了天体力学的理论基础。如果说，刻卜勒的行星运动定律只是近似地描述了行星的力学定律，那么牛顿的万有引力定律则进一步揭示出了行星运动规律的力学原因。正是在万有引力定律的基础上，牛顿扩展了刻卜勒的行星运动第一定律，论证了他的第二定律，修正和发展了他的第三定律。这样，就不仅使得行星运动的力学规律进一步被揭示出来，而且使从哥白尼到刻卜勒的日心学说获得了严密的理论基础。从哥白尼开始的近代天文学革命经历 140 年的发展，由于牛顿的万有引力定律的发现和论证，也就达到了一种基本完成。

万有引力定律的发现，还给从地面到天体的所有物体运动提供了统一的力学图景，揭示了统一的力学原因。从苹果落地到潮汐现象，从抛物运动到行星运动，原来都遵从统一的力学规律，出于统一的力学原因。特别是以前刻卜勒无法解释的行星的椭圆轨道、行星在椭圆轨道上的不匀速现象，运用万有引力定律都可进行成功的解释。根据万有引力定律，著作圆周运动的线速度大到一定的值时，轨道必然变成椭圆，而行星的线速度所以是非匀速的，乃是因为在近日点时，引力增大，因此速度加快；而在远日点时，引力减小，所以线速度则相应变慢。

牛顿在运用万有引力定律对行星轨道进行力学分析时发现，行星轨道并非标准椭圆轨道，而其中有失调现象。牛顿根据这一发现推测，行星的椭圆轨道所以失调，其原因在于：行星在其运行中除了受到主要来自太阳的引力之外，可能还受到了来自行星之间的引力作用。因此，在研究某一行星的运动规律时，除了太阳对这一行星的引力之外，还应考虑到别的行星对这一行星的引力作用。这就是牛顿以他的万有引力定律为基础，在近代天体力学奠基时期提出的著名的“三体问题”，即三个天体之间的引力作用问题。

三体问题是一个极其复杂的数学力学问题。就一定的意义而言，提出问题往往比解决问题更重要。因为这一问题的提出，使人们开始看到行星轨道失调的原因，开始激起进一步探索行星运动规律的兴趣。正是在牛顿提出的三体问题的影响下，法国数学家和天文学家拉格朗日(1736~1813年)在 1772 年前后对三体问题进行了新的研究，并给予了最初的解释。此后，法国天文学家拉普拉斯(1749~1827年)在 1799 年进一步提出了行星摄动理论。而行星摄动理论的提出，又导致了后来海王星等新行星的发现。

万有引力定律发现之后，哈雷立即把这一定律运用到天体力学的有关计算之中。1682 年，哈雷发现一颗慧星。他运用万有引力定律对这颗慧星的轨道进行了计算，发现这颗慧星的轨道与 1607 年和 1531 年出现的慧星轨道相似。根据史料分析，哈雷认为这颗慧星是一颗周期慧星，其回归周期约为 76 年。哈雷因此断言，这颗慧星将于 1758 年至 1759 年间再度回归。后来这颗慧星果然在 1758 年 12 月 15 日再度回归，这就是著名的周期慧星哈雷慧星。哈雷慧星的发现，首次证实了万有引力定律的正确性。

由于万有引力定律的发现，同时也由于二体问题的解决与三体问题的提出，天体力学这门介于天文学与力学之间的新兴边缘科学，也就由牛顿奠定了牢固的基础。直至今日，从人造卫星到宇宙飞船的运行轨道研究与设计，牛顿的万有引力定律仍然是主要的天体力学基础。

(2) 万有引力发现的居先权之争

争论的开始。1693年，英国皇家学会的百余名会员云集伦敦，举行一年一度的年会。这是皇家学会创立以来的第31届年会。同以往的年会一样，会员们各自报告了一年来在科学研究中所取得的新成果。

在本届年会即将结束时，皇家学会总干事、年近六十的老会员胡克发表了一项重要声明。胡克在这项声明中说，引力的平方反比定律是他首先发现的，而牛顿剽窃了他的成果。声明指出，牛顿在《自然哲学的数学原理》（以下简称《原理》）一书中，把引力的平方反比定律的发现完全归功于自己，这是不公正的。胡克的声明引起了与会者的思想混乱。

本来，根据皇家学会的要求，牛顿早在1684年11月至12月间即开始写作《自然哲学的数学原理》，并在1685年夏完成了第一卷，1686年，牛顿又完成了第二卷，并开始写作第三卷。1686年春，当牛顿向皇家学会提交第一卷后，却未能在当年出版，其原因，一是皇家学会凑不出足够的出版经费；二是皇家学会总干事胡克对书中的引力的平方反比定律发现的居先权提出了异议，胡克认为，引力的平方反比定律是他首先发现的，正是他的发现引导牛顿发现了万有引力定律。但是牛顿在书稿中却对胡克的发现只字不提，因此，胡克不同意此书的出版。

《原理》在当年未能出版的后一个原因的内幕，牛顿开始并不知道。过了一段时间之后，哈雷才向牛顿透露了这一内幕。1686年5月22日，哈雷在给牛顿的信中说：“我应当告诉你一件事，就是胡克先生对于你的重力减小到中心的距离的平方成反比这个法则的发明还有一些要求。他说你是从他那里得到这个概念的。……胡克先生希望你在序言中稍微提到他一下。”这样，胡克就通过哈雷，向牛顿提出了万有引力发现的居先权之争。

对于胡克的提议，牛顿起初表现得比较克制，因为他对这位年长的科学家还是尊重的，牛顿在同年5月27日给哈雷回信时说：“感谢你写信给我，告诉关于胡克先生的一切。”又说，希望能与胡克之间“保持良好的了解。”由此看来，牛顿起初对胡克的提议并不在意。

但此后不久，当牛顿听说胡克在一次会议上说牛顿的引力平方反比定律是剽窃他的成果时，牛顿表示了愤慨，同年6月20日，牛顿在给哈雷的信中，驳斥了胡克对于万有引力发现居先权的要求。牛顿说，他再也不能宽恕这个粗鄙无能的胡克了，并指责胡克是想“要拿走步其后尘的以及走在他前面的人的所有发明。”由于愤慨，牛顿不想发表他的《原理》第三卷了。

哈雷接到信后，立刻回信牛顿，对牛顿进行了宽慰和劝导。哈雷说：“我衷心地感到歉疚。”又说：“在这全人类都应该向你表示感激的事件上，你竟碰到了使你不安的事情。……现在我必须再次恳求你，不要让你的怒火冲天，以致使我们失去你的第三卷。”

哈雷的宽慰和劝导使牛顿逐渐恢复了平静。牛顿在回信中表示了愿意和解的态度，并答应了哈雷的要求，加紧了《原理》第三卷的写作和修改。1687年4月6日，牛顿把《原理》的第三卷也提交给了皇家学会。

牛顿从1684年11月至12月间开始写作《自然哲学的数学原理》的第一卷，到1687年4月提交《原理》的第三卷，经过两年多的紧张工作，这部用拉丁文写作的三卷本科学巨著，终于全部脱稿了。

[英]斯蒂芬·F·梅森：《自然科学史》，上海译文出版社1980年版，第186页。

[英]J·K·斯科特：《数学史》，商务印书馆1981年版。

《原理》的三卷手稿全部提交给皇家学会之后，由于皇家学会一时凑不出足够的出版经费，同时由于胡克提出的万有引力发现居先权的争议，皇家学会无法出版。最后，哈雷慷慨解囊，于 1687 年 5 月资助出版了牛顿的这一著作。

可是，事过 6 年之后，胡克又提出了万有引力发现的居先权问题，这不能不使与会会员大为惊异，同时也使牛顿本人深感震惊。

争论的原因。胡克是 17 世纪中期的以天文学、力学、光学、生物学和化学等方面的成就著称的科学家。

胡克在力学中的建树，表现在他的力学实验中，胡克在 1659 年对格里凯抽气机进行了改革，并用这种抽气机协助化学家波义耳进行大气压力实验，使波义耳发现了大气的体积与压力成反比的定律，即著名的波义耳——马略特定律。此外，胡克还进行过弹性力学的实验研究。他在弹簧的应力实验基础上，发现弹性物体的应变与应力成正比的定律，即著名的胡克定律。这一定律虽然直到 1676 年才以字谜的形式陈述出来，并迟到 1678 年才以定律的形式发表出来，但胡克本人早在 1660 年发现了这一定律。

那么胡克对万有引力发现的居先权是否真实？这要从引力理论发展的历史源流来说。

17 世纪初，吉尔伯特发表《磁石论》，天体和地面物体运行的力学规律即已受到天文学家和物理学家的重视。吉尔伯特已试图运用磁力理论对天体运行的力学规律进行探讨。而伽利略的落体定律及其朦胧的引力观念、刻卜勒的行星运动的三定律及其最初的天体引力思想，事实上已分别在力学和天文学的领域内播下了万有引力定律的理论种子。

但是，在刻卜勒发现行星运动的第三规律和提出最初的天体力学理论后，他的理论思想在半个世纪之内未引起人们的充分重视。只是到了六十年代中期，人们才重新关注这一问题。在意大利、荷兰、英国、相继出现了一些引力问题的研究者。

1666 年，意大利物理学家博雷利（1608—1678 年）重新提出了刻卜勒的引力理论，博雷利是比萨大学的数学教授、佛罗伦萨实验学院的院士。他继承了伽利略的力学传统，同时吸取了刻卜勒的引力思想。博雷利在研究行星的运行轨道时认为，行星轨道之所以是椭圆轨道，是由两种相反的力合成的效果。其一是把行星吸向太阳的引力，其二是使行星离开太阳的离心力。这两种力合成之后，其运动就像用绳索系住石头后让它旋转一样。博雷利提出这一假设之后，未能对这一假说进行数学论证。但博雷利重新提出行星轨道的力学问题，说明研究引力理论的条件已经成熟了。

荷兰著名物理学家惠更斯在研究动力学的过程中，也研究了引力问题。1673 年，惠更斯发表了他的动力学著作《摆钟论》。在这一著作中，惠更斯论述了他所发现的向心力定律：即当一定量为 m 的物体以速度 V 在半径为 r 的圆上运动时，其向心力所产生的加速度 a 为 V^2/r 。向心力定律的发现传到英国后，直接推动了牛顿对万有引力定律的研究。

在英国，则出现了更多的热心的引力理论研究者，因为此时行星运动的引力问题已成为英国最吸引人的前沿科学问题。由于刻卜勒定律的影响，不少科学家都发现了太阳对于行星的引力，并且推测到这种引力随行星到太阳

的距离的平分成反比的变化。后来，由于惠更斯发现的向心力定律的影响，天文学家和物理学家进一步被吸引到引力问题的研究中，其中，牛顿、胡克、哈雷和雷恩便是试图攻下引力问题这一科学难关的最热心的代表人物。

胡克的引力问题研究是以伽利略的运动力学为基础的，胡克在研究中发现，如果用伽利略的惯性原理解释行星运动规律，必然要从力学理论上引出这样两个问题：其一，使行星轨道弯曲成圆或椭圆所需要的向心力；其二，证明太阳的引力提供了行星运动所需要的向心力。这两个问题都需要研究向心力或引力随两物间距离的变化而变化的规律。胡克正是从这一问题走向引力定律研究的。

1662年至1666年间，胡克根据他的上述推想，进行了一项试图探索引力随距离变化的引力实验，他在深井和高山上量得同一物体的重量，试图通过同一重物在与地心处于不同距离时的重量差，来求得引力随两物体之间的距离的变化规律。但实验没有成功，因为山的高度与地球的半径相比是微不足道的。

1664年，当雷恩在与胡克的一次聚会中商讨慧星的轨道问题时，胡克根据他当时对引力问题的研究，指出当慧星靠近太阳时，其轨道是弯曲的。而慧星轨道弯曲的原因，正是来自太阳的引力。

惠更斯在1673年发现向心力定律之后，为引力定律研究提供了新的理论借鉴。因为运用这一定律，即可以从刻卜勒的行星运动的第三定律直接推导出引力的平方反比定律。虽然惠更斯本人可以做到这一点，但他却未从理论上做出这一推导。

惠更斯的向心力传到英国之后，立即引起了牛顿、胡克、雷恩、哈雷等人的重视。1674年，胡克提出了关于引力的三条假设。第一，一切天体都有倾向自身中心的吸引力，这种力又作用于其他天体。因此，不仅太阳和月亮对地球的形状和运动发生影响，而且地球对太阳、月亮同样有影响，其他行星对地球的运动也都有影响，从而指出了引力作用的普遍性。第二，作直线运动的任何天体，在没有受到其他作用力使其偏斜之前，继续保持直线运动不变；受到其他力的作用时，它的直线轨道就会倾斜，沿椭圆、正圆轨道或某种复杂的曲线运动。这就找出了吸引力同天体运行轨道的联系。第三，物体离吸引中心越近，所受到的吸引力越大，具体数量关系尚待实验中解决。我们一旦知道了这个数量关系，就可以很容易地解决了天体运行的定律了。1680年初，他又明确地提出引力同距离平方成反比的思想。所以英国科学史专家贝尔纳认为，万有引力的基本概念是属于胡克的，但他缺乏牛顿那样的数学才能，所以没能明确地提出万有引力的公式。

在相继发现引力的平方反比定律之后，由于种种原因，胡克未能对引力的问题进行更深入的研究。只有牛顿以引力的平方反比定律的发现作为他研究万有引力定律的新的起点，向着万有引力定律的目标继续前进，并最终发现了万有引力定律。

发现引力的平方反比定律并不等于发现万有引力定律，这一点，胡克本人也是清楚的。在牛顿尚未发现万有引力定律之前，胡克曾在1679年写信给牛顿，问他能否根据向心力定律和引力的平方反比定律，证明行星运动是椭圆轨道运动。胡克不仅在这一信中提出了这个问题，而且指出了解决这一问题所在。胡克认为，证明中的最大困难，是如何把太阳和行星这样庞大的天

体质量，都看作好像是集中在它们各自的中心点来处理。显然，胡克的这一力学思想与力学方法，与牛顿后来在 1683 年所采用的把两天体同时作为两个质点来处理的方法是一致的。在这一力学思想和力学方法上，也许牛顿确实曾受到过启迪，因为胡克的这一思想和方法的提出，要比牛顿实际运用质点力学的处理方法早 4 年。而牛顿又是确实知道胡克提出的这种类似质点观念的思想和方法的。因此，就这段史实来看，胡克向牛顿提出万有引力发现居先权之争，确实也事出有因，有理有据，因为牛顿确实有可能从胡克的信中受到理论和方法上的启示。

1679 年，牛顿没有能够回答胡克的来信中提出的问题，因为牛顿本人在万有引力定律上尚处于踌躇不前的状态。

1684 年，哈雷在研究刻卜勒的行星运动的第三定律时，认为向心力也是与距离的平方成反比的，但哈雷自己当时尚无力从数学和力学上证明这一点。因此，哈雷与雷恩和胡克的一次聚会中，把他的发现作为一个问题提了出来。胡克当即声称，他可以证明出来。可是，他并未真正拿出这一问题的证明来。据说他当时曾声称，他要等到别人试作的证明都失败以后，他才把自己的证明拿出来，这样人们才会真正赏识他的功劳。由于胡克素有吝啬和爱讥嘲的名声，因此雷恩和哈雷均对胡克采取不信任的态度，同时由于哈雷对胡克的证明不满意，所以 1684 年 8 月，哈雷带着万有引力定律的证明问题，专程前往剑桥大学三一学院向牛顿请教，牛顿说这个问题他已经证明出来了。

这样，当牛顿于 1684—1685 年在剑桥作了题为《论天体运动》的讲演之后，特别是牛顿在 1686 年春天向皇家学会提交《自然哲学的数学原理》的第一卷之后，一场万有引力定律发现的居先权之争也就随之爆发了。

胡克提出的居先权之争并非毫无理由，他与牛顿大体同时发现了万有引力，但他们在这一发现上所取得的成就不是等同的。这种差异集中表现在：牛顿不仅发现了万有引力，而且最终论证了万有引力定律；胡克在引力问题的研究上虽然比雷恩和哈雷更深入一步，发现了万有引力，但并未能像牛顿那样证明万有引力定律。他们在万有引力问题的研究中所以表现出明显的差异，是由于他们两人在科学思想、科学方法和数学基础方面的差异造成的。

3. 经典力学体系的建立

牛顿对力学的研究与天文学的研究是紧密结合、齐头并进的。可以说，他对天文学的研究促进了他对力学的研究，而他对力学的研究也推动了对天文学的研究，两者交互作用的产生，便是由他建立起来的天体力学。如果说，万有引力定律的发现奠定了天体力学的基础的话，那么这块基石的支点之一便是力学。

在牛顿之前，比较全面地研究宏观物体运动的力学现象的代表人物是伽利略，伽利略虽然未能建立起完整的经典力学体系，可是他在受控实验基础上对惯性原理的表述，对抛物运动的分析，对落体定律的表述，以及由此形成的地面运动力学的基础，无疑是牛顿建立经典力学的基本前提。与此同时，刻卜勒的行星运动定律及其天体力学思想的胚胎，同样也是牛顿建立经典力

学的基本前提。此外，笛卡尔和惠更斯等人对力学所作的积极贡献，也是牛顿建立经典力学的重要借鉴。

牛顿研究了伽利略、刻卜勒等人的力学成果，感觉到，他们俩人在力学中虽然取得了重要成就，而在对力学现象进行定性描述和定量分析时，却缺乏明确的力学范畴，即没有明确的力学概念。为此，牛顿首先在力学概念上进行了研究，较为明确地提出了质量、动量、外力等一套力学概念。

对于质量，牛顿吸取了化学家波义耳的质量概念。1660年，波义耳进行了关于气体容积与压力的关系实验时，曾从气体的密度引出质量概念。牛顿把这一概念引入力学中，指出质量是“用它的密度和体积一起来量度的”物质的量。

对于动量，牛顿以他的质量概念为基础。指出动量是“它的速度和质量一起来量度的”运动的量。

对于外力，牛顿吸取了当时静力学中外力的概念，特别是吸取了伽利略的惯性原理中的外力概念，指出外力是“一种为了改变一个物体的静止的或等速直线的运动状态而加于其上的作用力”。

此外，牛顿还提出了惯性、向心力、加速度、相对运动、绝对运动等力学概念的明确定义。

在建立了质量、动量、外力等一套明确的力学概念以后，牛顿对客观力学现象进行了广泛的实验、观察与分析，在发现万有引力运动定律的过程中，同时发现了著名的牛顿力学三定律。

第一定律：在不受外力作用的条件下，任何物体都保持原有的静止或匀速直线运动状态。按照牛顿的本来表述是：“每个物体继续保持其静止或沿一直线作等速运动的状态，除非有力加于其上迫使它改变这种状态”。因为这一定律是用来描述物体运动的惯性原理的，因此，这一定律也称为惯性定律。

第二定律：在外力作用下，“运动的改变和所加的动力成正比，并且发生在所加的力的那个直线方向上。”在一般情况下，也表述为：在外力作用下，物体的加速度与外力成正比，与物体的质量成反比；加速度的方向在外力的作用方向上。其数学表达式为 $F = ma$ 或 $a = \frac{F}{m}$ 。其中 F 为外力， m 为质量， a 为加速度。

第三定律：作用力与反作用力大小相等、方向相反。按照牛顿本来的表述就是：“每一个作用总是有一个相等的反作用和它相对抗；或者说，两物体彼此之间的相互作用永远相等，并且各自指向其对方。”其数学表达式为 $F = -F$ 。

在发现运动力学三定律的基础上，牛顿还从三大定律出发，作出了三大定律的一些推论，如关于一个物体同时受两个力作用时的运动方向与所需时间的推论，关于力的合作与分解的推论等。这样，牛顿就以他的力学概念、三大定律、基本推论为主要内容，实现了17世纪中期以前的力学的一次大综合，从而奠定了经典力学的理论基础。

力学三定律是一个整体，是经典力学的基础。第一定律从质的方面反应了物体惯性的本质，第二定律是从量的方面说明了作用力与物体之间的关

系，第三定律揭示了机械运动的一个矛盾：作用力与反作用力。而惯性与力，是全部牛顿力学中的两个最基本的概念。

由于万有引力定律的发现，由于力学三大定律的发现，一个以宏观低速物理现象为研究对象的经典力学体系，也就由牛顿建立起来。

牛顿的经典力学成果，集中地反应在他的《自然哲学的数学原理》这一巨著中，全书共分三卷。其中第一卷和第二卷均为“论物体的运动”，讨论从天体力学到运动力学的一般力学规律问题，第三卷为“论宇宙的体系”，讨论行星、月球、彗星、潮汐和岁差等具体的天体力学问题。全书在 1687 年 5 月出版。按照自古希腊以后的传统涵义和当时语义内涵，所谓自然哲学，实际上指广义的自然科学。因此，所谓《自然哲学的数学原理》，实为《自然科学的数学原理》。牛顿在这一著作中所讨论的自然现象的普遍性，以及他所用的数学方法的严谨性，使这一著作无愧成为经典力学的奠基工作，经典力学体系由于此书的完成也就初步建立起来。

4. 机械自然观的确立与牛顿的综合

牛顿生活在英国资产阶级革命后的王政复辟时代。他在哲学思想上主要受从培根、霍布斯（1588—1679 年）到洛克（1632—1704 年）的唯物主义经验论的影响。正是在这种唯物主义经验论的影响下，才形成了他在自然观与方法论上的自然科学的唯物主义基础。

牛顿的《自然哲学的数学原理》一书，不仅奠定了近代力学的基础，它还展示了近代科学上最早的理论体系。这本书首次告诉人们，与从演绎原理出发人为构成的哲学体系相区别的，一个始终以实际经验为基础，由逻辑推理构成的科学理论的体系究竟应该是怎样的。

《原理》全书共分为三部分，这三部分前面还有两节——定义和公理（或运动定律）这些内容具有极为重要的意义。在前面，在卷首，有致读者的序文。牛顿在序文中表明了自己用数学形式论述力学的基础上来说明整个自然现象的愿望。

在《原理》的第三卷中，牛顿曾列出自然哲学（实为自然科学）的四条基本推理法则。

“法则 1：除那些真实而已足够说明其现象者外，不必去寻求自然界其他原因。”

“法则 2：对于自然界中同一类结果，必须尽可能归之于同一种原因。”

“法则 3：物体的属性，凡既不能增强也不能减弱者，又为我们的实验所能及的范围内的一切物体所具有者，就应视为所有物体的普遍性。”

“法则 4：在实验哲学中，我们必须把那些从多种现象中运用一般归纳而导出的命题看作是完全正确的，或者是非常接近于正确的；虽然可以想象出任何与之相反的假说，但是没有出现其他现象足以使之更为正确或者出现例外之前，仍然应当给与如此对待。”

从牛顿所列的这些推理法则可以看出，牛顿坚信物质世界的客观性、统一性、因果性和规律性。正是从自然科学的唯物主义的这些基本信念出发，牛顿实现了机械自然观与科学方法论的综合。

在近代科学革命兴起之初，哥白尼和维萨里等人虽然动摇了神学自然观的基础，但他们并没有建立起一套新的自然观。直到 19 世纪初年，当法国哲

学家伽桑狄使以伊壁鸠鲁为代表的古希腊哲学中的原子论复兴后，特别是伽利略的运动力学与刻卜勒的天体力学的影响日趋增大之后，一种以力学观念为基础的机械自然观即处于初步形成之中，而笛卡尔则是一种自然观在初步形成时期的代表人物。笛卡尔认为，物质的唯一属性是广延，因此他以广延为基础，提出空间、时间、重量和速度是物质世界的基本量纲。正是从这些基本量纲出发，笛卡尔为物质世界建立起了一幅最初的机械图景，并因此奠走了机械自然观的初步基础，但他却没有使机械自然观最终确立。

牛顿批判了笛卡尔把物质与空间等同的思想，吸取了笛卡尔的空间和时间是基本量纲的思想，建立了绝对时空观。牛顿认为：所谓“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”；牛顿也提出过相对空间的概念，不过他认为相对空间只是绝对空间的可动部分或者量度。为了证实绝对空间的存在，牛顿还设想过著名的水桶实验。牛顿设想，若有一桶水，让它做旋转运动，开始时水桶旋转而水不动，此时，水与桶壁之间虽有相对运动，但水面与水桶静止时相同，是一个平面。随后，水被桶壁带动并与桶一道旋转，这时水与桶之间虽无相对运动，但水面却与桶静止时不同，是一个凹面。这样，即使在水与桶没有相对运动的情形下，也可判定水桶体系有无相对于绝对空间的运动。

对于时间，牛顿认为，笛卡尔的数字演绎法处于彼此分离的状态。培根轻视数学演绎为：“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，与任何其他外界事物无关地流逝着。”

在批判笛卡尔把物质与空间等同的思想时，牛顿还吸取了伊壁鸠鲁的原子论思想，建立了物质的微粒观。牛顿说：“一切物体的最小微粒也具有广延性、不可入性、能动性，并且赋有其固有的惯性，这是整个哲学的基础。”物质微粒观不仅是牛顿的科学自然观的一个重要方面，而且也是他的力学中的质点观念与光学中的微粒观念的直接理论基础。

同时，牛顿还以他的绝对时空观为基础，提出了绝对运动观。他说，所谓“绝对运动是一个物体从某一绝对的处所向另一绝对的处所移动。”为了说明绝对运动的存在，他除了借助于绝对时空观之外，也借助了他所提出的相对运动观念。实际上，无论是绝对运动观还是相对运动观，牛顿都是从他的绝对时空观出发的。

正是在绝对时空观、物质微粒观、绝对运动观相继形成的基础上，牛顿把自然界的所有作用都规定为力的作用，并指出：“哲学的全部任务，看来就在于从各种运动现象来研究各种自然之力，然后用这些方法去论证其他的现象。”正是从这一宗旨出发，牛顿写作了《自然哲学的数学原理》一书，而正是在这一巨著中，牛顿建立了关于物质世界的一幅完整的机械力学的图景。

可见，机械自然观的最终确立，对于牛顿前半生的以经典力学为代表的科学成果的取得，确实是起过积极的作用。

在科学方法论方面，培根重视实验归纳法的作用，笛卡尔轻视实验归纳法的作用，而牛顿则首次在理论上，特别是在实践上实现了两种科学方法论的综合。

牛顿重视实验的作用，同时也重视数学的作用。牛顿认为，“物体的属性只有通过实验才能为我们所了解。”又说：“探求事物属性的准确方法是从实验中把它们推导出来。”正是在这种方法论思想的指导下，牛顿进行了

一系列受控实验，设想了不少理想实验，与此同时，牛顿也十分重视数学的作用，认为数学方法是自然科学的基础方法，并由此探索了整个数学方法统一的数学原理。这样，牛顿也就实现了实验方法与数学方法的结合。

在科学逻辑方面，牛顿既重视培根的归纳法，也重视笛卡尔的演绎法。牛顿曾把归纳法作为他的推理法则的第四条准则，并进而指出：“在实验哲学中，命题都从现象推出，然后通过实验而使之成为一般。”与此同时，尽管牛顿本人曾反复声称：“应当力戒去考虑假说”，说他自己“不作任何假说”，但在实际上，牛顿不仅在其科学理论的研究中经常运用假说，而且在理论上也承认过建立假说的必要性。1672年，牛顿在给皇家学会秘书欧登堡的一封信中说：“进行哲学研究的最好和最可靠的方法，看来第一是，勤恳地去探索事物的属性，并用实验来证明这些属性，然后进而建立一些假说，用以解释这些事物本身。”可见，牛顿所反对的假说只是那些没有实验依据的臆测。

在科学逻辑方面，牛顿不仅较好地处理归纳与演绎的关系，而且较好地处理了分析与综合的关系。牛顿认为：“从结果到原因，从特殊原因到普遍原因，一直论证到最普遍的原因为止，这就是分析的方法；而综合的方法则是假定原因已经找出，并且已把它们立为原理，再用这些原理去解释由它们发生的现象。并证明这些解释的正确性。”而在自然科学研究中，“总是先用分析的方法，然后才用综合的方法。”牛顿不仅在理论上提出了分析与综合相结合的方法论思想，而且在其科学实验中应用了这一基本方法。就一定的意义来说，牛顿在光学、数学、天文学和力学方面的成就，都是他的分析与综合相结合的方法的结果。

三、物理学

1. 光学

(1) 光学发展的技术基础和科学动力

16 世纪与 17 世纪初，由于制镜业的发展，磨制透镜的技术有了显著提高，这就使近代早期的光学发展具备了最初的技术基础。在此基础上，荷兰光学家詹森（1580—1638 年）在十六世纪末发明了第一台显微镜，而荷兰的制镜商利波尔塞在 1608 年发明了第一架望远镜。

第一代显微镜和第一代望远镜发明之后，其科学价值立即为一些著名科学家所重视。1609 年，伽利略得知荷兰发明了望远镜后，他立即意识到这一新的发明对天文观察的重大价值，因此在同年即发明了第一架折射型天文望远镜，并作出了震惊西欧的天文发现，以后他又曾研制过显微镜，并用它观察过昆虫的生理结构。在他的影响下，望远镜和显微镜立即被广泛地运用到天文学和解剖学之中。

在天文学中，由于天文观察的需要，反过来推动了望远镜的光学原理的研究，推动了望远镜的制作技术的革命。近代天文学发展初期的伟大开拓者，如伽利略、刻卜勒、惠更斯和牛顿等人，都直接研究过望远镜，并由此研究光学。因此，近代初期的许多天文学家，同时也是光学家。

在解剖学中，由于解剖观察的需要，反过来也推动了显微镜的光学原理的研究，推动了显微镜制作技术的革新。17 世纪初，由于詹森发明的显微镜的显微倍数大多在 10 倍以下，且观察到的镜像大多扭曲和模糊，加上色差现象过分严重，因此在解剖学观察中尚未广泛使用显微镜。到了 17 世纪中期，荷兰一家眼镜店的店员列文虎克（1632—1723 年）对显微镜进行了革新，使显微镜的显微倍数扩大到 270 倍左右。意大利显微解剖学家马尔比基（1628—1694 年）则以这种显微镜在 17 世纪中期奠定了显微解剖学的初步基础。后来，胡克也曾用他自制的显微镜观察过植物的细胞，并在 1665 年发表了《显微术》这一有关光学、解剖学和化学的著作。可见，解剖学的需要也是早期光学发展的一大科学动力。

(2) 光学的早期发展

17 世纪初年，刻卜勒以他的几何学研究为基础，并从革新天文望远镜的实际需要出发，对几何光学现象进行了一些最初的研究。1604 年，他发表了一篇几何光学论文，对光的直射现象、反射现象以及视觉现象作了一些初步的理论解释。1611 年，他又出版了一部光学著作，对作为望远镜制作原理的几何光学问题作了进一步的理论探讨，在这一著作中，他最先提出了焦点和光轴等最初的几何光学概念。可以说，刻卜勒是近代几何光学的直接开拓者。

继刻卜勒之后，荷兰物理学家和数学家斯涅尔（1580—1626 年）对几何光学现象进行了较为系统的实验研究与数学分析。他是荷兰莱顿大学的数学教授，他坚信自然现象中存在着数的和谐，并由此推论在光学现象中也存在着数的和谐关系，正是从这一信念出发，他在 17 世纪初年对人们当时关注的光现象进行了一些实验观测和数学分析，终于在 1620 年发现了几何光学现象的两条基本定律：反射定律和折射定律。这两条定律的发现，奠定了近代几何光学的初步基础。

在几何光学初步发展的基础上，近代早期的物理光学也随之发展起来。在早期的物理光学中，人们对于光的物理特征的探讨，主要集中在两个方面：一是光的本性问题，一是光的颜色问题。

17 世纪初，居住在荷兰的法国数学家笛卡尔在光的几何特征被初步揭示出来之后，他对物理光学问题进行了初步的探讨。1637 年，在他的《方法论》的三个附录之一的《折光》中，论述了物理光学理论。对于光的本性问题，笛卡尔曾提出过两种假说：第一种假说认为，根据光的反射现象推导，光可能是一种类似微粒的性质；第二种假说认为，光是一种以“以太”为媒质的压力（以太，ether，other 的变异，意为另外一种东西，一种说不清的东西）。他的两种假说，其一被奉为后来的微粒说的鼻祖，其二由于含有朦胧的波动观念，则被奉为后来的波动说的先驱。

笛卡尔的关于光的本性的两种假说提出之后，主要以他的微粒说对当时已知的光的反射和折射现象进行了解释。他认为，光线可以发生反射，是因为光微粒碰到反射面之后，遵循一定的力学定律被弹射回来，这样就发生了反射。而光线所以发生反射，是因为光微粒在由一种介质进入另一种介质之后，由于两种介质的不同密度的影响，光微粒再受到另一种密度较大的介质的阻力作用之后，粒子运动相应减速，因此发生了折射。他的光的微粒说提出以后，曾经比他的那种朦胧的波动说产生过更大的影响，而他的那种朦胧的波动说也被一些后继者所重视。

因此，以斯涅尔和笛卡尔两人的光学成果为代表，几何光学和物理光学在 17 世纪初期均已奠定初步的基础。

(3) 波动说与微粒说

到了 17 世纪中期，随着实验光学的发展，几何光学和物理光学都有了进一步的发展。在这一时期，最先推动物理光学发展的是意大利波仑亚大学的数学教授格里马第（1618—1663 年）。

1655 年，格里马第对物体在光线传播方向上的物影进行了观测。他发现，物影总比假定光线直线传播时应有的大小还要大一些，而且物影的边缘总是模糊的。他由此推想，光可能是一种与水波类似的流体。为了证实这一推想，他进行了一个光学实验，他让一束光穿过一个小孔，然后让穿过小孔的光线照射到暗室的一个屏幕上。结果发现，穿过小孔的光线的光影明显地增宽了。他认为，这种光现象用笛卡尔的微粒说是解释不了的。他把这种光的传播现象与水波的传播现象进一步作了类比，认为它与水波穿过小孔后的衍射现象极为相似。因此，他把他的实验称为衍射实验，并在 1660 年进一步提出了他的光的波动说，认为光是一种作波浪式传播的流体。

此后不久，英国物理学家胡克重复了格里马第实验，并进行了肥皂泡膜上的颜色观察。他认为，不论是格里马第实验，还是肥皂泡膜上的颜色，都是微粒论无法解释的。因此，他在 1665 年出版的《显微术》一书中，综合了笛卡尔和格里马第两人的一些看法，提出了光是以太的一种纵向波的假说。运用这种假说，胡克对光的颜色作了解释，认为光的颜色是由光波振动时的不同频率来决定的。

到了 60 年代中期，牛顿也在光学领域里进行了一些实验。牛顿所进行的第一个著名的实践是三棱镜实验，即光的色散实验。1666 年 1 月，牛顿在家里进行了这一著名的实验，为了进行这一实验，他磨制了一台三棱镜。他把

这台三棱镜置于暗室的窗板上的一条细缝的入口处，暗室外的日光即成一束平行的光线通过三棱镜。当日光透过三棱镜被折射后，牛顿惊异地发现，窗户对面的墙上出现了一条按赤、橙、黄、绿、蓝、靛、紫的顺序排列的色彩绚丽的光谱。此后不久，牛顿又买了一台三棱镜，当他把第二台三棱镜放在第一台三棱镜折射出的各种单色光的通路上时，各种单色光经第二台棱镜折射之后，又重新聚合在一起，复合成白光折射到屏幕上。为了证实单色光是否还能继续分解，牛顿在屏幕上开了一条窄缝，让被分解后的单色光透过窄缝射到第二台棱镜上，结果证实，这束单色光只发生方向的偏移，而不能继续分解。光的色散实验使牛顿认识到，白光是原来由各种单色光组成的复合光；复合光能分解为单色光，单色光能组合为复合光；单色光不能再继续分解；复合光被分解成单色光之后，形成有序的单色光光谱。牛顿通过光的色散实验提出的这些新的光色理论，是当时在光的颜色理论上的重大进步。

牛顿所进行的第二个著名的光学实验是“牛顿环”实验。他认为胡克的肥皂泡实验的精确度不高，而且泡膜转瞬即逝，不便于观察，于是他又设计了一个被后人称为“牛顿环”的实验。他将一个半球面透镜放在一块平板玻璃上，让其曲面接触平板玻璃，而其平面向上，然后，他让一束光从透镜的平面上方直射下来。这时，他发现，在透镜的曲面与平板玻璃的接触点上，形成了一个很大的暗点，而在暗点的周围，则出现了以这个暗点为圆心的明暗相间的彩色同心圆。在发现这一现象后，他运用白光和色光进行了对比实验。他发现，在白光照射下出现的是明暗相间的彩色同心圆；而色光照射下出现的明暗相间的单色同心圆，这就是“牛顿环”现象的最初发现。

此外，牛顿还进行过其他一些重要的光学实验，如衍射实验、折射实验以及在各种光学实验中的分析对比实验等。牛顿进行大量的光学实验的目的，主要是为了从理论上探索光的各种几何性质和物理性质。

在几何光学中，牛顿通过对光的几何性质的研究，发现有可能研制出一种反射型望远镜并于1668年制出。由于比较粗糙，因此其观测效果尚不如折射型望远镜。后来，他又进一步改革，特别是在磨制出光洁度较好的反射镜之后，终于在1671年研制出了第二台反射望远镜。牛顿即向皇家学会呈交了这台反射型望远镜，并被送到国王查理二世那里，受到了赞许。由于这种新式的望远镜的发明，牛顿在1672年1月11日被选为皇家学会会员。

在物理光学中，牛顿着重研究了光的颜色问题和光的本性问题。通过色散实验和“牛顿环”实验，他认为，各种单色光之所以有不同的颜色，白光经过三棱镜折射后之所以分解为有序的光谱，是因为不同的单色光具有不同的折射率。在各种单色光中，紫色光的折射率最大，而红光的折射率最小，因此它们分居光谱的两端。在经过近六年的理论探索之后，牛顿把他的这一关于光的颜色理论在1672年2月6日写成论文：《关于光 and 色的新理论》，2月8日，他在皇家学会的周会上宣读了这篇论文，以作为对皇家学会把他吸收为会员的答谢。同月19日，这篇论文发表于由皇家学会秘书欧登堡（1615—1677年）主办的《皇家学会会报》。

牛顿的光色决定于折射率的理论，能比较成功地解释光的色散现象，并进而建立起了最初的光谱理论。可是，对于“牛顿环”中的明暗相间的彩色或单色的同心光圈，牛顿却无法用他的光色理论作出成功的解释。牛顿在其光学实验中发现了“牛顿环”，但却未能从理论上解开“牛顿环”。

通过光的色散实验和“牛顿环”实验，牛顿对光的本性问题也进行了探

讨。胡克曾较为明确地提出：光是以太的一种纵向波。但牛顿认为光是一种粒子流。后来，牛顿从他的质点力学理论出发，进一步发展了他的光的微粒理论，提出光是一种由极小的微粒形成的粒子流。本来，笛卡尔早在 1637 年也曾提出过光是一种以太粒子流的假说，可是笛卡尔没有把微粒说系统地用于光的直射、反射、折射的理论解释。而牛顿则运用微粒说，对这些光现象进行了较为成功的理论解释。这样，牛顿也就成了关于光的本性的微粒说的代表人物。

光的微粒说虽然能解释直射、反射、折射这些主要的光现象，可是它在理论上也遇到了困难。如“牛顿环”中的明暗相间的彩色或单色同心光圈、格里马第实验中的光的干涉现象，运用微粒说均无法解释。由于微粒说并不能完全解释当时已知的光现象，这就导致了 1678 年前后惠更斯的波动说与牛顿的微粒说的论争。

(4) 惠更斯及其波动说

惠更斯是荷兰著名天文学家、物理学家和数学家，他也是通过天文学而接触光学的。当巴黎科学院在 1666 年创立时，即以重要职位和待遇聘任惠更斯为巴黎科学院院士。

在光学中，惠更斯早年在研制望远镜等光学仪器时，已比较系统地研究过几何光学。来巴黎后，他的光学研究逐渐从几何光学转到物理光学方面。后来，他去英国旅行，在剑桥大学会见了牛顿，他们互相介绍了自己对于光的本性的初步看法，那时，虽然惠更斯尚未建立起系统的光波系统学说，但已倾向于格里马第和胡克等人的观点，认为光是一种波。这样，在光的本性问题上，惠更斯与牛顿明显地发生了分歧。返回巴黎后，惠更斯重复了牛顿的一些光学实验，通过这些光学实验，特别是“牛顿环”实验与格里马第实验，惠更斯进一步认定，这些实验事实用微粒说无法解释。他还以生活中的光现象为例进行了分析，他说，如果光线是微粒组成的，那末光线在彼此交叉时，它们就会互相碰撞，互相碰撞就会改变方向，但生活中并未见到这样的光线现象。在研究“牛顿环”实验与格里马第实验基础上，惠更斯提出了它的一种比较系统的的光波学说。

惠更斯认为，光是一种机械波，这种机械波是由光波的振动而发出的。可是，这随即产生了另一个问题，即如果光是一种机械波，那么它必然有相应的载体。水波的载体是水，声波的载体是空气，光波的载体是什么呢？为此，惠更斯提出了他的光波学说的第二个要点，即光波是一种靠物体载体来传播的纵向波，传播它的物体载体是“以太”。

在提出上述两个要点之后，惠更斯还就光波本身的传播规律进行了研究。他认为，波面上的各点，本身就是引起媒质振动的波源。他把由波源振动发出的波称为子波；而把发出于波的波称为原波。子波由原波发出后，形成新的波面，新的波面形成后即成为原波，原波又发出子波，如此持续传播下去。这就是他用以解释光的传播规律的著名的惠更斯原理。

根据上述原理，惠更斯较好地解释了波在媒质中的传播规律。运用这一原理，可以推导出光的反射定律和折射定律，可以解释光在晶体媒质中的双折射现象，可以解释光的衍射现象，也可以解释实为光的干涉的“牛顿环”现象。

这样，一个由上述三个理论要点为基本内容的光波学说，就由惠更斯基

本上建立起来了。光的波动说虽然不是惠更斯最先提出来的，但却是由他最先给予理论总结的。所以，从此惠更斯就成了光的波动说的代表人物。

1678年，惠更斯向巴黎科学院提交了他的光学论著《光论》。同年，他还以光的波动论为基本内容，在巴黎科学院年会上作了反驳牛顿的光的微粒说的著名讲演，这样，波动说与微粒说的第二次论争，便在惠更斯与牛顿之间爆发了。

(5) 牛顿及其微粒说

惠更斯于1678年在巴黎科学院所作的反驳微粒说的讲演内容不久以后即传到英国，《光论》一书在1690年出版后也传到了英国。针对惠更斯的观点，牛顿以他的光的色散实验为基础，进一步发展了他的微粒说。与此同时，牛顿开始修改和充实他在1675年前后动手写作的主要光学著作《光学》。

在《光学》中，牛顿反驳了惠更斯的波动说，对他的微粒说进行了系统的理论解释。在反驳惠更斯对冰洲石（亦称方解石，但它实际上是方解石 CaCO_3 的无色透明的亚种）的双折射现象所作的波动说的解释时，牛顿说：“就我所知，到目前为止还只有惠更斯一人，试图用挤压或运动的传播来说明冰洲晶石中的非常折射，为此他假设在这种晶体中有两种不同的振动媒质。”他对惠更斯的这一假说进行反驳后接着说：“对我来说，假如光仅仅是在以太中传播的挤压或运动，那末这似乎也是解释不通的。”

在《光学》中，牛顿主要以光的反射和折射现象为基础，坚持了他对光的本性所作的微粒说的解释。他说：“光线是否是发光物质发射出来的很小的物体？因为这样一些物体能直线穿过均匀媒质而不会弯到影子区域里去，这正是光的本性”，“为了说明光线一阵容易反射、一阵容易透射的猝发现象，我们并不需要别的，而只要把光线看作是微小的物体，这些微粒用它们的吸引力或某种其他的力在它们对之作用的物质中激起振动，这些振动比光跑得快，连续不断地赶上光线，并激动它们，乃至轮流地增加或减少它们的速度，从而使它们处在一阵一阵的猝发状态之中。”

在《光学》中，牛顿不仅以微粒说作为他的光的本性问题的理论基础，而且把他的物质微粒观念推广到所有自然现象之中，并因此与他的整个质点力学体系融为一体。他在推论物质微粒的种种特性后说：“所有物质的东西似乎都是由上述这些坚硬的固体粒子所组成，都是依照一个智慧者的意愿在第一次创世时通过这些粒子的不同组合造出来的。”这样，牛顿就把他的光的微粒说与他的整个机械自然观也融为一体了。

牛顿的《光学》共分三编。第一编主要论述光的传播问题，第二编主要论述光的颜色问题；第三编主要以格里马第实验为基础，论述光的折射现象。最后以一系列的问题为结尾，论述了他的以物质微粒观念为基础的机械自然观。《光学》一书，表明牛顿在论述他的微粒说时，也曾吸收波动说的某些观念，并试图解决微粒说与波动说的论争，最终把两种理论统一起来。

牛顿的微粒说尽管有其局限性的一面，但在探索光的本性的认识道路上，它与波动说同样是一个重要的里程碑。因为关于光的本性的波动性与粒子性的认识，人们直到二十世纪初才得以在波粒二象性的基础上统一起来。

可能为了避免与英国的波动说的代表人物胡克再度引起论争，牛顿的《光

学》完成后一直未出版，直到胡克在 1703 年去世之后，牛顿的《光学》才在 1704 年公开出版。在《光学》公开出版之前，波动说主要代表人物惠更斯早已于 1695 年去世。惠更斯和胡克相继去世之后，波动说的一方无人能与牛顿进行论争，同时由于牛顿本人的科学声誉越来越高，牛顿的微粒说也就因此成为处于支配地位的学说。作为光学的早期经典著作之一的《光学》影响了长达两个多世纪的光学进展。直到本世纪初，当牛顿的《光学》再版时，爱因斯坦（1879—1955 年）在为该书作序时还说：“谁要有闲暇和宁静来读这本书，就会重新生活于伟大的牛顿在他的青年时代所经历的那些奇妙的事件当中。对于他，自然界是一本打开的书。”爱因斯坦的这一评述，除了在一定程度上揭示了牛顿在光学中所遵循的方法之外，也在一定程度上说明了牛顿的《光学》在出版后所产生的深远影响。在整个 18 世纪，除了瑞士数学家约翰·贝努利和欧拉等人坚持光的波动说之外，绝大多数人都成了牛顿的微粒说的信徒。

以牛顿为代表的微粒说和以惠更斯为代表的波动说之争，是一场影响深远的科学论争，正是由于这场论争，在近代光学史上正式揭开了波粒之争的序幕。

(6) 杨氏及其波动说

到了 18 世纪末，随着以天体演化学说为旗帜的科学思想的进一步解冻，光学开始慢慢地恢复一些生机。到了 19 世纪初，使人们意想不到的，以惠更斯为代表的光的波动说在沉寂了一个多世纪之后，又奇迹般地复兴起来，这个在新的世纪中复兴光的波动说的开拓者，是英国著名物理学家托玛斯·杨氏（1773—1829 年）。

杨氏是一位类同于法国百科全书派式的学者。1795 年，杨氏在哥庭根大学获医学博士学位。在德国自然哲学思潮的影响下，杨氏对牛顿的光学理论产生了最初的怀疑和动摇。他根据自己的一些初步的实验事实，在 1800 年写成了一篇题为《关于光和声的实验和问题》的论文，表示对惠更斯的光的波动说表示赞同，对牛顿的微粒说表示怀疑。他说：“尽管我仰慕牛顿的大名，但我并不因此非得认为他是万无一失的。我……遗憾地看到他也会弄错。而他的权威也许有时甚至阻碍了科学的进步。”在当时牛顿的理论尚居于权威地位的情况下，他能对牛顿作出如此大胆的议论，确实是需要一些胆略与气魄的。

在文中，杨氏对光现象与声现象进行了类比分析，他从所观察到的声波在重迭时有加强或减弱这种现象出发，认为光也有这种类似的特性，并进而认为光也是一种波。这是在光的波动说沉寂一百年之后，人们首次提到光的波动说。

1801—1804 年间，杨氏出任英国皇家学院物理学教授，讲授数学物理方程。在这一时间内，他完成了对光的干涉现象和干涉理论的研究。

杨氏虽在 1800 年重提光的波动说，但当时他尚缺乏实验证据。因此，他决定设计出一种实验，以证实光的波动说。他从对声波的干涉现象的研究出发，认为干涉是波所特有的性质。他设想，要切实证明光是一种波，就必须证实光是否也发生干涉现象。

1801年，杨氏进行了一个观察光的干涉现象的实验。他把一个点光源放在一块不透明的屏后，当点光源发射出的光线通过屏上的两个邻近的狭缝时，即在另一块屏上产生明暗交替的黑白条纹。这说明，当两束光线相干时，光线既可能加强，也可能相互抵消。很显然，这是一种类似于声波和水波的波的干涉现象。波在传播时，当两列波的波峰与波峰重叠、波谷与波谷重叠时，两列波相互加强；而当两列波的波峰与波谷、波谷与波峰重叠时，两列波相互抵消。屏上所以出现明暗相间的黑白条纹，正说明光也发生了波的干涉现象，并由此说明光是一种波。

由于光的波动说自己成功地解释了光的这种干涉现象，而光的微粒说则对此无能为力。这样，杨氏就以光的干涉现象这一判决性的实验事实，对光的波动说作出了有力的证实。

在光的干涉现象的实验基础上，杨氏于同年在英国皇家学会的《哲学会刊》上发表论文，一方面介绍了他所进行的光的干涉现象的实验，另一方面也对他所进行的光的干涉实验与牛顿所进行过的“牛顿环”实验进行了理论解释。在这篇论文中，杨氏首次提出了光波的干涉概念，并同时提出了光的干涉定律：来自同一光源的两束光线，当其方向平行或接近平行，且其路程差等于波长的整数倍时，光线互相加强；在其相干部分的中间态上，光线最强。在文中，杨氏还指出了相干光与不相干光的区别，公布了他首次近似测得的光线的波长，指出了不同色光的波长各不相同，并以光的波动说为基础，提出了人的视觉理论。

此后，杨氏又对光的波动说进行了一些新的实验和理论研究。1803年，他又写了一篇题为《物理光学的实验和计算》的论文，依据他的光的干涉定律，对光的衍射现象作了进一步的理论解释，认为衍射实际上是直接通过衍射缝的光波和边界波的干涉。这篇论文于1804年发表于英国皇家学会的《哲学会刊》上，尽管杨氏在文中对光的衍射现象所作的理论解释尚不十分成功，但他却以此进一步扩大了光的波动说的理论影响。

由于杨氏在英国复兴了原来形成于法国的光的波动说，这就刺激了牛顿学派，特别是法国的牛顿学派对光学研究。拉普拉斯（1749—1827年）、马吕斯（1775—1812年）、阿拉戈（1786—1851年）等人，即是法国的牛顿学派的代表人物。拉普拉斯在1808年用光的微粒说对光的双折射现象进行了分析，并在同年写出了对杨氏的光波学说进行驳难的论文。1809年，马吕斯在一次实验中发现了光的偏振现象，而惠更斯的光波说曾以为光波是一种纵波，但纵波不可能发生偏振现象，所以，马吕斯认为，这一新的实验事实的发现，是证实牛顿的微粒说的有力的实验证据。1811年，阿拉戈也发现了光的偏振现象，并发现偏振光在通过晶体时，能产生丰富的彩色现象。

与此同时，英国的牛顿学派也活跃起来，布吕斯特（1781—1868年）则是英国的牛顿学派的代表人物。1811年，他对法国的牛顿学派所发现的光的偏振现象进行了研究，他在实验分析中发现，反射光的偏振的程度，决定于入射角。当反射光呈全偏振时，反射线与折射线成直角，反射角的正切等于折射率。这样，他就找到了一个有关偏振现象的经验定律，从而在几何光学的基础上对新发现的光的偏振现象作了数学上的论证。

光的偏振现象与偏振定律的发现，最初确实显得对光的微粒说有利。在微粒说的驳难下，杨氏对偏振现象也进行了实验分析和理论探索，经过几年的努力，他发现，如果光波不是像声波那样沿着运动方向振动的纵向波，而

是像水波或者像拉紧的琴弦那样垂直于运动方向的横向波的话，即可用光的波动说对光的偏振现象作出解释。

1817年，杨氏放弃了惠更斯认为光波是一种纵向波的理论，而提出了光波是一种横向波的假说，从而对光的偏振现象作出了较为成功的解释。同年，杨氏写信给阿拉戈，在信中，杨氏以光波是一种横向波为新的理论基础，并吸取了牛顿学派发现的偏振现象与偏振定律方面的成就，对光波学说进行了新的论证，并对光的微粒说提出了新的驳难。

以后，波粒之争进入了新的高潮，由于菲涅耳（1788—1827年）成功地进行了新的光的干涉实验，使波动说在与微粒说的对比中，占据了明显的理论优势，但波动说的胜利并非波粒之争的终结。到了19世纪后期，新的光学问题又使波动说陷入新的理论危机。直到本世纪初，当德国著名物理学家普朗克和爱因斯坦提出了光的量子说以后，光的波粒之争才在新的实验基础与新的理论上，以光的波粒二象性的理论统一起来。

2. 电学

(1) 格里凯起电机

17世纪初，吉尔伯特对静电现象的观察与研究虽然引起了人们对静电现象的关注，但他只是提出了问题，并未能开拓近代电学发展的道路。在从17世纪初到18世纪末的近两个世纪之内，近代电学的发展是比较缓慢的。

吉尔伯特之后，意大利一个比伽利略略晚的物理学家卡毕奥（1585—1650年）也曾对早期电学进行过研究。1629年，他在一次实验中发现了同电相斥现象，但他无法对自己的发现进行更深入的实验研究和理论研究。因此，研制新的电学实验仪器，已成为当时电学进一步发展所面临的首要问题。17世纪中期以后，近代电学之所以继续有所发展，其首要原因是实验技术的进步。格里凯起电机真正点燃了近代电学的火炬。

曾经任过德国马德堡市市长的物理学家格里凯（1602—1686年），是一个具有杰出的实验仪器研制才能的实验物理学家。他在物理实验仪器上有两大发明。一是他在1650年发明了抽气机，即真空泵。抽气机使人类首次掌握了获得真空的技术，这一技术使他得以在1654年进行著名的“马德堡半球”实验，即以真空实验为基础的大气压力实验，而这一实验是导致后来蒸汽机发明的主要实验基础之一。二是他在1660年发明了起电机，起电机的发明则真正开创了近代电学发展的历史时期。

格里凯在发明抽气机和进行“马德堡半球”实验之后，对静电学进行了实验研究和理论探索。他发现，有可能根据摩擦起电的原理研制一种摩擦起电的机械。1660年，他研制出了一个可以在支架的铁轴上连续转动的硫磺球装置，当在人力操纵下飞快转动的硫磺球与布片摩擦时，即可比手工摩擦产生更多的电荷，第一台摩擦起电机就这样发明了。

起电机发明后，即传入西欧各国。牛顿对格里凯起电机进行了研究，1675年，他用玻璃球代替格里凯起电机中的硫磺球，也制成了一台摩擦起电机。牛顿曾用他的这台起电机研究过引力、斥力、火花放电等现象。到了17世纪末和18世纪初，在西欧各国乃至北美殖民地，就出现了经过改制的各种式样的格里凯起电机。由于起电机能获得比手工摩擦时更多的电荷，这样，关注静电现象的人也逐渐多起来了。

1729年，伦敦的一个靠领取养老金生活的业余电学爱好者格雷（1670—1736年）和他的助手在运用格里凯起电机进行一次静电传输实验时发现，只要用丝线把金属线悬挂得当，静电可沿金属线传输。当时格雷已把格里凯起电机上产生的微弱的电荷成功地送到765英尺（约233.172米）远的距离，他的静电传输实验也许是在近代科学技术史上最早架设输电线路的实验，正是为了进行这一实验而进行的各种传输材料的选择中，格雷发现了导体与绝缘体的差别，他发现丝线不导电，而与丝线同样粗细的铜线却具有很好的导电性能。格雷因此成为第一个用铜线作导线的人。

1731年，格雷发表了他的静电传输实验报告。在格雷实验的基础上，法国工程师杜菲在1734年进行了新的实验研究，他发现，摩擦后的两根琥珀棒相互排斥，摩擦后的两根玻璃棒也相互排斥；但摩擦后的琥珀棒与摩擦后的玻璃棒却相互吸引。杜菲因此认识到，电有两种，他把其中的一类称为玻璃电，而把另一类称为琥珀电，而两种电的关系是：同电相斥，异电相吸。杜菲的发现，是继格雷之后早期实验静电学发展史上又一显著的进步。

后来，法国另一工程师德萨居里埃在格雷的静电传输实验基础上对电的传输材料进行了更为广泛的实验。1740年，他发表了静电传输实验报告，进一步论述了格雷的导体与绝缘体的发现。

由于格雷和杜菲等人的努力，到了18世纪40年代初，人们对于静电知识便日益丰富起来，从格里凯起电机在1660年发明，经过80余年的积累和发展，早期静电学终于初具实验与理论基础。

（2）莱顿瓶

格里凯起电机发明后，人们已可在起电机上产生一定的可供实验用的电荷，但在起电机上产生出来的电荷，不仅电荷量不大，更主要的是不能保存下来，因而不便于对电学进行更进一步的研究。人们开始探索，能否研制出某种电器，它能像储存水那样，也能把起电机上产生出来的电荷储存起来。到了十八世纪40年代中期，人们终于发明了这种电学容器——莱顿瓶。

1745年，德国学者克莱斯特（1700—1748年）最先发明了这种可以使电流储存起来的装置，但并未用于电学研究。同年，荷兰电学家马森布罗克（1692—1761年）也独立地发明了一个同样可用来储存电流的装置，因他在荷兰莱顿大学任教，所以这种蓄电器后来便称为莱顿瓶。

在发明莱顿瓶之前，马森布罗克已对电学进行了较长时间的研究。1745年初，他最先发现了电震现象，当时一些医学家认为电震现象可能成为一种新的医疗手段——电疗，正是在这一目的指导下，他独立地发明了蓄电器。

莱顿瓶只能算是一种早期的电容器，它的制作方法，是在玻璃瓶的内外表面上都贴上锡箔，在瓶塞上再装上一根铜线，这样就可以把起电机上产生的电荷引入玻璃瓶中，电荷就会在玻璃的锡箔上蓄积起来。在一次实验中，马森布罗克曾用手触及了已经蓄电的莱顿瓶，他立即感受到了强烈的电击。而当他用一只手接触莱顿瓶，用另一只手接触铜线时，他立即感到“手臂和身体产生了一种无法形容的恐怖感觉，总之我以为我命休矣”。这说明，起电机上所产生的电荷，确实已在莱顿瓶储存起来了。

1745年，马森布罗克发表了莱顿瓶的实验报告。莱顿瓶及其实验迅速传到法、英等国。法国电学家、杜菲的学生、后来成为富兰克林的竞争对手的神父诺雷为了获取法王路易十五的欢心，曾以莱顿瓶实验为基础，发明了一

种别出心裁的电火化娱乐，诺雷让 700 修士手拉手，在莱顿瓶发出的电震下同时跳跃，而 700 个修士身上的袈裟也随之同时飘逸飞舞。莱顿瓶及其实验传到英国后，电学家沃森（1715—1787 年）、化学家卡文迪许以及贝维斯等人，都曾对莱顿瓶及其实验进行过研究。1745 年，沃森等人用莱顿瓶进行了一次长 12276 英尺（约 3741.7248 米）的远距离导线输电实验，试图以此测定电的传输速度。虽然沃森等人只是得出了电是瞬时传输的这一初步的结论，但这一实验却进一步加深了人们对电的传输实验的认识。1746 年，沃森在他的实验基础上发表了《电的性质与特征》这一论著。

有了莱顿瓶之后，人们不但能在起电机上产生出较多的电荷，而且可以在莱顿瓶中储蓄起少量的电荷了。有了这两种电学实验仪器，近代电学的发展才逐渐加快了步伐。这两大仪器的发明，不仅直接奠定了近代电学的实验基础，更重要的是，它们使人们进一步认识到，科学的发展与进步，不仅有赖于理论思维的发展，更有赖于实验技术的发展。没有实验技术本身的发展与进步，科学技术的发展与进步是不可能的。

(3) 富兰克林

沃森的《电的性质与特征》一书于 1746 年在英国发表之后，莱顿瓶实验在英国引起了越来越多的人们的兴趣。当时，一个叫斯宾士的英国学者前往北美殖民地讲学，他讲学的主要内容是当时电学领域内那些引人注目的最先发现，而他的主要演示仪器，除了格里凯起电机之外，那就是刚传入英国不久的莱顿瓶。他在波士顿等地讲学，他的讲演及其莱顿瓶实验引起了波士顿一些人的极大兴趣，其中一个就是后来成为近代电学的伟大奠基者之一的富兰克林（1706—1790 年）。

富兰克林听过斯宾士的电学讲演之后，即返回费城。这时，他在伦敦结识的英国皇家学会的朋友柯林逊给费城图书馆寄来了一大批书籍，其中有《电的性质与特征》等电学著作，富兰克林开始全力投入电学实验。

开始，富兰克林主要从事重复欧洲一些电学家已经进行过的实验。为此，他也研制了起电机和莱顿瓶。通过重复欧洲电学家已经进行过的实验，他掌握了电学实验技巧，增进了电学理论和知识。为了答谢柯林逊的友情，富兰克林把自己的实验以及在实验中的一些新发现整理成文，寄往伦敦的柯林逊。柯林逊在英国皇家学会上代他宣读了这篇论文。但由于富兰克林是英国人所鄙视的殖民地的小人物，因此英国皇家学会拒绝刊用富兰克林的这篇最初的电学论文。

1749 年，富兰克林进行了一些新的电学实验。在一次实验中，为了增大电容量，他把几个莱顿瓶联接在一起。当时，他的妻子丽达正在一旁观看他的实验，她无意中碰到了莱顿瓶上的金属杆，只见一团电火花一冒，且随之传出一声怪响，丽达已应声倒地。原来丽达受到电击，幸好当时的电容量不是太大，丽达躺了一个星期后才慢慢好转。这次使丽达差点送命的危险的电击实验给富兰克林以很大的启示。他立即联想到当时人们对雷电的两种不同的观念：一种认为雷电是上帝在发怒；另一种认为雷电是气体爆炸。因此他决定从理论上探讨雷电的实质。

1749 年 8 月，富兰克林在一则日记中把起电机上产生的电流与闪电进行了多方面的比较，发现两者有许多相似之处。如两者都是瞬时的，都产生同样的放电现象，都在放电时发出同样的声音，都能毁灭动物等。他由此推想，

人工产生的电与闪电可能是一种东西。他又进而推想，既然人工产生的电可以被尖端吸引，闪电也应可以被尖端吸引。这种推测，为他后来发明避雷针奠定了基础。

基于闪电与人工产生的电可能是同一种东西的认识，富兰克林在 1749 年底写了一篇题为《论天空雷电与我们的电气相同》的论文，并寄给伦敦的柯林逊，当柯林逊在英国皇家学会上宣读这篇论文时，遭到皇家学会的一些成员的嘲弄，皇家学会的会刊也拒绝发表这篇论文，由于柯林逊的多方奔走，才使这篇论文在另一刊物上发表。

而在北美的富兰克林，仍在继续着他的电学实验和电学理论的研究。此后，他又写了几篇论文，他把这些论文与原有的论文一起编成《电学实验与研究》论文集寄往伦敦。1751 年，在柯林逊的帮助下，这部论文集在伦敦出版了，并立即引起西欧科学家的注意，甚至在法国引起了一场纠葛。

神父诺雷此时已升任巴黎皇家学院的院长。当时，他已出版了《电学原理》一书，当他读到富兰克林的著作后，大为恼怒，并对书中的内容进行了责难。消息传到了富兰克林那里，他想立即动手著文答辩，但转念一想，觉得不应当把自己的观点强加于人，如果它是正确的，真理和事实会支持它；如果它是谬误，理所当然地应该放弃。因此，他觉得最好的回答是用事实来证实自己的理论。

要用实验证实天上人间的电是同一种东西，首要的条件是要把雷电从天上捕捉下来。富兰克林经过半年的反复思考和琢磨，终于设计出了一个可以捕捉到雷电的实验，这就是后来以风筝实验著称的捕捉雷电的实验。

1752 年 6 月的一天，狂风漫卷，阴云密布，一场暴风雨就要来临。富兰克林和儿子威廉一起，带着上面装有一个金属杆的风筝来到了一个空旷地带。富兰克林高举起风筝，他的儿子则拉着风筝线飞跑，由于风大，风筝很快就被放上高空。刹那间，雷电交加，大雨倾盆。富兰克林和他的儿子一起拉着风筝线躲入一个建筑物内。此时，刚好一道闪电从风筝上空掠过，富兰克林的手上立即掠过一种恐怖的麻木感。他抑制不住内心的激动，大声呼喊：“我被电击了！我被电击了！”随即他用一串铜钥匙与风筝线接触，钥匙上立即放射出一串电火花；随后，他又将风筝线上的电引入莱顿瓶中。回到家里后，富兰克林用从天上捕捉下来的雷电进行了各种电学实验，证明天上的雷电与人工摩擦产生的电具有完全相同的性质。富兰克林关于天上人间的电是同一种东西的假说，在他自己的这次实验中得到了完全的证实。

富兰克林立即把他的捕捉雷电的实验写成报告寄往伦敦，柯林逊立即将他的实验报告交给一家刊物发表了，并再次轰动西欧。

富兰克林的捕捉雷电的实验，对早期的近代电学发展产生了深远的影响，因为风筝实验不仅使人们认识到天上人间的电是同一种东西。更重要的是，它使人们认识到开发和利用电的伟大前景。风筝实验的结果告诉人们，既然天上人间的电是同一种东西，雷电有如此巨大的威力，而人类已能在摩擦起电机上产生电，一旦人类能找到更有效的生产电的途径，也就会获得如同雷电一样威力无比的能量，从这个意义上来说，风筝实验是近代电学史上的一场思想上和观念上的革命。如果说，在富兰克林以前，人们多少还把电学实验作为一种魔术活动的话，那么，自富兰克林以后，人们开始把电学作为一门真正的科学，并由此开始寻找能更有效生产电的途径。

富兰克林捕捉雷电的实验，对当时的近代科学发展也产生了重大的影

响。因为风筝实验一方面使人类看到了科学征服自然的伟力，另一方面也使人类看到了自身征服自然的伟力。如果说，在富兰克林以前，以牛顿为代表的早期近代科学成就还仍然停留在认识自然水平的話，那么自富兰克林之后，近代科学即开始了人类征服自然的伟大进军。

由于富兰克林在近代电学上确实取得了令人瞩目的重大成就，英国皇家学会也一反过去对富兰克林的歧视态度。破例地给富兰克林以永远赠阅皇家学会会刊的待遇，破例地授予他以金质奖章，并破例地接受他为英国皇家学会会员。

在实践电学与理论电学两方面的研究中，富兰克林更注重实验电学的研究。因此，他的电学论著大都是关于实验的描述。对此，他曾在自传中作过解释：“我之所述都是实验的描写，任何一人都能复试和证明，如果不能证明，也就无法辩护。”正因为他在电学的基础研究中早已具有这种重实验的倾向，所以他在科学与技术两方面的研究中，又特别注重把电学的实验成果转化为应用的技术。

富兰克林的时代，西方普遍流行着雷电是上帝之火和雷击是上帝的惩罚等神学迷信观念。而森林火灾、房屋倒塌、人畜伤亡等雷电引起的灾害时有发生，在成功地进行了捕捉雷电的实验后，富兰克林即想到要征服雷电。

在进行风筝实验后的同年夏天，富兰克林即着手研制避雷装置，同年，富兰克林研制出了这样一个避雷装置：把一根数米长的细铁棒固定在高建筑物的尖端，在铁棒与建筑物之间用绝缘体隔开，然后用一根导线与铁棒底端连接，再将导线引入地面之下。他把这种避雷装置称为避雷针。经过试用，果然能起避雷作用。

避雷针最初发明与推广应用时，教会曾将它视为不祥之物，但在费城等地，拒绝安置避雷针的一些高大教堂在大雷雨中相继遭受雷击，而比教堂更高的建筑物由于已装上避雷针，在大雷雨中却安然无恙。

由于避雷针已在费城等地初显神威，它立即传播到北美各地，随后又传入欧洲。避雷针传入法国后，诺雷等人开始反对使用避雷针，但法国人仍然选用富兰克林的尖头避雷针，他们还把富兰克林看成是苏格拉底的化身，并成了人们崇拜的偶像。避雷针传入英国后，英国人也曾广泛采用了富兰克林的尖头避雷针，但当时的国王乔治三世出于反对美国独立战争的愤怒，曾下令英皇室的建筑物上的避雷针的尖头上统统装上圆头。

避雷针确实是早期电学研究中的第一项具有重大应用价值的技术成果，但在富兰克林的电学实验中，避雷针只是他的实验电学成就的一项具体的应用。实际上，富兰克林在实验电学与理论电学中的成就，远比避雷针的发明重要得多。在实验电学中，他发明了一种新的电容器，这种电容器是从莱顿瓶向后来的伏打电池发展的一个中间环节。更重要的是，他以风筝实验首次向人们证实了电是一种自然力，这就使人类开始看到应用电的前景。在理论电学中，富兰克林首创了正电、负电、电池、电容、充电、放电、电击、电工、电枢、电刷等一套电学与电工术语，而且写出了有影响的电学理论著作，这就使近代电学的理论研究开始形成了自己所特有的理论规范和传统。

富兰克林不仅是一个杰出的电学家，而且在天文、地质、气象、化工、医药、机械等科学和技术领域也有过卓越的贡献，因此他不仅是近代电学的

伟大先驱，更是美国近代科学的伟大先驱。

富兰克林不仅是一个有多方面成就的科学家，而且也是一位杰出的政治家。在他的后半生，美国的民族解放运动蓬勃兴起。富兰克林不仅参与 1776 年美国的《独立宣言》的起草工作，而且参与了独立后的美国的宪法制定工作。美利坚合众国独立后，富兰克林又作为美国首任驻法国大使出使巴黎，为当时年轻的美国争取了广泛的国际援助。后来回国之后，富兰克林曾致力于黑奴解放事业。

1790 年 4 月 14 日，富兰克林以 84 岁的高龄病逝，据说他在临终时曾遗憾地说：“科学的迅速发展使我有时感到遗憾——我生得太早了。我们不能设想，人类对驾驭大自然的能力在一百年、一千年以后，能达到什么样的高度。我们也许能够学会克服地球的引力，举起庞然大物；农业能够减轻劳力而使产量倍增；疾病可以有效地预防——而人类的寿命可以大大延长。”当今的科学发展，不仅把富兰克林的理想早已变成了现实，而且早已创造出了他当年连想也不敢想的科学奇迹。

富兰克林在病逝后，人们在他的墓碑上刻下这样两句墓志铭：“从苍天那里取得了雷电，从暴君那里取得了民权。”以此来颂扬他在近代电学和美国革命中所建树的卓越功勋。

(4) 库仑定律和高斯定律

自富兰克林以后，电学已在自身的发展中逐渐产生活力，但人们所用的主要电学实验仪器，仍是格里凯起电机和莱顿瓶。由于在实验仪器上未取得很大进展，同时由于俄国物理学家李希曼在 1753 年 7 月 26 日所进行的一次与富兰克林的雷电实验类似的实验中丧生，因此在此后的最初 10 余年内，电学领域是相当沉寂的。在经过一段时间的沉寂后，电学最先在英国活跃起来。

在英国，继富兰克林之后最早进行电学研究的，是后来成为氧气的发现者之一的化学家普列斯特列。1766 年，普列斯特列在伦敦结识了富兰克林，他根据富兰克林的建议，在已进行过的初步的电学研究的基础上，开始进行《电学史》的写作，1767 年，他完成并出版了这一著作。在此著作中，他根据富兰克林所证明的中空带电导体里面的静电力等于零的环路定理，最先推导出了静电力的平方反比定律。1774 年，普列斯特列在发现氧气后，曾进行了氢与氧的火花放电实验，这一实验是电学与化学相互渗透，从而产生了电化学这一新的边缘科学的最初的实验基础。

从 60 年代起，英国化学家卡文迪许也在他自己的实验内进行着与化学有关的电学实验。他进行过盐溶液的导电实验，并由此测定过盐溶液的导电系数，他也进行过富兰克林做过的证明环路定理的中空导体内没有电荷的实验，他也与普列斯特列一样，独立地证明了静电力的平方反比定律。

在英国之外，其他国家的电学也在最初的发展之中。1784—1785 年间，法国物理学家库仑（1736—1806 年）通过扭秤实验，对电的引力和斥力作了定量性的实验分析，验证了两个静止的点电荷之间的相互作用力的平方反比定律，即在两个静止的点电荷之间，它们的引力与距离的平方成反比：

$$f = \frac{q_1 q_2}{\epsilon r^2}$$
，其中 f 为两个点电荷之间的引力， q_1 和 q_2 为两个点电荷的电

量， r 为两个点电荷之间的距离， ϵ 为介质的介电常数。这一定律的数学模型有点像万有引力定律，也可能库仑曾从万有引力定律在受到过启发。这一

定律，本来普列斯特列和卡文迪许也曾发现过，但是他们未进行充分的理论证明，也未建立起明确的数学模型，因此在库仑之前还不为人们所知。为了纪念库仑的这一贡献，这一定律后来被称为库仑定律，而“库仑”也就成了静电学中电量的度数单位。

在德国，青年数学家高斯（1777—1855年）在研究数学的同时，也进行了一些电学研究。他曾从库仑定律推导出另一定理：通过闭合面向外的电通量，是闭合面内电荷量的代数和的4倍。这就是后来静电学中著名的高斯定理。库仑定律只能用来描述点电荷之间引力，而高斯定理则把库仑定律推广到描述任意曲面上连续分布的电通量与曲面内的电荷的代数和之间的关系。

由于环路定理、库仑定律及高斯定理的发现，静电学因此获得了较为坚实的理论基础。

（5）伽伐尼实验与伏打电池

18世纪中期，人们在非洲与南美等地的热带河流中，曾发现一种很怪异的鱼，当你用手去抓它时，它能以一种类似“电击”的方式自卫，后来人们进一步发现，只是在用两只手同时碰它的头和尾部时，才受到电击。更有趣的是，这种鱼可用来给莱顿瓶充电。这说明，这种鱼的自卫方式确实是电击，是一种放电现象。后来，人们把这种鱼称为“电鳗”或“电妖鱼”。

电鳗的电击现象引起了意大利生物学家伽伐尼（1737—1798年）对动物体上的电现象的关注，当时，他正致力于动物解剖学研究。1780年，他偶然发现雷电使蛙腿肌肉发生抽搐，这一发现，引起了他的兴趣，以后几年内，他一直试图以实验再次证实这一发现。1786年9月20日，他进行了这样一个实验：他用莱顿瓶储存了一些用静电起电机产生的电荷，然后用莱顿瓶放电来刺激青蛙的大腿肌肉，发现同样能使肌肉抽搐。他认为，这可能是由于蛙腿肌肉本身含有一种像电鳗那样的“生物电”与莱顿瓶的放电相互感应的结果。

伽伐尼把他的实验告诉了他的朋友、物理学家伏打（1745—1827年），伏打重复了这一实验，也得到了相同的结果。不过伏打认为，这并不是因为动物体内含有“生物电”的原因，而是在于两种导体接触的结果。后来，伽伐尼于1791年又发现，用两种不同的金属叉尖同时接触蛙腿，同样也能使它抽搐。同年，伽伐尼提出了动物组织中含有“动物电”的论断。

伽伐尼不仅初步从实验上证实了“动物电”的存在，更重要的是，它导致了电流的最初发现，直接推动了电学的发展，特别是导致了电化学的诞生，而伏打即是电化学的伟大开拓者。

伏打是18世纪末19世纪初的杰出的实验电学家之一，1762年起，17岁的他就开始致力于电学研究。1775年，他在格里凯起电机的基础上，发明了一种新的起电盘，这种起电盘既可产生正电荷，也可产生负电荷，而且所产生的电荷量要比格里凯起电机所产生的电荷量大。在实验电学研究中，伏打试图发明一种新的电源，以便获得稳定的电荷。为此，他对各种金属与非金属元素的电势进行了实验分析，于1792年发表了一个最早的各种不同的金属的电势顺序表。

当伏打正致力于各种金属的电势的实验测定时，伽伐尼把自己的实验告诉了他。1792—1796年间，伏打多次重复了伽伐尼实验，得到了与伽伐尼同

样的结果。不过他认为，实验中所产生的电荷，并不在蛙腿肌肉本身，而在于两种金属的接触。因为他在实验中发现，当两种金属接触时，若在两种金属之间隔些溶液或湿物，也能产生微弱的电荷，这是伏打的一项重要发现，他决定以此为基础，进行他多年来希望进行的发明一种稳定电源实验。

在最初的实验中，伏打用半碗半碗的盐水依次将一连串的金属连接起来，他发现这种装置能产生一定的电流。正是在这种最初的实验中，伏打发现了“锌—铅—锡—铁—铜—银—金”等各种主要金属的电势序列。后来，他觉得这种装置很不方便，于是把各种金属做成一些小圆片，而金属中间的间隔物则用一些同样形状的浸透盐水的厚纸片来代替，然后依次按照铜片、纸片、锌片；铜片、纸片、锌片这样一组一组地叠起来。1800年，新的装置制成了，当伏打把铜片的一端与锌片的一端用导线连接起来时，果然从中获得了连续而稳定的电流。这就是伏打发明的第一个化学电源。后来，伏打为了进一步提高他的电源的电量，他对他的电源作了一些新的改进，他将一块铜板与一块锌板直接浸在盛有盐水溶液的容器中，将作为正极的铜板与作为负极的锌板用导线连接起来，同样得到了连续而稳定的电流。伏打最初把他的这种电源称为“伽伐尼电池”，以纪念他的朋友伽伐尼。后来，人们为了纪念伏打，把这种电池称为“伏打电池”或“伏打电堆”。

伏打电池是人类获得的第一个稳定的电源。伏打电池的发明，第一次把化学转变为电能，从而揭示出了电学与化学之间的联系，推动了电学与化学之间的相互渗透，并正式宣告了电学与化学的交互作用产生的一门新兴的边缘学科——电化学的诞生。伏打电池的发明，是电学发展与化学发展交互作用的结果，而伏打电池发明之后，它反过来又推动了电学与化学的发展，而自电化学诞生之后，电学与化学都进入了19世纪的高速发展时期。伏打电池的发明，首次揭示出了电能与化学能之间的内在联系，这就为后来的能量守恒和转化定律的发现进一步奠定了实验基础。因此，它对18世纪的僵化自然观念是又一次打击，而对于19世纪的辩证自然观的形成，也是一个重要的开端。

(6) 电化学的奠基

当伏打实验的新的化学电源的消息报道在英国传播后，这一新的发明即引起一个青年化学家的重视，正是他，后来在伏打的电化学成就的基础上，从实验和理论两方面进一步为电化学的发展开辟了道路，他就是英国当时的青年化学家戴维（1778—1829年）。

1806年，戴维在已经进行的一些电化学实验基础上，写成了《论电的化学作用》的实验报告。同年，他又以此为题，在皇家学会作了演讲。这一著名的演讲很快名扬欧洲大陆，刚刚称帝不久的拿破仑也决定授予戴维3000法郎奖金，以奖励他在电化学上的贡献。

1807年，戴维在电化学实验中又取得两项重大成就。其一，他在伏打电堆的基础上，制成了一个由250对铜片和锌片组成的能产生强大电流的巨型电堆；其二，他以这种巨型电堆为电源，成功地实现了对草木灰（碳酸钾）和苏打（碳酸钠）的电解，从中发现了两种重要的新金属元素钾和钠。他并没有止步，仍试图以电解法寻找新元素。最初他曾试图以钾为还原剂，对生石灰、重晶石、苦土进行电解，以图从中寻找新元素，但经过多次实验，均以失败告终。戴维又设法寻找新的实验方法，一方面，他对电堆再次进行改

革，制出了一种由五百对铜板和锌板组成的更大的电堆；另一方面，戴维在瑞典化学家贝齐力乌斯的来信中受到启示，采用了一些新的电解法，终于在1808年6月成功地实现了对生石灰、重晶石、苦土及锶矿石的电解，发现了钙、钡、镁、锶四种新的金属元素。

戴维在实验电化学方面的贡献是巨大的。首先，他制成了新的能产生强大电流的伏打电堆，从而为电化学实验找到了强大的电源。其次，他在贝齐力乌斯的启示之下改进了电解方法，成功地电解了一些在过去被当作元素的化合物，并相继发现了钾、钠、钙、钡、镁、锶这些新的金属元素。正是从电源与电解两方面，戴维为电化学的发展进一步奠定了实验基础。

戴维在进行实验电化学研究的同时，即进行电化学的理论探索。如同他后来的助手法拉第（1791—1867年）所说的那样，他的电化学理论十分庞杂，但他的电化学理论还是有特色的，这就是他的电化学理论集中在电的化学效应上。

早在拉瓦锡的化合物结构理论中，就曾有对于化学亲和力的一种朦胧的二元论见解。后来，德国物理学家和化学家格罗杜斯（1785—1822年）也曾在电解实验中研究过化合物的结构理论。戴维在研究了他们的理论后认为，物质在溶液中被电解时，电流把物质分解为带阳电与带阴电的两部分，带阳电的部分被阴极吸引，而带阴电的部分被阳极吸引，可见，物质是由两部分构成的，而把它们结合在一起的化学亲和力，即为它们之间的静电引力。这就是戴维的二元论的电化学说。

戴维以他的二元论的电化学为基础，对化学变化的本质进行了探讨。他认为，化学变化的本质是电变化，他说：“化学变化是由电变化引起的。除此之外，我再没有别的假说了。”

戴维以他的二元论的电化学说为基础，对物质的化学结构理论也进行了探讨。他认为，不同的原子在相互接触时，即产生相互感应，并随即在相互感应中分别带上相反的电荷，这样就使得它们在静电力引力作用下结合在一起。

戴维的二元论的电化学说的基本要点，是认为原子的电势起源于原子的接触。不同的原子在相互接触中产生相反的电荷，相反的电荷就会使不同的原子相互结合。因此，接触理论是戴维的二元论的电化学说的基本特色。正因为如此，所以戴维的二元论的电化学说后来又被称为接触学说。此后，戴维的接触学说被贝齐力乌斯进一步发展为极化学说，从而形成戴维——贝齐力乌斯的二元论的电化学说。

1809年，戴维在多次改进伏打电池的基础上，试制成功一种用2000多组伏打电池组成的强大电源，并利用弧光放电的原理，发明了一种光照耀眼的弧光灯，又称为电弧灯。它是在电灯发明之前，人们首次获得的一种足以驱逐黑暗的强大光源。电弧灯的发明，使戴维的科学荣誉达到了他一生的顶峰。1812年4月8日，英国王子授命在伦敦的威斯敏斯特广场为戴维举行隆重的授爵仪式，授予他以“勋爵”称号。1817年，戴维又以发明“矿用安全灯”而被授予“伦福德勋章”，1820年，他被选为英国皇家学会主席。

自戴维之后，电化学取得迅速的进步，而实验电学即以电化学和此后由法拉第等人开创的电磁学为双翼，旋即高高地飞腾起来。

3. 热学

(1) 计温学 (测温学)

冷和热这两个词习惯上指两种完全相反的感觉，也经常表示对这两种感觉物理原因的推测，如果一个物体能对我们产生冷和热的作用，就推测它是冷的或是热的，或认为它包含冷或热。在亚里士多德的哲学体系中，冷和热都属于基本的性质，它们和干与湿一起构成四元素。

在近代，对热现象的实验研究是从测量“热度”开始的，在科学地定义温度概念之前，人们往往把温度的变化与物体所含热量的多少混为一谈，用“热度”来表示。如要定量地测定热度，许多科学家致力于测温计的研制。1593年，伽利略制造了一个空气测温计，它是利用空气受热膨胀的道理来反映温度变化的。可是由于他的设计不好，影响气体膨胀的因素太多，所以这一仪器不能准确地表示温度的变化，后来它就很快地为液体测温计所代替。1641—1645年间，意大利西门图学院的科学家制造了一种用带色的酒精作材料的液体温度计，并在该仪器上标出刻度。以后，科学家们一方面寻找更理想的材料，另一方面改进标记刻度的方法。经过半个多世纪的努力，终于形成了三种较为适用的温标，这就是世界上仍在通行的华氏、摄氏和勒氏温标。

由于生产技术的发展，要求对热现象进行定量的研究，温度计的制作和改进最初是和进行气象观测的实际需要相联系的，直到十八世纪末，液体温度计才制得较为完善，“温标”的概念也已逐步形成。

1714年，德国人华仑海特(1686—1736年)制造出一种充填水银的温度计。虽然他不是水银温度计的发明者，但是由于他发明了净化水银的办法而使这一液体得以在温度计中普遍采用。1724年，他被选到伦敦皇家学会，同一年，他投寄给《哲学会报》五篇用拉丁文写的短文，第一次揭示了他制作温度计的过程。

华仑海特作了两种温度计：一种装上酒精；另一种装上水银。从他的第一篇论文看来，他那时所用的温度计选用了两个固定点：结冰的盐水混合物的温度和人体血液的温度，并把它们之间的间隔分成96度。从他的第二篇论文看来，他还使用了冰和水混合的温度32度决定了第三个固定点。他叙述说：“那些温度计的刻度仅仅是使用在始于零度和止于96度的气象观察而已。这个刻度取决于三个固定点的测定，它们是用如下方法得到的：首先，最低点……是以冰、水和氯化铵或海盐的混合物来确定的，如果把温度计浸在这种混合物中，则液体降落到记为零的点。这个试验在冬天比在夏天更成功。第二点是这样得到的，如果混合物是由水和冰混合而成，但没有刚才所说的盐，如把温度计浸在这种混合物中，则温度将固定为32度。第三点是96度，如果温度计是放入健康人的口中与腋下，酒精就膨胀到这一点。”以后他又增加了水的沸点212度作为第四个固定点，这是在测量标准大气压下水的沸点时确定的。他发现，同一种液体的沸点将随气压的降低而减小。利用这一关系，他把温度计与气压计联合起来，制造了一种温度气压计。华仑海特的温度标记方法称为华氏温标，用 $^{\circ}\text{F}$ 来表示。他的温度计和温标在英美国家中最为流行。

1730年，法国人勒奥默(1683—1757年)制造了一种酒精温度计。他反对使用水银这种膨胀系数较小的材料而选用酒精。他采用的温标是以水的冰点为零度，水的沸点为第二固定点，把其间分为80等份。这是因为他通过实验发现，酒精的体积如果在水的冰点时为1000份，当它达到水的沸点时体积

变为 1080 份，所以他定点水的沸点为 80 度。这样，酒精的体积在每一勒氏度之间就膨胀了原体积的 $\frac{1}{1000}$ 。勒氏温标较多地为德国人采用。

1742 年，瑞典人摄尔修斯（1701—1744 年）确立了另一种温标。他把水银温度计插入正在溶解的雪中，定出冰点，然后把这温度计插入沸腾的水中，定为沸点。并把冰点和沸点之间的间隔等分为 100 格，为了免得测量低温时出现负数，他把水的沸点定为零度，而冰点定为 100 度。这样一来温度越高，度数越低，使用起来不太方便。八年之后，由摄尔修斯的同事施勒默尔建议，把这标度倒转过来，以冰点为 0° ，沸点为 100° ，这样使用起来更为方便，这种改进温标就是后来的百分温标。1948 年，第九届国际计量大会根据“名从主人”的惯例，把百分温标重新命名为“摄氏温标”，单位是摄氏度，用表示。它曾在法国占据优势，并长期为科学界所采用。

温度计的发明和改进为测量温度的变化提供了便利，对热学的发展有着积极作用，一方面，为了定出温标，需要确定一些“定点”，这导致关于冰和其他物质在一定条件下熔点恒定不变的事实的发现；另一方面，为了找出合适的测温质，促进了对一些热膨胀规律的研究，首先是气体，其次是酒精、水银等物质。

(2) 量热学

由于温度计的发明和改进，有了科学的热量概念和精密的量热仪表，热学才真正地走上了独立发展的道路。

从 17 世纪起，意大利的科学家们通过实验发现，在同一温度下具有相同重量的不同液体分别与冰混合时，冰被融化的数量各不相同，这表明不同物质的放热能力不同（即相同重量的不同物质在下降相同的温度时放出的热量不同）。起初，有人认为，物质的这种能力可能与它们的密度有关，密度越大，物质吸收或放热的能力越大。可是华仑海特通过实验发现，水银的吸或放热能力仅仅是同体积水的三分之二，这就打破了上述猜想。

由于化学中对燃烧现象的研究，化学开始向热学渗透，热化学即随之诞生，正是在热化学的研究中，大约在 1760 年，英国化学家布莱克进一步研究了这一问题，他做了如下的实验：把温度为 150° 的金子与同重量的 50° 的水相混合，它们达到的平衡温度为 55° 。这时金子的温度下降了 95° ，而水的温度只升高 5° ，可见相同重量的金子每下降或上升一度时它们的放热与吸热能力之比为 19。这个实验说明物质的吸热与放热能力与它们的密度并不是成比例地变化的。布莱克通过实验比较了各种物质与同重量但不同温度的水混合达到热平衡后的温度变化，从而推算出这些物质每升高或降低一度时它们吸收或放出热量与同重量的水吸收或放出热的比值。他把这个比值叫做物质的热容量，其实它就是物质的比热。由于测出了各种物质的比热，这样，就从测温学中逐渐发展出了量热术。这就是我们今天在物理学中用 $Q = Cm \cdot t$ （ C 为比热， t 为温度差， m 为质量， Q 为热量）的公式来求出物体吸收或放出热量的方法。

布莱克在热学方面的另一项重要工作就是他研究了物态变化中的热现象。大约从 1756 年起，他就考虑了为什么在冰融化为水和水变为汽时，物质吸收了大量的热而温度却不升高。他认为这可能是由于热潜藏起来的缘故。

他把这种不表现温度升高的热叫做潜热，并用冰+潜热=水，水+潜热=汽的公式说明了上述现象。1762年，他测出冰变为水时所吸收的潜能是同重量的水升高一度时吸收热量的78倍，水汽化时吸收的潜热是同重量的水升高一度时吸收热量的450倍。潜热和热容量的发现为人们研究不同材料的吸或放热现象及热传导能力提供了理论指导。瓦特在研制蒸汽机时就曾借助于布莱克的理论改进了汽缸的绝热性能，并增加了一个与汽缸分离的冷凝器以减少汽缸中蒸汽损失的热量，从而提高了热机的效率。

布莱克的工作由拉瓦锡和拉普拉斯等人加以发展，他们把一磅水升高或降低1度时所需要的热作为热量的单位，称作卡。1780年，麦根仑首先使用了比热这一术语，并把它定义为物质在一定温度下单位物质质量中所含的全部热量。随后，拉瓦锡等人通过液体与同重量但不同温度的水相混合的办法测定了各种液体的比热，同时还给出了求比热的一般公式。他们发现，物质的比热并不是不变的，在不同温度下略有差别，不过在通常温度下可以认为几乎没有变化罢了。

由于布莱克等人把“温度”和“热量”这样两个不同的热学概念区别开来，并提出了“比热”和“潜热”这些新的热学概念，从而开创了量热学这门新的学科。

(3) 热质说与热动说

在进行量热学的研究中，布莱克曾对热的本质进行过初步探讨。布莱克是“燃素说”的信奉者之一，在研究热的本质时，他认为“热”和“燃素”一样，是一种由特殊的“热粒子”组成的“热流体”。布莱克所说的这种“热粒子”，后来也被人们称为“热素”和“热质”。这样，布莱克就提出了关于热的本质的“热质说”。根据这一假说，他把热看成是一种特殊的物质，他认为热是一种流体，它可以渗透到物体中去并在热交换的过程中从一个物体流向另一个物体，水是“热质与冰的结合”。尽管在热交换前后，热质在不同物体中的含量有所改变，但是它们的总量是守恒的。很显然，热质说只不过是“燃素说”在热学中的推衍而已。热质说能够解释许多已知的热现象，因而成为18世纪占统治地位的一种观点。

拉瓦锡推翻了“燃素说”，在1780年又与拉普拉斯合作，完成了正确测定物质热容量的课题。在进行这一实验时，拉瓦锡说：关于热的本质，有人认为是一种物质，有的认为是物质分子的微小运动。只要是以热量保持恒定为前提，那么采用哪一种说法都是不错的。如果采用热是一种物质的观点，就可用热物质不生不灭来解释热量的守恒。如果采用热是分子运动的观点，就可用能的守恒来解释，因此各有各的道理。但是，不管表面上如何，拉瓦锡是倾向于把热当作一种物质来处理的。他在1789年所写的《化学纲要》一书中清楚地引入了热物质，把它作为元素之一，取名为热质。他论述道：所有物体由相互吸引的分子所组成，通过加热，固态会变为液态、液态会变为气态。从这两种现象来看，我们不得不承认存在着一种极易流动的物质实体，它具有充填分子间的空间，扩大分子间的距离的作用。这一物质实体——热质，根据其状态可分为“自由”热质和“束缚”热质。束缚热质被束缚在物质中间（束缚在分子上），形成该实质的一部分。而自由热质没有任何束缚状态，它从一个物体移向另一个物体，成为各种热现象的载体。拉瓦锡把将一定质量的物体加热到一定温度所需要的热质也取名为比热。比热取决于物

质分子间的距离和分子间结合的强弱，而且分子之间的空间的大小决定该物质的热容量。

这样，由布莱克提出，拉瓦锡明确归纳而成的热质说，在 18 世纪末到 19 世纪前 30 年左右在物理学上占了统治地位。正是在这种情况下，热学有了相当大的发展。这里需要注意的是：第一，正如人们在拉瓦锡时代已经看到的，热质这一观点和把热看作为运动的观点不能看作为二者绝对相斥、互相对立的，而应看作为同一事物的两个侧面；第二，以热质说为基础的研究，在某些范围内还是取得了很大成果的。这是因为热量守恒在某种范围的一些现象是成立的，另外，也因为熵在无增减的过程中，根据热量观点，在理想情况下可以获得熵。

18 世纪末，开始有一些人对“热质说”表示怀疑。1798 年，从美国移居欧洲的科学家汤普森（即伦福德伯爵，1753—1814 年）在德国的一家兵工厂进行了著名的“伦福德热学实验”。汤普森用锐钻头和钝钻头这样两种不同的钻头钻造炮膛，并测量两种钻头所产生的不同的热量。他发现，在相同的时间内，钝钻头比锐钻头钻进的深度要小得多，但钝钻头所产生的热量比锐钻头所产生的热量反而要大得多。而根据“热质说”，钝钻头产生的热量更大，释放出来的热质更多，因而钻进的深度也应更大。但事实却与由“热质说”所推出的结论完全相反。汤普森还发现，一只简直不能再用于钻孔的钝钻头，在它钻孔时，它所产生的热量竟能在 2 小时 45 分钟内使 18 磅左右的温水热到接近沸点。根据上述热学实验，汤普森认识到，热不过是机械运动的一种形式，它的本质在于机械运动，运动产生热。这样，他就提出了最初的热唯动说，即与“热质说”对立的“热动说”。

汤普森提出热动说以后，即以热动说为理论武器，对热质说进行了最初的批驳。1799 年，他在《伦敦哲学学报》上发表了一篇论文中说：“什么是热？它不可能是物质的实体。对我来说，热除了是那种在这个实验（给大炮钻孔）中当热出现时不断传给金属屑的东西即运动以外，似乎难以设想它是别的什么东西。”

汤普森最先发现了热运动与机械运动的本质联系，使热学与力学实现了最初的渗透和结合，这就为热力学的诞生在实验上和理论上迈开了第一步。

但是，由于布莱克的热质说在那时仍具有广泛而深远的影响，因此汤普森的热动说发表之后，并未立即产生显著的影响。在热动说发表之初，只有一个人立即接受了汤普森的热动说，这个人就是英国青年电化学家戴维。

1799 年，戴维进行了一次摩擦冰块实验。他在一个可靠人力操纵的真空装置中让两块冰相互摩擦。由于冰被密封在真空装置中，不可能有另外的热源给冰块加热。在实验开始之前，戴维断言，两块冰在相互摩擦中将会产生一定的热，而它们在摩擦中产生热的标志即是它们都将在相互摩擦中溶化。实验结果，他的预言成了事实。这一实验，使汤普森的热动说进一步得到了实验上的证实。

继戴维之后，曾重建光波学说的英国物理学家托马斯·杨氏从光与热的关系出发，在 1807 年对热动说进行过研究。瓦特在革新纽可门蒸汽机时，虽然他既利用了布莱克的量热学成就，同时也接受了布莱克的热质说的理论，但他在革新成功蒸汽机以后，也曾在 19 世纪初接触过一些热力学问题。他曾

绘制过一张蒸汽压力与汽缸容积的分析图，这说明他对热力学问题已有所认识。

显而易见，正是在力学、热学、化学的相互渗透中，发生了热动说与热质说的论争。虽然热动说直到 1826 年才为苏格兰植物学家布朗（1773—1856 年）所发现的分子热运动最后证实，但正是热动说与热质说进行的论争，不仅为热学与力学的相互渗透、从而产生热力学这门新兴的边缘学科创造了条件，而且为以后能量定律的发现奠定了一块基石。

四、天文学

1. 著名天文学家

自从哥白尼的日心说提出后，近代天文学得到了很大发展，但由于教会的迫害，神学自然观的盛行，天文学的发展受到了限制，但这一时期也涌现出了一大批杰出的天文学家。

(1) 赫维利斯 (1611—1687 年)

波兰天文学家，生于格但斯克。自幼喜爱天文学，青年时代从事过多种技术和艺术活动，是位著名的艺术雕刻家、机械师和光学专家。1641年，在他的领导下，建成了当时欧洲最大的天文台——格但斯克天文台。

赫维利斯是月面学的创始人。他于1647年绘制了精确而且详尽的、并有一定艺术价值的月面图。他对月面的各种形式，如角、海、山等加以一一命名。这些名称仍保持到现在。同时，他还发现月球的光学天平动、水星相和四颗彗星，并对恒星自转周期作了第一次精确的测量。

1687年，赫维利斯编成了1546颗星的星表，划分出11个新的星座，并一一加以命名，如：猎犬座、鹿豹座、蝎虎座、小狮座、六分仪座、麒麟座、狐狸座、盾牌座等。这些名称至今仍在沿用。

赫维利斯制造了许多天文仪器和设备，其中包括六分仪、象限仪和折射望远镜等。1671年，他谢绝了巴黎天文台的聘请，留在波兰工作，直至逝世。

(2) 皮卡 (1620—1682 年)

法国天文学家，生于拉弗莱什。青年时随法国物理学家、天文学家伽桑狄学习天文学，1655年，继伽桑狄成为法兰西学院的天文学教授。他是法国科学院建院时的第一批院士之一，也是建立巴黎天文台的发起人之一。

皮卡受法国科学院的委托，于1669—1670年测出了巴黎和亚眠之间的子午线的弧长。根据皮卡的测量，该子午线1度的长度为111.21公里，比现在测量的数据仅大了0.03公里。

皮卡第一个用线网目视筒代替觇板孔来进行角测量。他制成了十字丝测微计，并装在巴黎天文台的测量工具上，用它测量了太阳、月球和行星的角直径及邻近恒星之间的角距离。经过测量，他认为地球不是很精确的球形，通过对子午线天体赤经的观测，他第一个提出了利用摆钟测定天体赤经的方法。

为了测定太阳视差，皮卡于1672年同卡西尼一起在火星冲时，对火星进行了详细的观测，所得结果进一步阐明了以前的一些看法。他得出的有关地球的一些重要数据，为后来牛顿提出万有引力定律创造了条件。

皮卡于1678年出版了天文年鉴，这是世界天文史上的第一部年鉴，皮卡的著作主要有《地球的测量》等。

(3) 卡西尼 (1625—1712 年)

意大利天文学家，生于佩里拉尔多。曾在热那亚的一些教会学校学习。1644—1650年，在波伦亚附近的潘茨格天文台工作。1650—1669年，任波伦亚大学天文学教授。1669年，迁居法国。同年成为巴黎科学院院士，他领导

了巴黎天文台的筹建工作，并一直主持该天文台的研究工作。

卡西尼是一位才华出众的观测家。他用子午仪完成了大量的太阳位置观测。在此基础上编成了新的太阳表，于 1662 年发表。他根据正弦定律提出了第一个准确的大气折射理论。1664 年开始用大型优质光学望远镜观测行星表面，测定了木星的自转周期（9 时 56 分），描述了行星表面多个地带系统，测量了行星轨道的偏心率。1666 年，对火星表面作了详细观测，由此确定出火星准确的自转周期为 24 时 40 分。他于 1668 年编纂并于 1693 年校订的木星运行表，曾为天文学家和航海家所广泛采用。

卡西尼于 1671—1684 年先后发现了四颗土星卫星，即：土卫八、土卫五、土卫三和土卫四。他还发现土星光环的缝隙（卡西尼环缝），即土星环是由暗带分开的两个部分所组成，并估计整个土星光环由大量微粒所构成。1671—1679 年，还对月球表面作了详细的观测，并编成了月离图。

(4) 勒默尔（1644—1710 年）

丹麦天文学家，生于奥尔胡斯。曾在哥本哈根大学学习，1671 年，移居巴黎，在巴黎天文台充当皮卡的助手。1681 年回到丹麦，在哥本哈根大学任天文学和数学教授，创建了哥本哈根天文台，并担任台长。

1675 年，勒默尔在研究木卫运动时曾发现：当地球和木星相距最远时，木卫食的时间比计算的时间要晚；当地球和木星相距最近时，木卫食的时间则比计算的时间要早。1676 年勒默尔用光速有限值解释了木卫运动的这种虚假的不均匀性，同时测量了这种不均匀值，并得出光通过地球轨道直径的时间为 22 分钟。

勒默尔在哥本哈根天文台时发明了具有准确分度盘和子午环的测量工具，改进了测微计，并制造了许多其它天文仪器。他还测定了 1000 多颗恒星的位置，所得数据为后来的许多天文学家用来确定恒星的自动。

(5) 弗拉姆斯蒂德（1646—1719 年）

英国天文学家。自幼体弱多病，1662—1669 年，在家自修天文学；1671 年，与汤利一道开始了系统的天文观测。1674 年，剑桥大学函授毕业；1675 年，获得第一个皇家天文学家的称号。1676 年担任格林尼治天文台台长，1676 年被选为伦敦皇家学会会员。

弗拉姆斯蒂德以天文观测而闻名，他的成就为现代方位天文学奠定了基础。为了测得恒星、行星和太阳的准确位置，他最先采用了望远镜。他研究了月离理论，并于 1673 年编成了月离表。随后，他又根据新的观测结果，进一步发展了这一理论。牛顿在研究月离理论时，曾采用了他的理论和观测结果，以及有关行星角直径的论文。

弗拉姆斯蒂德到格林尼治天文台以后，通过系统的观测，完成了一部三卷集的巨著《不列颠星表》，收集了 3000 颗星的位置，并标有每个星座的编号。这些编号迄今仍在沿用，如天鹅座 61 等。

(6) 哈雷（1656—1742 年）

英国天文学家。生于伦敦一个商人家庭，从小热爱天文学。上中学时就曾测出伦敦磁针变化为 $2^{\circ}30' W$ 。在牛津大学学习期间，他设计了测定行星轨道单元的新方法。1703 年，被聘为牛津大学教授。1720 年，接替弗拉姆斯

蒂德成为皇家天文学家，并担任格林尼治天文台台长。

1676年，年轻的哈雷担负起南天星表的编制任务，经过几年的努力，终于在1679年出版了第一个南天星表，因而赢得了较高的声誉，被选为皇家学会的会员，弗拉姆斯蒂德称他为“南方的第谷。”

1682年以后，哈雷为解决海上经度的确定问题，对月球进行了一系列的观测。1698—1720年，他为了观测地磁的变化，并考察英吉利海峡的潮汐和海峡，进行了连年的探险工作。

哈雷对天文学的最大贡献是对彗星的研究，他在观测1680年的大彗星之后，又对24颗彗星的轨道进行了计算。他注意到1456年、1531年、1607年及1682年彗星运行轨道的相似性。他首次利用万有引力定律推算出一颗彗星的轨道，并预测该彗星以约76年为周期绕太阳运转。这颗彗星被后人称之为“哈雷彗星”。

此外，哈雷还发现了恒星的自行现象和月球的运动的长期加速度，并提出了以观测金星凌日来测定太阳的视差的建议。

(7) 布莱德雷 (1693—1762年)

英国天文学家。1711年进入牛津大学，1719年成为牧师，1721年，被聘为牛津大学天文学教授，1742年，接替哈雷担任了格林尼治天文台台长。

布莱德雷在天文学上有两项重要的发现，一是光行差现象，二是章动现象。由于地球的运动，观测者所看到的天体方向，不是它的真实方向，而是地球的速度和来自天体的光速合成的方向，这两个方向之差叫光行差。布莱德雷所得出的光行差常数在20至20.5秒之间，接近现代光行差常数20.47秒。这项成果发表在1729年皇家学会的《哲学学报》上。

由于地球自转的进行，春分点除了长周期的岁差外，还有许多短周期的微小变化，总称为章动。布莱德雷于1747年所发现的是其中最主要的一个，周期约为18.6年。

1749年以后，布莱德雷由于得到了一些新式的天文测量仪器，包括8英尺墙象限仪等，因而对恒星的位置一一进行核对。经过6万多次的观测，终于编成一部比较精确的星表。这部星表共两卷，在布莱德雷逝世以后，先后于1798年和1805年出版。

布莱德雷在英国天文学史上享有较高的声誉，当时牛顿曾称赞他是欧洲最佳的天文学家。

(8) 拉卡伊尔 (1713—1762年)

法国天文学家，生于尤梅尼。曾在巴黎一些教会学校学习修辞学和哲学，后改学神学。获得天主教的神甫职位。从1736年起在巴黎天文台工作，1739年，任巴黎马札林学院的数学教授，1750—1754年，在南非好望角从事天文观测。他是法国科学院的院士。

拉卡伊尔是当时最杰出的天文观测家之一，曾以南天的观测而闻名。他绘制了约1万颗南星图，着重观测和计算了其中的1942颗星的位置。拉卡伊尔完成了南天星座的划分，分出了14个新的星座，并一一加以命名。1751—1752年他在南非好望角对月球、火星、金星进行过多次的观测，并利用对北半球的观测来测定月球视差和太阳视差，所得视差值与现代的测定值接近。

拉卡伊尔参加了大量的大地测量工作，如巴黎天文台的测量，法国海岸线的地形绘制，南非子午线弧的测量等。此外，他从 1743 年起编写了大量为当时所广泛采用的数学、力学、天文学和光学方面的教材，其中主要有：《数学基本讲义》、《力学基本讲义》、《天文学和几何学和物理学基本讲义》、《光学基本讲义》、《天文学基础》、《对数表》等。

(9) 克莱罗 (1713—1765 年)

法国天文学家和数学家。生于巴黎，12 岁即写出了关于研究四阶代数曲线的论文，16 岁开始研究双曲率曲线，18 岁发表了相应的论文，同年被吸收为巴黎科学院的研究生。

1736 年，克莱罗参加了以测量子午线为目的的所谓拉普兰德勘察工作，1743 年他完成了《基于液体静力学的地球形状理论》一书，在该书中，提出了所谓克莱罗大地测量基本定律，即确立地球表面重力分布与地形及旋转角速度参数之间关系的定律。还提出了关于缓旋液体平衡图形的一般问题，并引入了曲线积分。

克莱罗对月球的运动、哈雷彗星的运动、太阳摄动等问题进行了研究，取得了一定的成就。所著《月球的运动理论》一书影响较大，曾获得彼德堡科学院的奖金。

克莱罗与欧拉是关于运动的动力理论的创始者。他为把牛顿的《自然哲学的数学原理》一书翻译成法文，付出了大量的劳动，并为其作了注解。

(10) 拉格朗日 (1736—1813 年)

法国数学家、力学家、天文学家。生于意大利的都灵，就学于都灵炮兵学院。1759 年，被选为柏林科学院院士。1772 年，被选为巴黎科学院院士。1776 年，被选为彼德堡科学院名誉院士。1764 年和 1766 年，先后以《月球天平动》和《木星卫星理论》获得巴黎科学院的第一等奖。1766—1787 年，担任柏林科学院主席。1787 年，定居巴黎。

在天文学方面，拉格朗日研究了彗星和小行星的轨道摄动，提出了彗星起源假论，并对金星凌日、日食进行了计算。著有《关于月球的天平动问题》、《木卫的运行问题》、《三物体算题》、《月球的多年加速度》、《彗星轨道的摄动》等。

2. 康德

(1) 青年天文学家康德

进入 18 世纪后，由于神学自然观的影响，在整个自然科学领域相继出现了停滞和萧条的局面。18 世纪中期，在德国首先吹起了一股消融神学自然观的春风。1754 年，德国天文学家康德 (1724—1804 年) 以“潮汐假说”宣布了地球的毁灭；第二年，他又以“星云假说”宣布了太阳系的起源。

当康德悄悄地掀起一场新的自然观的革命时，他还是一个刚刚结束家庭教师生涯的小人物。他生于哥尼斯堡的一个马鞍匠之家，他先天不足，体质瘦弱。成年后也仍然是个身高只有一米五七的瘦小个儿，靠着家庭的节俭，康德得以进该城的腓特烈学校。他最初曾向往将来当一个古文学者，但在 1740 年进入哥尼斯堡大学后，由于该校的一位教授的影响，对科学与哲学，

特别是对天文学以及天文学中的哲学问题产生了浓厚的兴趣。由于家境困难，康德在哥尼斯堡大学的学业前后持续了7年，最后还是未能结束学业即离校当了家庭教师。

在哲学上，他特别注重研究古希腊哲学，而对于古希腊哲学，他又特别推崇古希腊哲学中的原子论学派。古希腊哲学家留基伯（公元前500—前400年）和德谟克利特（公元前460—前370年）曾创立了最初的原子论。后来经过古希腊另一哲学家伊壁鸠鲁（公元前341—前270年）的发展，使原子论形成较为完整的理论形态。这种原子论认为，世界的本原是原子，宇宙万物都是由一种不可再分割的最小的物质粒子——原子组成的。到了古罗马时期，唯物主义哲学家卢克莱修（公元前99—约前55年）在总结当时的自然科学成果的基础上，把伊壁鸠鲁的原子论进一步哲学化。可以说，正是古希腊哲学上的原子论，给了康德的原始星云假说以哲学上的最初的启迪。

在科学上，康德特别注重研究天文学。他除了研究哥白尼、第谷、刻卜勒、牛顿等人的天文学成果之外，还极其关注当时天文学的进展。例如，当时的英国天文学家布莱德雷、法国天文学家莫泊丢（1698—1759年）、英国天文学家赖特（1711—1786年）等人，都曾在天文学中取得一些新的进展。除此之外，康德还研究过进化论的先驱者之一、法国生物学家布丰的有关生物进化的最初理论，特别是研究过布丰在1745年提出的彗星碰撞太阳而引起行星产生的有关行星起源的灾变假说。

正是在积极吸取古代和当代的哲学和科学成果的基础上，康德悄悄地准备着重新掀起自然观上的革命。

另一方面，当康德正致力于准备这场革命时，在德国，莱布尼茨和沃尔弗（1679—1754年）的哲学已成为德意志的官方哲学；在欧洲，以沃尔弗为代表的神学目的论也正是甚嚣尘上之时。

(2) 潮汐假说

1754年6月，刚刚结束家庭教师生活不久的康德，发表了他的第一篇科学论文《对一个问题研究，地球是否由于绕轴旋转时发生过某种变化》。这篇论文是按普鲁士科学院悬赏征文的题目写的。当时的征文是《地球是否从生成的时刻起就由于绕轴旋转而日夜交替中发生过某种变化》。对于是否参加论文竞赛，康德开始犹豫不决，而当他的论文发表时，征文奖金已被评给一位神父。这位神父的论文认为，地球自神创之日起，没有发生过任何变化。这种观点显然是与以宇宙不变为基础的神创论的自然观一致。但是康德的论文作了断然相反的回答。康德认为，由于月球与地球的相互吸引而产生的潮汐摩擦，对地球自转必然产生直接影响，即对地球的自转起阻碍作用。尽管这种阻碍作用与地球自转的巨大速度相比，小得简直可以忽略不计，但这种力毕竟在永恒不息地起作用，这就必将使地球自转速度逐渐迟缓。由此地球和整个太阳系都将走向毁灭。这就是康德提出的著名的潮汐假说。

1754年8月，康德发表了另一篇科学论文：《关于从物理学观点考察地球是否已经衰老的问题》。在这篇论文中康德再次论述了他的潮汐假说，他指出一切事物在产生与发展之后必将逐渐走向衰老和死亡。地球当然也不例外。

(3) 星云假说

在重返哥尼斯堡之前的家庭教师生活中，康德已根据他在十余年中对天文学中的哲学问题的研究，基本上完成了一部天文学方面的哲学问题的著作。这一著作最初的名称是《宇宙论或根据牛顿理论试论宇宙的结构、星体结构和它们按物质运动一般规律运动的原因》。1754年底，即康德在提出他的潮汐假说之后，便着手整理和修改他的这一著作，1755年初，康德完成了这一著作的最初定稿工作，并将这一著作的书名最后定名为《关于诸天体的一般发展史和一般理论或根据牛顿原理试论整个宇宙的结构及其机械起源》。

慑于当时神学自然观的声威，同时也出于康德本人已经萌芽的二元论立场，他决定匿名发表这一著作，并决定以最恭敬的颂辞献给普鲁士国王腓特烈二世。1755年3月，康德这一著作在哥尼斯堡出版。正是在这一著作中，康德提出了他的另一个著名的假说——星云假说。

《宇宙发展史概论》由前言和三个部分组成。在前言中，康德概述了他的星云假说的基本内容。他认为，太阳系是由一团原始星云在万有引力的作用下逐步演化而来的。在这团原始星云中，处于分散状态的物质微粒由于相互吸引而不断凝聚，由于相互排斥而发生旋动。于是处于混沌状态的原始星云逐步演化为目前的天体系统。为了批判宇宙不变论所宣扬的神创论的自然观，康德在序言中特别强调天体起源和天体演化的自然原因。他说，宇宙“只是受到一般运动规律所支配的物质所起的作用的结果”，“大自然是自身发展起来的，没有神来统治的必要。”他还大胆宣称：“给我物质，我就用来造出一个宇宙来，这就是说，给我物质，我将给你们指出，宇宙是怎样由此形成的。”

《宇宙发展史概论》的第一部分是全书的基础。在这一部分中，康德主要阐述了宇宙结构及其系统。康德根据当时的天文学成就指出，水星、金星、地球、火星、木星都在自己的轨道上绕日运转。太阳只是太阳系的一颗恒星。而银河系中其它的数目巨大的恒星，同样也是“很多类似太阳系的天体系统的中心”，同样也是它们所在系统中的太阳。在这一部分，康德除了概述宇宙的结构系统之外，还论述了宇宙结构的力学原因，即无论是在什么天体之间，都受万有引力定律的支配。而正是由于这一力学原因，使宏大浩瀚的宇宙构成了一个有序的整体。他引用同时代英国诗人蒲柏（1688—1744年）的哲理诗句说：“看那神奇的大链条，把世界各个环节扣牢，使伟大整体连在一道。”康德充分肯定宇宙系统结构的力学原因，正是为了批判牛顿关于天体运动的“经极原因”的神学解释。

第二部分是全书的重点。在这一部分，康德主要论述了天体的起源及其演化问题，即系统地论述了他的星云假说。康德假定，宇宙的初始状态是一片由多种物质微粒所组成的混沌不分的原始星云。由于物质微粒之间存在着两种作用力：引力和斥力，引力使一些物质微粒相互吸引并逐渐形成团块；而斥力则使一些微粒及其团块发生旋转。同时，由于太阳的位置最初基本上处在太阳系这一宇宙空间的中心，因此成为最强大的引力中心，使一些密度较小的星云物质迅速向这一中心凝聚，以致最后形成一个炽热并发光的天体。反之，由于斥力的作用，使其它星云物质产生另外的引力中心，一些密度较大的星云物质则凝聚在另外的引力中心，便依次形成行星、卫星和其它

天体。

康德的星云假说，有以下明显的特征：第一，他肯定宇宙的本源是一种原始的星云物质；第二，他认为斥力与引力是天体起源和演化中的两种相互联系的基本的作用力；第三，他指出天体起源与演化是一个逐渐发展的过程。这些基本的理论特征使他的星云假说成为 18 世纪后期与 19 世纪初期的科学思想的一面旗帜。

第二部分除了论述天体的起源和演化之外，还论述了行星系的起源及其运动的原因；论述了行星的不同密度及其质量的关系；论述了行星轨道的偏心率与彗星的起源；论述了行星的绕轴运动及卫星的起源；论述了其他天体的起源及其演化的力学原因。总之康德试图以他的星云假说为基础，全面地探讨天体的起源及其演化问题。

第三部分，康德以他的星云假说为基础进一步提出，地球并不是宇宙中唯一有生命的天体，其它行星上也可能有人类居住。当然对于地球外生命问题，无论在当时还是在现在，都仍然是个假说，但康德敢于提出这种与神学自然观针锋相对的假说，这在当时是颇有科学勇气的。

(4) 两个假说的影响

尽管康德的两个假说有种种缺点，但是，对于 18 世纪僵化的自然观而言，他的两个假说确实是向这种僵化自然观的第一次认真的开火，是第一次真正的革命。

在科学上，康德的天体演化学说在近半个世纪之后，与法国天文学家拉普拉斯的天体演化学说一道成为 19 世纪科学发展的先导。继康德——拉普拉斯的天体演化学说诞生之后，地质演化学说、生物进化论相继诞生。就科学思想的源流而言，这些新的演化理论都是以康德的天体演化学说为继续进步的起点的。

在哲学上，康德以他的天体演化学说为科学基础，奠定了他本人的哲学体系以及德国古典哲学的辩证自然观的基础。虽然在康德之后，经过费希特、谢林，最后到黑格尔那里，这种辩证自然观最终彻底地转向了唯心主义，但同以牛顿为代表的神学自然观和形而上学自然观相比，它毕竟是一大革命，一大进步。

因此，无论从科学上，还是从哲学上，康德的两个假说所引起的科学思想的革命，确实不愧为自近代科学诞生以后的又一次革命。

康德本人深刻地理解他的理论的革命锋芒，因此他的《宇宙发展史概论》最初是匿名发表的。他的著作匿名发表后，神学阵营和科学阵营都没有意识到它的价值，书的初版印数不多，销路不广，出版商因此宣告破产。到了 1796 年，拉普拉斯在他的《宇宙体系解说》一书中，提出了一个与康德的星云假说类似的星云假说，这才使人们重新记起康德的星云假说。1799 年，康德的《宇宙发展史概论》才得以再版，而他的星云假说才得以和拉普拉斯的星云假说一起，以“康德——拉普拉斯的天体演化学说”而载入近代科学史册。

3. 新的天文成果

(1) 天王星的发现

由于康德的天体演化学说的诞生，标志着天文学的相对冷落有所回升，

到了 18 世纪 80 年代初，这种局面发生新的转折。而发生这一转折的转折点，就是 1781 年对太阳系的一颗新行星——天王星的发现。发现天王星的是一个流浪音乐家，后来以天文学家著名的赫舍尔（1738—1822 年）。

赫舍尔出生在法国汉诺威的一个乐师之家。他从小学会了多种乐器的演奏，其时，法王路易十五发动了对德战争，赫舍尔即和父亲一起从军。1757 年，赫舍尔离开军队，只身流落到英国，开始了他的流浪音乐家的生涯。后来一家教堂聘请他做了乐师。他在白天为教堂演奏音乐，在晚上独自望着星空出神，他从音乐的和谐想到宇宙的和谐，似乎突然发现音乐结构与宇宙结构之间有某种奇妙的统一，于是他开始研究天文学。

要进行天文观察最基本的条件是必须有一台天文望远镜。但是他没钱购买，只得自己动手试制，经过一段时间的辛勤工作，终于制出了一台直径为 6.2 英寸的反射型天文望远镜。

1781 年春的一个夜晚，当赫舍尔把望远镜对准双子星座时，发现在视场中多了一颗六等小星。这颗小星初看起来并不显眼，可是在经过仔细观察之后，赫舍尔发现，它与其它的星星并不相同，这一偶然的发现引起赫舍尔的极大兴趣。

从最初发现这颗六等小星开始，赫舍尔又连续对它进行了十多个夜晚的追踪观察。赫舍尔发现，这颗小星的位置在不断地移动，当时，他认为可能是一颗彗星，于是在 3 月 13 日向皇家学会递交了观察报告，说明发现了一颗新彗星。以后他又对这颗六等小星进行多次观察和反复分析，最后认定，他所发现的，实际上是太阳系的一颗新行星。接着赫舍尔初步计算出了这颗新行星的运行轨道，计算出了它对日的平均距离。他发现，这颗新行星的绕日轨道近似圆形，而对日平均距离约为土星的两倍。

自古以来，人们只知道水、金、火、木、土五大行星。哥白尼的日心说创立后，人们才认识到人类自身所在的地球也是一颗行星，这样人们才知道太阳系有六大行星。自哥白尼以后，人们在天文观察中虽然有不少新发现，但由于人们一直认为土星是太阳系的最边缘，所以谁也没有想到在土星之外是否还有别的行星。赫舍尔发现的这颗新行星并不难观察，在晴朗的夜空，用肉眼也可以勉强观察到，但许多天文学家由于受到土星是太阳系的边缘这一既定观念的束缚，既使在看到它以后，也错把它当做恒星或别的天体放过了。

新行星的发现立即轰动了英国乃至整个欧洲。许多天文学家都在望远镜中找到了这颗新行星。天文学家们纷纷向赫舍尔表示祝贺，建议把这颗行星命名为“赫舍尔星”。但赫舍尔认为不合适，于是，这颗新行星便以古希腊神话中的天王尤拉纳斯的名字为它命名。这样，天王星便成了太阳系的行星家族中的第七名成员。

天王星的发现为英国赢得了极大的科学荣誉，英国皇家学会立即授予赫舍尔以皇家学会会员的称号，并聘请他为皇家天文学家。自此以后赫舍尔便成了一名职业天文学家，那时赫舍尔 43 岁。

赫舍尔被聘请为皇家天文学家时，正值他中年盛时，因此，他又在天文学中，特别是在天文观察中作出了一系列杰出的贡献。1782 年，他编制出了第一个双星辰。1783 年，他不但发现了太阳本身的自行，而且发现了太阳系作为一个整体在空间的运动。这一杰出的发现，可以与发现天王星相媲美。因为这一发现动摇了认为恒星不动和太阳系不动的传统观念。1785 年，他首

次用统计方法研究了恒星在空间的分布和运动，从而描绘出了第一个银河系结构模式，并由此奠定了恒星天文学的基础。1787年，他又发现了天王星的两颗卫星：天卫四和天卫三，并首次发现了第一个行星状星云。1789年，他又发现了土星的两颗卫星：土卫一和土卫二。1800年，他首次从太阳光谱中发现不可见的红外辐射。1802年，他又发现双星有相互绕转的周期运动。可以说，在18世纪末和19世纪初的天文学史中，乃至在整个近代天文学史上，谁也没有象赫舍尔有这么多的杰出发现。

由于赫舍尔在天文观察中所取得的一系列成就，特别是由于天王星的发现，在天文学中又重新激起了一股新的热流，在这股新热流的激荡之下，天文学又出现了一个新的蓬勃局面。

(2) 拉普拉斯与高斯的天文学研究

拉普拉斯(1749—1827年)生于法国诺曼的一个农民家庭，在博蒙陆军学校毕业之后，由大数学家达兰贝尔推荐，当了巴黎军事学校的数学教授。在法国大革命时期曾参加过巴黎高等师范学校和工科大学的组织工作。

在赫舍尔发现天王星之前，拉普拉斯即开始致力于天文学研究。不过，他最初的研究主要是在天体起源的力学理论方面。1775年，他对潮汐动力学的研究取得初步成果。此后，他进一步致力于天体起源的理论推导。1796年，他发表了《宇宙体系解说》这一名著，在这一著作中，他提出了一个类似于康德的天体演化学说的“星云假说”。所不同的是，拉普拉斯的“星云假说”比起康德的“星云假说”有更多的力学基础与物理学依据，而他的《宇宙体系解说》比康德的《宇宙发展史概论》产生了更深远的影响。正是由于拉普拉斯的“星云说”，使人们想起了康德的“星云假说”。这样以“星云说”为基础的天体演化学说，自此便以“康德——拉普拉斯学说”而闻名于19世纪初。由于这一学说本身所具有的革命内容，同时也由于法国革命在当时的巨大影响，“康德——拉普拉斯学说”便成为19世纪各种演化学说的先导，成为19世纪科学革命的一面旗帜。

当赫舍尔发现天王星的消息传到法国后，即进一步激起了拉普拉斯对数理天文学的兴趣，特别是激起了他对天体力学的兴趣。于是，他以牛顿、欧拉、达兰贝尔、拉格朗日等人有关行星摄动的力学和数学成果为基础，开始对行星运动的力学和数学问题进行研究。1799年，拉普拉斯发表了《天体力学》这一重要著作。在这一著作中，他进一步发展了行星运动的摄动理论。

天王星的发现，也激起了观测天文学的新的热流。1801年1月1日，意大利天文学家皮亚齐(1746—1826年)在火星与木星之间发现了太阳系的第一颗小行星“谷神星”。这是继天王星发现后，又一轰动科学界的重要新闻。自此之后，人们才知道，不但有天王星这样的大行星，而且还有像谷神星这样的小行星。这样，人们对于太阳系的认识又前进了一步。

谷神星的发现引起了德国青年数学家高斯的兴趣，当时高斯年仅24岁，但他已在数学上取得了一些引人注目的成就，于是他很快转入天体力学的研究。在研究之初，高斯对皮亚齐的观察资料进行了分析，结果发现，只要用三个基本数据就可以算出谷神星的轨道。1802年，高斯的朋友、德国天文学家奥尔别尔斯在火星与木星之间又发现了一颗小行星“智神星”。高斯也用同样的方法对智神星的轨道进行了计算，其计算结果与观察的结果是一致的。

高斯在天体力学中取得的这些最初的成果给了他很大的鼓舞。但不久以后，人们发现，无论是谷神星，还是智神星，它们的实际运行轨道要比理论计算轨道复杂得多。而使小行星的轨道复杂化的原因，显然是由于大行星的摄动作用引起的。于是高斯由行星轨道的一般理论研究，转入重点研究行星的长期摄动问题。此后高斯经过几年的努力，终于建立了一个按圆锥曲线运动的理论来计算行星摄动的新的数学方法。1809年，高斯出版了论述他的这一新的数学方法的著作《天体按照圆锥曲线运动理论》。这样，继拉普拉斯之后，高斯又把行星摄动理论向前推进了一步。

五、数学

1. 微积分的发明

(1) 高等数学的奠基

17 世纪初年，由于社会生产的需要，推动了天体力学、几何光学、力学和数学等学科的发展，正是在这些当时处于迅速发展状态的学科里，最先播下了微积分的数学种子。

首先，在天体力学和力学的发展中，由于计算行星的轨道，由于计算抛物体的运动，从距离和时间的函数关系求运动物体的瞬时速度，或从运动物体的瞬时速度来求运动物体的距离，这样属于变速运动的数学问题又突出地摆在数学家面前。

其次，在几何光学与力学的发展中，还从另一方面提出了新的数学问题。在几何光学中，由于设计透镜，需要计算入射光与法线和切线的变化，因此提出了曲线上的任意一点的切线计算问题。在力学中，为了找到运动物体在曲线上任意一点的运动方向，同样也提出了曲线上的任意一点的切线的计算问题。

同时，在数学本身的发展中，特别是在笛卡尔和费尔玛两人的解析几何建立之后，求曲线上任意一点的切线问题，同样也突出地摆到数学家面前。

除了上述的求运动物体的瞬时速度和求曲线上任意一点的切线这两个基本的数学问题之外，还有求函数的极大值和极小值问题，求曲线的长度、曲面的面积、曲体的体积等问题，同样也提到了数学的议事日程。这些基本的数学问题，实质上可归于同一数学问题。所以，17 世纪初的数学家，只要他真正走到了当时的数学的前沿，没有一个不想在这一数学问题上试试自己的数学才能的。

正是在上述历史条件下，生活在 17 世纪初期的数学家已对微积分问题进行了卓有成效的探索。在进行这一开拓性探索的数学家队伍中，普通数学家多达几十人，著名数学家多达十几人，如笛卡尔、卡瓦列利、费尔玛、罗伯佛尔，以及英国数学家华里斯和牛顿的老师巴罗等人。在这些数学家中，法国数学家罗伯佛尔早在 1634 年写作《不可分法论》（1693 年出版）时，就曾对求曲线的问题作过最初的尝试。1635 年，意大利数学家卡瓦列利在出版《用新的方法推进连续体的不可分量的几何学》一书时，已发明了一种形式比较简单的微积分。1637 年，笛卡尔在出版《几何》一书时，在他的曲线方程的基础上，也曾对曲线的切线问题进行过最初的研究。1637 年，法国数学家费尔玛在其《求极大值和极小值的方法》一书中，曾用微分法来求极大值与极小值。在英国，华里斯 1655 年出版的《无穷算术》一书中，为微积分的奠基作出了重要的贡献。此后对微积分的奠基作出重要贡献的，便是牛顿的老师巴罗，巴罗在 1669 年出版的《几何讲义》一书中，已经找到了求曲线上任意一点的切线的数学方法。可以说，17 世纪初期的这些数学家与微积分的最后发明都只相距一步之遥，而牛顿的老师巴罗直接把牛顿送到了微积分发明的前沿。

在数学研究中，牛顿不仅广泛地阅读和研究笛卡尔、费尔玛、华里斯和巴罗等人的数学著作，而且善于吸收和综合他人的数学成果。正因为如此，这就使牛顿有可能在综合当时的数学成果的基础上，跨出最高的和最后的一

步，从而最终完成微积分的发明。

据牛顿自己说，他最初发明微分方法是在 1665 年 11 月，而最初发明积分方法是在 1666 年 5 月，这两年正是牛顿在他的故乡逃避瘟疫的时期。当然，牛顿所说的时间，是他最初发明这一数学方法的时间，而真正较为系统的建立起微积分的基本原理和主要方法，是在此后十年左右的时期。

在最初的发明微积分方法之前的 1664—1665 年间，牛顿曾运用华里斯的分析方法，对二项式进行过研究。这一研究是由曲线形面积的求积问题引起的。在研究中，牛顿尝试用无穷级数的方法进行计算。随着研究的深入，牛顿发明了著名的二项式定理。而这一定理作为曲线形面积的最直接最简便的求积方法，对牛顿发明微积分方法起了直接的推进作用。

1669 年，即牛顿继任卢卡斯讲座数学教授的当年，牛顿即着手进行微积分的研究。同年，他写出了记述微积分的第一部重要论著：《运用无穷多项方程的分析学》。在这一论著中，牛顿在他初步引入的无穷小量的基础上，找到了求一个变量对另一个变量的瞬时变化率的普遍方法，并因此初步地建立起微积分的基本原理。但这一论著的原稿在当年送交皇家学会登记备案后，直到 1711 年才公开发表。

1671 年，牛顿写出了研究微积分的第二部重要著作：《流数法与无穷级数》，即《流数术》。在这一著作中，牛顿改变了变量由无穷小量组成的看法，从力学的瞬时速度的角度对微积分方法进行了研究。他从力学的运动观念出发，把两个变量称为“流”，而把两个变量的变化率称为“流数”。同时指出：微分的基本问题，乃是由已知的两个流之间的关系，求它们的流数之间的关系。而积分不过是微分的逆运算。在《流数术》中，牛顿还讨论了流数术的一些应用，如用它微分隐函数，求曲线的切线，求极大值与极小值，求曲线的曲率等。在《流数术》中，牛顿还附入了一个积分的简表。但《流数术》在牛顿生前也未能出版。直到 1736 年，即牛顿逝世 9 年后，这一著作方从拉丁文原稿译成英文出版。

1676 年，牛顿写出了研究微积分的第三部重要论著：《曲线求积法》（一译《求曲边形的面积》）。早在 1672 年，牛顿在研究华里斯的求积方法时，就发现了曲线的作法及其计算方法。在研究求积问题的基础上，牛顿在《曲线求积法》中进一步改变了对无穷小量的看法，并试图进一步消除甚至完全抛弃无穷小量的概念，以建立起不用无穷小量的微积分。他说：“我认为数学中的量并不是由非常小的部分组成的，而是用连续的运动来描述的。直线不是一部分一部分的连接，而是由点的连续运动画出的，因而是这样生成的；面是由线的运动，体是由面的运动，角是由边的旋转，时间段落是由连续的流动生成的。”牛顿在放弃无穷小量的概念之后，代之以另一新的观念：最初的和最终的比（亦译为基本的和最终的比）。他说：“流数可以任意地接近于在尽可能小的等间隔时段中产生的流量的增量，精确地说，它们是最初增量的最初的比。”同样，牛顿的这一著作也直到 1704 年才公开发表。

尽管牛顿在对无穷小量这一基本概念的表述中，经历了前后不同的演变，并因此引起了这一概念自身的混乱。但是，正是在持续十年左右的探索中，微积分的基本原理和主要方法，都由牛顿较为完整地建立起来了。

后来，牛顿把微积分的基本原理写入他在 1686 年底完成的《自然哲学的数学原理》这一总结性的著作中。在《原理》的第三版中，牛顿似乎已在微积分的极限理论周围徘徊。他说：“量在其中消失的最后比，严格说来，不

是最后量的比，而是无限减少的这些量的比所趋近的极限，而它与这个极限之差虽然能比任何给出的差更小，但是在这些量无限缩小以前既不能越过也不能达到这个极限。”当然牛顿只是提出了最初的极限概念，并未能最终建立起极限理论。但是，牛顿的极限概念无疑是后来法国著名数学家柯西（1789—1857年）建立极限理论的思想起点。所以，尽管牛顿的微积分方法本身还不十分完善，而且还缺乏严密的数学理论基础，但是，作为一种全新的数学方法，它的发明已由牛顿基本上完成了。

微积分的发明，是继笛卡尔和费尔玛的解析几何发明之后，近代数学史上的又一大功绩。自此之后，整个数学才真正进入了一个全新的发展时期——高等数学的发展时期。如果说，解析几何的发明还只是高等数学的曙光的话，那么微积分的发明则是高等数学的光辉灿烂的日出了。自此以后，整个近代数学的面貌就大大地改观了。

微积分的发明，也使整个近代科学获得了全新的数学方法，因为“只有微分学才能使自然科学可能用数学来不仅仅表明状态，并且也表明过程：运动”。

当然，在很少一段时期内，在天文学和力学以外的自然科学领域内，人们尚未一下看到这一新的数学方法的潜力。直到19世纪70年代初，当英国著名电磁学家麦克斯韦（1831—1879年）运用微积分建立起关于经典电磁理论的麦克斯韦方程时，人们才进一步认识到这一数学方法的巨大威力。

（2）莱布尼茨（1646—1716年）

非凡的才能。莱布尼茨生于德国的莱比锡。1664年，莱布尼茨在莱比锡大学毕业，以一篇有关逻辑学的论文获哲学学士学位。1666年，他又以一篇有关方法论的论文《论组合的艺术》获阿尔特道夫大学的哲学博士学位。同年，获阿尔特道夫大学教授席位。此后，莱布尼茨即任教于该校，开始进行哲学、数学、力学等方面的科学研究。

青年时代的莱布尼茨就十分关注应用数学的发展。当时，在应用数学的发展中最引人注目的进展是机械式计算机的发明。早在1649年，法国著名数学家巴斯噶就发明一种可进行加减运算的机械式计算机。自此之后，法国曾一度成为计算机技术的研究中心。正是在这一背景之下，莱布尼茨也来到巴黎，研究了以巴斯噶计算机为基础的计算机技术。

在巴斯噶计算机的基础上，莱布尼茨进行了两方面的改革。其一，莱布尼茨把巴斯噶计算机中的十进制改为由他发明的二进制。当时，在明末清初来华的法国传教士曾把中国阴阳八卦与自然哲学思想带回法国。在中国阴阳八卦中的朦胧的二进制观念的影响下，莱布尼茨最先发明了二进制，并立即把这种二进制运用到他的计算机中。对于早期的那种机械式计算机来说，虽然莱布尼茨的二进制未能显示出明显的优越性，但它对后来计算机技术的发展产生了重要的影响。其二，莱布尼茨对巴斯噶计算机的机件设备也进行了一些改革，如加装了梯形轴等装置。由于进行了上述二进制和机件两方面的改革，莱布尼茨终于在1671年发明了一台新的机械式计算机。

由于莱布尼茨在哲学和科学上的才华，1672年3月，作为梅因兹选帝侯

[美]M·克莱因：《古今数学思想》第二册，上海科学技术出版社1979年版，第74—76页。

恩格斯：《自然辩证法》，人民出版社1971年版，第249页。

的大使，出使巴黎。在出使期间，莱布尼茨结识了在巴黎科学院任职的荷兰科学家惠更斯，由于惠更斯的影响，莱布尼茨进一步产生了对数学的兴趣。虽然在此之前，莱布尼茨也读过一些数学著作，但对于当时的数学的最新进展，莱布尼茨基本上还不熟悉。正是在惠更斯的引导之下，莱布尼茨开始研究笛卡尔、费尔玛和巴斯噶等人的著作，通过对笛卡尔等人的著作的研究，莱布尼茨得以迅速地走向当时数学的最前沿。

1673年，莱布尼茨又以梅因兹选帝侯的外交官员的身分出使英国。在伦敦期间，他结识了英国皇家学会的许多知名人士。在这些知名人士中，对莱布尼茨影响最大的是英国皇家学会的联络秘书欧登堡，由于欧登堡与英国科学界有广泛的联系，因此他为莱布尼茨广泛了解英国科学的进展提供了极大方便。同年，莱布尼茨在英国皇家学会演示了他所发明的二进制的机械式计算机，并因此在同年被选为英国皇家学会会员。在英国期间，莱布尼茨除了继续研究笛卡尔、费尔玛等人的数学著作之外，他还研究了英国著名数学家华里斯及巴罗等人的数学著作，特别是巴罗的《几何讲义》，对莱布尼茨的影响最大。通过上述研究，他开始认识到求曲线的切线问题的重要性。这样，莱布尼茨也就在英国产生了微积分思想的最初萌芽。

微积分的发明。不久以后，莱布尼茨返回巴黎，直至1676年被任命为汉诺威选帝侯图书顾问而被召回德国。

在巴黎期间，莱布尼茨继续研究笛卡尔的解析几何，从中吸取了笛卡尔在《几何》中所用的求曲线的切线方法。同时，莱布尼茨还继续研究巴罗的《几何讲义》，从中吸取了巴罗的微分三角形法，并从巴罗的著作中意识到微分与积分的互逆性质。与此同时，他还通过欧登堡继续了解英国数学方面的最新进展，根据莱布尼茨的自述，经过一年多的努力，他在1674年发明了微积分的基本原理和主要方法。

莱布尼茨发明微积分的起点，是求曲线的切线作法及其计算问题。在研究过程中，莱布尼茨从巴罗在解决这一问题时所用的微分三角形法中得到启发，创立了他自己的一种新方法——纵坐标差分法。莱布尼茨所创立的这种新方法的基本特点，按照他自己的说法，乃是把曲线及其切线置于笛卡尔坐标系中，求切线的问题即可相应地转变成求横坐标与纵坐标变化率之差。

在创立纵坐标差分法之后，莱布尼茨又相继在原理和方法上作了一些新的研究。在1675年10月29日的一篇手稿中，莱布尼茨已决定用 $\frac{dy}{dx}$ 作为求和的符号；11月11日，他又在一篇题为《切线的反方法的例子》的手稿中，进一步对微分和积分的符号进行了探讨。此后，他又在一些数学手稿中证明了微分和积分的互逆性，导出了微分法和积分法的一些基本原则。尽管在无穷小量这一概念上他与牛顿一样含糊不清，但最迟在1676年，莱布尼茨已基本完成了微积分的发明。

当时，英国科学家牛顿也在研究微积分。因此莱布尼茨作为外交使节出使英国期间，曾通过欧登堡与牛顿有过通信往来。后来，当莱布尼茨返回巴黎留任驻法大使时，以及返回德国任汉诺威图书顾问以后，莱布尼茨仍然通过欧登堡与牛顿保持着一定的联系。1676年，莱布尼茨在与欧登堡的通信中，得知牛顿的微积分研究已有显著的进展时，因此，他要求欧登堡告诉他有关这方面的消息，欧登堡把莱布尼茨的愿望转给牛顿，牛顿即于1676年6月13日，写了一份关于他的流数法的简要说明，请欧登堡转寄给莱布尼茨。同年8月27日，莱布尼茨收到了欧登堡的信及附寄来的牛顿的关于流数法的

简要说明。此后，莱布尼茨直接致信牛顿，向牛顿简述了他自己在微积分方面取得的成果，并要求牛顿能就他的无穷级数的处理方法作进一步说明。同年 10 月 24 日，牛顿给莱布尼茨回信，就他的流数法作了较为详尽的说明，此时牛顿估计莱布尼茨也有可能发明了微积分，因此他在回信中写入了一个著名的字谜（以字谜的方式表示自己已作出某一发现或发明的方法起于 17 世纪初，在 1610 年，伽利略发现金星的位相之后，他意识到这是证实哥白尼日心说的重要发现，但他也认识到，完全弄清金星的位相变化还需要时间，因此他先发表了一个由 35 个字母组成的字谜，表示他已经发现了金星的位相。此后，这种以字谜暗示已作出某一发现和发明的方法即流传于 17 世纪）。牛顿给莱布尼茨回信中的字谜是：

6a cc d ae ff 7i 3l 9n 4o 4q rr 4s 9t 12 vx

字谜就是由这些字母和数字组成的一个不规则的句子。这个字谜的谜底是：根据所给的方程式，在任意多变数方程求出流数及其逆运算。牛顿所以给莱布尼茨寄去这个字谜，实际上是向莱布尼茨暗示，他已经发明了微积分。

莱布尼茨收到牛顿的回信之后，研究了牛顿对于流数法的说明，也研究了牛顿的字谜。当然，莱布尼茨未能解开牛顿的字谜，但莱布尼茨也估计到，这是牛顿表明他已经发明了微积分的隐语。因此，他在 1677 年 6 月 21 日给牛顿回信时，也向牛顿坦率地介绍了他发明微积分的纵坐标差分法：“我长期在用一种更普遍得多的方法来处理切线问题，这就是纵坐标差分法。”并认为：“求切线无非就是求相应于已知的（相等的）横坐标之差的纵坐标差。”

此后，他们两人各自致力于数学和其他学科的研究，谁也没有公开发表有关微积分的研究成果。直到 1684 年，即他们彼此都知道对方已经发现了微积分的 7 年之后，莱布尼茨在德国的《博物者学报》发表了一篇关于他的微积分方法的简要介绍。因为这篇简介实际上只是一篇介绍报道性的文章，因此在当时并未引起人们的注意。

1686 年，莱布尼茨在《博物者学报》上发表了一篇有关微积分的内容比较具体的论文：《求极大、极小和切线的新方法，也能用于分数和无理量的情形以及这个方法的一个巧妙的计算》。在这篇论文中，莱布尼茨公开发表了微积分的基本原理和主要方法。

在发表上述论文之前，莱布尼茨已于 1675 年 10 月 29 日的数学手稿中创用积分符号 \int 。是 sam（总和）一词的第一个字母的拉长写法。此后，莱布尼茨在 1684 年发表的那篇简介中创用了微分符号 d 。在 1686 年发表的这篇论文中莱布尼茨首次同时使用了 dx , dy , $\frac{dx}{x}$, $\frac{dy}{y}$ 这样的微分符号和积分符号。其中 dx 表示两个相邻的 x 之间的差， dy 表示两个相邻的 y 之间的差，而 $\frac{dx}{x}$ 与 $\frac{dy}{y}$ 则相反。

莱布尼茨在 1686 年发表的这篇论文的标题虽然很长，但篇幅却很短，只有 6 页。但由于其内容新颖，方法新奇，符号新巧，因此，立即引起欧洲数学界的极大关注，而莱布尼茨亦因此先于牛顿成为人们知晓的微积分这一新数学方法的发明者。

微积分发明的居先权之争。由于莱布尼茨先于牛顿发表了微积分，而牛顿又先于莱布尼茨发明了微积分，加上他们之间又有过直接和间接的交往，因此，正当胡克为万有引力的发现居先权与牛顿发生争执时，由于莱布

尼茨论文的发表，一场关于微积分的发明居先权之争，几乎同时爆发了。

在争议中，牛顿和莱布尼茨各自说明了自己发明微积分的时间、过程和方法。牛顿说，他早在 1665 年 11 月就发明了微分，1666 年 5 月又发明了积分。莱布尼茨说，他是在 1674 年发明微积分的，他的微积分是他独立发明的。

对于微积分发明的居先权之争，两个当事人似乎表现得相当克制。牛顿在 1687 年谈到这场争议时说：“大约在十年前，在和非常博学的数学家莱布尼茨的通信中，我告诉他，我发明了一种可以求出极大值和极小值，划出切线并解答类似的数学问题的方法。这种方法运用到无理数上和应用到有理数上同样行之有效。当我谈到这一点时（假定已知一个任意多的变数方程求流数，并反过来，已知流数求变数），我没有把方法告诉他。这位著名人物回信给我，他也想到了同类型的一种方法，并把它告诉了我。他的方法除了定义、符号、公式和产生数的想法在形式上和我不一样以外，几乎并没有多大的差异。”可见，牛顿是充分肯定莱布尼茨的微积分的发明的独立性的。至于莱布尼茨，似乎从未对牛顿独立发明微积分的问题提出异议。

尽管牛顿和莱布尼茨两人对微积分发明居先权的争议似乎都不了了之，但海峡两岸的一些非当事人却起劲地卷入了这场争议，并最终使海峡两岸的数学家陷入对立之中。

英国人激烈地为牛顿辩护，为此还成立过一个调查委员会，对莱布尼茨在伦敦期间的科学活动作了不公正的评价，对莱布尼茨与牛顿的通信往来也作了不公正的评价，从而得出了莱布尼茨是牛顿成果的剽窃者的结论，并公开指责莱布尼茨是剽窃者。

莱布尼茨不得不为自己的声誉辩护。1714 年，莱布尼茨写了题为《微分学的历史和起源》这一总结性的论著，陈述了他自己发明微积分的背景、历史和方法，试图以此批驳英国人强加给他的“剽窃者”的罪名。

除了莱布尼茨本人著文声辩外，大陆数学家也竭力为莱布尼茨争辩。特别是著名的瑞士数学家贝努利兄弟（雅克·贝努利和约翰·贝努利）更是莱布尼茨的热烈辩护者、牛顿的坚决反对者，约翰不仅仅只为莱布尼茨辩护，而且尖锐地嘲笑和猛烈攻击英国人，甚至把牛顿贬斥为“老糊涂”。

由于大陆数学家的攻击，致使英国人更坚决地捍卫牛顿，甚至发展到坚决捍卫事实上比莱布尼茨的微积分符号差得多的牛顿的微积分符号。

由于微积分发明的居先权之争，使海峡两岸的数学家在此后一个世纪左右的时间里几乎完全停止了彼此之间的数学交流，这样，致使欧洲的数学发展受到了影响，特别是英国数学的发展受到了严重的影响。自牛顿之后，英国数学就逐渐落在后面。

牛顿的科学成就固然值得英国人骄傲，可是，自微积分发明的居先权之争爆发之后，英国人却从民族主义立场出发，以民族感情代替科学史实，处处捍卫牛顿，甚至连牛顿的明显缺点也要捍卫。这是英国科学在十八世纪初走向相对衰落的一个重要原因，这说明，一个民族如果过分地陶醉于光辉的过去，必然会失去伟大的未来。

事实说明，牛顿和莱布尼茨都是微积分的独立发明者，除了在发明与发表微积分的时间上各有先后外，还有他们在完成微积分的发明过程中所显示出来的种种差异。一方面是他们完成微积分发明的科学背景不同，牛顿显示

出了他的力学背景，莱布尼茨则显示了他的几何学背景。另一方面，他们的基本数学方法不同，牛顿的基本方法是“流数法”，莱布尼茨的基本方法是“差分法”。此外，他们两人在科学思想、科学风格、基本符号以及对无穷小量的基本表述，也都存在着明显的差异。这些都说明微积分是他们各自独立发明的。

尽管他们在完成微积分的发明中表现出了一些具体差异，但他们是在共同的历史条件和共同的数学基础上完成这一伟大发明的，因此他们获得了相同的结果。如果离开了当时的历史条件，离开了17世纪初期的数学基础，离开了从罗伯佛尔到巴罗等人的那些有关微积分的最初发明，无论谁，都是不可能最终完成微积分的发明的。恩格斯说，微积分“是由牛顿和莱布尼茨大体上完成的，但不是由他们发明的。”

莱布尼茨与牛顿在微积分发明上的居先权之争；胡克与牛顿在万有引力发现上的居先权之争；以及在此以前及以后的一系列发明与发现的居先权之争，是近代科学技术发展史上的一个极为普遍的历史现象。这种现象说明，科学巨人并非天上掉下的圣人，而科学成果也绝非天才人物的偶然发现。无论是科学人才，还是科学成果，都是一定的历史的产物，一定的时代的产物，都是某个国家，某个时代的特定的经济、政治、文化与科学等各种因素所造成的一种合力孕育的结果。

(3) 第二次数学危机的发生

17世纪中后期，当早期近代科学的发展出现以英国为中心的全面兴盛的景象时，曾在16世纪中期至17世纪初期受到天文学革命和解剖学革命冲击的神学思潮，此时已在这种兴盛景象的背后重新泛起。在这股重新泛起的神学思潮的影响下，波义耳、莱布尼茨以及牛顿等一些著名科学家在自然观上却纷纷转变到神学方面。

尽管牛顿竭力证明上帝的存在，并在他生活的后35年始终表现了对上帝的虔诚，但是正统神学家对牛顿并不满意。到了1734年，即牛顿死后的第七年，一场由正统神学家向牛顿发起的攻击发生了。这场攻击就是由当年升为大主教的正统神学家贝克莱（1685—1753年）向牛顿的微积分发起的。

贝克莱在阅读了牛顿的《自然哲学的数学原理》后，1734年，他向牛顿生前的好友、天文学家哈雷写了一封奇特的公开信：《分析学者，或致一个不信教的数学家。其中审查现代分析的对象、原则和推断是否比之宗教的神秘与信条的构思更为清楚，或推理更为明确》。信中所说的“分析学者”、“不信教的数学家”，均指哈雷而言。贝克莱的公开信的内容要点，是企图以牛顿的无穷小量中的自我矛盾为突破口，既对数学进行“神学的批判”，又对神学进行“科学的论证”。

在对数学进行“神学的批判”时，贝克莱抓住了牛顿在无穷小量的表述上的混乱以及在此基础上运用流数法的矛盾，批判牛顿所一直信奉的“基本的和最终的比”这一命题，认为渐近于零的两项之间不可能存在着有限的比，于是，贝克莱对牛顿的流数进行猛烈的抨击。他说：“这些流数是什么？是渐近于零的增量的速度，那么这些相同的渐近于零的增量又是什么呢？他们既不是有限量，也不是无穷小量，可也不是虚无。难道可以把它们称为死去

的量的幽灵吗？”

贝克莱对牛顿的微积分的基本原理的攻击，虽然出于一个正统神学家对科学的反对立场，但是他也确实揭示了微积分在创立初期尚未解决的内在矛盾。正因为贝克莱在对微积分的攻击中揭开了微积分的内在矛盾，所以微积分本身即由此陷入理论危机之中。由贝克莱的发难所造成的这场数学危机，就是数学史上的著名的第二次数学危机。

牛顿和莱布尼茨在创立微积分时，虽然他们都发现了微积分的基本原理和主要方法，但是，在对于微积分的基本概念无穷小量的表述上，他们都未能给予确切的数学的定义。他们时而说无穷小量是“零”，时而说无穷小量“非零”；他们时而说无穷小量“消逝为零”，时而说无穷小量“趋向于零”。总之，没有严格的数学定义。正因为如此，尽管微积分在运算方法上是正确的，但是，从逻辑上看，它违背了形式逻辑的基本规律；从常量数学来看，它是错误的，而从变量数学来看，它也缺乏充分的理论依据。这说明，牛顿和莱布尼茨在最初发明微积分时，确实都还缺乏严密的数学理论基础。也正因为如此，才使贝克莱这位敏锐的神学家终于从中看出了他所说的那种“严重的空虚、黑暗和混乱。”

贝克莱的公开信立即在数学家中产生了影响。哈雷此时已近 80 高龄，并未理会这位神学家的挑战，但是，其他一些数学家相继进行了反击。1734 年，即在贝克莱公开信发表的当年，英国数学家朱允（1684—1750 年）即发表《几何学，非不信教的朋友》这一公开的批驳信，首先对贝克莱的公开信进行反击。朱允认为，对于精通几何学的人来说，流数的概念是清楚的，并按照他的理解对牛顿的流数作了解释。对此，贝克莱在 1735 年发表了题为《捍卫数学中的自由思想》一文，予以反击，为此，朱允又另著文反驳。

1735 年，英国另一数学家罗宾斯（1707—1751 年）也参加了论战，他发表了几篇论文，并出版了《论牛顿的流数法以及最初比与最终比方法的本质与可靠性》的专著，试图对牛顿的流数进行数学解释，批驳贝克莱对流数的神学解释。

此后，英国另一著名数学家马克劳林（1698—1746 年）也参加了反击贝克莱的论战。1742 年，马克劳林出版《流数论》一书。在这一著作中，马克劳林除了驳斥贝克莱对微积分的攻击外，还试图建立起微积分的严密的数学理论基础。

但由于当时历史条件的限制，直到 19 世纪初法国著名数学家柯西的极限理论建立前，微积分在数学理论方面所发生的危机一直未能从根本上结束。但第二次数学危机的发生，使人们认识到微积分本身还不够完善。这样，微积分就开始了试图克服自身危机的革命。此后，经过近一个世纪的几代人的相继努力，微积分终于在 19 世纪初建立起了严密的数学理论基础。

2. 数学家族

(1) 数学家族的第一代兄弟

17 世纪 80 年代末和 90 年代初，当牛顿和莱布尼茨为微积分发明的居先权发生争议时，在大陆数学家中有两个兄弟站出来热烈地为莱布尼茨辩护，

这就是贝努利数学家族的第一代贝努利兄弟：雅克·贝努利(1654—1705年)和约翰·贝努利(1667—1748)，人们通常称他们为老贝努利兄弟。

贝努利兄弟生于瑞士巴塞尔的一个牧师家庭，他们都曾有过一段自学数学的经历。

雅克曾根据他父亲的意愿，最初在巴塞尔大学学神学，因为他的父亲希望他将来能成为一个牧师。可是，雅克在法国、德国和荷兰等国进行广泛的旅行后，由于受到所结识的一些数学家的影响，对数学产生了兴趣。从1670年以后，雅克即开始自学数学。当时，微积分尚未发表，雅克找来一些数学著作，开始研究人们当时极为关注的求曲线的切线等数学问题。在研究中，他主要研究了笛卡尔的《几何》、华里斯的《无穷算术》、巴罗的《几何讲义》等著作。雅克也几乎走到了独立地发明微积分的边缘。正在这时，莱布尼茨的微积分成果相继发表，雅克对莱布尼茨极为敬佩，他前往德国，与莱布尼茨进行短期合作。1686年返回巴塞尔当上了巴塞尔大学的数学教授。

雅克的弟弟约翰，他的父亲最初曾想让他去经商，而他本人却想去学医。但此后不久，在哥哥的影响下，他也开始自学数学。从1695年起，约翰因其在数学上初露才华，被聘为荷兰格罗宁根大学的数学教授。1705年，其兄不幸去世，约翰应聘返回瑞士，接替了他哥哥在巴塞尔大学的数学教授职位。

(2) 变分法与概率论基础的奠定

雅克·贝努利对于当时数学的贡献，主要在于奠定了变分法与概率论的基础。

变分法所涉及的一些基本数学问题，即求极值的问题，可以追溯到古希腊数学发展时期。那时，阿基米德就曾证明，在给定的周长之间，所围成的各种几何图形的面积，以圆形的面积为最大。在古代，极值问题不仅为一些著名数学家所关注，而且流行在一些民间的传说中。在迦太基传说中，就有一则求极值的数学故事：有人给戴多皇后一张牛皮，要她用这张牛皮围出尽可能大的面积。戴多皇后把牛皮割成长条，然后用长条围出一个半圆。这说明，求极值问题远在古代已经引起了人们的关注。

进入17世纪后，由于力学和数学的发展，类似的数学问题又重被人们提出，在伽利略和莱布尼茨的有关著作中，都曾出现过类似的数学问题。

1696年，约翰向他的哥哥提出了6个数学难题，这些数学难题都不是用当时的数学方法能一下子解决得了的。其中有一个问题是这样的：在给定的—根水平轴上画出的所有半椭圆中，怎样才能求一个半椭圆，使物体沿着它的凹面下滑时，所需要的时间最短。这一问题实际上就是求最速降线问题。用通常的数学术语来说，也就是求曲线，它能使最初为零的质点在重力作用下从起点沿曲线降到终点时，所需时间最短。

对于约翰提出的最速降线问题，雅克一时无法作出回答。此后经过三年多的努力，他终于从微积分中引出一种新方法，即是在求极值方法的基础上，运用积分方法求出某一积分的极值。1697年12月，约翰在《博物杂志》上发表了他向雅克提出的数学问题。1700年，作为对约翰提出的问题的解答，雅克在《博物者学报》上发表了一篇著名的论文：《等周问题实解》。在文中，雅克除了讨论最速降线问题之外，还讨论了涉及到求极值的另一个重要

问题：等周问题，即在一切具有定长的平面闭曲线中，求出一条围成的面积最大的曲线。无论是等周问题，还是最速降线问题，都是微积分中求极值方法的运用和发展。文中还讨论了求极值方法的一般原理与普遍方法。这样，雅克就以微积分中的求极值方法这一基本数学问题为生长点，在微积分中开辟了变分法这一新的数学分支。

由于变分法的建立，不但推动了微积分本身的发展，而且初步奠定了力学和物理学中变分原理的数学基础。这样，雅克就把微积分从纯粹数学与应用数学两方面向前推进了一步。

雅克除了奠定变分法的基础之外，在微积分的早期发展中，也曾取得一些类似于莱布尼茨的重要成果。1694年，雅克出版了《微分学方法，论反切线》这一重要论著。在书中，雅克对微积分的基本原理和方法进行了比较系统的研究，特别是推进了常微分方程与积分法的研究。这一著作在微积分的早期发展中产生过重要影响，并被一些数学史家誉为微积分的奠基作之一。

雅克对近代数学发展的另一个重要贡献，是进一步奠定了概率论的基础。

在雅克之前，概率论已有最初的萌芽。荷兰科学家惠更斯1657年发表的《论机会游戏的演算》，可以算是近代数学史上最早的概率论著作。

雅克在1685—1690年间对概率论进行了研究。1685年，他在《博物杂志》上发表的一些论文中，重新提出了惠更斯在《论机会游戏的演算》中提出过的一些概率论问题：若甲乙两人在赌博游戏中同掷一颗骰子，先掷出是么点的为胜。甲乙两人开始各掷一次，然后各掷两次，接着各掷三次，依此继续下去，两人获胜的概率各有多少；或者，甲先掷一次，乙接着掷二次，甲掷三次，乙接着掷四次，两人获胜的概率又各有多少。通过提出这些问题，雅克开始了对概率论的研究。

1690年，雅克完成了赌博游戏中胜负概率的计算方法的研究，找到了以排列组合为基础的一种普遍的数学方法。运用这一方法，可以确定某一事件的概率范围，即使某个在多种机率中出现的事件概率无限地趋向这个已经确定的概率。这样，雅克就找到了一种处理随机现象的数学方法。自此之后，概率论也就从惠更斯所最初提出的一些基本问题，开始成为一门以随机数学现象为基本研究对象的新的数学分支。同年，雅克在《博物者学报》上发表了关于概率论的一些初步解答。后来，他又进一步总结了他在概率论方面的研究成果，完成了《猜测的艺术》这一早期概率论的奠基之作。在这一著作中，雅克比较详尽地论述了以下问题：其一，概率论的基本问题；其二，排列与组合理论的研究；其三，机会和对策中的概率问题；其四，概率论在民间、道德和经济问题等方面的实际应用。这样，概率论也就由雅克的《猜测的艺术》的完成而奠定了初步的数学基础。

雅克的《猜测的艺术》虽然直到1713年才出版，但他出版后，即对概率论的发展产生重要影响。不久以后，这一新的数学分支即成为人们极为关注的数学领域，新的著作相继问世，新的成果不断出现，直至19世纪成为科学研究中基本的数学方法。

雅克除了作为变分法与概率论的奠基人而闻名于近代数学史外，还在级数与解析几何的研究中有过重要贡献。在级数方面，雅克在1704年出版了《关于无穷级数及其有限和的算术运用》一书，推进了级数理论方面的研究。在解析几何方面，雅克还在笛卡尔坐标的基础上建立了极坐标。由于极坐标的

建立，使得曲线及其方程的研究有了新的发展。

雅克是贝努利家族的第一个对近代数学产生重要影响的数学家。

(3) 纯粹数学与应用数学的发展

约翰早年也是莱布尼茨的拥护者之一，并与莱布尼茨进行过一些卓有成效的合作。与此同时，约翰也曾与雅克进行过合作。但是，到了后来，约翰因急于成名，开始与其兄进行激烈的竞争，有时甚至把其兄的研究成果作为自己的成果抢先发表。雅克因此对约翰的行为不满。后来，两兄弟即陷入公开的冲突和对立中，莱布尼茨曾想从中调解，但雅克认为莱布尼茨是蓄意贬低他的数学成就，因此雅克对莱布尼茨也不满，并转到反对莱布尼茨的方面。

约翰接任巴塞尔大学数学教授席位时，年仅 39 岁。他活了 81 岁，长寿使他有充裕的时间来完成他的数学著作，因此约翰成为近代数学史上少有的几位多产的数学家之一。他对近代数学的贡献，除了与其兄一道建立变分法之外，主要在纯粹数学与应用数学两方面推动了近代数学的发展。

在纯粹数学方面，其中主要是在微积分的基础理论研究方面，约翰在曲线求长和曲面求积的微分方程，在各种不同的积分方法等问题的研究上，均取得过一些新的成果，这些新成果进一步丰富和发展了莱布尼茨微积分的原理和方法。

约翰对纯粹数学的贡献，还表现在对微积分所进行的系统化和理论化的研究工作上。1691 年，约翰出版了《微分学初步》，这一著作被当时的大陆许多大学作为微分学的基础教材。1742 年，约翰又发表了《积分学教程》，这一著作也同时被一些大学作为积分学的基础教材。因此，约翰的这两大著作被誉为早期微积分的发展中的新的里程碑。

在应用数学方面，约翰把微积分引入到普通力学与天体力学方面。在其《微分学初步》中，就曾探讨过微分这一新的数学方法在力学以及整个物理学中的应用问题。1727 年，约翰发表了《论运动的交换规律》一文，在普通力学问题的研究中引入了微积分方法。1734 年，又发表了《讨论行星椭圆轨道，特别是轨道的倾斜度》一文，进一步推进了微积分在天体力学中的应用。可以说，约翰是继牛顿之后，把微积分引入普通力学和天体力学的又一代代表人物。微积分进入力学的结果，不仅推动了力学及相关的物理学和天文学的发展，而且推动了数学本身的发展。

(4) 数学家族的第二代兄弟

继第一代贝努利兄弟之后，约翰的两个儿子：大儿子尼古拉·贝努利（1695—1726 年）和小儿子丹尼尔·贝努利（1700—1782 年）也成了著名数学家。人们因此把他们称为贝努利数学家族的第二代贝努利兄弟，亦称为小贝努利兄弟。

与其父辈相似，尼古拉虽在数学上作过一些贡献，但与他的伯父一样早逝，而丹尼尔则与其父一样，活到 82 岁高龄，在近代数学史上产生过更大影响。

丹尼尔生於约翰在格罗宁根大学期间，后随父返回巴塞尔大学。他早年在巴塞尔大学学医，此后不久，去德国和意大利留学。1725—1733 年间，丹尼尔应聘去俄国彼得堡科学院工作，成为彼得堡科学院的第一批外籍院士。1733—1755 年，回巴塞尔大学任解剖学和植物学等课教授。1750 年以后，任

巴塞尔大学的哲学教授。在数学研究中，丹尼尔综合了第一代贝努利兄弟的成就，在微积分、概率论以及应用数学方面，均作出了杰出贡献。

在微积分方面，丹尼尔在 1724 年即出版了他的第一部数学著作《几门数学练习》，此后，他又发表了一些关于微积分的著作。在这些著作中，他研究了微分方程与偏微分方程的解法，特别是偏微分方程研究方面，推动了微积分的发展。

在概率论方面，丹尼尔研究了《猜测的艺术》等早期概率论著作，首次把微积分方法列入概率论研究。1730 年，丹尼尔发表了《赌博法新论》，1759 年，又发表了《关于猜测的新问题的分析研究》。在这两部概率论专著中，丹尼尔将概率论首次用于人口问题的统计分析，提出了正态分布误差理论，为人口理论的发展提供了数学方法。

在应用数学方面，他把微积分方法全面引入物理学研究，并因此成为数学物理方法的奠基人。他还应用他的数学物理方法，推进了流体力学与气体动力学的研究。1738 年，丹尼尔建立了流体力学与气体动力学中的基本方程，即流体速度、压强、势能之和为一常量的流体运动方程，人们通称之为贝努利方程或贝努利定理。同年，丹尼尔出版了《流体力学》一书，书中除奠定了流体力学的一般理论基础之外，还对流体的喷射推进现象进行了最早的研究。这一研究，使他成为近代喷射理论研究的先驱之一。

在应用数学方面，丹尼尔不仅把微积分引入了流体力学研究，而且也引入了天体力学研究。早在 1734 年，丹尼尔就与其父约翰合作，研究了行星轨迹的力学问题，并以《行星轨道与太阳赤道不同交角的原因》这一天体力学论文而获巴黎科学院奖金。

由于丹尼尔在多种数学领域中所作的重要贡献，他因此成为贝努利家族中与雅克和约翰齐名的著名数学家。

(5) 数学家族与欧拉和哥德巴赫

在贝努利家族先后产生了 11 名数学家，这个家族因此成为数学史上著名的数学家族。贝努利家族不仅在微积分、变分法、概率论以及应用数学诸方面作出了重要贡献，而且在他们的培养和直接影响下，出现了以欧拉（1707—1783 年）和哥德巴赫（1690—1764 年）为代表的一些著名的数学家。

欧拉是约翰在巴塞尔大学任教时的学生。他出生在巴塞尔附近的一个牧师家庭。他的父亲曾要他去学神学，但年少的欧拉却执意追随约翰学数学。由于成绩优异，15 岁时大学毕业，16 岁开始发表数学论文，19 岁时以船的立桅问题获巴黎科学院奖金。后来，由丹尼尔推荐，被聘为彼得堡科学院院士，并在 1733 年前往彼得堡接任丹尼尔的数学教授席位。此后在彼得堡科学院工作 8 年（1733—1741 年），1741 年，欧拉应普鲁士腓特烈大帝之邀去柏林，在柏林科学院工作了 25 年。在此期间，欧拉给彼得堡科学院寄去了大批数学论文。1766 年，欧拉在双目即将失明的情况下，仍应叶卡特琳娜女王之邀，重返彼得堡，一直在彼得堡科学院工作到临终。

欧拉在数学上的重要贡献，是在贝努利家族的数学成就的基础上，全面推进了纯粹数学与应用数学在各个分支方面的发展。在纯粹数学方面，他的主要著作《无穷小分析引论》（两卷，1748 年出版）、《微分原理》（1755 年出版）、《积分原理》（三卷，1768—1770 年出版）丰富和发展了微积分、微分方程、变分法、微分几何、数论等各数学分支的内容。在应用数学方面，

他以微积分为主要数学方法，对力学、声学、光学、热学以及多种工程技术进行广泛的研究，并取得了有影响的成果，在力学中，欧拉继承和发展了丹尼尔的流体力学成就，进一步奠定了流体力学的理论基础，并以流体力学与船舶力学相结合的论文《论船舶的左右及前后摇晃》在 1759 年获巴黎科学院奖金。在光学方面，他完成了折射望远镜、反射望远镜、显微望远镜的许多计算问题，从而推动了几何光学的发展。

欧拉是科学史上罕见的多产科学家之一。据说他的科学论著若全部出齐，估计多达 74 卷之多，而且其中不少论著是在他双目失明后完成的。他的科学成就，特别是他的科学精神，确实是近代科学史上光辉的一页。

哥德巴赫生于德国，早年留学于英国牛津大学法学系。他在欧洲各国旅行期间，由于结识贝努利家族而开始对数学产生兴趣，并开始进行业余数学研究。1725 年，哥德巴赫作为普鲁士公使出使俄国。1733 年欧拉来到俄国之后，哥德巴赫即与欧拉共同探讨一些数学问题。1741 年欧拉前往柏林之后，哥德巴赫移居莫斯科。自此之后直到哥德巴赫去世的 1764 年，哥德巴赫与欧拉始终保持着通信联系。他的不少数学成就，都是与欧拉通信商讨过程中取得的。

哥德巴赫在近代数学上的重要贡献是在数论方面。1742 年 6 月 7 日，哥德巴赫在给欧拉的信中提出：每一偶数都是两个素数之和；每一奇数或者是一个素数，或者是三个素数之和；推而言之，任何一个整数 $n \geq 6$ 时，都可以用三个素数的和表示。同年 6 月 30 日，欧拉在给哥德巴赫的回信中指出：要解决这一问题的关键在于充分证明每一个偶数都是两个素数之和。因为其他问题可以从这一问题中推导出来。由于这一问题是哥德巴赫最先以猜想的形式提出的，因此这一问题被后来的数学家称为“哥德巴赫猜想”，或称为哥德巴赫——欧拉问题。哥德巴赫猜想的提出，对近代数论的发展产生过极大的推动作用。

此外，哥德巴赫在微积分与级数方面也有过一些重要贡献。

在贝努利家族的影响下，微积分方法在德国也得到比较迅速的普及。去法国传播微积分的工作主要是由约翰的学生、法国数学家罗彼德(1661—1705 年)进行的，并因此为法国在 18 世纪末和 19 世纪初的近代数学的繁荣打下了初步基础。

继牛顿和莱布尼茨之后，贝努利家族及其数学成就对欧洲大陆数学产生了广泛的影响。

六、化学

1. 近代化学的发生

近代化学迟至 17 世纪中期才产生，它的产生与炼金术有很大关系。当中国炼金术通过阿拉伯传入欧洲后，第一个真正相信炼金术，并且认真地研究过炼金术的人，是 13 世纪的实验科学的开拓者、英国哲学家罗吉尔·培根（1214—1294 年），他曾进行过炼金术的实验，并开始试制火药。1317 年，罗马教皇约翰二世颁布禁令，严禁炼金术，但炼金术仍在发展之中，为寻找黄金和“哲人之石”——当时欧洲人对“丹”的另一种称呼，众多的炼金术陷入了盲目的化学实验中，但却导致了某些元素、金属盐类、无机酸、酒精等许多新的化学发现。

15 世纪末和 16 世纪初，炼金术与炼丹术在欧洲进入了全盛时期，而以行医和制药为职业的炼金术士瑞士的巴拉塞尔苏斯（1493—1541 年）则是这一时期内炼金术的主要代表人物。他曾用水银制剂治好过一些病，并在炼丹术的实验中炼制过一些金属药剂，在一系列的实验中，他对蒸馏、溶解、升华、还原、凝结等操作过程进行了研究。他相信古希腊自然哲学中四元素理论，认为四元素在人体内变成了盐、硫、汞三要素，这三要素就构成了人体的三基，而这三基又分别支撑着人的身体、灵魂和精神。他的炼丹术与炼金术奠定了最初的医药化学基础。

比利时的炼金术士赫尔蒙特（1579—1644 年）则是从炼金术向近代化学过渡时期的代表人物。1609 年他偕同新婚的妻子隐居于维尔伏尔德长达 7 年，从事他自己所说的“火术”（实为炼金术）的研究。在实验中，赫尔蒙特最先发现，空气并不是一种纯净物质，不是一种元素，而是一种含有不同类别气体的混合物，他曾发现了二氧化碳、一氧化碳、二氧化氮。因此，他曾不止一次地把自己称为“气体发明家”。

此外，赫尔蒙特还在实验中试制并使用了硫酸、硝酸等无机酸，辨认出人体的胃液中所含有的酸以及胆汁中所含有的碱。他还初步发现了真空的存在。

然而，赫尔蒙特对近代化学的贡献，主要是他的化学实验方法和化学元素理论。

在化学实验方法上，他十分重视化学实验中的定量分析，他在实验中广泛地使用天平，这就促进了定量分析方法在化学实验中的运用和发展。定量分析是炼金术向近代化学转变的重要一步。

在化学元素理论上，赫尔蒙特以他的实验事实为基础，否定了古希腊自然哲学中的元素学说，他认为，元素之所以称为元素，是因为它们不能转变成别的东西，而且也不能把它们还原为更简单的状态。根据元素这一定义，他认为土与火并不是元素，而只有水和空气才是真正的元素。这个元素的定义为后来波义耳确定元素的科学定义奠定了直接的理论基础，波义耳认为赫尔蒙特“在实验方面比许多学者所乐意认为的更加伟大”。

赫尔蒙特死于 1644 年，他的主要著作《医学入门》于 1648 年出版，正是在这一著作的影响下，英国青年波义耳踏上了把炼金术彻底转变为化学的科学道路。

2. 波义耳的化学成就

(1) 波义耳的实验化学成就

波义耳(1627—1691年)生于爱尔兰的利菲莫尔堡的一个贵族家庭。为了学习大陆科学,少年时,曾到意大利、瑞士等国留学,在留学期间,他学习了当时尚处于炼金术襁褓中的早期化学。1644年,他父亲、保皇党派的理查德伯爵被击毙,他只得赶回爱尔兰多尔塞特郡老家,去看守祖传庄园并开始过隐居生活。在隐居期间,他进行了哲学和早期化学的研究。

1646年,波义耳应邀加入了由威尔金斯组织的群众性科学社团——“哲学学会”(亦称无形学院)。1648年,威尔金斯被克伦威尔政府任命主持对牛津大学的改革,威尔金斯邀请波义耳到牛津去工作。本来,早在1645年,波义耳就曾在他家的位于牛津的祖传领地斯泰尔桥筹建过物理化学实验室,此时,波义耳也极想返回自己在牛津的实验室。1654年,波义耳应邀重返牛津。自此以后,波义耳的实验化学研究进入了一个新的时期。

在牛津期间,波义耳重建了斯泰尔桥的物理化学实验室,聘请了包括青年胡克在内的一批助手,开始进行多种课题的实验化学研究,如与胡克一起进行的大气压力实验、多种燃烧实验,差不多都是在牛津进行的。波义耳在牛津留居长达十四年之久,斯图亚特王朝复辟后,波义耳移居伦敦。在伦敦,他创建了英国第一所专门的化学实验室,以进行新的化学实验。

在实验上,波义耳所作过的许多实验都曾在近代化学史上产生过深远影响。在牛津期间,波义耳曾与胡克一起用格里凯发明的抽气机进行过减压蒸馏实验,以后又进行过大气压力实验,正是这些实验,导致波义耳在1662年发现了以他和另一个法国物理学家两人命名的气体定律,即气体的体积与压力成反比的波义耳——马略特定律。

波义耳进行过不少燃烧实验,特别是各种燃烧的对比实验。他进行了真空条件下燃烧与充足空气条件下燃烧的对比,发现了燃烧与空气的密切关系,1673年,他根据这些燃烧对比事实,写成了论文《关于火焰与空气关系的新实验》,最先揭示了空气是燃烧的基本条件这一事实。

波义耳也进行过不少金属焙烧实验,他在1673年发表的《使火与焰稳定并可称重要的新实验》一文中,曾描述过这样一个实验:把一块8盎司重的锡放在一个敞开的烧瓶中加热,结果发现锡的重量增加了18格林。他在这一实验事实的基础上提出的“火粒说”成为后来“燃素说”的理论先导。

此外,波义耳还进行过其他许多重要的化学实验,如酸与碱对类似于指示剂的植物染剂的颜色实验;动物在真空与非真空两种不同条件下的呼吸与生存实验。他还是磷的发现者之一,为研究磷的制取方法和化学性质也进行过不少实验。

波义耳是近代化学史上第一个杰出的实验化学家,为近代化学的奠基人,他的成就与他所受培根的实验归纳法影响密不可分。因此,就科学方法而言,他是培根实验归纳法的实践者,是吉尔伯特与哈维的实验传统的直接继承人。

(2) 波义耳的理论化学成就

在波义耳以前,人们事实上已经发现了不少可以称得上是元素的元素。远在古代,人们就发现了铜、锡、锌、铅、金、银、汞等金属元素,后来,

人们又发现了砷、碳等非金属元素，但是，对于到底什么是元素，人类却一直处于迷茫之中。在古代中国，人们从自然哲学中的猜测出发，认为土、木、水、火、金是五种基本元素，而古希腊哲学家恩培多克勒把水、土、气、火称为四种基本元素，并以此构成炼金术士所说的“三基”。因此，从古代到中世纪，人们一直都说不清楚什么才是真正的元素。只是到了赫尔蒙特时，对元素观的理论研究才稍有起点，但他的水和空气是元素的具体结论却是错误的，而他的关于元素不能互相转变和不能还原成简单的东西的定义，却是元素发展史上的一大进步。

正是在积极吸取古希腊哲学原子论和赫尔蒙特的元素定义的基础上，波义耳提出了一个关于元素的科学定义，他说：“我说的元素的意思和那些讲得最明白的化学家说他们的要素的意思相同，是指某种原始的、简单的、一点也没有掺杂的物体。元素不能用任何其他物体造成，也不能彼此相互造成。元素是直接合成所谓完全混合物的成份，也是完全混合物最终分解成的要素。”

波义耳的元素定义的提出，激起了人们对已知的“元素”进行重新鉴别的热情，人们发现，根据波义耳的元素定义，被炼金术士们称作元素的硫和汞确实是元素；而被炼金术士们称为元素的盐、水、空气根本不是元素；反之，炼金术士们认为不是元素的铜、铁、锌、碳等倒是真正的元素。

波义耳的元素定义的提出，也激起了人们寻找新元素的热情，正是在波义耳元素定义的指引下，终于导致以后一系列新的化学元素的发现。而化学也因之得到迅速发展。

波义耳的元素定义，除受赫尔蒙特的元素定义的影响外，也受到了古希腊哲学中的原子学说的影响。波义耳不仅在原子学说的基础上提出了元素的定义，而且还试图以原子学说来解释化学反应。他认为，有些元素之间之所以能发生化合作用，是因为在元素中存在着粒子团，由于粒子团中的“粒子并不是非常紧密的附着在一起，但这些粒子可以在另一种微粒中相遇，同其中的一些微粒结合，比这些粒子彼此之间的结合更为紧密”。波义耳的上述见解，已初具化学原子论的理论雏形。

(3) 近代化学的奠基

由于波义耳在实验化学与理论化学两方面的重要贡献，就为近代化学奠定了初步基础。他一生著述甚丰，其主要化学著作是发表于1661年的对话集：《怀疑的化学家：或化学物理的怀疑与悖论，涉及炼金家普遍推崇并为之辩护的而又为化学家通常认为实在的种种要素》，他的主要化学成就，大都反映在此书中。

由于“波义耳把化学确立为科学”（《自然辩证法》），由于他在化学史上确实开创了一个新的时期，即近代化学时期，因此他被视为近代化学的奠基者，柏廷顿这样评述：“把波义耳称为近代化学奠基者有三个理由：他认识到化学值得为其自身目的去进行研究，而不仅仅是从属于医学或作为炼金术去进行研究——虽然他相信炼金术是可能成功的；他把严密的实验方法引入了化学中；他给元素下了清楚的定义，并且通过实践证明亚里士多德的四元素和炼金家的三要素（水银、硫磺和盐）根本不配称为元素或要

素，因为其中没有一个可以从物体（例如金属）中提取出来”。他为化学赢得了独立的科学地位；把严密的实验方法引入化学；最终确立了元素定义。正是由于这三大贡献，波义耳使化学最终摆脱炼金术的襁褓，进入了近代化学新的发展时期。

3. 燃素假说

(1) 在原子学说的启迪下

波义耳揭开了近代化学的序幕，是以对火的研究，即以对燃烧和焙烧的研究为基础的，波义耳做过大量的物体燃烧实验与金属焙烧实验，通过这些实验，他初步认识到了燃烧与空气的关系，认识到空气是燃烧的必要条件，可是，他无法从理论上解释燃烧现象，尤其使他不能理解的是，像木炭这样一类物质在燃烧之后，其灰烬变轻了；而像锡、铅、铜、铁等金属经过焙烧之后，其灰烬反而变重了。

17 世纪初，法国哲学家伽桑狄（1592—1655 年）对古希腊哲学的原子学说进行了系统的研究和广泛的宣传，特别是对亚历山大时期的古希腊哲学家伊壁鸠鲁（约公元前 341—前 270 年）的原子学说进行了系统的研究和广泛的宣传。1649 年，伽桑狄发表了《伊壁鸠鲁的哲学体系》这一重要论著，这就使古希腊哲学中从德谟克利特到伊壁鸠鲁的原子学说得以迅速复兴。从德谟克利特到伊壁鸠鲁的原子学说的理论核心，认为物质世界是由原子这种不可再分的最小的物质微粒组成的。由于原子学说的复兴，原子学说中所包含的微粒思想和其他思想，在当时以及后来的整个近代科学发展时期，便成为孕育出近代各种科学理论的思想土壤。

正是在伽桑狄复兴的古希腊哲学中的原子学说的启迪之下，波义耳试图把原子学说的微粒观念与笛卡尔学说的空间要素结合起来，建立起一种以机械论自然观为基础的燃烧学说。

在原子学说的启迪下，波义耳提出了一个试图解释燃烧和焙烧现象的“火粒说”，他认为，火是一种极精细的微粒构成的，火本身是一种“微粒的物质元素”，所以有些物质在燃烧时释放出了这种物质微粒，而有些物质在燃烧时吸收了这种物质微粒。他先解释汞经过焙烧后变成红色氧化汞时，就曾认为，这可能“是一些穿透性的火的粒子”作用的结果。

可是，为什么同是因为火的作用，有的物质在燃烧后释放出火的微粒，而有的物质在燃烧后却吸进了火的微粒？对此，波义耳虽然力图以他的“火粒说”进行理论解释，但在进行这种理论解释时始终表现出困惑不解，波义耳看到空气是燃烧的必要条件，这是他的贡献。可是，他只看到了火对物质的化学作用，而没有看到空气对物质的化学作用，这即是他的局限所在。他的那种建立在“火粒说”基础上的燃烧理论，也就无法真正揭示燃烧与焙烧的化学奥秘。

波义耳并未建立起真正的燃烧理论，继波义耳之后，继续探索燃烧与焙烧奥秘的是波义耳的助手胡克。胡克在协助波义耳进行燃烧实验时，就曾注意到：当木炭在密封的容器中被加以强热时，它并不变成灰烬，而只是变黑；

同上书，第 74 页。

同上书，第 83 页

但是，如果放进空气，木炭就立即烧掉，最后变成白色的灰烬。在有无空气这两种不同的条件下，木炭燃烧的结果是不同的。而这也正好说明，空气在燃烧中起着必要条件的作用。胡克在与波义耳一起进行的燃烧和焙烧实验的基础上，提出过一个最初的燃烧学说，这个最初的燃烧学说载于他在 1665 年发表的《显微术——用放大镜观察的微小物体的生理描述。附有关的观察和研究》一书中，论及了他最初提及的燃烧学说。后来，胡克进一步提出了一个当时没有发表的包括十二个命题在内的燃烧学说，其中两个最基本的命题是：“(1)空气是所有硫素物体的万有溶剂；(2)进行溶解作用时产生大量的热，我们称之为火。”这样，胡克就把燃烧过程看作燃烧物体被空气溶解的过程；而燃烧物体所以能被空气溶解，是因为燃烧物体中含有能被空气溶解的“硫素”。于是，胡克就在波义耳的“火粒说”的基础上，提出了他的“硫素说”。“硫素说”的基本特点，在于充分肯定空气在燃烧中的作用，而其学说的理论核心，在于认为燃烧物体中含有可燃物质“硫素”，当“硫素”物体一旦接触空气，就立即发生他所说的溶解作用，而这种溶解放热过程也就是燃烧过程。可见，胡克的燃烧学说也是在当时原子学说的影响下所产生的一种理论假说。

此后，胡克的燃烧学说为英国当时的另一个化学家约翰·梅尤（1641—1679 年）所发展，1673 年，梅尤在他自己进行的燃烧实验与呼吸实验的基础上，写成了他的主要著作《医学哲学五论》，1674 年，梅尤在牛津出版了这一著作。在此书中，他提出了燃烧学说，这是胡克燃烧学说的继承和发展，他认为，可燃物体本身含有“硫素粒子”，而空气中则含有“硝气粒子”，燃烧就是可燃物体中的“硫素粒子”与空气中的“硝气粒子”相互碰撞的结果，这就是梅尤在胡克“燃素说”的基础上提出的两种粒子的“碰撞说”。为了证实他的燃烧理论，他曾在 1673 年进行过这样的实验：将一个其中点着蜡烛的玻璃钟罩置入水中，钟罩内的蜡烛燃烧一会后即熄灭，随蜡烛的熄灭，水亦随之在钟罩内上升，但总是只能上升到一定的高度。他认为，这是由于存在于钟罩内的空气中的“硝气粒子”被燃掉了，由于“硝气粒子”在空气中所占据的空间是一定的，在蜡烛燃烧后所造成的真空也是一定的，所以水在钟罩内上升的高度也是一定的。梅尤的这个实验，实际上是对氧气的最初发现，只不过是本人当时并未认识到这是氧气。所以他对这一实验的解释只比波义耳和胡克前进了一步：即认识到并不是所有的空气都参加燃烧，而只是一部分空气参加燃烧。这部分参加燃烧的空气就是空气本身所含有的“硝气粒子”。

其实，在波义耳、胡克、梅尤等人之前，法国冶金学家雷伊（1583—1630 年）就曾提出过类似的理论。1630 年，他发表了一篇题为《关于焙烧锡和铅重量增加原因的研究》的论文，在文中，他叙述了他的焙烧锡和铅的实验，他认为，锡和铅经过焙烧之所以增加了重量，是因为“浓密的空气”“混进烧渣中”的缘故。他认为，空气中的某种浓密成分混进金属烧渣并不是两种物质之间的化合，而是两种物质微粒的一种机械混合，这种混合就同水的微粒与沙的微粒的混合一样。水粒混入沙粒后使沙粒变重，空气混进金属烧渣后也使金属烧渣变重。

同上书，第 86 页。

同上书，第 92 页。

以上事实说明，在燃烧说尚未正式登上近代化学的历史舞台之前，在 17 世纪初期逐渐复兴的原子学说的影响下，近代化学的早期理论中已逐渐形成了一种机械自然观，它在当时的最典型的理论特征，一是把一切物质实体的最小单位看作是类似于原子的物质微粒；二是把一切物质实体的相互作用看作是微粒之间的力学作用。从雷伊、波义耳、胡克到梅尤，他们所提出的关于燃烧的种种理论，差不多都是这种机械自然观在燃烧理论上的反映。

(2) 燃素假说的兴起

梅尤之后，英国化学出现了停滞不前的局面，而在带有浓厚的炼丹术与炼金术色彩的德国医学化学却振兴起来，正是在这种背景下，以贝歇尔和斯塔尔为代表的医药化学家提出了解释燃烧和焙烧现象的燃素假说。而早期的近代化学也因此进入了以燃素假说为基本标志的发展时期，即一般化学史家通称的“燃素时期”。

最先提出燃素假说的是德国美因茨大学的医学教授贝歇尔（1635—1682 年），1669 年，他发表了他的主要著作《地下的自然哲学》，提出了最初的燃素假说。他从炼金术关于物质构成的硫、汞、盐三要素的观念出发，认为一般固体物质的构成元素是三种土质：油土、汞土和石土。其中油土是存在于一切可燃性物体中的油质性的土，相当于炼金术士所说的硫元素；汞土是一种可变化的流质性的土，相当于炼金术士所说的汞元素；石土则是一切物体中一种固定的硬质性的土，相当于炼金术士所说的盐元素。在提出三种土质理论的基础上，贝歇尔对燃烧进行了解释，他认为，在一切可燃物体中都含有油土，油土作为一种油性的和硫质的元素，在可燃物体燃烧时，便从可燃物体中释放出来。所谓燃烧，实质上是可燃物体释放油土的过程。这是贝歇尔提出的最初的燃素说。

后来，德国的另一个医药化学家斯塔尔（1660—1734 年）在贝歇尔的油土说的基础上，以燃素概念代替了贝歇尔的油土概念，并对贝歇尔的油土论作了一些发挥，这样就正式形成了解释燃烧现象的燃素假说。

1697 年，斯塔尔进行了一些硫磺与硫酸的实验，他推测，硫磺燃烧时，即生成硫酸；反过来，如果把硫磺燃烧时随火焰一道逸去的东西重新加入硫酸，那么这两者重新加在一起就会生成硫磺。因此，他认为，在硫磺燃烧时随火焰逸出的那部分物质，实质上就是硫磺中所含有的可燃性的物质。他把这种可燃性的物素称为“燃素”，意即火的原素。

在进行上述实验研究的同时，斯塔尔研究了《地下的自然哲学》等医学化学著作，1703 年，他重印了《地下的自然哲学》一书，并在贝歇尔阐述的油土论的地方加上了一个很长的评注，他指出，贝歇尔所说的油土，实际上就是存在于一切可燃物体中的燃素。后来，他在《化学基础》一书中进一步阐述了他的燃素说。并在他的教学中长期讲授他的燃素说，这样，燃素假说这样一个关于燃烧学说的新理论便广泛传播开来。

斯塔尔的燃素说认为，燃素是一种火质和火素，但并非火的本身，而是一种呈细微粒子状的火的原质或元素；燃素广泛地存在于一切可燃物体之中，也存在于金属之中；燃素有时是油质的，有时是火质的，有时是土质的，但无论分别存在于植物体、动物体和矿物体的燃素的性状怎样不同，它们在本质上都是一样的。它们的本质属性是它们的可燃性；物体的燃烧过程实质上是燃素的逸出过程，燃素本身具有从一种物体转入另一种物体的特性。斯

塔尔还认为，如果把金属烧渣与含有燃素的物质一道加热，就可以使金属还原。

燃素说大体上能解释一些燃烧现象，如油、脂、土、炭等在燃烧之后留下来的残渣与灰烬确实比原来的物体要轻得多，而这些现象很有些燃素说所解释的那样，这是因为这些物体在燃烧时，燃素随着火焰一道释放出来了。这样，其残渣与灰烬自然要比燃烧前轻得多。

由于燃素说表面上能解释一些燃烧现象，所以他给当时的化学家们以一种理论上的幻觉：似乎燃素说确实是能够正确解释燃烧现象的燃烧学说。正因为如此，当时的不少化学家都成了燃素说的忠实信徒，而近代化学也因此进入了一个以燃素说为标志的新的历史时期——燃素时期。

4. 气体化学

(1) 燃素说的理论危机

从贝歇尔最初提出的燃素说的 1669 年起，燃素说在欧洲化学界前后风行了一个多世纪。

根据燃素说的解释，燃素是一种基质，但这种基质却具有变幻莫测的性质：它有时是火质，有时是土质，有时是油质，有时是光质，有时是热质。它充塞于天地万物之间，流动于雷电风云之中。但无论是在动物体或植物体中，还是在矿物体或其他物体中，它在本质上是一样的。一方面，它是组织这些物质的一种基质；另一方面，它又是这些物质的物理性质与化学性质的质动因。物质失去它就变成灰烬，而灰烬得到它就会新生。总之，在当时一些化学家的心目中，燃素是无所不在、无所不能的超级基质。

根据燃素说对燃烧现象所作的理论解释，一切与燃烧有关的化学变化都可归结为物体吸收燃素与释放燃素的过程，但在解释一种与燃素有关的化学现象时，燃素说始终无法自圆其说。这种与燃素有关的重要化学现象就是金属的煅烧现象。

燃素说认为，物体燃烧的过程是物体释放燃素的过程，物体燃烧，燃素释放出去了，燃烧物体变成了灰烬。因为燃素被释放出去了，所以物体的灰烬也就比物体本身轻得多。对于诸如木炭之类的植物体的燃烧，燃素说是乎能得到一种似是而非的解释。可是，同样是物体的燃烧，为什么金属被燃烧后，它的灰烬不但不比原来的金属物体轻，反而比原来的金属物体重呢？

对于金属燃素（煅烧）后增加重量的事实，当时一些持燃素论立场的化学家颇感困惑，为了使燃素论能自圆其说，法国化学家文耐尔（1723—1775 年）竟别出心裁地解释：燃素有时具有为地心引力所吸引的向下的重量，他把这种向下的重量称为“正重量”，有时具有与地心引力相反的“向上的重量”，他把这种“向上的重量”称为“负重量”。由于金属燃素具有“负重量”的性质，所以当金属燃烧而释放出燃素时，它的重量就不但没有减轻，反而增加了。

一种基质，既具有向下的正重量，又具有向上的负重量，这很令人费解，于是，有些人费尽心思找到了这样一个比喻：金属失去燃素，好比人死时失去灵魂。失去灵魂的死人不是比含有灵魂的人重吗？由此可见，燃烧后的死金属要比活金属重。这样，就使燃素不仅成为一种无所不在的基质，而且成了一种神秘莫测的幽灵。由于燃素说在解释金属煅烧时所遇到的无法克服的

理论困难，它所编织出来的理论幻景正在消逝，理论化学已处于一场新的危机之中。

把燃素说进一步推向理论危机的动因，是 18 世纪初气体化学的初步发展。

(2) 布莱克

到 18 世纪初，气体化学有了初步发展，特别是对于碳酸气的发现与研究，可以说是 18 世纪气体化学发展的先导。第一个重新发现并深入研究碳酸气的是英国化学家布莱克（1728—1799 年）。

1746 年，18 岁的布莱克考入格拉斯哥大学学习医学，在学习医学之际，他同时致力于化学研究，1750 年，在他移居爱丁堡的同年，由于医学研究的需要，布莱克即开始进行酸类与碱类物质的研究。1754 年，他写出了他的博士论文《论胃中食物产生的酸，兼论白氧镁》，第二年，他把这篇论文扩充为专著，并在爱丁堡学会上宣读了这一著作，1756 年，该书以《关于镁石、石灰石和其他碱类物质的实验》的书名出版，在这一著作中，他记述了发现碳酸气的过程，并对这种气体的性质进行了初步的分析。

在一次实验中，他发现，把石灰石加热，除了制得石灰之外，还可以制取一种气体，他把这种气体叫作“固定空气”，并用定量分析的方法对这种气体的性质进行了分析，结果发现，石灰石经过煅烧后减少重量 44%，他认为，这正是“固定空气”被从中释放出来的缘故。与此同时，他也用镁石（碳酸镁）作过类似的实验，发现镁石也含有“固定空气”。他还发现，碳酸镁（镁石）与氧化镁（镁土）的区别，仅仅在于“固定空气”的得失，碳酸镁失去“固定空气”即为氧化镁；而氧化镁得到“固定空气”即为碳酸镁。

布莱克还用其他许多方法制取过“固定空气”，并认识到在呼吸、发酵、木炭燃烧中也能产生这种气体，而空气本身就含有少量的“固体空气”。

在制取“固体空气”的基础上，布莱克对这种气体的性质进行了多方面的研究。他发现，这种气体能为苛性碱所吸收；能使燃烧的蜡烛熄灭；能使动物窒息以至死亡。在当时，“窒素”曾是一个与“燃素”对立的观念，布莱克的发现从根本上揭开了“窒素”的秘密，原来“窒素”并不是一种与“燃素”对立的基质，而是一种特殊的气体。

通过对“固定空气”的深入研究，布莱克进一步指出，石灰石在煅烧后失重并转变为苛性石灰，正是由于失去酸性的“固定空气”，而这种“固定空气”本身并不是“燃素”，而恰好是“窒素”。他的这些实验与理论，一方面使燃素说进一步陷入了严重的理论危机中；另一方面，也为后来推翻燃素说提供了重要的实验根据与理论启示。

(3) 卡文迪许

继布莱克之后为证实燃素说而进行气体化学研究的，是英国化学家卡文迪许（1731—1810 年），他是一个公爵的后代。富裕的条件使得他终生得以进行专注的研究。

他在气体化学方面的第一个重要贡献，是创用汞槽法制取纯净的二氧化碳，并测定了二氧化碳的比重和溶解度，证明了用实践方法制取的二氧化碳，与动物呼出二氧化碳和木炭燃烧时产生的二氧化碳完全相同，同时，他还发现，当空气中含有九分之一的二氧化碳时，就会使蜡烛熄灭。

他在气体化学方面的另一贡献，是制取了氢气，并对氢气的性质进行了初步的研究。

1766年，他把题为《人造空气的实验》的论文提交英国皇家学会。文中除了具体论述二氧化碳的制取及其性质外，就是论述氢气的制法及其性质。他在文中指出，用盐酸或稀硫酸与铁或锌等作用，就可以用水槽法收集到反应过程中产生的氢气。他还指出，用定量的某种金属与多种酸作用，所产生的氢的量总是固定的，而与酸的种类无关。他认为氢气与空气混合后，一点燃即发生爆发。由于他崇信燃素说，所以他断言这种气体来自金属，而不是来自酸，因此他把这种气体称为“从金属中来的可燃空气”，他错误地认为，这种“可燃空气”就是从金属中分离出来的“燃素”，后来，他又认为氢气是“燃素”与水的混和物。

卡文迪许制取氢气后，人们曾把它充入气球，发现它能使气球很快飘浮上升，这样，一些燃素论的信奉者认为，气球飘浮上升正是“燃素”具有负重量的证据。可是不久发现氢气本身也是有重量的。

氢气的发现，一方面直接导致了后来的氧气的发现，另一方面也又一次动摇了燃素说。

(4) 卢瑟福

在导致氧气的发现并最终推翻燃素说的过程中，除了二氧化碳与氢气的发现外，氮气的发现也是极其重要的一步。1755年，布莱克在制取“固定空气”即二氧化碳之后，意识到剩余的气体与“固定空气”并不同，因此，他要他的学生卢瑟福（1749—1819年）继续研究这种剩余气体的性质。

1772年，卢瑟福对这种剩余气体进行了多方面的实验研究，他把一只老鼠放在含有这种气体的器皿内，发现老鼠闷死后，器皿内的气体容积减少了十分之一（实为老鼠耗掉的氧）。如果将里面剩余的气体用碱液吸收，则器皿内的整个气体的容积又减少十分之一（实为二氧化碳）。他以这样的方法除掉器皿内的“燃烧素空气和固定空气”（实为氧气与二氧化碳）之后，再对剩余的气体进行研究。他在这种剩余气体中点燃蜡烛，仍能看到隐现的烛光；若投磷少许，则可见磷发光。这些现象使他认识到，他所得到的并不是纯净的另一种剩余气体，于是，他改用以磷在密闭的器皿中燃烧的方法，结果制取了这种较为纯净的剩余气体。通过实验分析，卢瑟福发现，这种气体既不能助燃烧，也不能助呼吸，且不溶于苛性钾溶液。他把这种气体命名为“浊气”或“毒气”。由于他受燃素说的影响较深，他认为这种“浊气”并不是一种独立的气体，而是从燃烧物体中吸取“燃素”后的“火气”。但他的实验，实际上是氮气的最早发现，后来，他把这一发现写入了《固体空气或浊气导论》一文中。

与卢瑟福大体同时，卡文迪许也运用苛性钾吸收木炭燃烧时产生的二氧化碳的方法，制取过这种剩余气体，他也发现这种气体具有灭火的性质。可见，卡文迪许也是氮气的独立发明者。

这时，英国化学家普列斯特列也利用石灰水吸收二氧化碳的方法，制取过这种剩余气体，并且也发现这种气体的既不助燃、也不助呼吸的性质。由于他信奉燃素说，因此他认为，氮气所以不助燃，是因为它已经吸足了燃素，这样就使它失去了助燃的能力。因此，他把这种气体叫“被燃素饱和了的空气”。

瑞典著名化学家席勒也在这时发现过氮气，他还最后指出，氮气是空气的组成成分之一。

正是在氮气这一重要成果的直接推动下，仅在一两年后，席勒和普列斯特列就大体同时发现了直接推翻燃素说的重要气体——氧。

(5) 席勒

席勒（1742—1786年），生于瑞典波美尼亚的斯特拉尔松城的一个经商的家庭，十四岁时，被送到药剂师包赫的药店去当学徒，为他后来的化学研究打下了基础。

在从事医药化学研究的同时，席勒也开始进行燃素现象与气体化学方面的研究。1772年，席勒独立地发现了氮气。就在同年，他在实验中发现，一定容积的空气在长久接触某种物质后，其容积就会减少，而其中剩余的空气能使蜡烛熄灭。席勒根据这一实验事实分析，空气至少有两种性质不同的气体组成。他认为这两种气体中有一种不表现出吸引燃素的性质，因此他把它称为“浊空气”（即氮气）；而另一种则表现出特别能吸引燃素的性质，因此他把这种气体称为“火空气”，这实际上是氧气的最初发现。

在发现“火空气”之后，席勒即想以实验方法制取出这种“火空气”来。他根据燃素说设想，热是由“燃素”和“火空气”组成的。如果能把热分解为“火空气”和“燃素”，便可制取出“火空气”来。他想，只要选定这样一种物质，这种物质对燃素的吸引力比“火空气”对燃素的吸引力更大，那么就可以使这种物质同燃素结合，从而将“火空气”单独离析出来。为此，他选定了硝酸，因为硝酸易于与金属作用，易于吸取金属中的“燃素”。实验的结果，他取得了这种气体，点着的小蜡烛在这种气体中能放射出耀眼的光芒。这样，被席勒称为“火空气”的氧，就不但被席勒最先发现了，而且被席勒最先制取出来了。

此后，席勒又先后采用加热氧化汞、硝酸镁、二氧化锰与硫酸等多种方法制取过“火空气”，1782年，席勒又最先给“火空气”取名为“氧”。

在发现和制取氧气之后，席勒还对氧气的化学性质进行了初步的研究。如果循此前进，席勒本来可以揭示出氧在物体的燃烧与金属的煅烧中的化学实质，并由此推翻燃素说。但由于席勒坚信燃素说，因此，他同略后一些发现氧的化学家一样，没有抓到“碰到鼻尖的真理”。

席勒在化学的其他方面也有建树，他在1774年曾对氯、锰、钡等元素有过最初的发现，1775年，曾从骨中制取过磷，他还制取过一种被人们称为“席勒绿”的染料。特别是他在1788年合成了第一种有机酸“氢氰酸”。可惜的是，他由于多年的贫困与疾病的折磨，在刚得到一笔稿费使他得以同一个孀妇结婚的两天之后，即已四十四岁之年去世。

1773年以前，席勒发现并制取氧的有关实验即已完成，有关氧气的著作《论火与空气》一书，也在1775年底以前完稿，由于出版的延误，席勒这一著作直到1777年8月才出版。此后，普列斯特列记述发现氧的论文已经发表了，拉瓦锡论氧的论文也发表了。

(6) 普列斯特列

普列斯特列（1733—1804年）是与卡文迪许齐名的18世纪后期的英国著名化学家之一，他是一个农民的儿子。起初，在富兰克林的影响下，他开

始研究电学，特别是电学史的研究。1676年，他发表了一篇电学史方面的论文《电的历史及状况》，他因这篇论文被选为英国皇家学会会员，并于同年获博士学位。这一年，他出版了《电学史》的第一卷。在写作《电学史》第二卷的过程中，他在听一位化学博士的讲演时，对化学产生了兴趣。经过几年的努力，他已经精通了当时的化学理论与实践技术。1771年，他在加热硝石时，实际上已制得了氧气，并认识到这种气体有助燃性。只是他当时还未认识到这是一种独立的气体，而是把它同空气混为一谈。

1772年，普列斯特列独立地发现了氮气，他开始认识到，空气并不是单一的气体，而是由不同的气体组成的。氮气的发现，为他进一步发现氧气铺平了道路。

1774年8月1日，普列斯特列想用刚得到的一只大透镜做一次实验，以分析光对氧化汞的作用。他想，物体燃烧时，它的火焰总是放射出光，也许燃素本身是一种光？当他把透镜的聚焦点上的强光投射到玻璃罩内的氧化汞上时，红色的汞灰即出现耀眼的光点。几分钟后，汞灰竟变成了水银珠。而当他把点燃的干木条放入玻璃罩内时，不但木条本身燃烧得更旺，而且整个罩内即发出闪亮的光焰。显然，罩内有一种未知的气体被点燃了。但由于他笃信燃素说，他误认为通过透镜聚射进去的强光本身就是燃素，而没有认识到这是新的气体。

以后他陪一公爵到欧洲旅行，在法国期间，他会见了拉瓦锡，并告诉了自己的发现，这一新的科学信息，成了拉瓦锡在三年后彻底推翻燃素说的最初起点。

1774年11月，他回到英国，1775年，他开始研究他的发现，这时，他逐渐认识到，他所发现的并不是燃素，而是一种新的气体。这一年，他在对新气体所进行的研究中，主要做了以下两方面工作。在实验上，他进一步分析了这种气体的化学性质，发现这种气体特别能助燃烧和助呼吸。老鼠在盛有这种气体的器皿中活的时间要相当于在盛有普通空气的器皿中活的时间的两倍，而且在取出之后还能复活。他自己吸入这种气体后，胸部有一种特别轻松舒畅的快感，他欣喜地说：“这种气体，将来说不定要成为一种时髦的奢侈品呢！”他看到这种气体具有重要的医学价值，建议医学家们在治疗中运用这种气体。而这一点，后来成为现代输氧技术的发端。在理论上，他也试图对这种气体进行一些探索，但由于燃素说的影响，他认为，这种气体之所以特别能助燃烧，是因为它只含有少量燃素或者根本不含燃素，因此，他把这种空气称为“脱燃素空气”。同时他认为氮气之所以能使火焰熄灭，是因为它已被燃素饱和，因此，他把氮气称为“燃素化空气”。这些是完全错误的分析。

普列斯特列发现了氧，可是他不承认拉瓦锡以他所发现的氧所建立起来的氧化学说，正如居维叶所说：“普列斯特列是现代化学之父，但是，他始终不承认自己的亲生女儿。”

5. 氧化说

席勒和普列斯特列相继发现氧气之后，他们本来应由此引起对燃素说的怀疑与动摇，本来可以引起一场理论化学的革命，但由于他们盲目崇信燃素说，以至使氧气“这种本来可以推翻全部燃素说观点，并使化学发生革命的

元素，没有在他们手中结下果实。”而发现氧气并引起化学革命的并不是一个职业化学家，而是一个曾是学习法学的法国青年拉瓦锡（1743—1794年）。

拉瓦锡是巴黎一个富有的律师的儿子，在父亲的敦促下，他上了巴黎的索尔蓬纳学院的法学系。在校期间，他除了学习法学课程之外，还经常去听该校著名化学家卢埃尔（1703—1770年）的化学课，他开始接触到了元素理论和燃素假说，并产生了献身于化学的最初愿望。

人们一直认为，拉瓦锡本质上是一个理论化学家，而不是一个实验科学家，“在科学方面，拉瓦锡虽然是一个伟大的建筑师，但他在采石场的劳动却是很少的。他的材料大都是别人的，而他是不劳而获的。他的技巧就表现在把它们编排和组织起来。”但这并不是说，拉瓦锡不重视实践，他曾进行过不少化学实验，只不过他在理论思维上表现出了杰出的才能，而在实验技巧上显得平庸而已。他的这些平庸实践，对于他后来走向化学革命的里程有重要的意义。拉瓦锡虽然缺乏杰出的实验才能，但他的实验却颇具有独特的风格和独到的特点，这就是他在实验中十分重视系统的定量分析方法，他认为：“由于人工的或天然的操作不能无中生有地创造任何东西，所以每一次操作中，操作前后的物质总是相等的，而且其要素的质和量保持不变，只是发生更换和变形。这可以看成公理。做化学实验的全部技艺是基于这样一个原理。我们必须假定被检定的物体的要素和分解产物的要素精确相等。”这一论述见于他在1770年写的一篇论文中，这实际上是对化学反映中质量守恒定律的最初表述。

1772年11月，拉瓦锡在提交科学院的一篇论文中，说他在一次实验中通过定量分析发现，硫或磷在空气中被燃烧后重量增加了。他由此推测，这是因为一些空气在燃烧时被吸收了。

1773年，拉瓦锡在《物理化学简史》一书中，论述了他所进行的另一次实验：在一个钟罩内的水银面上燃烧磷，在磷完全燃烧后，置于罩内的水银面上升了，其中剩下的空气使余下的磷或小蜡烛熄灭，而由磷燃烧所产生的白色粉末（实为 P_2O_2 ）比磷重。磷的生成物所增加的重量，与罩内失去的air的重量基本一致。拉瓦锡认为，这一实验事实说明，罩内的一部分空气在燃烧时确实被磷的生成物吸收了。与此同时，拉瓦锡也用硫进行过同样的实践，也得到了同样的结果。

通过硫和磷在密封的钟罩内的燃烧实验，使拉瓦锡对燃素说产生了最初的怀疑。根据燃素说，燃素在燃烧中或具有正重量，或具有负重量。可是，无论取正重量还是取负重量，对这种现象都根本解释不通。磷或硫燃烧后增加重量的事实说明，它们的生成物只能是燃烧物体与某种空气化合的结果。可是，空气中以一定的比例与燃烧物体化合在一起的这种气体到底是什么呢？

1774年，拉瓦锡又以锡和铅作了著名的金属煅烧实践。他把经过精确称量的锡和铅分别放在两只曲颈瓶中。在将曲颈瓶密封后，他精确地称出了金属、曲颈瓶和其中空气的总重量。在将曲颈瓶内的锡和铅加热之后，他发现，锡和铅虽都已化为灰烬，但瓶内的总重量并无变化。而后，当他称量锡和铅的灰烬时，发现灰烬总量增加了。这说明，金属灰烬中所增加的重量，既不

《资本论》第2卷，恩格斯序，人民出版社1964年第2版。

《化学简史》，第131页。

可能来自于火中，也不可能来自于瓶外，而只能是与瓶内部分空气化合的结果。同时，他还发现，当把曲颈瓶口一打开时，瓶外的空气立即冲了进去。而冲进去的air的重量，又刚好与金属灰烬中增加的重量相等。

通过锡与铅的煅烧实验，使拉瓦锡对燃素说产生了进一步的怀疑。因为在密封的曲颈瓶中加热金属增加重量的实验事实，用燃素说是无论如何也解释不了的。而它只能说明，金属灰烬只能是金属本身与某种空气的化合物。可是，这种同样以一定的比例在煅烧时与金属化合在一起的气体又是什么呢？拉瓦锡曾设想，要想证实金属灰烬是金属本身与某种气体的化合物，最有说服力的实验，莫过于从金属煅灰中把这种气体直接分解出来。根据这一设想，他用煅灰进行了实验，但没有成功。

正当拉瓦锡在实验上遇到困难时，普列斯特列会见了他并介绍了自己的新发现，席勒也写信给他告诉自己发现的“火空气”。1774年11月，拉瓦锡运用普列斯特列的方法，重做了普列斯特列作过的用火镜加热氧化汞的实验，果然得到了与普列斯特列的实践同样的结果，他也从金属灰烬中分解出了这种被他称为“上等纯空气”的氧气。

从1772年对燃素论产生最初的怀疑和动摇开始，经过长达五年的实验分析和理论探讨，特别是在普列斯特列和席勒发现氧气的基础上，拉瓦锡感到推翻燃素说并建立起新的燃烧理论的化学革命的条件已经成熟。于是，他在1777年9月5日，向巴黎科学院提出了一篇题为《燃烧通论》的论文报告，正式提出了他的关于燃烧理论的氧化说：燃烧时，放出光和热。物体只能在纯粹空气中才能燃烧。燃烧时空气被分为两种成份，其中的纯粹空气被燃烧物体吸收。燃烧物体后所增加的重量等于“被破坏或被分解”的纯粹空气的重量。非金属燃烧后变为酸酐。纯粹空气是酸的本原，一切酸中都含有纯粹空气。金属煅烧后变为煅灰，它是金属与纯粹空气的化合物。纯粹空气是火质或光的一个基的化合物。由上述要点可见，其中除个别内容还带有燃素说的某些影响之外，把以前曾被燃素颠倒了燃素理论，从根本上再颠倒过来了。

此后不久，拉瓦锡在一篇论文中开始把“纯粹空气”的基称作“酸化要素”或“氧素”。1782年，席勒首次把这种空气称为“氧”，拉瓦锡也采用了这一名称，这样，新的燃烧理论就以氧化说著称于世了。

氧化说建立之初，遭到了卡文迪许、席勒和普列斯特列等著名化学家的反对，但受到了正处于科学发展上升时期的法国科学界的欢迎。在天文学和物理学界中初露头角的青年科学家拉普拉斯最先对氧化说表示支持。到了八十年代，法国青年化学家富克鲁瓦（1755—1809年）及其他一些青年化学家也表示支持氧化说。在英国，年老的布莱克在八十年代初也接受了氧化说，并在教学中讲授了拉瓦锡的氧化说。此后，氧化说在西欧各国进一步赢得了理论阵地。

1783年，拉瓦锡的《关于燃素的回顾》一书出版，在书中，他回顾了氧化说的建立过程，进一步总结了他的新的燃烧理论。自1785年以后，除了像普列斯特列这样在科学思想上极其保守的化学家之外，氧化说已为绝大多数化学家所接受。

拉瓦锡在1782—1787年间，还和其他化学家一起，曾对化学名词命名法进行了研究，他在《化学名词命名法》一书中提出的新的命名法，使当时较为混乱的化学名词初步得到统一，而这一点，对传播他的新的化学理论也起

了重要作用。1789年，他的《初等化学概念》一书出版。在书中，他把他当时所知道的元素分为四类：气类元素、酸类元素、金属类元素和土类元素，尽管他的分类并不尽正确，并且把光和热也当作气类元素，但他对元素分类所作的这些初步尝试，无疑是19世纪的元素分析与元素规律研究的思想先驱。他还最先发现化学反映的质量守恒定律，并由此尝试使用最初的化学反应方程式。

在科学上，拉瓦锡为近代化学建立了功勋，然而，在政治上，拉瓦锡是失败的，是有罪的，他走到了法国大革命的对立面，1794年5月8日，这位似乎只知道金钱而不懂政治的科学家，终于被送上了断头台。

氧化说的建立，推翻了统治理论化学长达一百多年之久的燃素说，从而最终扫清了带有若干炼金术理论色彩的燃素论在理论化学中的残余影响。自此之后，近代化学真正进入了一个新的发展时期。氧化说的建立，向人们又一次显示了理论思维对于科学的极端重要性，拉瓦锡尊重实验事实而又长于理论思维，终使他最终在当时的理论化学中建立了卓越的功勋。

6. 原子——分子说

从氧化说建立到新世纪到来之前的20余年时间内，化学又取得了一些新进展，如：又相继发现了铷、碲、钨、钛、钇、铬、铍等新元素；法国化学家雅·查理（1746—1823年）于1785年发现了气体的膨胀定律；1791年，康德的学生德国化学家李希特尔（1762—1807年）发现了酸和碱的中和定律以及当量定律；法国化学家普吕斯（1754—1826年）于1799年发现了化学反应的定比定律。这些新定律的发现，对化学的进一步发展有重要的实验意义。

到了18世纪末和19世纪初，由于人们在实验化学与理论化学中相继取得的新发现和进展，人们越来越突出地感到这样两个问题：其一，氧化学说并不能解释一切化学现象；其二，应当探索化学反映的本质。当新世纪到来时，对于包括化学在内的整个自然科学来说，新的科学革命不但早已具备了一种历史必然性，而且也逐渐具备了一定的现实可能性。

古希腊哲学家认为，世界本是由原子组成的，文艺复兴后原子论又开始复兴。这对当时的科学产生了广泛而深远的理论。在早期近代科学中，波义耳的“火粒说”和牛顿的“微粒说”明显受到古希腊原子论的启迪。在晚期近代科学发展时期，古希腊原子论孕育出来的第一个理论成果是康德的天体演化说，它所孕育出来的第二个理论成果是道尔顿的化学原子论。

道尔顿（1766—1844年）生于英国坎伯兰的一个贫困的山村。1799年，开始进行专门的化学研究，1801年，道尔顿在一些气体分析实验中，发现了气体的扩散现象，发现了气体的热膨胀定律和分压定律，正是从这里出发，使道尔顿最终走向了有关物质结构和化学反应的原子论。

道尔顿为建立化学原子论所作的直接研究，始于1803年。1803年9月6日，他在笔记中写下了原子论的要点：(1)原子是组成化学元素的、非常微小的、不可再分割的物质粒子。在化学反应中，原子保持其本来的性质。(2)同一元素的所有原子的质量以及其他性质完全相同。不同元素的原子具有不同的质量以及其他性质。原子的质量是每种元素的原子的最基本特征。(3)有简单数值比的元素的原子结合时，原子之间就发生化合反应而生成化合

物。化合物的原子称为复杂原子。(4)一种元素的原子与另一种元素的原子化合时，它们之间成简单的数值比。

在9月6日提出原子论的要点之后，在同月内，他即根据当时一些化学家对一些化合物分析的结果，并试用以氢的原子量为单位，初步计算出了氧、氮、硫、碳等元素的原子量。与此同时，他还创用不同的圆型符号，用来表示不同的元素的原子。由于当时尚未建立化合物的分子理论，道尔顿还提出了复合原子的概念，并试用各种圆型符号的规则组合来表示化合物的复合原子。这种表示方法，实际上是后来出现的分子式的先驱。

1803年10月21日，道尔顿在曼彻斯特文哲会上宣读了《论水对气体的吸收》的论文，首次报告了他的化学原子论的要点，公布了他所编制的第一个原子量表，以及说明为何用原子论来解释物质的化学结构和化学性质。同年10月10日至11月13日这段时间内，他在笔记中记载了氧化氮与空气的混合实验，试图用来证实他的原子论。1804年以后，道尔顿又进行了沼气（甲烷）和油气（乙烯）的化学成分的分析实验。他发现，甲烷中的碳与氢之比是4.3:4；而乙烯中的碳与氢之比是4.3:2。他由此推论出碳与氢化合的比例关系，并由此发现倍比定律：即相同的两元素生成两种或两种以上的化合物时，若其中一种元素的重量不变，则另一种元素在其他化合物中的相对重量为2:1。他认为，倍比定律很像是他的原子论的一个推论，也可以看作是他原子论的一个重要证明。1807年，英国化学家汤姆逊（1773—1852年）在他的《化学体系》一书中，向人们详尽地介绍了道尔顿的原子论。同年，道尔顿着手撰写他的主要化学著作《化学哲学的新体系》，该书的第一卷于1808年正式出版，道尔顿把他的原子论的主要实验和基本理论写入这一著作中，这样，道尔顿的化学原子论即由此正式问世。

道尔顿的原子论的建立，是继拉瓦锡的氧化学说建立以后，在理论化学中所取得的最重大的进步，它对当时的科学和哲学都具有重大的意义。在科学上，原子论首次揭示出了原子这一化学现象的物质载体，揭示出了一切化学现象不过是原子的运动这一化学本质。由于原子论揭示了化学的这一核心和本质，化学才真正明确自己的研究对象，才真正奠定自己的科学基础，化学也才真正成为科学。在哲学上，由于原子论以元素的原子量为元素的本质属性，这就初步揭示出了化学变化中的质与量的关系，揭示出了化学反应中的本质与现象的关系，并由此初步揭示出元素的内在联系及其相互关系。因此，在继天体演化学说诞生之后，原子论又一次冲击了当时僵化的自然观，同时，对于科学方法论的发展，对于辩证自然观的形成，乃至对后来的整个哲学认识论的发展，也都具有重要意义。

原子论的建立，极大地推动了化学以及与化学相关的一些学科的发展，自此以后，化学及相关学科发展迅速。由于原子论的建立，导致了意大利物理学家阿佛加德罗（1776—1856年）的分子论的建立；导致了瑞典化学家贝齐力乌斯（1779—1848年）等人所进行的元素的原子量的测定工作；导致了后来门捷列夫（1834—1907年）的元素周期律的发现。因此，原子论为19世纪初理论化学进入新的发展时期的一个伟大的开端。正如恩格斯所说：“化学中的新时代是随原子论开始的。”

原子论提出后不久，法国化学家盖——吕萨克（1778—1850年）研究了

各种气体物质反应时的体积关系，他发现，气体物质化合时，体积上有简单的整数比关系，如：氢与氧化合成水时，体积比为 2 : 1；一氧化碳和氧气化合时，体积比为 2 : 1；氮气与氢气化合时体积比为 1 : 3；氨与氯化氢化合时，体积比为 1 : 1 等。1808 年，他根据原子论所揭示的“化学反应中的各种元素的原子以简单数目相化合”这一结论作出如下推论：不同的气体在同等体积中所含有原子数成简单的整数比；而不同的气体在化合时，它们的体积也成简单的数值比；在相等的体积中，气体元素的重量正比于它的原子量。

吕萨克认为，自己所发现的气体反应的体积定律是对道尔顿的原子论的一次有力论证，而道尔顿却反对他的定律，认为如果按照吕萨克的定律，在相同体积中不同气体的原子数目相同，那么既然 1 体积氮与 1 体积氧化合生成 2 体积的氧化氮，则每一氧化氮原子中就应只含半个氧原子和半个氮原子，这与原子论中“简单原子不可分割”是完全对立的。道尔顿认为，这是吕萨克定律的实验基础不够确切。而证明吕萨克的气体反应的体积定律正确无误的是意大利物理学家阿佛加德罗。

阿佛加德罗于 1811 年发表了一篇论文，论述了关于原子量和化学式的问题，他以吕萨克的实验为基础，进行了合理的推理，首次引入了一个与原子概念既有联系又有区别的分子概念。他认为，所谓原子是参加化学反应时的最小质点，所谓分子是在游离状态下单质或化合物能独立存在的最小质点。分子是由原子组成的。同种元素的原子结合成的分子即为单质，而不同元素的原子结合成的分子即为化合物。在分子概念的基础上，他提出了分子论，主要内容是：分子是物质具有独特性质的物质结构的最小单位，是物质结构中的一个基本层次，无论是单质还是化合物，在其不断被分割的过程中，都有一个分子阶段。单质的分子可由多个原子组成。在同温同压下，同等体积的气体含有同等数目的分子。他的分子论使道尔顿的原子论与吕萨克的气体反应的体积定律在新的理论上统一起来，从而成为化学和物理学的统一的理论基础的原子——分子论。

阿佛加德罗以原子——分子论为依据，测定了气体物质的原子量和分子量，并确定了化合物中各种原子的数目。他根据气体反应时的体积比，确定了氨分子的组成为 NH_3 （道尔顿错误地定为 NH ），水分子的组成为 H_2O （道尔顿错误地定为 HO ），这些结论都是正确的。但他的正确思想并未被当时的化学界和物理学界所承认和重视，反而被冷落了大约半个世纪，主要原因是由于当时的科学的发展还不足以对分子作出系统的、明确的论证。

七、地质学

1. 近代地质学的兴起

近代地质学是一门起步较晚的科学。因为在近代科学发展的初期，工场手工业尚不发达，社会对金属矿产和其他矿产的需要量不大，因此使采矿业还只处于最初的发展之中，这样使得人们对地球的地质状况缺乏了解，但随着手工工场在 17 世纪的进一步发展，社会对于煤和金属矿产的需求逐渐增加，到了 17 世纪中后期，采矿业与采煤业迅速发展起来，因此人们的地质知识也就逐渐丰富起来，特别是由于不同地层中的大量化石的发现，直接推动了近代地质学的诞生。

17 世纪中后期，第一个真正属于近代类型的地质学家，是意大利医学家、比较解剖学的先驱斯台诺（1638—1687 年）。斯台诺原是丹麦人，青年时期留学于意大利后，即留居意大利任佛罗伦萨宫廷的御医。在行医之余，他通过解剖学研究走向了对化石的研究。在解剖研究中，他把现代鲨鱼和狗鱼与当时已经发现的一种化石作了比较，发现它们之间有相似之处。因此他认为，那种化石是现代鲨鱼和狗鱼的祖先，并由此得出化石是古生物遗迹的结论。通过对化石的研究，斯台诺不仅奠定了比较解剖学和古生物学的最初基础，而且还由此走向了地质学的研究。

在地质学中，斯台诺以化石鉴别为基本内容和主要方法，对地层学进行了初步的研究。他认为，化石是鉴别地层的主要依据，而含化石的地层则是地层演化史的直接记录。他指出，若某一地区的地层中的化石生物与现代海洋生物相似，则可以证明该地区的地层为海洋沉积；若某一地区的地层中化石生物与现代陆地生物相似，则可证明该地区的地层为陆地沉积，这样，斯台诺就以化石鉴别为实验基础，建立起了地层学的基本原理。而由于实验方法的初步引入，属于近代科学范畴的近代地质学，也才产生了自己的萌芽。

斯台诺把实验方法初步引入地层学之后，还对地层演变规律进行了初步探讨。通过对化石的鉴别和佛罗伦萨郊外的考察，他提出了地层演变三定律：迭加定律、原始连续性定律、原始水平性定律。他在三定律中指出，若地层未经变动，则下层地层老于上层地层，而上层地层新于下层地层，这是迭加定律；若地层未经变动，则地层应呈现连续性减薄，这是原始连续性定律；若地层未经变动，则地层应呈现出水平或接近水平的产状，这是原始水平性定律。他认为，运用他所提出的地层三定律，就可以从未经变动的地层产状来鉴别发生过地层变动的地层演变。

在提出地层演变三定律的基础上，斯台诺还对地史学进行了最早的研究。他通过对佛罗伦萨郊外的托斯卡纳地区的地层考察，把这一地区的地质史划分为六个演变时期，亦即六个地质幕：第一幕，沉降而接受沉积；第二幕，抬升为陆；第三幕，发生断裂与岩层倾斜；第四幕，再次沉降接受沉积，并出现化石生物；第五幕，重新抬升为陆，成为滨海平原；第六幕，在流水和地下火的联合作用下，相继形成河谷和峭壁，构成现今地貌。可见，斯台诺所编制的该地区的这个地质史年代表中，已孕育着近代最初的地质演化思想。

斯台诺不仅在化石学、地层学和地史学等方面为近代地质学的诞生作了开拓性的工作，而且开创了近代地质学的一些主要科学方法，如化石比较法、历史分析方法等。因此，就他的地质学成就与地质学方法而言，他不愧为近代地质学的伟大先驱。1669年，斯台诺在他的著名论文《天然固体中的坚强物》以及其他一些论文中，阐述了他的地质学理论。自此以后，早期地质学开始萌芽，进入最初的生长期。

2. 水火之争

(1) 早期水火之争

伍德沃德与早期水成论。当早期地质学最先在意大利萌芽时，它也在手工工场发展比较迅速的英国产生了萌芽。在英国，由于采煤场与采矿场的迅速发展，化石的发现也日趋增多，引起人们对地质现象的关注。

在英国，最早对化石进行认真研究的代表人物，是剑桥大学的牧师、著名的植物学教授约翰·雷伊（1627—1705年）。他早年在剑桥大学进行植物教学与植物分类学研究，并在1660年首创植物分类的自然分类法体系。此后，雷伊又与英国地质学家维路比（1635—1672年）一起进行过广泛的生物和地质考察，开始致力于动物分类的自然分类法体系的建立，在此过程中，雷伊研究了动物的比较解剖学，并由此走向了对生物化石的研究。

在对化石的看法上，当时的英国仍普遍受神学自然观的影响，即认为化石是上帝创世留下的废品，那些在高山上的海生生物化石，是由于《圣经》中所说的摩西洪水的作用，对于这种对化石成因的神学解释，雷伊在1660年以后发表的一些论文中提出了质疑，雷伊指出，化石并非上帝创世时留下的废品，而是古生物的遗迹。至于海生生物的化石出现在高山地层之中，他觉得那是难以用《圣经》中的摩西洪水说解释的。

当时，水成论尚未明显地形成一种学说，只是由于《圣经》中有关于摩西洪水的传说，而早期地质学先驱斯台诺在论述地质作用时，即提到过“地下火”的作用，又提到过水成作用，因此早期的水成论似乎既有神学背景，又有科学依据。因此它比早期的火成论似乎更有影响。反之，当植物学家雷伊在批驳水成论时，他也尚未形成系统的火成论思想。

雷伊在对早期水成论提出质疑时，虽然尚未形成系统的火成论，但是他对水成论的质疑却引来了一些对化石与地质持有神学见解的人的不满，并因此对雷伊的非神学见解提出了反驳。其中，对雷伊反驳得最起劲的人物，要数格雷山姆学院的医学教授、英国早期地质学的先驱伍德沃德（1665—1728年）。

伍德沃德早年学医，后因医学化学的关系，转为研究早期的矿物化学，并因此进行过一些地质考察。他考察了一些在水成作用下生成的地层及其化石，形成了较系统的水成论见解。他曾向剑桥大学赠送了一批能证明水成作用的化石，以示向雷伊证实水成论的正确性。1695年，他出版了他的地质学著作《地球自然历史试探》，论述了他的水成论思想。

对于地质的变化原因，伍德沃德以《圣经》的摩西洪水为依据，论述了地质变化中的水成作用。他认为，摩西洪水之大，比雷伊所设想的规模还要大得多。他说：“那时整个地球被洪水冲得土崩瓦解，而我们现在看见的地

层都是从混杂东西中沉积而成的，就像含土液体中的沉淀一样。”这说明，伍德沃德是把《圣经》中的摩西洪水说作为地层变化的主要原因的。

对于地层的变化过程，伍德沃德也阐述了他的一套比较系统的水成论的见解，他认为，摩西洪水作用于地层变化的过程，基本上可分为两个过程：破坏过程与沉积过程。在破坏过程中，摩西洪水不但毁灭了地球上大部分生物，而且粉碎了地表构造，使地表的岩石、土壤、杂物以及各种无机物全部被冲击起来，整个地球就成了一片包括人体、生物遗体、岩石，以及各种杂物在内的沉渣泛起的汪洋。他认为，在水成作用下的地层变化的第二个过程是沉积过程，他认为，在摩西洪水的后期，洪水慢慢澄清。最重要的金属矿产、骨头化石先沉积到最底层；海生动物的遗骸沉积到白垩层；而最轻的人体和高等动物的遗骸则沉积古沙土层。由于动植物遗体被卷入了整个沉积过程，因此在地层最深处也能见到生物化石。至于海生生物中的贝壳化石之所以在高山地层中出现，那是由于它们比较轻的缘故。

在论述地层变化原因与变化过程的基础上，伍德沃德指出：地层中的所有生物化石，都是古代曾经有过的生物的遗骸。只不过是出于摩西洪水所造成的弥天之灾，使其中的某些物种绝迹了。无论是仍然流传下来的生物化石，还是已经完全绝灭的生物的化石，他认为它们都是《圣经》中所提到的摩西洪水的见证。

以伍德沃德为代表的早期水成论，虽含有浓厚的神学色彩，但也确实含有一定的科学成分，因此，英国不少科学家也持有类同于水成论的见解，如牛顿、哈雷等。

雷伊与早期火成论。伍德沃德的水成论著作发表之后，雷伊即著文反驳，并在反驳中较为系统地提出了他的火成论学说。

1693年，雷伊在他的最初的比较解剖学研究的基础上，建立起了动物分类的自然分类法系统。在建立动物的自然分类系统的过程中，雷伊通过对不同地层的化石的考察，朦胧地发现了生物化石在地层中的新老迭加现象。他认为，含有不同化石的地层的一层一层地堆积现象，用水成论的摩西洪水的一次破坏和一次沉积作用是无法解释的，因此他也根据人们当时所关心的地质的变化原因和地质的变化过程这两个基本问题，阐述了他的火成论见解。

对于地层变化的原因，雷伊认为，岩石和地层的形成，化石在不同的地层中的分布，并不是摩西洪水的作用，而是地球内部的火运动的结果，即火山运动的结果。而地球内部的火的运动，乃是出于上帝的命令。在上帝的指令下，由于地球内部火的作用，山岳和陆地便从大海深处升起，最后升出水面形成现在的地层与地表构造。

对于地质变化的过程，雷伊认为，地球内部的火在持续的运动中，因此使火山不断爆发，生物不断死亡，这样就使火山熔岩与生物遗体混杂在一起，一层一层地堆积起来，于是在不断的堆积中形成现在的新老迭加堆积的地层产状。如果说，伍德沃德的水成论把地质变化过程看作是水成作用的一次沉积过程的话，那么雷伊则把地质变化过程看作是火成作用的多次堆积过程。

对于化石的成因和分布，雷伊也运用他的火成论进行了解释。雷伊认为，化石是在火山爆发时被毁坏生物遗体与火山熔岩混杂堆积的结果。而高山地层中之所以出现贝壳化石之类的海生生物化石，说明该地区在漫长的地质

年代以前是海洋，由于火山爆发使该地区隆起，并最终升出水面成为高山。反之，现在是海洋的地方，可能是以前的高山沉降的结果。

雷伊的火成论虽然带有一定的神学色彩，但也含有重要的科学成分，特别是在那些仍有活火山的国家，雷伊的火成论更易于为人们所接受。继雷伊之后，在 18 世纪前期持火成论观点的著名代表人物，是意大利威尼斯一个修道院的院长莫罗（1687—1764 年）。

18 世纪初，莫罗对意大利的一些山地地层进行了考察，在高山上发现了不少海生生物贝壳的化石。莫罗认为，高山上存在的贝壳化石用摩西洪水说是解释不了的，而只能用火山的作用才能加以解释。为此，他在 1740 年发表了一篇题为《论在山里发现的海洋生物》的论文，论述了他的火成论见解。莫罗的火成论继承和发展了雷伊的火成论。他认为，地质的变化原因，纯粹出于地球内部的炽热的熔岩的运动，引起一系列的火山爆发。每次火山爆发之后，冷却的熔岩都与混杂在其中的生物遗骸堆积成新的岩层。火山不断爆发，岩层不断堆积，也就逐渐形成了现在的地质结构。至于在不同的地域所表现出来的地质差异，他认为，那是因为每次每处的火山爆发存在着时间和地点的差异，所以在地质结构上也就表现出了差异。对于摩西洪水的作用，他认为，它可能是地质作用中的一种因素，但在整个地质作用中，它并不占主要地位。

由于莫罗的火成论继承和发展了雷伊的火成论学说，同时也概括了南欧地区的一些近代地质史实，因此它产生了比雷伊的火成论更为深远的影响。到了 18 世纪后期，尽管水成论仍具有神学背景，但火成论已发展为一种可以与水成论势均力敌的地质理论了。

(2) 重起的水火之争

新的地质考察。17 世纪末 18 世纪初的早期水火之争后，水火之争曾一度处于相对沉寂的状态，到了 18 世纪末期，水火之争又重新爆发。爆发的主要原因，是 18 世纪中后期采矿业的迅速发展，特别是随采矿业的发展而发展起来的广泛地质考察。

在法国，地质学家盖达尔（1715—1786 年）和德马雷（1725—1815 年）进行了最初的地质考察。盖达尔是医生，他从医药化学的研究中产生了对地质学的兴趣，他的地质考察遍及法国各地。他在地质考察中发现，地层中的矿层与岩层总是并列存在，他从这种夹层的走向来断定地层的走向。他在考察法国的海岸地层时，发现一个夹层因陷入英吉利海峡而消失，他断言，这一夹层应当在英国重新出现，后来，他在英国南海岸的考察证实了他的这一推断。在地质考察的基础上，盖达尔还在巴黎科学院的赞助下，与化学家拉瓦锡合作，于 1780 年绘制并出版了第一张大型的法国地质图。在地质理论上，他倾向于水成论的观点。他认为，爱尔兰的“巨人堤道”上的“石柱”型的玄武岩，正是由于水成作用形成的。但由于他对被认为是死火山地区的奥汶地区也进行过考察，因此他也相信火成论的某些观点。德马雷在地质理论上倾向于火成论，他在考察中发现，在年代久远的死火山附近，也有由玄武岩构成的“石柱”。因此他认为这些“石柱”型的玄武岩，是火山熔岩冷却的结果，即是由火成作用形成的。由于他们两人的主要注意力在地质考察方面，而且他们在地质理论上倾向于一派时，对另一派的理论也并不完全拒绝。因此，在他们之间虽然已重新发生了水火之争的思想交锋，但尚未形成

新的水火之争的激烈论战。

在德国，柏林大学的地质学教授勒曼（？—1767年）和医生富克泽尔（1722—1773年）曾对哈尔茨山脉产煤区的地层进行过地质考察。他们根据在矿区断层中发现的岩层的区别，对岩层进行了分类研究，他们认为，所有的岩层，基本上可分为三类：第一类是原始岩层，这种岩层不含化石，是年代最为久远的古老岩层，它们是构成山峦地层的核心。第二类是沉积岩层，其中含有简单的海生生物化石，它们在历史年代上比原始岩层年轻。第三类是堆积岩层，其中含有大量陆生生物化石，在历史年代上，它们又比沉积岩层年轻。根据地质年代学与岩层分类学的研究，勒曼与富克泽尔兼取了水成论与火成论的观点。

此外，在英国，在西欧和北欧的一些国家，也有一些地质学家进行了地质考察。

新的地质考察的发展，推动了新的地质理论的研究，而作为当时地质理论的两大支柱：水成论和火成论，也就随之相应地重新活跃起来。

维尔纳和水成论。18世纪末19世纪初，使水成论重新兴起于地质界的，是这一时期水成论的新的代表人物，德国地质学家维尔纳（1749—1817年）。

维尔纳生于一个矿业世家，在莱比锡大学毕业之后，即转入了地质学研究。1755年，26岁的维尔纳即开始在当时德国著名的弗赖堡矿业学院任教授，主讲矿物学、采矿学、岩石学和地球构造学等多门课程。在此后的40年左右，他以弗赖堡矿业学院为基地，创立了新的水成学派。

在任教期间，维尔纳曾对弗赖堡所在的萨克森和波希米亚地区进行过多次较为深入的地质考察。在考察中，他采集到了大量的岩石与矿物标本，他以这些标本为基础，对岩石进行分类研究。他认为，就岩石所含的化石的状况而言，可将所有的岩石分为四类：第一类是原始岩石，这类岩石是在原始海洋中结晶而成的，因此它里面完全没有化石；第二类是过渡性岩石，如石英、板岩等，这类岩石是在海洋沉淀过程中形成的，因此含有海生生物化石；第三类是沉积岩，它们是在洪水沉积过程中形成的，因此其中含有大量的生物化石；第四类是次积岩与异生岩，即由沙石与粘土组成的岩石，它们是其其他岩石风化之后形成的。维尔纳对岩石所进行的分类学研究，奠定了早期岩类学的基础。

由于维尔纳所考察过的地质区域有限，他所考察过的萨克森与波西米亚地区是以水成岩为主的地区，因此，在地质理论研究中，他就无条件地接受了水成论学说，并以他的岩石学和矿物学为基础，进一步发展了水成论学说。

维尔纳认为，所有岩石和矿石，最初都是由于原始海洋的沉积作用形成的，因此，水成作用是地质起源与演化中的主要地质作用，至于火山，那不过是煤在地下着了火的结果，由于煤的燃烧，融化了附近的岩石，因此才有火山的爆发，所以，火成作用是在主要岩层都形成之后才出现的一种非常次要的地质作用。

维尔纳的水成论中的地质起源、地质演化以及地质作用等方面的内容，是伍德沃德早期水成论的继续，所不同的是，维尔纳的水成论有岩石学与矿物学这样新的科学基础，特别是由于维尔纳在岩石学与矿物学上取得了较高的成就，加上维尔纳善于教学，这样弗赖堡矿业学院就吸引了来自欧洲各国的许多有志于地质学的青年学生。而在维尔纳周围，也就逐渐形成了一个新

的水成论学派，弗赖堡矿业学院也因此无形之中成为新的水成论学派的中心，而综合了最初的岩石学与矿物学成就的维尔纳的水成派学说，也就随弗赖堡矿业学院的学生传遍欧洲。从18世纪80年代开始，以维尔纳为代表的水成论，已跃居为理论地质学中占主导地位的理论。

赫顿和火成论。当维尔纳的新的水成论在80年代风行地质界时，英国业余地质学家赫顿（1726—1797年）同样使火成论成为当时地质学中引人注目的理论。

在研究地质学之初，赫顿曾对英国海岸的一些沉积岩进行过地质考察。后来，他又对苏格兰山脉的岩层进行过较为广泛的地质考察。在考察中，他发现，苏格兰山脉的岩石是结晶型的。他认为，这些结晶岩显然是由熔岩冷却而成的，而不是像维尔纳所说的那样，结晶岩是矿物在水中结晶而成的。正是在对结晶岩的考察和分析中，赫顿对维尔纳的水成论产生了最初的怀疑。

通过初步的地质考察，赫顿逐渐形成了地球内热作用是主要的地质作用这一基本观点，而地球内热作用亦即火成作用，这实际上是早期火成论的观点。这样，赫顿就在新的历史条件下，不但使早期火成论得以复兴，而且进一步发展了早期的火成论，赫顿本人也就因此成为火成论的新的代表人物。

1785年，55岁的赫顿在英国皇家学会上宣读了他的第一篇地质学论文，简要地论述了他的火成论的基本观点。1795年，赫顿所著的代表新的火成论的奠基性著作——《地质学理论》在爱丁堡出版。

赫顿的火成论有三个明显的理论特征：他认为火成作用是主要的地质作用；他认为水成作用也是一种重要的地质作用；他认为现在的地质结构是多种自然力长期缓慢作用的结果。

赫顿认为，由于地球的内热作用，地球内部熔融的岩浆就会时而从地壳的裂缝和缺口中迸发出来，从而形成火山爆发，因此就会不断产生熔岩的堆积，这样就会形成不同的岩层。在肯定地球内热是主要地质作用的同时，赫顿也不完全否认水成作用。他认为，沉积岩的形成，就是地球内热与海水压力共同作用的结果。此外，赫顿还认为，地质作用并不是单一的，而是一种多种自然力长期的、连续的和缓慢的作用。由于各种自然力的作用十分缓慢，因此不易为人们所觉察。但是，地质作用又是长期的、连续的，因此人们可以从现在还在起作用的那些力量中来分析地球地质的演化历史。

赫顿还在当时处于萌芽中的力的守恒思想的启发下，提出了地质作用力守恒思想。他从这一思想出发，认为各种地质作用力是周而复始的，地质变化过程是一个永恒的过程，它“既没有一个开始的迹象，也没有一个结束的前景”。

赫顿的新的火成论以英国的一些地质史料为基础，较为科学地解释了一些地质现象，并初步地提出了地质渐变论的思想。但是，由于这种思想违背了《圣经》中关于摩西洪水的说法，同时，由于赫顿的火成论不像维尔纳的水成论那样具有矿物学与岩石学的基础，因此，赫顿的火成论发表后不久，就受到了水成论的猛烈攻击。

水成论与火成论的争论。在英国，最先对赫顿的火成论进行猛烈攻击的，是曾对英国煤矿地质进行过考察的地质学家约翰·威廉斯。他是一位有宗教信仰很深的地质学家。1785年，当赫顿去皇家学会宣读他的第一篇有关火成论的论文时，威廉斯就对火成论表示不满。此后，威廉斯花了4年时间，

以他的煤矿地层考察为基础，在 1789 年写成并出版了《矿物界的自然史》一书，对赫顿的火成论进行了猛烈的攻击。

威廉斯认为，火成论的主要错误，是以火成作用和其他自然力的作用本身来说明地质变化，而这样做，在理论上就必然会导致无神论。因此，他认为，无神论倾向是赫顿学说的主要错误。他说：“赫顿关于地球的永恒性的狂妄和牵强的见解，首先把人引向怀疑论，最后把人引向十足的反正统信仰和无神论。如果我们一旦相信地球是永恒的，并能继续产生不断进步的万事万物，我们就会认为不需要有一个统治力量来干预一切；而且我们因为无从靠肉眼看到至高无上的主宰，我们就会把一切都归之于盲目的机会。”他指责说，赫顿的著作实质上是一种对宗教的叛逆行为。

新的火成论在 18 世纪末，虽然在理论上处于十分幼弱的地位，但也有不少支持者，在英国，最先在理论上对赫顿的火成论表示支持的，是他的两位友人：一位是爱丁堡大学的博物学教授普莱费尔（1747—1819 年），一位是爱丁堡地区的业余科学家霍尔（1761—1832 年）。

普莱费尔去爱丁堡大学任数学教授时，就对赫顿的著作进行过深入的研究，同时，他自己也在英国、法国、意大利进行过广泛的地质考察。1802 年，他出版了《赫顿学说的新证》一书，在书中，他对赫顿学说所作的理论阐述，比赫顿本人还要清楚。除此之外，他在著作中还论述了他自己对冰川遗迹所作的地质考察，因为他发现，冰川常常把一大块岩石从一个地方带到另一个地方。因此，他认为，冰川作用也曾是地质史上的一种重要的地质作用。

霍尔主要以实验方法证明赫顿学说。1790—1812 年，他设计并进行了一些重要的地质学实验，以求使赫顿学说获得实验证据。维尔纳的信徒批判赫顿学说时，从水成论的观点出发，认为熔融的岩浆不会因固化而变成晶体，而只会像火山的熔岩那样，变成玻璃状的东西。对此，霍尔进行了一个与水成论的说法相反、而与赫顿学说一致的实验，霍尔曾在一家玻璃工厂看到，当熔融的玻璃浆缓慢冷却时，它就变为不透明的结晶体；而当它快速冷却时，它就变成透明的玻璃体。霍尔假定熔融岩也是这样。于是，他从维苏威火山和埃特纳火山弄到了一些熔岩，他把这些熔岩放在炼铁厂的高炉中熔化后作了类比实验。结果发现，熔融的岩浆缓慢冷却时，它就变成了像玄武岩那样的结晶体；而当它快速冷却时，它就变成了玻璃状的东西。这一实验结果，使赫顿学说获得了最初的实验证据。又如，维尔纳的信徒在批判赫顿学说时，曾从水成论的观点出发，认为象石灰岩一类的岩石受热后就会分解，而不会如同赫顿所说的那样，在受热后变成新的岩石。对此，霍尔也进行了一个判决性的实验：他把石灰石放在一个封闭的容器中加热，结果发现，它并没有象水成论的信徒所说的那样分解掉，而是象赫顿曾预言过的那样，在冷却后变成了大理石一类的岩石。又如，霍尔在一次实验中发现，把散沙放在一个盛有海水的壶中加热，结果散沙凝结在一起，变成了同沙岩一样坚硬的岩石。这一实验，同样也使赫顿有关沙岩形成的理论得到了实验上的证实。霍尔的这些地质学实验，不仅使赫顿学说获得了实验上的证据，更重要的是，他首次把实验方法带进了地质学，这对 19 世纪地质学的发展，产生了极为重要的影响。

(3) 发展趋势

从 1790 年到 1830 年间，由于水成论与火成论的论战，由于矿物学、岩

石学、矿物化学以及古生物学等相关学科的发展，地质学进入了被称为地质学史上的“英雄时代”。19世纪初，随着地质学的进一步发展，水火之争随之出现新的发展趋势，这种新趋势主要表现在：火成论逐渐向渐变论发展，而水成论则进一步向灾变论转化。

早在赫顿提出火成论之初，法国著名生物学家布丰就提出过关于地球演化的渐变理论。在生物学上，布丰是早期进化论的思想先驱之一。他在进行植物种植和植物分类研究的同时，也进行过一些初步的地质理论研究。在他自己的早期生物进化论思想的影响下，他认为，地球也有自己的地质演化史。他曾假定地球的年龄为8万年左右，在这漫长的地质年代中，地球经历了7个地质演化阶段，这些演化阶段的主要过程是，最初某颗慧星与太阳相撞，使太阳的一些物质迸发出来形成太阳系的大小行星。而地球最初也同其它行星一样，是半液体状的熔融物质，由于自转的作用，逐渐形成具有凸出来的赤道和扁平的两极这样的球体。后来，由于地表温度逐渐下降，便形成了地壳以及地表褶皱，这样就使地表出现了不同的地貌。与此同时，大气中的水分在冷却的地表上逐渐凝结为水，这样就逐渐形成浸没地表的海洋。此后，由于海水对山脉的侵蚀作用，使蚀碎的岩石逐渐沙化，并和泥土一起发生沉积，海洋中的一些生物遗体被沉积在其中，这些遗体便逐渐形成化石。最后，由于地表出现裂缝，海水灌进了地球内部，地表也就出现愈来愈多的陆地。这样，当初的那种熔融物质，也就逐渐演化成现在的地质结构。

布丰的这种最初的地质演化思想，是从他的最初的生物进化论中类比出来的，但也含有一定的科学成分，即把地质演化看作一个长期缓慢的渐进过程。

赫顿在《地质学理论》一书中，已有了较为明显的地质演变的思想萌芽，他已较为明确地认识到现在的地质结构是多种自然力长期的缓慢的作用的结果，因此赫顿本人即是把火成论逐渐发展为渐变论的思想先驱之一。

当火成论向渐变论发展时，水成论已进一步向灾变说转变。水成论向灾变说的转化，一方面由于水成论自诞生起，本来就含有灾变说的成份，所谓“摩西洪水”灾变说，即是在伍德沃德那里就有的；另一方面，法国古生物学家居维叶对水成论向灾变说转化也起了重要作用。正是由于居维叶，水成论完全演化为灾变说，而居维叶则成为19世纪初地质学与生物学中的灾变说的代表人物。

(4) 居维叶

居维叶(1769—1832年)生于巴塞尔附近的一个胡格诺教徒家庭，早年在德国斯图加特大学随生物学家基尔迈耶(1765—1844年)学习生物学，1795年，由著名生物学家拉马克和青年生物学家希雷尔共同保荐，26岁的居维叶被任命为巴黎国立自然历史博物馆的比较解剖学教授，主要研究方向是古脊椎动物。1801—1805年，他出版了《比较解剖学讲义》一书，在书中，他较为系统地论述了他在比较解剖学和古生物学中的研究成果。

在比较解剖学中，居维叶所创立的动物肢体类比原则主要包括两方面的内容：第一，动物肢体结构所具有的系统性。居维叶说：“一个动物的所有器官形成一个系统，它的各部分合在一起并相互作用和反作用。一部分发生变化必然使其余部分发生变化。”根据这种系统性，“牙齿的形状意味着颞的形状，肩胛骨的形状意味着爪的形状。正如一条曲线的方程式含有曲线的

所有属性一样。”第二，动物肢体结构所具有的类比性。由于动物肢体的基本结构是稳定的，动物器官的基本机能是类同的，动物之间的各种器官和结构具有可进行类比分析的属性。即可从未知生物的某些局部的骨骼化石与一些已知的类同动物的类比中，推出未知动物的形体结构来。

显然，居维叶所创立的这一原则，对于比较解剖学与古生物学都具有方法论上的意义。

在古生物学中，居维叶运用他在比较解剖学中创立的原则，根据当时已经发现的一些古生物化石，复制出了大约一百五十种已经完全绝迹的古代的哺乳类动物的标本。在复制出这些标本的同时，居维叶还根据这些动物的形体结构，对它们的生活习性进行了描述，这对于古生物学是一个重要的贡献。

正是在比较解剖学、古生物学的研究中，居维叶把与古生物学密切相关的地质学中的水成论进一步引向了灾变说。从 1812 年出版他的《化石骸骨的研究》起，到 1817 年提出动物分类的“四类型说”，居维叶提出了他的系统的灾变说。

居维叶以他的比较解剖学和古生物学中的某些成果为基础，对动物分类学进行了研究。他以神经系统和循环系统为主要标准，将动物分为四个自然类型或类群：第一，脊椎动物类型，这一类型中的动物都有脑和脊髓，其中包括哺乳类、鸟类、爬行类和鱼类等；第二，软体动物类型，这一类型中的动物都含有由神经质块组成的神经系统，其中包括蜗牛、牡蛎等六类动物；第三，肢节动物类型，这一类型中的动物都含有由两个股索组成的神经系统，其中包括海虾、蜘蛛、昆虫、蠕虫等四类动物；第四，辐射动物类型，这种动物既无神经系统，也无循环系统。居维叶根据他的动物分类学，认为地球表面至少经历了四次大的洪水灾变，在每次大的洪水灾变之中，当时的绝大部分物种即被毁灭。而在每一次大的洪水灾变之后，新的物种又按与以前的物种类同的一般结构方案被造物主重新创造出来，因为每次灾变后的再创造只是依据以前物种的一般方案，所以每次大灾变后被重新创造出来的物种总要出现一些与以前的物种不同的差别，这就是动物物种所以出现历史系列现象的原因。他认为，历史上的大洪水灾变发生过 4 次，因此动物也就依次显示出 4 种类型，而最后一次大的洪水灾变，就是《圣经》上所记载的发生在五六千年前的“摩西洪水”

由于地质学是与古生物学密切相关的科学，所以，居维叶在古生物学中提出灾变说的同时，就自然把灾变说运用到地质学中。这样，水成论已有的灾变成分加上居维叶的发展，这就使得水成论完全转化为灾变说。居维叶在他的地质学代表作《地球表面的革命》一书中说：“引起这些地区出现干燥陆地的这种变化，并不是由于水面或多或少逐渐的和广泛的下降，而是地面上存在着水的多次突然上升和退却。”显然，居维叶在这里提到的这种水成作用，已完全抛弃了早期水成论中的某些合理的科学成分，而已将水成论改造成以他的“突变论”为特色的灾变论。他又进一步说：“这种水的反复进退不是以缓慢和渐进为特征的，恰恰相反，大多数激变是突然发生的。”而正是由于这种突变性的灾变作用，才“最后出现今天的大陆的基本轮廓。”这样，居维叶就把地质学中还含有不少科学成分的水成论，完全改造为他的带有浓厚神学色彩的地质灾变说。

由于居维叶在比较解剖学与古生物学上有重要贡献，而灾变说本身又以水成论为寄生体，同时也由于它得到神学的支持，因此，在 19 世纪初，居维

叶的灾变说曾是地质学与生物学中的喧嚣一时的理论。

然而，灾变说的前景并不乐观，到了 19 世纪 30 年代初，英国青年地质学家赖尔（1797—1875 年）就以他的地质渐变论对灾变论进行了首次的科学判决，到了 50 年代，英国杰出的生物学家达尔文（1809—1882 年）又以他的生物进化论对灾变论进行了再次的科学判决。

八、生物学

1. 生物分类学的早期发展

自哥伦布发现新大陆以后，特别是西欧各国纷纷向北美移民之后，随着新的植物和动物的发现、开发和利用，广泛的植物和动物资源考察成为一种时髦的而且经久不衰的科学活动。与此同时，近代植物园和动物园相继建立。在植物园中，其中建立较早的，有创建于 1545 年前后的意大利的帕多瓦植物园、比萨植物园，以及在同一时期创建的荷兰的莱顿植物园等。此后不久，西欧各国的皇家植物园也相继建立起来。由于生物考察与生物养殖的兴起，采集生物标本和进行生物分类，便成为近代早期生物学研究的基本内容。

由于在近代早期以及近代以前的生物学主要是以生物分类学为基本内容的，因此生物分类学本身是一门极为古老的科学。古希腊时期亚里士多德在对生物进行观察和解剖的基础上，曾对分类原则和分类系统进行过初步研究。在分类原则上，他反对把生物划分为相反的两类这种对分原则（如分为陆上生物与水生生物；有翅动物与无翅动物等），而主张选取尽可能多的不同特征进行分类。在分类系统上，他把生物从低等向高等的发展序列依次划分为 11 个等级，并初步提出了类和纲这样的分类学概念。

继亚里士多德后，他的学生德奥弗拉斯特（公元前 372—前 287 年）进一步推进了生物分类学的研究。德奥弗拉斯特在初创双名制命名法的基础上，给许多植物命了名，并进行了初步分类。由于他首创双名制命名法和奠定生物分类的初步基础，因此被西方生物学家誉为古代植物学之父，他的《植物的历史》与《植物的探究》亦被视为古代植物学的经典著作。就一定的意义而言，西方近代生物分类学的发端，正是以德奥弗拉斯特为代表的古希腊生物分类学为直接的理论渊源的。

文艺复兴运动兴起后，随着古希腊生物学的复兴，特别是由于生物考察与生物养殖的兴起，近代生物分类学在意大利、英国、荷兰、瑞典等沿海国家逐渐发展起来。近代生物分类学从 16 世纪中期兴起后，在此后持续一个半世纪的发展之中，不但积累了丰富的物种资料，而且还由于不同的宗教背景的影响，初步形成了两种不同的分类法：人为分类法与自然分类法。

人为分类法的基本方法是，选取植物和动物的某一个器官的形态特征为分类的主要标准，然后把生物物种人为地划分为不连续的、有等级序列的若干级类别。这种分类法形成和发展于天主教流行的国家。近代生物分类学的先驱、意大利生物学家契沙尔比诺（1524—1603 年）和另一个生物学家马尔比基（1628—1694 年）则是人为分类法的代表人物。

契沙尔比诺是近代生物分类学中的人为分类法的开创者，他深受亚里士多德的生殖灵魂论及其最初的人为分类法的影响，认为生物的生殖器官是机体的灵魂，而这种生殖灵魂，对植物来说，则表现为果和根：靠果繁殖，靠根生长。因此，在植物分类中，他以果和根的形态特征作为分类的主要标准，在其于 1583 年出版的 16 册本的《论植物》中，以南欧地区的植物和少数动物为分类对象，初步建立起了近代的第一个生物分类的人为系统。

此后过了 70 余年，意大利的另外一些生物学家试图把契沙尔比诺的人为分类法广泛地运用到包括动物在内的所有生物物种的分类上，从而建立起完整的生物分类系统。最先把人为分类法引入动物分类学的生物学家，是显微

解剖学的奠基人之一的马尔比基。他在 1661 年发现毛细血管之后，对契沙尔比诺的人为分类法进行了研究，试图建立一个把一切生物都纳入等级序列系统的分类体系。他认为，对动物来说，呼吸器官的完善程度是生物呈等级序列的主要标准，于是，他以生物的呼吸器官的形态特征为主要依据，将所有生物按植物、昆虫、鱼类、高等动物、人这种等级序列进行了统一的分类。

自然分类法的基本方法是，选取植物和动物的多种器官乃至全部器官的形态特征作为分类的标准，然后把生物物种自然地划分为连续的、彼此有亲缘关系的若干类别。这种分类法形成和发展于新教比较流行的国家，如荷兰生物学家洛比留斯（1538—1616 年）、瑞士生物学家鲍兴（1560—1634 年）、英国地质和生物学家约翰·雷伊则是这种分类法的代表人物。

自然分类法强调分类中的多标准，强调物种之间的亲缘关系。运用这种方法，瑞士植物学家鲍兴曾在 1623 年完成了对他当时所知的近 6000 种植物的分类。鲍兴在建立他的植物的自然分类体系时，还广泛地采用了在 16 世纪中期已有人采用的双名制命名法，从而扩大了双名制命名法的影响。

继鲍兴之后，约翰·雷伊进一步推动了自然分类法的发展，他在研究 17 世纪中期以前的植物分类法时认为，在选用分类标准时，不仅要注意植物的果和根，也要注意植物的花、叶和其他器官的形态特征。1660 年，雷伊运用自然分类法建立了一个植物的自然分类体系。此后，雷伊逐渐转向动物学的研究和地质学的研究，并对当时尚处于萌芽时期的比较解剖学进行了最初的研究，在此基础上，雷伊进一步推广了自然分类法的运用范围，在 1693 年又建立起了一个动物的自然分类体系。这样，雷伊也在生物分类学中建立起一个统一的自然体系。

自然分类法强调在生物分类中采用多种标准，强调生物物种之间的亲缘关系，比较符合生物物种类别及其关系的本来面目。但由于这种分类标准太多，不易掌握；而且由于此分类法与天主教教义相悖，因此此分类法影响甚小。

17 世纪末，植物学中的一大新发现也对人为分类法的发展起了直接的推动作用。1692 年，英国植物学家格鲁（1641—1712 年）发现了植物的有性繁殖，1694 年，德国图宾根大学的植物学教授卡梅拉留斯（1665—1721 年）以及其他的一些生物学家进一步证实了格鲁的发现。由于格鲁和卡梅拉留斯等人的发现使人们认识到植物的雄蕊实际上是它的雄性器官，而它的雌蕊实际上是它的雌性器官，这就更增强人们对植物具有生殖灵魂这一观念的信奉。植物有性生殖的发现，加强了生物分类学中的人为分类法的优势。

2. 生物学家林耐

(1) 对生物分类学的探索

林耐（1707—1778 年）生于瑞典司马兰省的牧师家庭，他的父亲是个乡村牧师，热爱大自然，喜爱种花草，为此，曾开辟过一个规模不小的花园。幼年林耐受到了这种热爱花草种植的家庭气氛的熏陶，也许是使林耐后来成为一个著名的植物学家的最初动因。

林耐中学毕业后，考入瑞典的龙德大学，在进大学之初，林耐寄宿在一个叫司徒比的医生家里。司徒比既是一个医生，也是一个博物学家，他家里藏有丰富的矿物、介类、植物、鸟类的标本。林耐因此向司徒比学到采制生

物标本的知识和方法。一年以后，林耐转入瑞典的著名大学——乌帕萨拉大学，受到了该校医学教授、植物学家路德维克的器重，并把林耐破例地提升为自己的助教，代表他讲授植物学。后来，由于校方禁止没有学位的人在大学执教，林耐只得离开该校。林耐离校后，进行了一段时间的植物考察，此后，林耐为了取得正式医生的资格，于1735年前往荷兰。在荷兰期间，林耐结识了不少生物学家，并曾一度前往英国进行植物品种交换与植物物种考察。1738年，林耐取道法国回国，在巴黎期间，林耐又结识了法国的一些生物学家。1740年，由于路德维克去世，林耐即应聘继任路德维克的教授席位，重返乌帕萨拉大学任教。

青年时代的林耐极其重视生物物种考察。早在乌帕萨拉大学任助教时，林耐就曾只身前往瑞典北部的拉帕兰地区进行植物物种考察。拉帕兰地区环境恶劣、气候寒冷，1732年底，林耐对该地区的植物物种进行了初步的分类研究，写成了《拉帕兰植物志》，这是林耐早期的重要著作之一，也是瑞典当时重要的地域植物志之一。1733年初，林耐离开了乌帕萨拉大学，立即应瑞典达拉纳省省长之邀，前往该省进行植物资源考察。林耐在瑞典境内进行的这些植物考察，为他后来建立分类体系奠定了初步的实验基础。1740年，林耐返回乌帕萨拉大学任教之后，觉得个人独自进行考察的力量有限，于是动员他的学生走出瑞典，走向欧洲，走向世界，到世界各地去进行更为广泛的动植物物种考察。林耐派出进行考察的学生，有的曾东到日本，有的曾西去北美，有的曾南到南非，有的曾北去斯比兹堡群岛。其中有位学生也到过中国。可以说，林耐的这种广泛的生物物种考察，正是他所以能够最终完成生物分类的人为体系的重要实验基础之一。

青年时代的林耐也极其重视植物种植。在荷兰留学期间，林耐曾应荷兰人克里福之邀，经营过克里福植物园。在克里福植物园进行植物种植期间，林耐熟悉了西欧地区的许多珍贵植物品种。克里福植物园的植物种植是林耐青年时代主要的植物种植实验活动之一。正是在这次植物种植的实验基础上，林耐完成了他早年的另一部地域性植物志：《克里福园植物志》。

林耐重返乌帕萨拉大学任教之后，由于该校原有的植物园在40年前毁于大火，所以林耐在继任植物学教授之后，即致力于重建乌帕萨拉大学植物园。在开始重建时，被焚毁仅存的园内植物只有50余种，后来在林耐的主持下经过六年之后，园内的植物已愈1500余种。其中有1100余种由林耐从国外引进。作为一个植物学家，长期坚持进行植物种植，显然也是他能最终完成生物分类的人为体系的另一重要实验基础。

在广泛地进行植物物种考察和植物种植的基础上，林耐为他的生物分类学研究奠定了比较广泛的实验基础。与此同时，林耐还对生物分类学的理论进行了研究。

18世纪初，由于以牛顿为代表的一批科学家从科学向神学的转化，神学自然观已在当时的科学界产生日趋增大的影响。这样，就使以天主教为背景的人为分类法具有更为有利的社会背景和宗教背景。同时，以英国植物学家格鲁为代表的植物有性繁殖的发现，也使人为分类法在当时取得了明显的理论优势，所以，在当时人为分类法远比自然分类法更为生物学家所接受。林耐也在生物分类法上站到了人为分类法一边，但他在理论和方法上也吸取了自然分类法的许多成果。对瑞士植物学家鲍兴进一步发展的双名制命名法及其对许多植物的命名、英国生物学家约翰·雷伊在植物分类与动物分类中的

成就，林耐都曾进行过研究，并从中受到了不少积极影响。

早在乌帕萨拉大学任植物学助教时，林耐即开始酝酿建立统一的生物分类系统。1735年，28岁的林耐为取得医学博士学位，带着他刚完成的生物分类学著作《自然系统》的初稿来到荷兰，在同年7月获得博士学位后，林耐便带着他的《自然系统》的初稿访问了荷兰莱顿大学的著名植物学教授格罗诺乌博士。格罗诺乌看过林耐的《自然系统》的初稿后，大为赞赏，并立即出资为林耐在荷兰出版了这一著作。此后，林耐又相继在1736年完成了《植物学基础》、《植物学文献录》；在1737年完成了《植物属志》、《克里福园植物志》；在1738年完成了《植物纲志》。这些著作都是在荷兰完成的。

返回瑞典后，林耐在完成他的另外的生物学著作的同时，仍然不断修改、扩充、深化他的主要著作《自然系统》。这一著作在1735年初版于荷兰时，还只是一本小册子；可是，当它在1768年第12次再版时，已是一部鸿篇巨著了。《自然系统》在60年代末仍在修改，但林耐的分类体系实际上在1735年已基本形成，而他的双名制命名法在1753年即已通用于他的植物分类之中；1758年他在《自然系统》的第十版时，又扩展于统一的生物分类体系之中。这样，林耐在经过长期的生物分类学的实验与理论探索之后，终于在18世纪中期集生物分类学之大成，在建立统一的双名制命名法的基础上，最终完成了生物分类学史上的人为分类系统。

(2) 双名制命名法

林耐在进行生物分类学研究之初，由于没有找到统一的生物命名法，因此在建立统一的生物分类体系的过程中遇到了困难。后来，他从瑞士植物学家鲍兴的双名制命名法中得到启发，认为有可能运用双名制命名法建立统一的生物命名法。林耐吸取了鲍兴的双名法的基本原则，改进了其中的不足之处，又从英国生物学家雷伊那里吸取了种的概念，建立起了以人为分类法为基础的属名与种名相结合的新的双名制命名法。

林耐的双名制命名法的基本原则与鲍兴的双名法基本相同，即用两个词来命名物种的名称。但在实质上与鲍兴的双名法有所区别，鲍兴的双名法中的两个词不完全是属种结合的分类学概念，而林耐的双名法中的两个词完全是属种结合的分类学概念。即属名在前，是一个名词；种名在后，是一个形容词。林耐规定，这种新的双名制要统一使用拉丁文；属名只能用名词，种名只能用形容词。这样这种新的双名法在分类学上做到了属种结合，在语义学上做到了名词和形容词的结合。因此，不论在生物分类上还是在语义表达上，它都显得简要精当。例如，在食肉兽中，按林耐的双名制命名法，狮、虎、豹的学名分别是：

狮	Felis	leo
虎	Felis	tigris.
豹	Felis	pardus

前面的名词说明它们是同一个属，后面的形容词说明它们是不同的种。

运用这种新的双名制命名法，林耐给他所知的7700种植物和4400种动物命名了统一的学名。

由于新的双名制命名法科学合理，简要明了，方便易行，因此，自林耐之后，新的双名法即为各国生物学家相继采用。1867年，在巴黎举行的首次国际植物学会议上，林耐的双名制命名法得到了国际植物学界的确认。直到

1905年，当第二次国际植物学会议在维也纳举行时，林耐的双名法不但进一步得到国际植物学界的确认，而且规定林耐已经命名的物种的属名仍以林耐的命名为依据。可见，自林耐的双名法确立之后，生物学中的物种名称混乱的状况就逐渐结束，而生物分类学以及整个生物学也就建立在一个统一的命名基础上。

林耐确立双名制命名法之后的两百余年之中，生物分类学又有了新发展。人们又相继规定了一些新的方法，如规定属和亚属以上的名称，采用单名制；物种的名称，采用双名制；亚种的名称，采用三名制。亚种表示动植物物种的地理分布，但物种本身的命名仍用双名制。尽管生物命名法在后来有了新的发展，但基本的命名原则，仍然是以由林耐最终确立的双名制命名法为基础的。

(3) 人为分类系统

由于建立了统一的双名制命名法，这就为林耐对生物物种进行统一分类，并进而建立统一的生物分类系统奠定了基础。

要建立统一的分类系统，首先要确定分类的主要标准，林耐认为，人为分类法中的分类标准是可行的，特别是在植物分类中更是如此。在确定以生殖器官为分类的主要标准的基础上，林耐也有所发展。林耐的发展在于积极地吸取了英国植物学家格鲁和德国植物学家卡梅拉留斯所发现的植物有性繁殖的成果，确定了以雄蕊的数目区别纲，以雌蕊的数目决定目，以花区别属，以叶区别种的分类标准和原则。这种选用多级分类标志的原则，比以往的人为分类法用生殖器官作为唯一标志当然更为合理，更为严密。由此看来，林耐在植物分类中选用分类标志的原则和方法，明显地吸取了自然分类法的某些优点。

在动物分类标志的确定上，林耐也同样地吸取了自然分类法中的某些内容。他以动物的心脏、呼吸器官、生殖器官、感觉器官和皮肤特征等多种性状为分类的综合标志，将动物分为六大纲：

心脏有二心室、二心耳，血温、红色：

胎生 哺乳纲

卵生 鸟纲

心脏有一心室、一心耳，血冷、红色：

肺呼吸 两栖纲

腮呼吸 鱼纲

心脏有一心室、无心耳，血冷、白色：

有触角 昆虫纲

有触手 蠕虫纲

林耐对动物的分类标记的确定，也与传统的人为分类法并不完全一样，而是在吸取自然分类法的多种性状特征为依据的基础上来确定分类的综合标志的。

在分别确定植物和动物的分类标志之后，在分类中所面临的另一重要问题，是如何确定分类的等级序列。

在通过广泛的植物考察、植物种植、标本分析以及理论研究的基础上，林耐对传统的人为分类法中已有的分类范畴作了一些改进。他继承和发展了雷伊的种的概念，把它引为人为分类法的等级序列概念中的基本概念，从而

建立起了纲、目、属、种这样由四级分类概念所构成的等级序列。

对于整个自然系统，林耐把整个自然界划分为有生与无生两界；把整个有生界划分为植物和动物两个亚界；亚界下分纲，其中把植物划分为 24 纲，把动物划分为 6 纲；纲下再分目；目下再分属；属下再分种。种是这个等级序列中的最基本的分类单位。这样，林耐就建立起了一个由纲、目、属、种四级分类序列构成的人为分类系统。

林耐的分类序列概念与现代分类学的区别在于：他的属与目之间没有种；他的纲上没有门；但他在种这一级中列有亚种。

由于确定了分类的基本标志，又确定了分类的等级序列，林耐就以他的新的双名制命名法为基础，在对 7700 种植物和 4400 种动物统一命名之后，最终完成了以人为分类法为基础的生物分类系统。

林耐的生物分类学成就，集中地反映在他的《植物种志》、《瑞典动物志》和《自然系统》这三部主要著作中。其中《植物种志》最初写作于 1746 年，前后历经 6 年时间，直到最后完全建立双名法之后，才在 1753 年定稿出版，此书建立了植物的人为分类系统。《瑞典动物志》最初出版于 1746 年，后来修改再版，再版本中，林耐建立了动物的人为分类系统。《自然系统》是林耐的最主要著作，在林耐生前再版 12 次。

在进行生物研究的过程中，林耐对人类学也曾进行过初步研究。在 1753 年《自然系统》的第五版中，他曾把人与猿同放在“灵长目”中，对于作为“灵长目”的人属，他又按人的肤色及其性状特征把人分为四大种。他的研究是人类学的开端。

林耐的生物分类系统的建立，对近代生物学的发展产生了深远的影响。由他最终完成的双名制命名法和人为分类法，不仅直接奠定了近代生物分类学的基础，而且也奠定了近代生物学的初步基础。正是由于他所建立的分类系统，初步廓清了数以千计的生物物种的等级序列，从而为后来以生物分类学为基础的生物进化论的孕育提供了母体。而他的整个生物分类的人为系统的完成，也为后来自然分类法的进一步发展提供了借鉴。就这些意义来说，林耐建立统一的生物分类系统的功勋，“可同牛顿把宇宙中万千种物体的运动归纳为简明扼要的万有引力定律一样媲美”。

林耐的人为分类系统，到 19 世纪初即为瑞士生物学家德·堪多（1778—1841 年）的自然分类系统所代替。恩格斯曾说，早期近代科学发展的终结，是“以牛顿和林耐为标志的。”

3. 进化理论的先驱：拉马克

(1) 林耐以后的生物学

林耐的生物分类学成就，代表了 18 世纪中期生物学的最高成就，但对人为分类法以及物种不变论，晚年他曾有所动摇。到了 18 世纪末，当林耐的生物分类法仍在生物学中占主导地位时，在法国，逐渐产生了一股反对人为分类法与物种不变论的新思潮。这种新思潮的代表人物，一是以植物学家朱西厄（1699—1777 年）为代表的植物学派，一是以动物学家布丰（1707—1788

竺可桢：《纪念卡尔·林耐诞生 250 周年》，《科学史集刊》1958 年第 1 期。

《自然辩证法》，人民出版社 1971 年版，第 9 页。

年)为代表的动物学派。

朱西厄是法国特里亚农皇家植物园园长,他研究过林耐的分类学著作,但不同意林耐的人为分类法。他的主要贡献是在植物的种植方面,在他主持下的特里亚农皇家植物园内,植物是按自然分类系统排列的,这种种植方式,能给人以一种生动的物种可变的直观感。他的侄子安东尼·朱西厄(1748—1836年)以他的植物种植为基础,在1819年发表的《自然分类学基本原理》一书中,建立起了第一个较完整的自然分类法。

当朱西厄叔侄在研究植物的自然分类系统时,布丰和他的助手道本顿(1716—1800年)正致力于研究生物的分类系统,特别是致力于以比较解剖学的方法研究动物之间的亲缘关系。布丰强烈反对人为分类法,他认为一切人为分类法都是“形而上学的一个错误”,其错误“在于不了解自然过程,这种过程总是循序渐进的……,我们能够使人无法察觉地从最完善的生物逐渐下降到最不具形状的东西。我们将能发现许多中间物种以及一半属于这一类、一半属于那一类的物种。这种不可能指定一个地方的东西,必然使得建立一个普遍体系的企图成为徒劳”。布丰也反对物种不变论,他认为自然界没有不连续的纲、目、属、种,这些界限都是人为分类法造成的界限。他认为,当时人们所知的200余种四足兽,是从大约40种原始类型传下来的。后来他又进一步认为,它们最初可能起源于一个亲体。他说:“在动植物里面,且不说有好几个物种,即使只有一个物种是通过直接遗传过程从别的物种中产生出来的,只要这个论点一旦成立,那么自然的力量便不能再加以限制了。而且只要有足够的时间,大自然就能从一个原始的类型发展出一切其他的生物种类来。”

为了建立自然分类系统,布丰在1749年以前即开始写作他的长篇巨著《自然史》。这部巨著的前三册在1749年出版,在这三册中,布丰论述了他的自然分类系统的总论点。从1753年—1767年,他出版了这一巨著中的四足类动物部分的12册。1781—1786年间,他又出版了鸟类与矿物类部分的10册。1788年,布丰去世,他的学生拉塞佩得(1756—1825年),在1788—1804年间又出版了蛇类与鱼类部分的后8册。至此,布丰的《自然史》的44册本才全部出齐。正是在这一巨著中,布丰建立起了一个最初的自然分类系统,论述了最初的物种可变思想,只不过他是个物种退化论者。

在朱西厄和布丰致力于建立自然分类系统与论述物种可变论的同时,另一些生物学家已在物种变化原因的研究中初步形成两种不同的学派,一是以法国植物学家罗比耐(1735—1820年)为代表的“内力分化派”,一是以瑞士动物学家邦尼特(1720—1793年)为代表的“外力灾变论”派。

罗比耐主要以生物学为基础进行自然哲学研究,1761—1768年间,他曾出版过一部五卷本的自然哲学著作。在自然哲学研究中,罗比耐一方面看到了物种之间的亲缘关系,一方面又受基督教教职等级观念的影响,他把这两种观点掺合在一起,提出了物种并不是一个静止的等级,而是一个随时间变化的由下而上的直线阶梯的理论。他认为,生物“个体的序列是生物朝着人类演化的若干阶段”,至于人的特性则以种子的形式存在于整个生物阶梯中,连最不具形态的物质里面,也有生命和灵魂,甚至在宇宙的基本原子中,也具有生命和灵魂。从这种带有泛神论性质的普遍灵魂论出发,罗比耐认为,

物种变化的机理，即物种变化的原因，乃是生物本身所具有的一种最普遍的属性，即一切生物都具有一种内在的自我分化力量。

邦尼特是个博物学家，他在早年曾致力于动物学研究，曾于1740年发现过无性生殖现象。后来，他由于视力变坏而转向生物学的理论研究，1770年，他在《哲学上的新生论或关于生物过去和未来的一些想法》的论文中，曾从蚜虫不经受精而生育幼蚜这种无性生殖的现象出发，认为在每一物种母体的胚胎中，即已含有未来一代的雏形，这意味着物种是永远不变的。但物种变化却又是当时生物学家所必须面对的事实。于是，邦尼特从早期地质学的水成论中吸取了灾变论的观点，认为物种的变化是周期性的洪水造成的，在每次洪水之后，生物物种的躯体毁灭了，但其他胚胎中的种子却在洪水后的遗骸中复活过来，每次灾变后的新种都比前一个种高一等级，这样就形成了生物进化的序列。他预言，世界还将发生一次大洪灾，在这次大洪灾后，动物将具有人的理解力，而人将变为天使。到那时，在猴子和大象中将产生莱布尼茨和牛顿，在海狸中将产生培罗（17世纪的法国著名文学家）和沃邦（17世纪的法国著名建筑师）。邦尼特这种灾变论，后来为法国动物学家居维叶继承和发展。

(2) 拉马克

植物学和动物学的研究。拉马克（1744—1829年）生于法国北部的比卡提州的一个没落贵族之家。欧洲七年战争期间，拉马克参加了法国的志愿军，退职后开始了气象学的研究。在最初的气象学研究中，拉马克曾创用了卷云、浓云、积云、层云等气象学名词，以进行云的分类研究，同时，他还研究了云的变化规律及其成因，并由此开创从云层和风向的变化中探索天气变化规律的研究，他由于这一研究而成为近代气象学史上第一个观云测天气的人。后来他进入医学院，并随其大哥迁往巴黎市郊的乡村，由于当时学医必须选修植物学，这使得拉马克有机会常去特里亚农皇家植物园和巴黎皇家植物园听讲，在那里，他结识了与当时植物学有同样爱好的著名哲学家卢梭（1712—1778年）、朱西厄、布丰及其助手道本顿，卢梭的朦胧生物进化论，朱西厄、布丰和道本顿的物种可变论思想都对拉马克产生一定的影响。因此，拉马克走上了一个植物学家的道路。

1768年，24岁的拉马克在朱西厄的直接指导下，开始进行植物分类学研究，经过近十年的努力，拉马克以特里亚农皇家植物园和巴黎皇家植物园的植物物种和标本为基础，写出了一部三卷本的《法兰西植物志》。这是法国的第一部大型植物志，它以林耐的双名法为基础，较为详尽地描述了法国各地的主要植物的形态和性状。在这一著作中，拉马克还创用“两段索引法”，即把植物所属的种和属分别加以索引，使人们更易于掌握植物的性状及其特征。这部植物志完稿之后，由道本顿写了序，1778年，在巴黎出版。此书一出版，即在巴黎成为轰动一时的畅销书之一，这本书的出版，改变了人们对植物学的看法，使人们不得不承认，植物学也是一门科学。此书更赢得了法国植物学界本身的重视，在布丰的提议下，巴黎科学院在1779年批准拉马克为科学院院士，同时，布丰还聘请拉马克为他儿子的导师。

由于《法兰西植物志》的出版，拉马克一跃而成为法国知名的植物学家，1781年，布丰为拉马克在巴黎皇家植物园谋得了一个“皇家植物学家”的头衔。同年，拉马克带着布丰的儿子，考察了德意志、匈牙利、荷兰、奥地利

等国的植物园和博物馆，在国外历时两年的考察期间，拉马克结识了许多植物学家，采集了许多植物标本，这次考察为拉马克继续进行植物学研究打下了新的基础。

拉马克回国后，法国正在百科全书派的思想影响之下，拟定编撰各种类型的百科全书。《系统百科全书》就是其中拟编的分类百科全书之一。这部百科全书分为 48 类、166 卷，拟在 1782—1832 年间相继出版。主编委托拉马克负责其中的《植物学辞典》的编写。拉马克在他所负责的这部分内容中，正确地描述了 2000 多个属的植物，与此同时，他还编写了一部载有 900 余幅彩图的七卷本的《植物图鉴》。

拉马克为皇家植物园进行了许多研究工作，但始终是义务的。直到布丰去世之后，布丰的继任者恩克菲力伯爵才为拉马克谋得一个年俸为 1000 利佛的植物标本室的管理员职务。

法国大革命后，新政府采纳了拉马克的建议，将巴黎皇家植物园改组成“国立自然历史博物馆”，道本顿被任命为第一任馆长，拉马克仍为植物标本室管理员，并兼任图书资料工作。新政府还以拉马克的建议为基础，颁布了将皇家植物园改组为国立自然历史博物馆的实施计划，根据这一计划，博物馆将增设 12 个自然科学讲座教授，其中设植物学讲座教授三个，设动物学讲座教授二个。拉马克虽从事植物学研究 25 年，但植物学教授席位并没有任命给他。动物学讲座，根据林耐所分的蠕虫、昆虫、鱼、爬行（包括两栖类）、鸟、哺乳这样六个纲，设二个讲座教授，青年生物学家希雷尔被任命为鱼纲、爬行纲、鸟纲、哺乳纲的讲座教授，而蠕虫与昆虫两纲，当时在法国无人问津，博物馆只得请拉马克任这一讲座教授。

在当时，动物学远比植物学落后，特别是对低等动物的研究，更是一片空白。1794 年，年已 50 岁的拉马克只能转向当时尚处于荒漠状态的蠕虫和昆虫这样的无脊椎动物的研究。拉马克在分析数量巨大的各种无脊椎动物标本的基础上，认为林耐提出的蠕虫与昆虫这种两分法不足以反映无脊椎动物的众多类型，他在摒弃林耐的两分法之后，在无脊椎动物中逐渐提出了一些新纲。他在 1799 年提出甲壳纲，1800 年提出蜘蛛纲，1802 年提出环虫纲，1807 年提出滴虫纲，到 1809 年出版《动物学哲学》这一著作时，他便将无脊椎动物划分为软体动物纲、蔓足虫纲、环虫纲、甲壳虫纲、蜘蛛纲、昆虫纲、放射虫纲、水螅纲、滴虫纲等 10 个纲，加上林耐已定下的鱼纲、爬行纲、鸟纲、哺乳纲等四个脊椎动物纲，拉马克就以这 14 纲为基础，建立起了一个动物分类的新体系，并成为后来动物分类学进一步发展的基础。

在进行动物分类研究的基础上，拉马克还研究了动物的进化系列问题，早在他研究植物学和撰写《法兰西植物志》时，他就研究过植物的系列问题，并绘制过一个植物系列图，正是植物种间的明显的系列，给了拉马克的进化观念以鲜明的实验证据。当拉马克研究动物系列时，他把这种方法也移植过来了，1801 年，拉马克出版了《无脊椎动物系统》一书，在这一著作中，拉马克论述了他所发现的一个与植物的进化系列类似的动物进化系列。1802 年，拉马克又写出了《关于活体组织的研究》这一重要论著，更进一步明确了他的进化论的理论要点。这一论著也是他的《动物学哲学》的前身，这一巨著集中地反映了他的进化论思想。

《动物学哲学》。《动物学哲学》是一部两卷本的著作，全书共分为三编。第一编共八章，这一编是全书的总纲，拉马克的进化理论的基本要点，

都集中在这一编。第二编除导言外，正文有九章，再加结论一章，这一编主要论述动物的分类及进化系列问题；第三编除导言外，另有八章，这一编带有总结的性质。拉马克在动物学方面的主要成就，基本上集中地反映在这一著作中，而他的进化理论，也在整个著作的内容体系中反映出来。因此，《动物学哲学》既是拉马克在动物学方面的代表作，同时也是早期进化论的奠基之作。

在《动物学哲学》中，拉马克从古生物学、植物学、动物学以及比较解剖学等当时各种研究成果出发，建立了第一个以进化观念为基础的递升式的动物分类系统。他认为，以前人们对动物所作的各种分类大都是递降式的，即是从人、高等动物这样的次序逐渐下降的，他认为这不符合自然界的“实际次序”。因此，他以动物的神经系统作为动物分类的主要标准，以动物的呼吸系统和循环系统作为次要标准，建立起了一个从最简单的动物开始的逐渐上升到高等动物和人的递升式的分类系统。这个递升式的分类系统，为他的进化论奠定了分类学的基础。

在此书中，拉马克还以他的递升式分类系统为基础，建立起了一个生物进化系谱树。在最初的动物研究中，拉马克曾把生物的进化看成是一个直线系列，但对无脊椎动物进行了较深入的研究后，他愈来愈清楚地看到，生物的进化并不是一个直线系列，而是一个有多个分支的系谱树。在书的附录中，他建立起了第一个生物进化的系谱树。

在这种进化系谱树中，他假定从原始的胶质粒子进化到单细胞的原生动物，然后分两条进化路线，一条路线从单细胞动物进化为辐射对称动物，如水螅和海盘车等，另一条路线则向一切左右对称动物进化，最后进化到高等动物和人类。由此，拉马克因之成为生物进化论中系谱学的直接先驱。

在《动物学哲学》中，拉马克对生物进化的原因也进行了初步的理论探讨，他认为，有内外两种力量推动着生物的进化。内在力量不断对物种的进化起作用，如不碰到外力的作用，它就会演变出一个从最简单的单细胞生物一直上升到人的直线的进化系列。但实际上进化系列不是直线的，而是存在着许多缺环和分支，他认为，这是由外力的作用造成的，即由生活环境的变化引起生物的生活习性变化的结果，由于生活习性的变化，由于用进废退的作用，就会使动物性状发生相应的变化，若把后天获得的这种性状遗传给后代，便是获得性遗传，这是拉马克用以解释他的生物进化论的理论支点之一的获得性遗传学说，例如，长颈鹿为了吃高树上的树叶，这一生活习性慢慢地转化为遗传，最终形成了长颈；鼯鼠世代代生活在地下，这一生活习性同样地慢慢转化为遗传，最终丧失了视力。这些性状的形成，都是环境即外力对生物进化所起的作用，即由获得性遗传造成的。

正是以上述理论为基础，拉马克建立起了近代生物学史上的第一个生物进化论学说，当然，他的生物进化论还有种种错误和缺陷，但是，他的进化论成功的方面无疑是主要的。他的进化论是近代生物学史上的第一个具有较为完整的理论形式的进化论学说，对当时的科学与哲学的发展具有重要意义。

在科学上，他以较为科学的动物分类系统为基础，提出了第一个生物进化系列及其进化系谱树，并由此对生物进化论的有关理论进行了探讨，这就为动物学以及整个生物学的发展，特别是为生物进化论的发展开辟了道路。从这个意义上来说，拉马克的生物进化论是达尔文生物进化论的直接的理论

先驱。在哲学上，由于他的进化论第一次揭示出物种之间的内在联系，第一次揭示出一个较完整的生物进化系列，这就为辩证自然观的形成和发展提供了生物学方面的最初的科学基础。自拉马克后，生物学即进入一个以进化论为旗帜的全新的发展阶段。

拉马克可以说是一个著作等身的生物学家，除了上述的《法兰西植物志》、《植物学辞典》、《植物图鉴》等植物学名著外，他还从1803年起与法国另一植物学家米伯尔合写了《植物自然史》这一多达十五卷的巨著。在动物学方面，除了《无脊椎动物的系统》、《关于活体组织研究》、《动物学哲学》等名著之外，后来又在1815—1822年间完成了另一部无脊椎动物学巨著《无脊椎动物志》，这著作后来被日本权威生物学家小泉丹誉为“动物学上的金字塔”。拉马克对地质学、气象学、心理学也进行过研究，并作出过重要贡献。1802年，他出版了《水文地质学》一书，1799—1810年间曾写过不少气象学论著，并主编过许多期《气象年鉴》，晚年曾写过《人类意识活动的分析》，为心理学的早期重要著作之一。在古生物学中，拉马克也有许多重要著作，在巴黎国立自然历史博物馆成立后新办的《学报》的最初八卷中，差不多每期上都有拉马克研究古生物化石的报告，这些报告前后多达33篇，涉及到184种古生物，后来这些报告以《古生物学》为题汇集出版，这一论文集也是古生物学早期名著之一。

拉马克在科学上功勋卓著，然而他一生的学术道路和生活道路却至为曲折，特别是到了晚年，他就更为艰辛了。一方面，由于在科学思想上，拉马克是进化论的代表人物，而居维叶是灾变论的代表人物，居维叶对拉马克产生了严重的敌对情绪。另一方面，居维叶当了拿破仑王朝的教育部长，后在波旁王朝复辟时，又出任过教育部全权代表，这便使他得以借拿破仑的声威来打击拉马克。但拉马克对此毫不理会，仍坚持他的科学研究，1821年，77岁的拉马克双目失明，当时他正在写作《无脊椎动物志》，他仍以惊人的毅力与惊人的记忆，在他一个同事的协助下，由他口述，由他的两个女儿笔录，坚持完成了这一巨著的最后两卷；他的最后一部著作《人类意识活动的分析》也是以同样的方式完成的。

1829年12月25日，85岁高龄的拉马克在穷困中结束了他伟大的一生，当时他穷得买不起一块超过五年期限的墓地，当后人重新认识到他的伟大时，他的骨灰早已不知去向。但他不朽的科学业绩，却永远写在科学史册之中。

九、技 术

科学的首要目标是发现事物和事件的本质与规律，以便能够理解与解释它们；技术关心发明新的事物和流程或者改良旧技术。它们密切相关，但它们的关系往往被误解，技术常常被描述为仅仅是“应用科学”。这种说法显然认为，人们先从对某些现象的科学认识开始，然后把它应用于某种实际目的。但在文明史上，实际发明的进步无疑先于有关现象的理论知识的进步。甚至在近代最初的几个世纪里，虽然科学进步有时促进实际应用，但更经常地还是预先存在的技术方法为科学发现提供资料。

在 17、18 世纪，科学和技术的关系更加密切了。一方面，科学家对实际问题的兴趣更浓厚；另一方面，实际工匠或技师对自己工作的科学方面表现出新的兴趣。如，化学家马格拉夫把他的化学知识应用于甜草根制造糖；富兰克林发明了避雷针，又对家用炉进行了改进；地质学家赫顿发明了硃砂制造；勒布朗用盐和硫制备苏打；贝尔托莱采用氯来漂白纺织品；马凯、贝尔托莱和其他化学家发明了纺织品染色新方法；米欣布罗克、马里奥特、库仑和其他科学家做了一些同建筑和工程有关的实验；地质学家德马雷斯任法国工业总监时，提出了许多关于布匹、纸张、乳酪等制造的报告；夏普、罗伊泽尔、萨尔瓦和其他人发明了电报系统。同时，这个时期的有些工匠，尤其是瓦特则本着一种严格的科学精神进行了一些实验。

欧洲各国在 18 世纪时已先后取得了资产阶级革命的胜利，摆脱了阻碍生产力发展的封建羁绊。资本的原始积累使资产者获得了大量金钱，使成千上万的农民破产为“自由的”劳动者。工场手工业的发展和分工的扩大，造成了一大批熟练工人，在技术改进上积累了经验，使应用机器进行生产成为可能。十七八世纪的科学技术，为生产的发展提供了许多发现和发明，在这种情况下，在这些条件具备得更充分的英国和相继而起的其他一些国家，开始了工业革命。

1. 纺织技术

在 18 世纪的上半期，英国的工场手工业进入了前所未有的勃兴时期。以牛顿的力学为理论基础，以钟表的机械工艺为技术基础，各种最初的机械工艺迅速发展起来，特别是各种工作机迅速涌现出来。但各种工作机的原动力最初都还是以各种自然力，特别是以人力为动力的，这就有两个突出的技术问题相继被提了出来：第一，如何进一步提高工作机本身的工作效率；第二，如何进一步提高工作机所需要的原动力。第一个问题导致了工作机的革命，第二个问题则导致了动力机的革命。

如果说，动力机的革命曾经是第一次工业革命的主旋律的话，那么工作机的革命则是第一次工业革命的前奏曲。因为“工业革命首先涉及到的是机器上进行工作的那一部分。动力一开始在这里还是人本身”。

在由工场手工业向机器大工业的转化过程中，由于圈地运动的进一步发展及海外贸易市场的进一步扩大，棉织工业与毛纺工业成为当时英国的工场手工业的带头行业。同时，由于纺织工业本身具有投资少、见效快、利润高

等特点，因此使它成为当时工场手工业的中坚。这样，第一次工业革命的风云便最先在纺织工场手工业中兴起。

1733年，一家棉织工场的机械师凯伊发明飞梭。凯伊曾当过钟表匠，掌握熟悉的机械工艺。他把钟表中的一些工艺原理和工艺技巧用于织布机中，终于发明了飞梭这种新的织布工具。带有飞梭的织机实际上是一种自动穿梭的织机，尽管它的原动力仍然是人力，但其工效却比原来的纺机提高一倍多。由于飞梭的发明，棉纱供不应求，因为当时的纺车基本上还是古老的手纺车。据当时工场纺织业十分发达的曼彻斯特统计，五六个纺工纺一天的纱，仅能供一个织工织一天，由于棉纱短缺，“纱荒”遍及英国，不少纺织场因此停工。

织机的革命必然推动纺机的革命。自飞梭发明之后，人们一直致力于新的纺机的研制，可是一直进展不大。1764年的一天，曼彻斯特有个兼做木工的织工哈格里沃斯（？—1778年），在一次偶然的发现中受到启发。有一天，他的妻子的纺车突然翻倒在地，但竖起来的纺锭和车轮仍在转动。他猛然想到，几个纱锭并立在一起，不是仍可以用一个轮子来带动吗？经过反复研制，他终于在1765年设计并制造出了一架可同时纺8个纱锭的新纺机。这样，把纺纱的工效一下提高了8倍。为了纪念这次偶然的发现，哈格里沃斯以他女儿珍妮的名字为这种新的纺机命了名。珍妮机一发明，便在纺纱行业中迅速推广开来。后来，珍妮机的纱锭由原来的八个增加到十几个，纺纱工效也随之提高到十几倍。遍及英国的纱荒，就基本上缓和了。

最初的珍妮机仍然是以人力为动力的。从工艺原理来看，珍妮机的纱锭可以继续增加，可是作为珍妮机的原动力的人力有限，这就使珍妮机的改进受到了限制。1769年，钟表匠阿克（1732—1792年）发明了一种以水力为动力的纺纱机。这是一种以水力来转动纺轮的新的纺纱机，它是继珍妮机后纺机的又一大进步。

1779年，一个童工出身的纺纱工克隆普顿（1753—1827年），对珍妮机和水力纺纱机进行了综合分析，在综合这两种纺机的优点的基础上研制出了一种被称为骡机的新纺纱机。骡机以水力为动力，一台螺机能带动近2千个纱锭，这就使纺纱机的工效大大提高。

织机的革命曾推动过纺机的革命，纺机的革命反过来又必然推动织机的革命。1785年，一个叫卡特赖特（1743—1823年）的机械师，在水力纺纱机和骡机的启发下，发明了水力织布机。新的水力织布机的工效要比原来带有飞梭的人力织布机的工效高40倍。由于水机织机的发明，又暂时缓和了织机落后的矛盾。

以纺织机的革命为先导，印刷工业、造纸工业、榨油工业以及其他工业的工作机的革命也相继发展起来。可是，无论什么行业的工作机的革命，当它发展到一定程度时，都必然受到自然力这一原动力条件的限制。因此，第一次工业革命便按自身发展的客观规律由工作机的革命向动力机的革命发展了。

2. 蒸汽机

英国资产阶级革命胜利后，工场手工业得到了迅速发展，大大增加了动力燃料和金属矿产的需求。到了17世纪中叶，已经历经近一个世纪发展的

英国采煤业与采矿业，此时更加迅速地发展起来，这不仅直接推动了近代地质学的发展，而且直接推动了近代动力技术科学的发展。

在近代地质学中，当火成论与水成论之争揭开近代地质学的序幕时，在近代动力技术科学中，纽可门蒸汽机的诞生，也升起了近代动力技术科学的曙光。纽可门蒸汽机的诞生，可以说直接源于采煤业与采矿业的推动作用。

近代蒸汽动力技术的产生，除了源于当时的社会生产直接推动作用外，还源于当时的实验科学的长期孕育作用。在近代，最先研究蒸汽动力的，是近代实验科学的先驱达·芬奇。后来，罗马山猫学院院士包尔塔（1538—1615年）曾设计和研制一种用蒸汽压力提水的实验装置。这为后来的蒸汽动力技术奠定了最初的实验科学基础。伽利略已经朦胧地意识到了大气压力与真空的存在，他的学生、意大利物理学家托里拆利（1608—1647年）和维维安尼（1622—1703年）最终揭开了大气压力和真空之谜。1650年，格里凯又发明了真空泵。正是由于蒸汽压力实验、大气压力实验以及真空作用实验这三大实验基础的相继形成，使人们得以从实验上开始认识蒸汽、大气和真空的相互作用。而这些重大实验成果也就为早期蒸汽动力技术的产生奠定了牢固的实验科学基础。

由蒸汽驱动的工业上通用的动力技术的发明和应用是18世纪工业革命的第二阶段。随着纺织机和其他新的工作机的出现，要求动力也要有所变革：工业革命起源于工作机的改变，发展于动力机的革命。

动力技术的变革首先发生于矿井排水的需要，在18世纪后半叶，英国的各矿井中已普遍使用早期蒸汽动力——纽可门蒸汽抽水机。这时也有了蒸汽机结构和效率的实验研究，为蒸汽机的改进提供了资料。而瓦特（1736—1819年）发明的新的蒸汽动力机，是工业革命中最重大的事件。

瓦特原是格拉斯哥大学中从事仪器制作和修理的工匠。他在修理纽可门蒸汽机时发现，这种蒸汽机的效率很低，大约为1%，而且小蒸汽机的效率又比大蒸汽机的效率要低一些。瓦特根据比热、潜热的概念分析了上述现象，认为纽可门蒸汽机的主要缺点是在汽缸内反复进行冷凝，把大量热能浪费于重新加热汽缸，而小蒸汽机汽缸面积对汽缸体积的比例更大，因而效率更低。针对这个问题，瓦特在1765年研制成功了同汽缸分离的单独的冷凝器，加上采取了精密加工、油润滑和设置绝热层等措施，改进了纽可门蒸汽机，使热效率提高到3%以上。

瓦特开始改进和研制的蒸汽机仍然是单向操作的，可以用于矿井抽水，但不能用作工厂生产中的动力机。他经过研究、试验，于1782年研制成功了具有连杆、飞轮和离心调速器的双向蒸汽机，使蒸汽机可以把直线运动变为连续而均匀的圆周运动。因而可以经过传动装置带动一切机器运转，给整个工业和交通运输业提供了一种可靠的通用动力机。从此，动力机、传动机、工作机组成了机器生产的系统。这是人类生产技术的一次重大突破，是认识和利用自然力的一个大突破。

3. 机械技术

18世纪工业革命的第三个阶段，是开始用机器制造机器。纺织业和其他行业的工作机的创建，动力机的革新特别是双向蒸汽机的发明，为工业的发展开辟了巨大的可能性，而实现这种可能性又取决于机器制造业的水平和能

力。否则，发明家即使把纺纱机、织布机、蒸汽机等设计出来并造出了样机，却不能成批地、合格地把它们生产出来，不足以使整个工业革命实现生产资料的更新，工业革命仍不能实现。只有在可以做到机器生产机器的时候，大工业才有它的技术基础。

18世纪以前，虽然有了用水力、畜力驱动简单机械，大量的产品基本上是靠手工加工的，连生产中所使用的机械装置也得用手工方法生产。纺织机靠木匠、钟表匠、纺织工匠的经验制成；早期的蒸汽机是由熟练工匠在简陋的小作坊里制造出来的，工匠们凭着精湛的技艺用双手在铁坯料上加工出汽缸和活塞等部件。但是，手工加工的速度终究很慢，产量低、成本高，精度也差。

在制造蒸汽机、纺织机和枪炮的推动下，18世纪末期的机械加工技术也有新的进展。在制锁、制枪支中开始实行了可以互换零部件的标准化方法。英国机械师莫兹利（1771—1831年）于1794年发明了车床上的移动刀架，于1797年制成了安放在铁底座上带有移动刀架的车床。莫兹利把原来用手握持的刀具安装在机架上并使之能沿着车床的中心轴线平行滑动，这种自动刀架车床可以方便、迅速、准确地加工直线、平面、圆柱形、圆锥形等多种几何形状的部件，使车床真正成为机器制造业自身的工作机。滑动刀架这一简单的发明是机械技术史上的重大创造，在19世纪中英国出版的《全国的工业》一书中认为，滑动刀架“对机器使用的改良和推广所产生的影响，不下于瓦特对蒸汽机的改良所产生的影响。采用这种附件的结果是各种机器很快就完善和便宜了，而且推动了新的发明和改良”。机械化操作的金属切削机床可以用来制造各种行业的工作机和动力机，也可以用来自己制造自己，是工业革命中名副其实的工作母机。它的出现标志着机器制造业进入到一个崭新的阶段。

4. 其他技术

这一时期，欧洲各国在农业、建筑、运输、矿冶和通讯等方面的技术也有所发明和改良。

农业中，英国在18世纪出现了诺福克轮作制，发明了全铁的轻犁、畜力条播机、畜力耕锄、收割机、脱谷机、切藁机等农具。建筑方面，对材料强度的研究和住宅房屋的设计都比以前有大的进步，出现了拱的平衡理论和家庭火炉装置。

运输业中已开始运用蒸汽动力的轮船，出现了港口和灯塔。工业化学制品在这时也有较大规模的生产，突出表现是用于金属、漂白和染色工业中大量需要的硫酸和碱的大规模生产。

通讯技术中，已开始利用光信号和电进行通报，为以后电报的发明开了先河。

这一时期的技术发明很多，社会的发展、人们思想的解放、科学实验手段的进步和理论的提高，都促进了科学技术本身的发展；而技术的发明和改良又为社会的进步提供了巨大的动力。

十、中国科学技术的落伍

明末清初，中国社会面临着深刻的危机，清朝统治者基本上沿袭了明代的各项制度，但由于清兵入关后对商品经济发达的东南沿海反清势力进行了残酷的镇压，使经济受到严重摧残。虽然清政府采取了一些恢复措施，但与西方同期发展速度相比，却被远远地抛在后面。科学技术的发展，也遭到了同样的命运，而且随着时间的推移，差距越来越大。

清政府对汉族知识分子的政策，也在很大程度上影响了科学技术的发展。特别是康、雍、乾三朝，因感于汉族知识分子中反清情绪仍很强烈，多次大兴文字狱，导致我国的学术研究走上了考证古典文献的道路，使学术研究严重脱离实际，从而严重阻碍了自然科学的发展。

由于清朝严行海禁，使得自 1723—1840 年的 100 多年间几乎中止了接受西方科技知识，这使我国科技的发展也受到很大的影响。

从 16 世纪末到 18 世纪初，即明万历至清康熙的 100 多年间，是西方科技知识传入我国的时期，清朝的科学技术也在西方科技的影响下沿着中国古代科学技术发展的道路有着缓慢的发展。

1. 天文学

(1) 西方天文历法的传人

16 到 18 世纪罗马教皇派一些传教士到中国来进行传教工作，他们同时也带来了包括天文学在内的一些科学技术知识。

明代历法，一直使用元代的授时历和回回历，因时间久远，误差很大。徐光启因此聘请意大利人龙华民（1559—1654 年）等传教士编译西方天文学书籍，其成果体现在《崇祯历书》的完成。但新历法由于守旧派的反对和明皇室的衰亡，实际上并没有实行。

清初，传教士、德国人汤若望（1591—1666 年）将新历献给顺治皇帝，因为新法预测的日蚀比旧法精确，遂即颁行，称为时宪历。钦天监监正的职务即委派汤若望担任。汤若望于是著《新法表异》详细陈述新法的优点，又重新制作已经损坏了的天文仪器，如天球仪、地平日晷和望远镜等。康熙时，传教士、比利时人南怀仁（1623—1688 年）在钦天监，他革新了六种仪器：黄道经纬仪、赤道经纬仪、纪限仪、象限仪、天体仪和地平经仪，写成《灵台仪象志》，绘图说明它们的制法、用法和使用这些仪器测得的各种记录。乾隆时，传教士、德国人戴进贤（1680—1784 年）在钦天监为官，传入 17 世纪德国天文学家刻卜勒发现的外星运转轨道为椭圆以及牛顿计算地球与日、月距离的方法，在他主持纂修的《历象考成后编》中写道：“日月五星之本天（即轨道）旧说以为平圆，今以为椭圆”，“地球与日、月距离之计算，采奈端（即牛顿）之术”，但对哥白尼的日心说和牛顿的万有引力定律都尚未论及。18 世纪中叶，传教士、法国人蒋友仁（1715—1774 年）在《坤輿全图》中才介绍了哥白尼的日心说，论述了地球运动的原理。

(2) 王锡阐和梅文鼎

清初一些学者接受了从西方传来的科学知识，积极展开了天文学和其他科学的研究。

王锡阐(1628—1682年),字寅旭,号晓庵,江苏吴江人;梅文鼎(1633—1721年),字定九,号勿庵,安徽宣城人。他们二人对中西之学均采取去伪存真的科学态度,他们主张“去中西之见”,“务集众长以观其会通,毋拘名目而取其精粹”,指出“数者所以合理也,历者所以顺天也。法有可采,何论东西,理所当明,何分新旧”。他们反对对西法的盲目崇拜,“以西法为有验于今,可也,如谓不易之法,务事求进,不可也。”于是,“考正古法之谈,而存其是,择取西说之长,而去其短”则成了他们的研究工作的重要特色。“王氏精而核,梅氏博而大,各造其极”,对我国天文学和数学的发展作出了贡献。

王锡阐深入钻研西法,在《历说》中,他指出了西法的若干缺点和错误。如西法以为月亮在近地点时,视直径大,故月食食分小;月亮在远地点时,视直径小,故食分大。王锡阐则正确地指出:“视径大小,仅从人目,食分大小,当据实径。太阳实径,不因高卑有殊。地影实径,实因远近损益,最卑(月亮在近地点)之地影大,月入影深,食分不得反小;最高(月亮在远地点)之地影小,月入影浅,食分不得反大”。他认为,按小轮系统算月亮运动时,除了定朔、定望外,其它时刻都应加改正数,但西法却不用这一改正数,好像日、月食一定发生在定朔、定望,然而事实上只有月食食甚才是在定望。他更以交食的实测事实,证明西法并不完全准确,从实践和理论上都证明西法并非完善的。

正是在对中、西方法都作透彻研究的基础上,王锡阐著《晓庵新法》六卷,吸取了两者的优点,并有所发明和创造。他提出了日月食初亏和复圆方位角计算的新方法,依次计算公元1681年9月12日发生的日食,较其它方法都准确。他独立地发明了计算金星、水星凌日的方法,还提出了细致地计算月掩行星和五星凌犯的初、终时刻的方法,都比中、西方法有所进步。

注重实践,是王锡阐天文工作的又一特点。从青少年时代起,夜晚遇天色晴朗,他就登上屋顶,仰观天象,竟夜不寐。“每遇交会,必以新步所测,课校疏密,疾病寒暑无间,于兹三十年矣”,继承和发扬了我国古代天文工作者“验天求合”的实践与理论相结合的优良传统。王锡阐在天文学上取得成就就是与此密切相关的。

梅文鼎以毕生精力从事天文学和数学的研究。他的天文学著作有四十余种,有对我国古代历法的评述与研究;有对《崇祯历书》的评论,“或正其误,或补其阙”;有对近人著述的介绍,并能正其讹阙,指其得失;有对他自己创制的天文仪器的说明,涉及面很广。这些研究使得他能够综论中西历法的异同得失,对中西历法的融会贯通,作了大量的工作。他的另一重要贡献是在数学方面,仅据《梅氏丛书辑要》所收的数学著作就有13种共40卷,内容涉及初等数学各个分支,有算术、代数学、几何学、平面三角学和地面三角学等等。

这些数学著作,并不是对西方传入的数学知识囫圇吞枣式地抄袭,而是通过作者咀嚼消化以后的心得所作。如对球面三角形,梅文鼎著《弧三角举

梅文鼎:《塹堵测量》。

王锡阐:《晓庵新法序》。

《畴人传·王锡阐》传后“论”。

《王晓庵先生遗书补编》。

要》一书，据他自己所说这是“盖积数十年之探索，而后能会通简易”而写成的。也正如《畴人传》指出的，“其论算之文务在显明，不辞劳拙，往往以平易之语解极难之法，浅近之理言达至深之理，使读其书者不待详求而又可晓然。”梅文鼎在其数学著作中还多有创见。他利用我国古代传统的勾股算术证明了《几何原本》卷二、卷三、卷四、卷六中的很多命题；他用几何图形证明了余弦定理和四个正弦、余弦积化和差的公式；他还独立思考得出若干四等面体、八等面体、十二等面体、二十等面体的多种几何性质，如它们的内切球半径和体积，订正了古人书中的错误。

梅文鼎还十分重视我国传统数学的成就，认为“古法方程，亦非西法所有，则专著论，以明古人之精意，不可湮没”，唤起了人们对明代几乎全部失传的宋元数学的光辉成就的注意。对此，梅文鼎也作出了自己的贡献。

总之，王锡阐和梅文鼎的工作，使明代以来传统数学和天文学重获生机，使新移植过来的西方数学和天文学在中国这块土地上长成了根干，结出了一些新果。他们对古今中外的有关知识采取了批判继承的正确态度。这种严谨的治学精神以及理论与实践相联系的工作方法，是他们在科学上取得成就的重要原因。

2. 数学

(1) 西方数学的传入

明代中期，西方数学开始由传教士传至中国，主要有欧几里得几何学、算术笔算法、对数和三角学等。特别是《几何原本》传入后，对我国数学界产生了一定影响。介绍西方笔算的著作《同文算指》，是由利玛窦和李之藻合作编译的，对我国算术的发展有较大影响，清代学者很重视并加以改进，笔算的应用遂即日渐普遍起来。此外，还有《圆容较义》和《测量法义》等，前者是一部比较图形关系的几何学，后者是关于陆地测量方面的著作。

作为近代数学前驱之一的对数，是传教士、波兰人穆尼阁（1611—1656年）于清初在南京传教时传授的。不久穆尼阁去世，跟从他学习的薛凤祚把他传授的科学知识编成一部包括天文、数学、医学、物理学等内容相当庞杂的《历学会通》，其中数学部分主要有《比例对数表》、《比例四线新表》和《三角算法》各一卷。《比例对数表》是从一到二万的常用对数表；《比例四线新表》是正弦、余弦、正切、余切的四线对数表；二表的对数都有小数六位。对数法传入后，即在历法计算上得到了应用。《三角算法》中讲的平面三角法和球面三角法都比《崇祯历书》的更为完备。

传入我国的计算工具主要有耐普尔的算筹和伽利略的比例规。

(2) 《数理精蕴》

康熙时，从1690年到1721年编成了《数理精蕴》这部介绍西方数学知识的百科全书。它是在法国传教士张诚、白晋等人译稿的基础上，由梅穀成等人汇编而成。它的主要内容是介绍从17世纪初年以来传入的西方数学，包括几何学、三角学、代数以及算术的知识。

《数理精蕴》上编5卷“立纲明体”，下编40卷“分条致用”，表4种8卷，共53卷。

上编包括有《几何原本》，其内容虽与欧几里得《几何原本》大致相同，

但著述体例差别较大。《算法原本》，讨论了自然数的性质，包括自然数的相乘积、公约数、公倍数、比例、等差级数、等比级数等的性质，是小学算术的理论基础。

下编包括实用算术、度量衡制度、记数法、整数四则运算、分数运算、比例及其应用，联立一次方程，开平方以及开带从平方、开立方以及开带从立方，解决有关直角三角形三边的二次方程应用问题，已知三边长求三角形面积，内切圆径及内接正方形边长的公式，由内接、外切多边形求圆周率的方法，求三角形函数值方法，三角形边长、角度相求——直角三角形和斜三角形的解法，直线形、圆、弓形、椭圆的面积，各正多边形的面积，与外切圆径、内接圆径的关系，柱体、棱锥体、棱台体的体积，圆柱体、圆锥体、截球体、椭球体的体积，各种等面体的体积与各种等面体的边长和外接球径、内切球径的关系等等；代数学知识，主要是方程的数值解法；“对数比例”，它是在穆尼阁传入对数及其用表之后，更详细地介绍了英国数学家耐普尔在1614年发明的对数法，并介绍了对数表制作的三种方法，使人们对对数有更明晰、更深入的了解。

各种数学用表：包括素因数表，这是一份1至10万间各数的分解成素因素相乘的数学用表，其中不能分解为因数的素数又分别列于每万的数字之后构成一份素数表；对数表，比穆尼阁传入的更为精密，它的真数是1至10万、假数的小数位是10位；三角函数表，每隔十秒，给出正弦、正切、正割、余弦、余切、余割的函数值，准确到小数七位；三角函数对数表，准确到小数十位。同时，它还介绍了西洋计算尺，这是我国最早关于计算尺的介绍。

《数理精蕴》出版后得到了广泛的流传，成为人们学习和研究西方数学知识的重要书籍，对以后数学的发展产生了重大的影响。

3. 黄河的治理

清朝的农业成就主要表现在对水利的兴修，特别是对黄河的治理上。

清统治者为了保证南北大运河的“漕运”，使载运南方大米到北方的船只畅通无阻。因此必须对黄河进行治理，当时对黄河的治理，主要是以水治水，即在下游“筑堤束水，以水攻沙”（《河议辩惑》），就是用人工筑堤，加快流速，使流水的冲蚀力量增大，带去泥沙，避免河床淤浅与决堤泛滥。

清初的陈潢（1637—1688年），字天一，号省斋，浙江钱塘（今杭州）人。他本是一“布衣”，对农田水利很有研究，曾作过实地考察，沿黄河上行直至宁夏。后来遇到在朝作官的靳辅，得到靳的赏识并留他在身边工作。在1677年至1687年靳辅担任河道总督期间，治理黄河的工作主要是由陈潢承担的。陈潢的治河理论和成就，在张霭生编纂的《河防述言》中有比较全面的记述。

陈潢在治河方面的贡献，首先是把明朝潘季驯“筑堤束水，以水攻沙”的理论建筑在更为科学的基础之上。他用的“测水法”是测流速和流量的方法，按《河防述言》所述是“用土方法，以水纵横一丈、高一丈为一方，计此河能引水几方”，使筑堤的宽度和高度以及其它工程设计能更合乎要求，洪流通过时既能起到攻沙的作用，又不致因容纳不下而泛滥成灾。他对黄河的治理问题，不局限在下游，而且认识到对黄河中游地区治理的重要。他从实地考察中，认识到黄河的泥沙是从中游黄土高原流失下来的，从而指出治

理黄河必须“彻首尾而治之”，不然“终归无益”。这种从全面考虑根治黄河的思想，可以说是我国治河理论上的一大进步。可惜他的远大理想，在当时的社会条件下无法实现，反而蒙受了不白之冤，他的科学才能没有得到充分发挥，便抑郁而死。

4. 医学

(1) 温病学说的创立

温病学说是我国古代人民长期与各种传染性热性疾病作斗争的经验总结。明代以前，医学家对于治疗传染性和非传染性热病的认识，实际上都没有超越《伤寒论》的范围。明清两代许多医药学家在临床实践中，深入研究传染病与热性病发病原因、特点和医治的方法。他们不满足伤寒六经辩证论治的方法，一些医家在继承前人经验的基础上，提出了新的理论、新的疗法和预防措施，写出了不少专门著作，形成了温病学说，总结出卫、气、营、血及三焦辩证论治的医疗理论，从而进一步丰富和发展了中国医学体系。

崇祯十四年（1641年），吴有性（1592—1672年，江苏吴县人，字又可）见到疫病在山东、江苏和浙江等省猖獗流行，通过观察研究，对温病的病因、传染途径以及平日用过的验方等详加记述，从而写成《温疫论》二卷，补遗一卷，为温病学说的形成奠定了基础。

清代中叶，温病学说又有了新的发展。著名医学家叶桂、吴塘和王士雄等在这方面作出了贡献。

叶桂（1667—1746年），字天士，江苏苏州人，被认为是温病学派的创始人，著有《温热论》。他的贡献主要是从理论上概括了外感温病的发病途径和传变，提出“温邪上受，首先犯肺，逆传心包”的说法；并且根据温病病变由浅入深的发展过程，分为卫、气、营、血四个阶段，以便更好地辩证论治。对于温病的诊断，他进一步发展了察舌、验齿、辨别斑疹和白痞的方法。

吴塘（1736—1820年，字鞠通，江苏淮阴人）和王士雄（1808—1867年，字孟英，浙江海宁人），系统地总结了前人的成就，分别著有《温病条辨》（1798年）和《温热经纬》（1852年），使温病学说达到成熟阶段，在我国医学发展史上占有重要地位。这样，我国医学在与传染病作斗争的过程中，形成了学术思想对立的伤寒和温病两个学派并驾齐驱的局面。

(2) 人痘接种法的发明

天花这种传染病，大约在汉代由战争的俘虏传入我国，所以又叫“虏疮”。古代医书中的“豆疮”、“天行斑疮”、“登豆疮”和“疱疮”等都是天花的别名。我国种痘法起于何时，尚未有定论，但据确信的记载，至迟在16世纪中叶人痘接种术已经发明。人痘接种术的发明，是早期免疫学的重大成就，为天花的预防开辟了一条行之有效的途径，在世界医学史上占有重要的地位。

清代俞茂鲲在《痘科金镜赋集解》（1737年）中记载说：“闻种痘法起于明朝隆庆年间（1567—1572年）宁国府太平县（今安徽太平）……由此蔓延天下。”至于具体的方法，在张璐的《医通》（1695年）中记有痘衣、痘浆、旱苗等法，并指出种痘法的推广是“始自江右，达于燕齐，近者遍行南

北。”痘衣法是把天花患者的衬衣，留给被接种的人穿用，使受感染。痘浆法是用蘸有痘浆的棉花塞入被接种人的鼻孔里，使受感染。旱苗法是将光圆红润的痘痂阴干研细，用小管吹入被接种的儿童鼻孔里。也有先用水把研成粉末状的痘痂调匀后，再用棉花蘸了塞入被接种者的鼻孔里，称为水苗法。那些被接种的人多数是儿童。旱苗法和水苗法都是用痘痂作为痘苗，虽然方法上比痘衣法和痘浆法有所改进，但仍旧用人工方法感染天花，还有一定的危险性。

在不断的实践过程中，这时发现若改用经过接种多次的痘痂作疫苗，要安全得多。清代朱奕梁在他的《种痘心法》中说：“其苗传种愈久，则药力之提拔愈清，人工之选炼愈熟，火毒汰尽，精气独存，所以万全而无害也”。这种对入痘苗的选育方法，完全符合现代制备疫苗的科学原理。

人痘接种法发明后，很快就传播到世界各地，首先来学习的是俄国医生，俞正燮《癸巳存稿》中记有康熙二十七年（1688年）俄国遣人“至中国学痘医”；不久又从俄国传入土耳其；1717年，英国驻土耳其大使蒙塔古夫人在君士坦丁堡学得种痘法，随即传入英国和欧洲各地；18世纪中叶，人痘接种法已传遍欧亚大陆；该法也从我国传入日本。1796年英国人琴纳（1749—1823年）发明牛痘接种法。1805年，由葡萄牙商人传入我国，因牛痘法更安全，就逐渐取代了人痘接种法。科学成就是全人类所共有的财富，各国、各民族间的科技交流促进了人类的共同发展和进步。

（3）赵学敏和《本草纲目拾遗》

赵学敏，字吉衣、号恕轩，浙江钱塘人，擅长医术。曾亲种药用植物，又访求各地单方，选其中之屡验者，于1754年编成《医林集腋》十六卷、《素养园传信方》六卷。又于1760年编成《升降秘要》二卷、《药性之解》四卷，这是制药方面的专著。此外，还有辨别药物别名、俗名、真伪、产地的著作，如《花药小名录》、《本草话》等，可惜均失传。现存《本草纲目拾遗》、《串雅》两种，而以前者最为著名。

赵学敏治学态度极其认真严肃，花了38年工夫编撰《本草纲目拾遗》。在编写过程中，他广泛搜集边防外纪诸书，访问去过边远省份的亲友，以及西方传教士所述，以至药房、药方、商号广告。他不仅询之于农夫、渔民，而且还验之以目，亲手栽植和观察。他不断删补、修改手稿，至死犹无清稿本。因此，该书是清代在本草学上最有贡献的一部。

此书专为《本草纲目》之遗而作，全书十卷，收载药物共908种。其中有些是《本草纲目》所没有收录进去的，在药物种类方面比《本草纲目》增加了716种；在药物分类方面还增加了“藤”和“花”两部，删去了“人部”，“金石”部分为“金”和“石”两部，共18部。在治法、形状等方面，赵学敏订正和补充了《本草纲目》中没有描述清楚或是错误的部分。因此，此书可说是《本草纲目》的续编。在此书中，赵学敏对生物界的演变和物种的变异，做过细致的观察，认识到植物与环境的统一性，具有一定的生物进化的观点。

（4）王清任和《医林改错》

王清任（1768—1831年），字勋臣，河北玉田人。二十岁左右开始学医，发现古代医书中有关人体结构和脏腑功能的记载有不少矛盾和错误的地方。

于是，决心通过自己的观察来解决这些问题。一次，他来到滦州（今河北滦县）稻地镇，当地正流传着传染病，义冢中多有被野狗扒出的儿童尸体。他不辞艰辛，不避污秽，甚至不顾可能被感染的危险，一连十天，每天去义冢仔细观察了30多具较完整的尸体的内脏，此后，他又多次到刑场去观察，向亲眼见过人体内脏的人请教，并作了一些动物解剖实验。

王清任根据自己的观察，对于人体内脏的认识，比前人有很大的提高。他正确地区分了胸腔和腹腔，指出在横隔膜上只有心脏和肺脏，其余的内脏器官都在横隔膜之下。他记述了气管和内气管分至肺两叶的支气管和细支气管，纠正了前人所说肺有“行气之二十四孔”的错误。他根据对“脑髓”的研究，认为“灵机在性，不在心在脑”，而“医书论病言灵机发于心”，也是错误的。他还观察到了视神经，指出了那是发于脑髓如同线一样的物质与眼联系着，眼的视觉“归于脑”。他把自己观察到的人体内脏的情况绘成“亲见诸脏腑”图，并与“古人所绘脏腑”图，一并附于《医林改错》卷首，以便比较研究。

王清任的医学理论是建立在人体解剖的基础上的。他认为“著书不明脏腑，岂不是痴人说梦？治病不明脏腑，何异于盲子夜行。”他对气血学说的认识，就是根据自己的观察，论述了血气在体内运行的情况。在书中，他列举了20种气虚症和50种血瘀症，还创制方剂30个。其中有不少方剂，对某些病症，确有较好疗效。

5. 其他科学技术

(1) 瓷器

这一时期，是古代中国制瓷业高度发展的时期，全国有半数省份能烧制瓷器，景德镇更成为全国的瓷业中心，仅官窑就有300多座。制瓷技术，特别是官窑，因为资本充分，不惜成本，集中技术人才，成品质量更优，代表了当时制瓷工艺的最高水平。

从瓷质来看，由于对瓷土的淘练加工技术不断改进而得到提高。清初，有的官窑采用“过箩，绢袋淘练法”，即把泥浆用细箩绢袋澄洗过，再用布紧包稠泥浆，挤出其中水分，然后反复踩练成瓷土。这样淘练出来的瓷土中的石英颗粒比以前更细小，而且分布均匀。瓷土的配方也有改进，如景德镇早期可能只用一种原料一瓷石，这时已发展为二种以上原料的配方。加上烧制的温度和时间控制合适，因而烧成的瓷胎、白度和透光性已达到现代硬质瓷的技术水平，雍正年间的彩盘胎白度超过了75度，烧成温度达到1310。

这时制瓷工艺最大的成就是精致白釉的烧成，釉色纯白如牛奶，而且晶莹透彻。白釉质量的提高，为一道釉和彩瓷的发展创造了条件。清代在一道釉方面烧制最好的有天蓝、翠青、苹果绿、娇黄、吹红、吹紫、吹绿、胭脂水、油绿、天青等。红釉中的鲜红、郎窑红和霁红、矾红、釉里红都是继承并发展了明代制瓷技术之后所取得的新成果。乾隆时景德镇的“唐窑”仅岁贡御用瓷色就有57种之多。此外，清代还能对历代名窑进行仿制，如仿汝、仿官、仿钧、仿龙泉古瓷器，配料准确，并能恰如其分地掌握好火候，使烧成的瓷器与所仿古瓷器真假难辨。这时还能有把握地掌握“窑变”釉色，“窑变”的烧成起先是在胎上蘸涂不同釉色，然后入窑，任其变化而成的。清代既能掌握还原焰技术，又能把氧化铜转变成游离状态的铜，使它均匀地分布

于釉药中，并把金属铜转化为胶体状态，而烧成色调别致的“窑变”釉色。这是清代制瓷技术的重大进步。彩瓷一般分为釉上彩和釉下彩两大类。先在胎胚上画好花纹图案，然后上釉入窑烧制的叫釉下彩；在上釉后入窑烧成了的瓷器上再彩绘，又经炉火烘烤而成的彩瓷叫釉上彩。著名的“青花”瓷就是釉下彩的一种。“青花”瓷，名为青花，实际上是蓝色，明清时青花瓷器已很盛行。能准确配制釉药和掌握好火焰性质与火候，而烧出精致的彩瓷，是制瓷工艺成熟的一个标志。清代的素三彩、五彩和粉彩、珐琅彩名闻中外。粉彩和珐琅彩都属釉上彩。粉彩就是在色料中加铅粉，或在色料上面另外涂上铅粉制成的，主要利用控制温度的办法，使它在烧成时釉面呈现不同的色泽，由于浓淡协调，光泽柔和，能表现出明暗分明的立体感。珐琅彩的制法基本上和粉彩相同，在瓷胎上画珐琅。它和粉彩瓷器在胎质、形态、款式、图样、风格等方面都是精美无比的。

(2) 清初全国地图的测绘

康熙爱好自然科学，当他接触西方科学的时候，态度积极，先后学习过几何、测量、天文、物理和医学等，并利用耶稣会士在科技方面的长处，进行了全国地图的测绘。

康熙亲自领导完成的中国全图的测绘，不仅在中国也是世界测绘学史上前所未有的创举。这项创举，康熙自己说是花费了“三十余年之心力，始克告成。”全国地图的正式测绘是从康熙四十七年（1708年）开始的，由法国教士白晋、雷孝思和杜德美（1668—1720年）等人率领，先从长城测起，然后测北直隶（今河北省），再测满洲地区。为了加快速度，1711年，康熙命增添人员，分两队进行。因此，关内十余省，包括西南（广西、四川、云南）、西北（至新疆哈密）广大地区，约用五年时间先后竣事。西藏地区是康熙特派两名曾在钦天监学习过数学和测量的喇嘛前去测绘的。康熙五十七年，一份具有相当水平的《皇舆全图》绘成。

新疆哈密以西的地图是乾隆二十一年（1756年）命刘统勋、何国宗等人前往测量绘制的，1761年完成《西域图志》。乾隆又令法国传教士蒋友仁在《皇舆全图》的基础上进行改制增订，全图完成后，曾制成铜版104块，这就是13排的《乾隆内府舆图》，范围比康熙绘制的全图为大，北至北冰洋，南至印度洋，西达红海、地中海和波罗的海，可以说是一幅亚洲大陆地图。

康熙年间开始的测图工作，主要进行的是大规模的三角测量，测定全国三角网，然后把各地已有的详图和考察了解的情况附著上去。而经纬度测量，由于当时天文测量的方法和仪器的限制，不易多测，也不易测得精确，特别是经度测量更是如此。尽管这样，当时所测的经纬点共有630处之多。康熙年间的测绘，有两件事在测绘史上是非常有意义的。第一，是尺度的规定。康熙为了统一在测量中使用的长度单位，规定以200里合地球经线1度，每里1800尺，因此每尺的长度就等于经线的百分之一秒。这种以地球的形体来定尺度的方法是世界最早的。第二，是发现经线1度的长距不等。1702年，实测过中经线上由霸州到交河的直线长度。1710年，又在满洲地区实测北纬41度到47度间每度的直线距离。这些测量得出纬度越高，每度经线的直线距离越长的结论。这些数据都证实了牛顿的地球扁圆说，这在世界科学史上是一件值得纪念的大事。

6. 中国近代科技的落伍

明代中后期，中国产生了资本主义萌芽，传教士也带入了先进的西方科学技术，但在中国却没有因此而产生近代科学。为什么在古代中国高度发达的科学技术基础上却没有继续发展为近代科学呢？到了近代中国科学技术反而落伍呢？

近代科学发展史表明，近代科学的发展至少需要三种基本因素：社会张力、文化张力和科学张力。16世纪中期以后的西方各国相继具备了这三种张力，而中国却一直不具备这三种张力。

就社会张力而言，近代科学的产生需要有一个商品经济较为发达、民主政体较为健全、对外交往较为频繁的开放性的社会结构，只有这种开放性的社会结构才能对近代科学的产生和发展产生张力。但是从明代中后期直到辛亥革命为止，中国始终未能形成这种社会结构。从经济方面看，虽然资本主义萌芽的出现促进了近代科学的萌动，但这种资本主义萌芽在当时的中国并不占主导地位，占主导地位的仍是重农抑商的传统的小农经济结构。重农抑商的政策使得中国没有形成足以产生近代科学的经济动力。从政治方面看，西方近代科学的产生和发展均以社会革命为先导，如意大利的文艺复兴、英国资产阶级革命等，这些都为近代科学的产生和发展扫除了社会障碍；而在中国仍然是一如既往的宗族制的专制统治，这种政治与科学的关系，完全由帝王视其需要和爱好而定，不可能对近代科学的产生和发展形成稳定的政治张力。从对外关系上看，中国一直以天朝大国自居，明代中后期以后，尽管对西方传教士的态度比较开放，但却长时期禁止国内商人出海贸易。这种闭关锁国政策，也使中国失去了足以产生近代科学所必须的国际科学交流的条件。

就文化张力而言，近代科学的产生需要一个由相适应的教育、哲学和宗教等因素构成的开放性的文化结构，因为只有这种开放性的文化结构才能对近代科学的产生和发展产生张力，但是从明代中后期直至辛亥革命，中国始终未能形成这种结构。从教育上看，科举制度可以说是古代中国教育的集中体现，但是受重视的只是进士科，明算科并不受重视，在这种僵化的科举制下，大批人才皓首于穷经读史之中，乾隆四十九年（1784年）的会试中，来京应试的各省举人“年届九十者一名，八十以上者二十名，七十以上者五名”，这种腐朽的科举制不但不能像西方近代大学教育那样对近代科学的产生和发展产生张力，而且从根本上破坏近代科学的产生和发展所必须的人才资源。从哲学上看，西方近代科学与近代哲学的产生和发展基本上是同步的，哲学与科学之间存在着相互推动的张力作用；而在近代中国，儒家思想仍占绝对统治地位，哲学宗旨是修身，对自然科学都不甚了了，只是对其伦理学说和社会学说进行一些哲学论证，正如鲁迅所指出的那样，那些饱读经史的“儒者们，倘是四方的大地，那是很知道的，但一到圆形的地球，却什么也不知道”，这种缺乏自然观的哲学，不可能像意大利的人文主义、英国的经验主义、法国的唯物主义和德国的思辨主义那样对近代科学产生一定的张力。从宗教上看，西方基督教在中世纪后期形成了一套较为系统的神学自然观，尽管基督教的神学自然观所依据的托勒密的地心体系和盖仑学说是错误的，但它却能从肯定与否定两方面对近代科学的孕育和革命产生张力，近代科学革命兴起后，基督教的神学自然观已被证伪，但基督教为自身利益仍千方百计

地改造和利用近代自然科学的成果；而在中国占主导地位的仍是儒、道、佛三教，除道教曾对古代中国的天文学和炼丹术产生过某些作用外，儒、佛都与自然科学毫不相关。所以明清时期，没有一种可以像基督教那样能对近代科学的产生具有否定性张力的宗教。

就科学张力而言，近代科学的产生需要有一个由自然科学、基础科学、技术科学和应用技术等不同的科学层次构成的开放性的科学结构，因为只有这种开放性的科学结构才能对近代科学的产生和发展具有内在张力。在西方，古希腊科学结构中已初具这种结构的原始胚胎，到了中世纪后期，当古希腊科学逐渐复兴时，这种具有内在张力的科学结构也随之逐渐复兴，所以近代科学能在这一结构的理论与实践、科学与技术的相互推动中获得其产生和发展的内在张力；在中国，古代科学技术结构是应用科学与应用技术为两大主干的实用科学技术结构。在这种结构中，自然哲学、基础科学和技术科学基本上是空白的，所以它在理论与实践、科学与技术之间没有能够形成循环发展的机制与张力，也正因为此，中国虽早在宋代就发明了活塞式风箱这种近代蒸汽机的活塞式汽缸所借鉴的主要技术构件，却由于缺乏有关蒸汽压力、大气压力和真空作用的理论和实践方面的基础研究，所以一直未能发明出推动工业革命的蒸汽机。

上面指出的是科学本身发展所应具有的基本条件。从客观条件上来说，由于清初屡兴文字狱，人们的学术和思想研究受到极大限制，迫使学者们多去选择考证古典文献这条保险的道路，加上政府的控制和笼络，考证学就大为兴盛起来，并在乾嘉时期在学术界占绝对优势，被称为乾嘉学派。乾嘉学派在古典文献的考证方面作出的成绩确实非常出色，但考证学派风靡一时，这种倾向使得学术风气流于繁琐，脱离实际，脱离生产，脱离对自然规律的探讨研究，从而对科学技术的发展产生了不利的影 响。梁启超在《清代学术概论》一书中，曾把清代的古典文献研究与欧洲文艺复兴相比，认为二者有相似之处，也有不同之处。从热衷于研究古典文献来看，二者是相似的。但从对自然科学的革命产生的影响来看，文艺复兴之后，欧洲知识分子冲出了教会的桎梏，纷纷探索新问题，各种新思潮、新学术骤然兴起，出现了一个生气勃勃的崭新局面，自然科学也得到了突飞猛进的发展；而清代的考证学派是由于文化专制政策所造成的，知识分子的注意力被引入到古籍的整理方面，对新事物的探索，或缺乏勇气，或不感兴趣，花费的心血虽令人赞叹，但却造成学术文化以至科学技术与欧洲相比较越来越落后的原因之一。有一则笑话说，中国古书竖排版，读者不知不觉在点头，似乎总在说“ Yes ”；西方书籍横排版，读者读起来总在不停地摇头，似乎总在说，“ No ”！所以中国人总在注释古书，总在古人那里寻找智慧，寻求认同，而西方学者却不断地否定前人，超越前人。这个笑话可以说明这时期的东西方科技发展的对比情况。中国人继承永远多于创造，西方人却在不断地发现新的东西。文艺复兴之后，西方科学技术以梦想不到的速度向前发展，中国清朝的社会经济还仍停留在自给自足的小农经济上，科学技术发展的速度就必然落伍了。

世界近代中期科学技术史，是人类科技发展史上的一个令人难以忘怀的时期。这一时期，人类取得了前所未有的科技成就。

英国资产阶级革命后，资产阶级思想开始在西方深入人心，资本主义经济的发展推动了科学技术的进步。同时，科学技术本身的发展规律，如理论与实验、科学与技术、学科之间、学派之间、学术交流、思想与方法等的相

互作用，也促进了科学技术的发展。

在近代早期的科技发展中，天文学和解剖学的革命拉开了第一次科学革命的序幕，人们把科学从神学的枷锁中解放出来，并初步奠定了各门基础学科发展的基础。在近代中期的科技发展中，牛顿经典力学体系的建立、以蒸汽动力技术为主体的技术科学基础的奠定，则使第一次科学革命完成，兴起了第二次科学革命。接着，以康德的天体演化学说为旗帜，第二次科学革命开始，又完成了第一次工业革命，兴起了第二次工业革命。在第二次科学革命中，由于天体演化学说、地质演化学说、生物进化学说等一系列新学说的建立，使得天文学、地质学、生物学等基础科学发生了全面而深刻的变革。在第一次工业革命中，由于工作机、动力机、传动机革命的相继完成，使以蒸汽动力技术为基础的大工业体系初步形成。

科学技术的繁荣进步又对社会生产的发展起促进作用，科技的社会功能日益显示出来，近代中期的社会发展也说明了这一点。

