

学校的理想装备

电子图书·学校专集

校园网上的最佳资源

世界近代前期科技史

e-BOOK
内部资料 非卖品

内容提要

从 15 世纪中叶到 17 世纪中叶，伴随着从封建主义向资本主义过渡的深刻社会变革，近代科技在欧洲兴起。在文艺复兴精神的激励下，天文学、地理学、生物学、数学、物理学、化学等各个方面都取得了重大成就，学科体系大致形成，科学研究方法趋于成熟。航海、印刷、矿冶、机械制造等实用技术进步显著，推动了相应学科的发展或为其奠定了基础。本书较为系统地论述了近代科技的产生条件和基本特征，具体描述了各个领域中出现或酝酿的革命性变化以及有关人物的事业和贡献，勾勒出在这个承先启后的转折时期中科技发展的脉络。同时，也介绍了这一时期中国明代科技的进展（中国明代科技部分由戈春源撰写）和中国与西欧的科技交往。

一、概述

1. 中世纪的遗产

6—7 世纪时，古代文明的余辉消失在中世纪的暗夜中。但如果把整个中世纪都视为漫漫长夜，那显然也是不正确的。中世纪的欧洲确实是以生产力的不发达和宗教迷信的盛行为特征的，但在欧洲的某些地方，仍有知识的小草挣扎而出，如意大利的城市还维持着一些世俗学校，实用的知识和技术还占有一席之地。此外，在欧洲学术衰落的时期，在拜占庭帝国，古典时代的知识仍得以保存。这一线光明后来照亮了西方走向文化复兴的道路。

从 11 世纪开始，欧洲农耕技术的早期进步以及手工业和商业的发展，使欧洲封建经济趋于繁荣。人口有了增加，城镇逐渐扩大，劳动分工日益明显，对脑力劳动的需求也越来越大。社会等级更加复杂，社会生活更加多样。尤其是在意大利的城市，随着商品经济的发展，新的价值观念和行为规范开始形成，生活情趣也发生了变化。

中世纪后期，有两个因素对欧洲文化的复兴起了推动作用。11 世纪末开始的十字军东征使欧洲人接触到了东罗马和阿拉伯文化，并由此而认识了古希腊的文明。许多领主在远征中获得了新知识，并把收集到的书籍带回家乡。而阿拉伯人对西班牙的征服，也有力地促进了由他们加以改造过的古典文化在欧洲的恢复。大批学者携带书籍来到欧洲，给西方世界带来了科学知识。

在 11 世纪时达到鼎盛的阿拉伯科学，对欧洲的影响十分久远。中世纪后期，被阿拉伯人占领的西班牙，是学术和知识的主要传播源之一。许多欧洲人远道来到西班牙，为的是获得知识、了解自然的奥秘。大量阿拉伯的科学著作和古代学者的作品被译成拉丁文，从这里流传到欧洲各地。意大利南部和西西里是传播希腊和阿拉伯学术的又一个中心。由于这里同君士坦丁堡之间有着外交和商业方面的联系，学术和知识的引入也十分活跃。例如，在意大利南部的萨莱诺，人们翻译了大量的医学著作，并对某些专门疾病如泌尿系统病和热病展开了研究。当时人体解剖尚未被人接受，但在萨莱诺已广泛利用猪来研究人体。

欧洲人在漫长的岁月中对古典时代科学知识的繁荣之况已经陌生，他们已失去了许多已经达到的学术水平或曾经取得过的科技成就。所以，中世纪后期阿拉伯科学以及由阿拉伯人或拜占庭帝国的臣民保留和注释的古典学术在欧洲的传播，不仅使欧洲人获得了大量的知识信息，了解了不少研究方法，而且也使欧洲人开始以更加现实的眼光来观察和看待物质世界。除此之外，当欧洲人突然发现他们的历史上曾经有过一个辉煌时期的时候，对知识的渴望和追求便不可遏制地发展起来。

贵族们开始对文化艺术发生兴趣。修道院和教堂的图书室，逐渐被古代著作的手抄本所充实。拉丁文的古典名著受到普遍的欢迎。许多国家和城市都出现了撰写编年史热潮。

在人口稠密的地方，教育也日益受到重视。在修道院和教堂之外，出现了非宗教的文化和知识中心，办起了世俗的学校。教师成为城市居民经常的话题，对他们的需求也日益增长。希望接受教育的人越来越多，因为这是找到一个体面的职业或满足求知欲望的重要途径。

由学者自行组织教学的形式十分流行。在科学和学术还处于起步阶段

时，教师个人的水平和能力，对于成功的教学具有决定性的影响。有名望的教师能够吸引很多学生，所以，经常有学者在修道院或其他地方公开招生，讲授课程。

从12世纪开始，欧洲相继出现了一些大学，如意大利的博洛尼亚大学、萨莱诺大学、法国的巴黎大学、英国的牛津和剑桥大学。13—14世纪，意大利的大学很有生气，这在很大程度上是由于财富的增加使得有计划地发展教育成为可能。据说，博洛尼亚有时将其国库收入的一半用于大学。建于1321年的佛罗伦萨大学也颇有名气，该市为市民就学提供了良好条件。初时，意大利的大学只开设宗教法、民法、医学这三种课程，后来逐渐增设了修辞学、哲学和天文学。黑死病的流行曾暂时影响了大学教育，但瘟疫过后，各大学普遍地恢复重建。

在大学之外，意大利几乎每个城市都有拉丁文学校。这种学校一般由市政当局举办或私人创办，其教学目标是使学生获得拉丁文知识，学习读、写、算，为接受大学教育作准备。

在印刷术尚未在欧洲推广普及的情况下，知识的传播在很大程度上是通过口授而非阅读。因此，大学和学校对于学术的进步和观念的变化所起的作用是不可替代的。尤其是大学，培养了人才，发展了知识，为近代科学的兴起作了准备。

在中世纪文化水准衰退的情况下，修道院和教堂曾起了文化的避难所和主要的知识中心的作用。在12—14世纪，它们对于文化和知识的发展，仍起着不小的作用。确有许多修士为发现和传播已被湮没的古代文明，作出了艰苦的努力。巴思的阿德拉德就是一个典型。他认为，科学知识应当高于世俗的情感、财富、权力和享乐。他曾翻译了阿拉伯的天文学图表，从阿拉伯文翻译了欧几里德的《几何学原理》。他还写过一本名为《自然问题》的书，以阿拉伯科学为基础论述了有关人的本质、气象学、植物学和动物学。阿德拉德善于观察和思考，例如，他详细记录了他在叙利亚旅行时经历的一次地震；他将一个容器顶部的口用塞子塞住，在容器底部钻了一些小孔，发现只有将塞子拔掉后水才会从小孔中滴出。他的不少观点后来都被科学的发展所证实，如关于宇宙的连续性和物质不灭的思想、关于地心引力的思想等。他还认为，科学研究必须使用一定的工具和手段，而不能单凭感觉。他提出，不能迷信权威，而应借助于理性的力量。阿德拉德的工作和思想，对罗杰·培根产生了明显的影响，对于崇尚科学之风的形成起了促进作用。

约在13世纪初，亚里士多德的全集被发现并译成了拉丁文。这一事件导致了欧洲思想和学术的重大变化。亚里士多德为中世纪的人们展开了一个新的世界，他的知识领域比当时所知的范围要宽广得多，他的思想显示出理性的色彩。

随着亚里士多德学说的复兴，经院哲学受到了严重挑战。13世纪著名的神学家、科隆的大阿尔伯特（约1200—1280年），是主张把对自然界的研究作为一门合法学科的首倡者。他注释了全部拉丁文本的亚里士多德的著作，并把亚里士多德同阿拉伯和犹太学术的要素结合起来，组成了一个包括天文、地理、植物、动物、医学等部分的知识体系。他认为，存在着两种知识，一种是从启示和信仰而来的知识，另一种是哲学的和科学的知识，二者并不是对立的，一切真理都可以相互协调，联成一体。

大阿尔伯特的学生托马斯·阿奎那（1224/1225—1274年）则努力把信

仰和理性、圣经和亚里士多德的学说结合起来。他认为，神学家从研究自然中能够得到的益处难以预见，但一般来说，信仰须以关于自然的知识作为前提，而错误则往往使人偏离信仰的真理。他对当时神圣的和世俗的知识加以理性的解释，从而使人感到宇宙是可以理解的，并产生对知识的兴趣。

无可否认，经院哲学的这些变化，在相当程度上增强了已经萌生的理性因素，促进了人们对自然的研究。

但经院哲学在总体上主张理性和信仰的一致，将古典学术著作中的自然知识与基督教教义混在一起，以神学观念解释自然现象和自然过程，并把亚里士多德、托勒密、盖伦等古代学者的学说神学化、凝固化。例如，亚里士多德的学说虽然比当时已有的知识更加科学，但其中也有不少谬误。而所有这些都奉为权威。这样，当它与文艺复兴时代的新知识发生抵触时，就成了妨碍科学从神学桎梏下解放出来的因素。

正因如此，13世纪也出现了罗杰·培根（约1214—约1292年）这样出自经院哲学而又对其进行批判的人物。

罗杰·培根是英国方济各会修士，也是哲学家和科学家。他早年就读于牛津大学，学过几何、算术、音乐、天文这4门高等学科，博览古典著作，对亚里士多德尤有兴趣。但他并不仅仅满足于接受有关自然知识的事实和推论，而认为应该通过观察和实验去证明前人的说法。

约从1247年开始，他的兴趣和智力方向发生较大变化，热衷于科学实验。在约10年的时间里，他在语言学、光学、炼金术、天文学和数学方面作了广泛的研究并取得了不少成果。后来，他又写了多种学术著作。他在科学方法论方面也作出了贡献，首先提出了科学实验的思想，强调只有实验方法才能给科学以确实性，认为真理来自于实验。这种心理和精神上的革命性改变，使培根成了近代西方实验科学的先驱。当然，他也不可能完全摆脱时代造成的局限，不可能完全摆脱中世纪的心理习惯。

罗杰·培根对经院哲学的冲击只是开端。14世纪上半期最有影响的经院哲学家威廉·奥康姆（约1285—1349年）公开否认神学教义可用理性证明，指出许多教义是不合理的。他是晚期经院哲学中唯名论的创立者。这一理论重视直接感观知觉的对象，从而否定了抽象观念的信仰而促进了观察、实验、和归纳研究。这种新思想尽管遭到教会的反对和禁止，仍不可遏制地传播开来。由奥康姆而始，哲学与神学不再是经院哲学所追求的那样融为一体的了，哲学的探讨不再一定要达到神学的预定结论了。

由于生产的发展、文化交流的扩大和学术的复兴，中世纪后期欧洲的科学知识和技术有了一系列进展。虽然从现代的眼光来看，这些进步似乎是微不足道的，但这终究是社会发展的重要标志，也使西方文明获得了新的推动力量。中世纪的迷信、巫术等等固然依旧阻碍着科学技术的发展，但探究自然奥秘，从观察和实验中获得结论的倾向也在加强。

概括地说，在中世纪的最后几个世纪中，欧洲已经积累了形成近代科学所必需的精神和经验方面的准备。这数百年的文化遗产，对于近代科学的开创者来说，是他们的事业和成就的历史基础。在中世纪的晚期，新时代的曙光已经依稀可见。

2. 文艺复兴的孕育

14 世纪，开始了对西方文明乃至人类历史具有重要意义的文艺复兴时代。它标志着世界历史从中世纪向近代的过渡，也孕育了近代科学。

文艺复兴发端于意大利，因为在意大利城市中最先出现了新的资本主义的萌芽。组织成手工业行会或商业同业公会的工商民，逐渐形成了对生活的新态度；城市下层劳动居民，也产生了对公平合理的生活的幻想。中世纪市民的自我意识开始成长，出现了反对宗教禁欲主义和教条主义、主张积极入世的思想观念。

意大利城市生活的发达，是文艺复兴的良好土壤。在许多其他欧洲国家，贵族一般都住在乡间庄园，管理自己的领地，而意大利的上层阶级大多在城里拥有住宅，且大部分时间在城里度过。在当时交通极为不便的情况下，这种居住习惯对文化发展具有很大影响，因为人们分散地居住于乡间，较少有机会交流思想，发展智力，促进创造，而意大利有闲阶级的城居生活，在特定时期和特定条件下为新文化的形成创造了理想环境。

古代希腊罗马文化在欧洲的逐渐恢复，使布满古代文化遗迹的意大利特别容易地出现了研究和接受这个文化的热潮。灿烂的古代文学、艺术和科学令人惊讶，中世纪的现实黯然失色。人们开始改变传统的思维方式，去研究和探讨各种问题。

正是在这一背景之下，人文主义思潮悄然而起。这是一种认为人和人的价值具有首要意义的思想态度和价值观念，也是文艺复兴的主题。

人文主义者从古代文化的表象之下发现了自由探讨的精神，并力图改造这种文化以适应现实的需要。他们致力于使古代灿烂的文化重新被人们所认识，使世俗的知识为人们所重视。通过对古典学术著作的研究，人文主义者加强了对天主教会和经院哲学的攻击。他们的工作表明，有些历来为天主教会所尊奉的信条原来是基于错误的翻译；有些被教廷用来作为其统治权依据的文件都是由天主教会伪造的。他们认为，主宰世界的不是神而是人，人生的目的不是来世的幸福而是现世的享受，人的自然欲望不是须要压制的罪恶而是应得到满足的正当要求。这种新的世界观的传播，逐渐瓦解了禁锢人们思想的枷锁，导致了精神解放的过程。

正是由此开始，迷信、偏见、僵化和无知在社会上遭到鄙视，而崇尚知识和学问的风气迅速发展。到 15 世纪初，意大利不少城市的居民已把学习古典文化作为重要的人生目的；许多贵族、君主和教皇也热衷于充当著名人文主义者的保护人，鼓励科学和教育事业。

在古典文化的熏陶下，在摆脱了思想的束缚之后，意大利人把自己的精力转向外部世界的发现。他们对自己生活于其中的自然界产生了强烈的兴趣，无数的问题和奥秘促使他们去研究和观察周围的事物。从中世纪后期到近代初期，意大利人一直是发现未知世界的先锋。早在 13 世纪，威尼斯的马可·波罗就越过千山万水到了中国，并把这个具有悠久历史和灿烂文明的国家介绍给西方。在这个世纪，热那亚人找到了加那利群岛，并最先试图寻找通往东方的海路。欧洲最早的植物园的出现，也反映了意大利人对自然界的广泛兴趣。不少君主和显贵在建筑他们的宫室宅邸时，营造了收集各种植物的花园，例如，15 世纪美迪奇家族的加里吉别墅庭园，就是一个有无数花草树木的植物园。收罗各种外国动物，同样包含有观察的目的。15 世纪时，动物园已成为宫廷不可缺少的设施。统治曼图亚的贡查加王朝，早就建立了欧洲最早的育马场，在这里为培育良种马而进行了各种试验。就是由此开始，

科学的植物学和动物学逐渐建立了自己的基础。

在文艺复兴精神的熏陶下，涌现出了一大批卓越的学者，他们开始了创立新的科学基础的过程，这个基础就是从自然界而来的归纳取代亚里士多德的演绎。

达·芬奇（1452—1519年）是时代造就的众多优秀人物的杰出代表，在他身上集中体现了文艺复兴的精神。这是一个多才多艺、学识渊博的文化巨匠，人类历史上罕见的全面发展的伟人。作为艺术家，达·芬奇流传后世的作品虽然不多，但它们的价值是难以估量的。《最后的晚餐》、《蒙娜丽莎》、《岩下圣母》、《安加利之战》等都是世界艺术史上的不朽名作。达·芬奇具有观察自然、接近自然的非凡能力。为了艺术的需要，他不顾传统的压力，亲自进行尸体解剖，以精确地了解和掌握人体构造。作为科学家，达·芬奇孜孜不倦地探索和研究自然的秘密。他深邃的哲理思想和极强的逻辑思维能力，使他在几乎所有的科学领域都走在前面。在解剖学的基础上，他研究了血液运动的问题，认为血液的运行就如同自然界中水的循环一样，他观察了心脏的构造，画出了心脏的瓣膜图；他制作了一个眼睛视觉部分的模型，用以说明图像在视网膜上的形成，否定了当时流行的关于眼睛发出的光线落在它所要看的物体上的说法；他研究了光学，探讨了透视和光线的问题；他已认识到惯性原理，认为凡是感官可以觉察的东西都不能自己运动，“每一物体在其运动的方向上都有一个重量”，并且提出落体的速度随时间而增加；在天文学和地理学方面，他也提出了与被普遍接受的看法不同的观点，如把天体看作是一架按确定法则运行的机器，认为地球不在宇宙的中心，指出内陆高山上发现的海洋生物化石是由于地壳运动山岳升高的缘故。作为建筑师和工程师，达·芬奇也取得了许多成就。他在大地测量、城市规划、地形图绘制等方面做了不少开创性的工作；在设计制作各种实用的机械装置过程中，他深入研究了与此有关的力学问题。根据不可能有永恒运动作为动力来源的认识，他用虚速度的方法证明了杠杆定律。他认为杠杆是最基本的机械，其他机械都只是杠杆的变化和复杂化的结果；在探索清除港口淤泥和提升水的办法时，他研究了诸如水通过孔的射流、沟道中的水流、波浪在水面的传播等一系列问题。

达·芬奇在科学方法论方面，也走在时代的前列。他并不轻信、盲从古代作家的论述，而是把它作为研究的起点，强调对自然界的观察和实验是科学的唯一方法，认为“科学如果不是从实验中产生并以一种清晰的实验结束，便是毫无用处的、充满谬误的，因为实验乃是确实性之母。”在精神上，达·芬奇差不多已经完全摆脱了神学的影响，在思考问题的时候不受神学教条的束缚。他虽然接受基督教的基本教义，但也尖锐批评天主教会的腐败和黑暗。在科学思想上，他显然比罗杰·培根更进了一步，后者虽然也主张通过实验获得知识，但仍把神学视为一切知识的归宿。

达·芬奇所具备的前所未有的科学精神和在科学技术各个方面作出的发现和发明，使他可以当之无愧地被认为是伟大的科学家。但令人遗憾的是，他在这方面的成就在当时未能产生广泛影响，因为他的笔记未经整理，没有发表。如果不是这样的话，近代之初科学的巨大进展也许会到来得更早些。

概括地说，文艺复兴在很大程度上打破了科学发展的外部障碍，思想的解放为近代科学的诞生开辟了道路。

近代科学产生的又一条件是社会经济方面的深刻变革，而文艺复兴对这

一变革也起了推动作用。由文艺复兴激发起来的探索未知世界的热情，促进了对历史进程具有重大影响的远航探险；新航路的开辟和地理大发现，又加快了欧洲财富的增长和经济的进步。马克思、恩格斯曾经指出：“美洲的发现、绕过非洲的航行，给新兴的资产阶级开辟了新的活动场所。东印度和中国的市场、美洲的殖民化、对殖民地的贸易、交换手段和一般的商品的增加，使商业、航海业和工业空前高涨，因而使正在崩溃的封建社会内部的革命因素迅速发展。”在这种经济上的进步之后，相继而来的是技术的进步和科学的进步，例如，远洋贸易引起了对造船技术、仪器制造技术的需求，用于导航的天文学也更加受到重视；生产的扩大促进了机械制造技术的发展，并促使人们研究力学问题；而采矿冶金业的兴起则对地学和化学的发展起了促进作用。

远航探险和地理大发现本身也是科学史上具有划时代意义的事件，它体现了新的研究精神，直接促进了人们对地球、对新的动物和植物、对新的人类社会组织形式的认识。

3. 新科学的诞生

15 世纪中叶到 17 世纪中叶，近代科学以崭新的面貌诞生于欧洲。除了在各个科学领域中都取得了重大突破或长足进步之外，新科学还具有一些鲜明的特征。

在这个时期，科学与技术开始紧密地结合起来。

以前，哲学家（那时通称从事脑力劳动的人）与实践者基本上是分离的。前者专注于思索真理而对日常生活中的问题了解甚少；后者则通过观察和试验逐渐地改进技术，但并不关心探究其原理。而且，有学识的人往往总是鄙薄直接操作者的，对体力劳动的偏见向来就是妨碍学术与实践结合的思想障碍。中世纪的经院哲学家把用脑的工作和创造视为“自由”的艺术，而把用手工改变物质形态的工作和创造称作“奴隶”的艺术。甚至在医学界，要动手的外科医生也比内科医生低一等，通常由理发师充任。因此，在研究者和操作者之间存在着很大的隔阂。但在文艺复兴时代，学者对实践的轻视开始得到扭转，科学与技术二者的关系趋于紧密。从事实际操作的工匠的地位有所提高，他们的工作和创造受到学者的尊重。而学者们所发现的古代科学和技术的种种事实以及对这些事实所作的研究和发展，也为实际操作者提供了新的可能性。许多学者一反传统，亲自从事实际工作，从实践中发现和研究问题，并由此而作出了不少重大发现，如维萨留斯、哈维等都是这样。至于伽利略，更是一个集哲学家、技师和手工工匠于一身的新型科学家。科学知识对于实际操作者，也有了日显重要的意义，如地图绘制者需要地理和数学知识，航海者需要天文知识和测定方位的计算手段，技师和工程师需要更多的物理知识等等。这两条途径的缓慢融合，既促进了近代科学的形成，也是其重要特征之一。

使科学与技术实现结合的重要外部条件是近代前期一系列新的生产部门的产生以及人们对未知世界探索的扩大和深入。在这个过程中，出现了许许多多需要解决的实际问题，这种需要推动学者们走上了寻找解决办

路。工业和工程中的技术进步，刺激了相应学科的发展或为其奠定基础，而学者们取得的研究成果，又加快了技术的进步。

实验与数学的结合成为基本的研究方法，是近代科学的又一特征。

中世纪后期，古代著作的重新发现，使人们接受了古代学者对自然界活动的解释，亚里士多德的见解受到尊重和推崇。虽然也有一些学者能够进行独立的观察，但他们在解释观察结果时，仍依赖于古人的论述。在伦敦和巴黎的大学中，逐渐产生了怀疑和探讨的精神，但由于受当时数学水平所限，人们尚不能发展这一趋势。

文艺复兴使欧洲获得了古代亚历山大里亚的数学；而在 1543 年，欧洲人重新发现了阿基米德——他的部分著作的拉丁文译本在这一年印刷发行。阿基米德可以被认为是最具有真正科学精神的古代学者，因为亚里士多德主要是运用推理和演绎方法来探讨问题，而阿基米德则精于几何并长于实验。

在此之前，达·芬奇凭直觉悟出了与阿基米德相同的科学方法。他认为，科学开始于观察，产生于实验，而运用数学的推理，则可以达到更大的确实性。不过他的观点在当时还未能产生重大影响。

从 16 世纪中叶开始，一些最卓越的学者一反唯古代学者是从的风气，将观察和实验作为自己研究工作的基础。而到 17 世纪，人们已经能够把观察和实验的结果加以量化，把已知的科学问题转变为数学问题。

作为观察和实验的手段，大量科学仪器相继出现并逐步完善。这既是近代科学进步的一个标志，又极大地推动了它的发展。例如，望远镜和显微镜的发明，使人们获得了认识宏观世界和微观世界的强有力手段。可以想象，如果没有望远镜，天文学的一系列突破是不可能的；如果没有显微镜，生物学的进展也是不可能的。另一方面，望远镜和显微镜出现之初肯定是有缺陷的，因为许多重要的光学原理还没有被人认识。但在望远镜和显微镜的实际运用过程中，光学科学逐渐发展，仪器本身也得到进一步的完善。

数学方法也具有越来越重要的意义，因为仅仅有观察和实验是不够的。15 世纪和 16 世纪初，有不少重要的发展趋势，由于缺乏数学而陷于停顿。而那些最先直接运用数学和几何方法的科学领域如天文学、力学、光学等，在近代之初取得了特别显著的进步。例如，天文学家第谷所作的无与伦比的观察，在经过刻卜勒用数学方法加工之后，便实现了天文学的革命性发展。同样，后来引力问题的解决，在很大程度上应归功于笛卡尔的解析几何以及牛顿和莱布尼茨的微积分。

科学进步的要求，促进了数学的发展，于是，算术和代数具有了近代的外貌。用字母代表数字的方法由维埃特系统地引入；代表分数的十进制被斯蒂文所使用；各种符号逐渐完善和普及；对数方法作为科学研究的重要计算工具而由纳皮尔发明。而到笛卡尔时期，代数方法与几何方法互相融合，解析几何发展起来，从而在精密科学的进步中迈出了巨大的一步。

这一时期，科学方法论也渐趋成熟。

在近代科学中，一般科学方法的问题日显重要。16 世纪以来，对亚里士多德及其当代追随者的批评，日渐增多并趋于激烈。在这一背景下，弗兰西斯·培根和勒内·笛卡尔在科学方法论问题上，进行了深入思考并提出了系统见解。他们的思想对近代科学产生了深远影响。

弗兰西斯·培根（1561—1626 年）是英国政治家、哲学家，曾担任过总检察长、掌玺大臣兼上议院议长，但他在历史上的最大贡献就是大声疾呼提

倡新的科学方法。

培根认为，古希腊早期的哲学家曾循着正确的道路建立了探索的方针，但后来亚里士多德却把科学引向了对终极原因的研究，而这个问题应属哲学范畴，与科学却无关。中世纪的那些学者把自己局限于少数古代作家的论述上，用有限的材料编织出复杂的网络，致使科学的进展微乎其微。培根否定亚里士多德的“三段论”演绎推理模式，主张采用批评的归纳方法。他确信，采用古代的方法不可能获得任何新东西，应该使经验和理论结合，通过观察、归纳、发现真理这一过程来实现科学的进步。在他看来，只要记录下一切可以得到的事实，进行一切可能的观察和实验，并把结果汇集、归纳起来，编制成实际数据的巨大表格，就能够发现现象之间的联系，找到表达这些联系的法则。他认为，他的新方法旨在使科学脱离迄今为止只是对现象的讨论上，而达到一个较高的水平。

培根是新科学的鼓吹者，但他的归纳法也有缺陷，即忽视了洞察力、想象、假设等在科学实验和科学发展中的作用。在具体的科学问题上，他也不是专家，而且还曾发表过一些错误的意见。然而，作为科学方法论的首创者之一，在经院哲学已经过时且不能增进人类对自然的认识、科学的发展迫切需要新的方法之时，培根提出了适应时代要求的新方法，指出了一条能够更广泛、更正确地认识自然界的道路，从而推动了新科学的形成。

培根的思想在他那个时代极大地活跃了人们的精神，激励人们去探索自然。还在17世纪上半期，他的著作就被译成其他欧洲文字，其影响远远超出了英国。

勒内·笛卡尔（1596—1650年）是法国科学家和哲学家，出生于贵族家庭。他以自己精深的思想体系和在各个科学领域中的广博知识，而成为17世纪科学和思想方面的伟人。

笛卡尔和培根一样，也是科学方法论的创始人之一。青年时代，他曾有10年时间在欧洲各地游历，在世界这本大书中学习，并由此而奠定了自己科学思想的基础。在《论世界》一书的序言中，他阐述了科学方法论问题，创造性地发展了演绎法，强调哲学对于科学的指导意义，并把数学视为全部方法论的核心。1637年出版的《方法谈》一书篇幅不大，但在哲学和科学思想方面的影响却极为深远。在这本书的自传部分，他回顾了他是如何意识到自己年轻时所学的科学实际上没有教给他任何东西，因为各种观点往往只是习惯和传统的结果；他是怎样经过苦苦思索之后，决定摆脱一切源自古代世界的观念和学说，怀疑一切和重新思考一切的。笛卡尔提出了4项方法原则：在通过明显的事实树立确信之前，对一切公认的观念和意见必须怀疑；对于研究中的难点进行分析，以找出与须解决的问题确实有关的东西，并尽量缩减为最简单的材料；从最简单、最容易理解的对象开始，逐渐达到更复杂的知识；概括推理的各个环节，以避免遗漏。他论述了自己观点的哲学基础，认为自然科学必须以现实世界的绝对确实性为基础，怀疑的方法应被普遍采用，怀疑即是思想，正在怀疑的我一定存在，除此之外没有任何别的立足点。

笛卡尔强调数学在科学中的作用。他认为，唯一正确的方法是依靠数学上的推理和抽象；通过清晰的思考，可以发现理性上能够认识的任何事物。因此，实验在笛卡尔的体系中只处于从属的位置，只是演绎推理的辅助手段。在稍后出版的《哲学原理》中，他重述了自己的基本思想，并按照单一的机械学原理的体系逻辑地描述了物理学、化学、生理学方面的各种现象。他把

解释这些现象时使用的机械学词汇与几何学概念联系起来，并利用假说进行概括，为科学理论的研究开辟了新途径。

笛卡尔在 17 世纪获得了众多的追随者。他的科学思想之得到传播的意义在于，理性的思索和判断被广泛接受，一切传统和权威都必须接受理性的检查。笛卡尔的贡献使科学的方法论的或哲学的基础发生了重大的变化。

科学组织的建立和科学交流的开展，体现了时代的精神，也是近代科学的标志之一。

弗兰西斯·培根十分强调科学机构和科学团体的作用，他认为这类组织将以群体的研究为特征，具有更高的效率。在《新大西岛》一书中，他设计了一个科学家的合作团体。他在这方面的见解对后来英国皇家学会的成立产生了直接影响。

16 世纪时，在一些欧洲国家流行的文学俱乐部和讨论哲学问题的团体，成为科学学会的雏型，因为当时许多科学家都利用这些组织的活动作为相互交流和探讨的形式。在这里，他们进行接触，建立联系，互相传阅和议论有关科学界信息和动态的材料和信件，介绍各自进行的研究工作。16 世纪末，在意大利已有 100 多个交流会性质的组织。

最早的科学团体是罗马的山猫学会，它从 1600 年开始活动，直至 1657 年。该团体的参加者经常聚会，并努力尝试建立自己的博物馆、图书馆、实验室、植物园和印刷所。伽利略也是这个学会的成员，他曾向学会赠送了一架自己制作的显微镜，并由学会出版了他的某些著作。

1622 年，德国生物学家约阿希姆·荣吉乌斯（1587—1657 年）组建了一个旨在促进和传播自然科学并将其建立在实验基础上的学会。虽然它的活动时间不长，但却是德国科学社团历史的开端。

约在 17 世纪 40 年代，意大利的美迪奇家族创办了一个装备完善的实验室，经常有各方面的学者在这里进行实验并探讨学术问题。数年之后，由伽利略的学生维维安尼（1622—1713 年）和托里拆利（1608—1647 年）在佛罗伦萨建立了受美迪奇家族资助的西芒托学院。有不少欧洲著名的科学家是这个学院的成员，他们在这里做了一系列重要实验，研制了许多在当时堪称一流的科学仪器。

英国皇家学会是从 17 世纪 40 年代一批追随弗兰西斯·培根的实验哲学的科学家每周举行的聚会发展而来的，法兰西科学院也是以一群巴黎的学者所举行的非正式聚会为基础的。那时，在梅森（1588—1648 年）的寓所，经常有人在一起讨论科学问题，提出研究方案，后来聚会变得定期化，并最终于 1666 年演变而成为法兰西科学院。

印刷出版业的发展，极大地改变了科学交流的条件。以前，科学知识和研究成果，基本上都是以口头方式传播的。随着近代科学以一种普遍运动的形式出现，信息的交流日显重要；定期学术刊物和有关学术著作的出版，使科学成果能很快地得到传播和核实。法国和英国的国家科学机构，都设有正式刊物以发表其成员的科学研究成果。

17 世纪上半期，科学家之间的通信联系，也在学术交流中发挥了重要作用。法国学者梅森致力于建立一个欧洲科学家的联系中心，亲自处理科学家之间的通信，帮助他们沟通和交流。他的活动实际上创立了当时欧洲最重要的科学信息交流系统。

4. 中国与欧洲

欧洲近代科学的诞生，曾得益于中国。中国是世界文明发达最早的国家之一，中国古代科学技术的许多发现和发明，超过了同时代的欧洲，15世纪以前尤其如此。阿拉伯人和蒙古人的征服等重大的历史运动，把中国古代的科技成就带到了欧洲。约在13世纪，火药经阿拉伯人传入欧洲。14世纪上半期，欧洲开始较普遍地使用火药，随后出现了火炮。战争武器发生的革命性变化，进而影响了西方社会的政治结构。指南针在中国的战国时代就已出现，它用于海上导航大约是在11世纪。阿拉伯人和欧洲人在12世纪末13世纪初，了解了关于指南针的知识。在由葡萄牙人首先开始的航海探险和地理发现中，指南针发挥了重要作用。中国在11世纪发明了活字印刷术，后来由蒙古人把它传入欧洲。15世纪后期，美因兹的谷滕堡首先使用这种技术印刷书籍之后，很快在欧洲各地得到普及。在此之前，中国的造纸术也通过阿拉伯人传至欧洲。这两项技术使书籍从只能用人工誊抄、供少数人阅读和收藏一变而为大众化的传播手段，从而促进了科技的发展。马克思曾经指出：“火药、指南针、印刷术——这是预告资产阶级社会到来的三大发明。火药把骑士阶层炸得粉碎，指南针打开了世界市场并建立了殖民地，而印刷术则变成新教的工具，总的来说变成科学复兴的手段，变成对精神发展创造必要前提的最强大的杠杆。”

明朝时，由于手工业生产的发展和商品经济的活跃，中国实用科学技术也继续发展，在航海、医药等方面还取得了世界领先的成就。然而也应该承认，当15世纪下半期以来近代科学技术在欧洲蓬勃兴起的时候，中国科学技术相对来说进展缓慢，逐渐被西方赶上和超过。而且，中国科学依然偏重于实用和经验，在基础理论的研究方面明显不足。造成这种情况的原因是多方面的。

首先，在封建制度和自然经济的条件下，缺少发展科学技术的社会要求和内在动力。近代科学是伴随着欧洲资本主义的成长而诞生的。在中国，虽然明朝后期在某些手工业行业中已经出现资本主义的萌芽，但这种新的生产关系十分脆弱和微小，它受到封建主义的严重染蚀，且仅存于东南地区的少数城镇。统治阶级推行抑制工商的政策，不但阻碍了中国社会的进步，而且也阻碍了与工商业有密切联系的科学技术的进步。

其次，中国的教育以儒学为基本内容，极少涉及科学技术知识。封建王朝对于作为科技发展主要力量的知识分子实行严格的的思想控制，同时实行科举制度，以八股取士，引导知识分子走读书入仕之路，使之终身成为书蠹或充当驯服的统治工具。在儒学教条的束缚下，知识分子难以在科技领域施展才能。而一些杰出的科学家也正是在摆脱了科举制度的名缰利锁之后，方才取得了显著成就。可惜这种淡泊功名的知识分子为数甚少，而近代科学的发展却需要大量的专门人才。

再次，中国封建统治者尊经崇古、保守自满，这种意识也阻碍了对外国科技成果的了解、学习和吸收。郑和曾七次远航，甚至到达东非海岸，但其目的只是宣扬天威，显示国力。虽然远航本身是空前的壮举，但它与稍后葡萄牙和西班牙的航海探险有重大区别。而且，自15世纪中叶始，就连这种对外交往的形式也不可能了。1433年郑和第七次远航归来，意味着中国乃至世界航海史上这一光辉篇章的结束，同时也标志着远方的海洋对中国来说已成

为历史。明王朝开始采取一系列措施禁止远航，后来甚至禁止沿海航行。当欧洲人正充满希望和激情地去发现未知世界的时候，中国却全面收缩，困守大陆。当近代科学技术在欧洲兴起的时候，中国却对外部世界惊天动地的变化茫然无知。

16 世纪末以后，一些耶稣会传教士陆续来到中国。他们在传教的同时，也介绍了一些西方天文学、地理学、数学、火器制造技术等方面的知识。少数开明的中国上层知识分子逐渐接受和学习西学，并参与了西方科技书籍的翻译介绍工作。虽然西方科技知识在中国的传播范围很是有限，但它也意味着中国科学独特发展道路的终结。当然，西方传教士并非单向地把科技知识带到中国，他们对中国文化的了解以及把中国典籍带回欧洲，对西方的社会和科技发展也具有积极的影响。

二、探索宇宙——天文学的革命

近代前期，科学的第一个伟大成就，便是由哥白尼提出“日心说”而开始的天文学革命逐渐深入，人类在探索宇宙的过程中获得了重大的突破。

1. 哥白尼以前的宇宙观

(1) 古希腊的天文学

为了理解哥白尼的太阳中心学说的意义，还要从古希腊的天文学说起。

天体系统的最初构建欧洲人关于地球位于宇宙中心的看法，是由来已久的。古希腊天文学的奠基人、米利多学派的阿那克西曼德（公元前 610—公元前 546/545 年）认为，地被太阳、月球等天体所包围，它没有任何支撑地位于宇宙的中心，因为它没有理由朝任何方向运动，所以是静止不动的。阿那克西曼德是最早阐述有关宇宙论或世界体系的思想的哲学家之一。作为理性主义者，他把几何学和数学引入了天文学，从而为摆脱以前的带有神秘色彩的宇宙观念开辟了道路。

对于数充满兴趣的毕达哥拉斯学派把他们的喜好用于解释宇宙，认为整个宇宙就是数与和谐，一切天体的运动都服从于数学规律，数字之比存在于从宇宙中心到各天体的距离；10 是最完美的数字，因此天上的运动的发光体也必然有 10 个。由于当时只能看到 9 个，他们就断定还有一个与地球相对的对地星。毕达哥拉斯派认为，整个宇宙是一个球形，各球形的天体都作均匀的圆周运动，因为球形和正圆形是最完美的几何体。他们认识到，假定地球在运动，就可以解释天体的视运动。

大约在公元前 5 世纪中叶，毕达哥拉斯学派的哲学家菲洛劳斯（活动时期约公元前 5 世纪中后期）构想了一个宇宙体系，在这个体系中，地被作为一个球体同其他 9 个天体一起围绕着一个中心火旋转，这个中心火是宇宙的祭坛，是人永远看不见的。

毕达哥拉斯派的最后一位学者埃克番达斯发现，昼夜的长短是随纬度而变化的。他由此而形成了一个新观点，即地球在空间的中央绕自己的轴旋转。

毕达哥拉斯派的宇宙观念，对后世产生了深远影响。特别值得指出的是，哥白尼和刻卜勒也十分重视数的问题，他们在提出和阐述太阳中心说时，都强调了它在数学上的和谐和简单性，并认为这是证明太阳中心说是真理的最好理由。

柏拉图（约公元前 428—前 348/347 年）对宇宙的看法，是先验地推导出来的。他也认为球是最完美的形式，因此宇宙必然是球形的，天体则按圆圈运行。把柏拉图的一些圆圈组合起来，能够得到太阳绕地球的视轨道。他的天文学观点，后来由希帕克和托勒密作了进一步的发挥。但据说柏拉图在晚年认识到，如果把地球假定为是运动的，就能够更好地说明天文现象。

柏拉图时代杰出的天文学家和数学家欧多克索斯（约公元前 400—前 350 年）为了解释所观测到的日、月和五颗行星的运动现象，建立了一个由 27 个透明的同心球体组成的模型，这些透明同心球体均以地球为中心，其中日、月各 3 球，5 颗行星各 4 球，恒星 1 球。恒星的球在最外层，向内依次为土星、木星、火星、太阳、金星、水星和月亮的球。每层球的旋转轴指向、旋

转方向和旋转速度都各不相同。欧多克索斯的这个系统，既保持了关于圆是完美的几何图形的观念，又把关于匀速圆运动的叠加可以计算天体的不均匀运动的观点引进了天文学。他的系统成为以后一些天文学家发挥地球中心说的基础。

差不多与欧多克索斯同时的亚里士多德也明确提出了地球位于宇宙中心的主张。他认为，地是一个球体，沉重的地球由于其特别的性质正好处于宇宙的中心；地球之外的天体具有永恒的均匀的圆周运动，它们不是由地球上的4种物质即土、水、空气和火所构成，而是由以太构成，其内部是不变的。亚里士多德的著作涉及内容广泛，是古代学术的百科全书，因此，当中古后期他的著作重新面世之后，他的观点——包括天文学观点——就成了权威。

不同的宇宙观在很长时间内都有所发展。

公元前4世纪，希腊的科学中心从雅典转移到亚历山大城——亚历山大远征时在埃及尼罗河口建立的希腊化城市。

萨摩斯的阿利斯塔克（约公元前310—前230年）是亚历山大城的著名天文学家，他的最大贡献是认为地球有自转和绕日公转这两种运动。这是有史以来第一次有人提出这样的观点。为此，斯多噶派的一些哲学家宣称，阿利斯塔克应该以“渎神”罪被指控。

据阿基米德介绍，阿利斯塔克提出了一个假设，即恒星和太阳是不动的，地球沿着一个圆的周边绕太阳运动，太阳则在这个轨道的中心；地球每天绕自己的轴旋转一圈，每年沿圆形轨道绕太阳旋转一周。为了解释恒星在地球运动时看起来不动的问题，阿利斯塔克正确地指出，这是由于恒星的距离同地球轨道直径比较起来极其巨大的缘故。一千多年之后，哥白尼在创立新的宇宙体学时，也曾受惠于阿利斯塔克的思想。

有关地球位于宇宙中心的思想也在发展。约公元前130年，天文学家希帕克（？—公元前127年之后）在欧多克索斯学说的基础上形成了一个新体系。希帕克首先假定，地球是中心，然后让日、月、行星等天体都在自己的圆轨道即本轮上匀速运行，而本轮又在一个大的圆轨道即均轮上围绕地球运行。他的体系对地球中心说的维持起了很大作用，且对托勒密体系的形成产生了直接影响。

在希帕克之前，当时就享有“大几何学家”盛名的阿波罗尼奥斯（约前262—前190年）为解释行星运动而引进了偏心圆运动和本轮运动的概念，这在后来也成为托勒密构筑宇宙体系的材料之一。

托勒密的宇宙体系希腊著名天文学家、地理学家和数学家托勒密（活动时期为公元2世纪）在天文学方面的研究成果，主要体现在他的《天文学大成》这部巨著中。这部共有13卷的著作，是对希腊天文学的总结。在前人提出的有关偏心圆、本轮、均轮的观点基础上，尤其是在希帕克体系的基础上，托勒密论证了地球位于宇宙中心静止不动的理论，构筑了一个描述太阳、月球和行星的位置以及视运动的体系，以一些被称为本轮和均轮的假想圆周和匀速的圆周运动来解释观测到的天体运动。托勒密认为，天是球形的，并且在不停地运动，恒星也都固定于其上。地也是球形的，但却静止不动，位于天的中心。太阳和行星都围绕地球旋转；太阳沿着一个本轮的圆周运动，而本轮的中心又沿着一个均轮的圆周运行，周期为一年；太阳均轮的中心与地心重合，而月球和行星的均轮中心则不在地心。

值得注意的是，尽管托勒密论证了地心说，但他在《天文学大成》的导

言中也承认，从数学角度来看，可以把星空的周日运动看作是地球绕自己的轴作周日运动的反映，但他不愿为了适应观测到的现象而把地球看作是运动的星体，因为他认为这从物理学上来说说是荒谬的：根据当时对惯性的认识，如果地球在旋转的话，地球表面的东西也将急速移动而不是与地球紧紧附合。

由于托勒密的体系符合《圣经》的说法，它得到了教会的支持而成为正统学说，并在大约 1400 年的时间里支配着天文学。

(2) 中世纪欧洲人的认识

直到中世纪晚期甚至近代初期，人们对宇宙的认识在总体上仍受到托勒密学说的影响。例如，在但丁（1265—1321 年）的描述中，宇宙是由一系列天体组成的系统，这些天体一个处于另一个之内，在整个系统的中心则是不动的地球。但丁认为，总共有 10 层天存在，每层天都是一个以地球为中心的透明天球，月亮、太阳、行星等天体分别附于天球的背面，整个系统每 24 小时绕不动的地球转一周。

在 1539 年安特卫普出版的阿皮安（1495—1552 年）的《宇宙志》中，有一幅以地球为中心的有限宇宙图。图的中心是包括水、空气和火圈的地球，它是不动的，并由分属月亮、水星、金星、太阳、火星、木星和土星的天球层层包围，在这 7 个“行星”天球之外是苍天即恒星系、第 9 个透明天球，第 10 个原动体。在这以外便是茫茫宇宙太空、上帝和神的住所。

但托勒密的体系也遇到了问题。由于行星实际上是沿着椭圆形轨道绕日公转，而到 15 世纪时人们对行星运动轨迹的测量也日渐精确，托勒密的体系必须变得更加复杂才能说明新观察到的现象。于是，托勒密的正确性受到了怀疑。

15 世纪，在哥白尼之前，已有一些学者明确地提出了同托勒密学说不同的理论。库萨的尼古拉斯（1401—1464 年）是天主教的枢机主教，但也是有影响的哲学家和科学家。他曾指出：“我们已经清楚，我们的地球在动，虽然这是感觉不到的，只有同恒星比较才能发现。”他认为，地球围绕自己的轴心，由东向西，24 小时旋转一周；同时，它还围绕同前一个轴相垂直的轴线旋转。星空和太阳也都作两种运动。尼古拉斯觉察到，包括地球在内的宇宙在运动，这个运动有一个中心，但这个中心不是地球。他的这一见解为哥白尼的天文研究开辟了道路。

2. 哥白尼的贡献

(1) 研习天文学

1473 年，尼古拉·哥白尼（1473—1543 年）出生于波兰东部的古城托伦一个有名望的商人之家。最初，哥白尼曾在自己的家中接受教育，后来进入当地学校读书。托伦的学校是一所世俗学校，它的教师中有一些天文学爱好者。正是在这里，少年哥白尼开始接触天文学。双亲去世后，他由舅舅乌卡什·瓦兹洛德养育和庇护。瓦兹洛德是波兰著名的人文主义者，崇尚科学，曾在克拉科夫和意大利的大学里学习过，1489 年被选任为瓦尔米亚的主教。1491 年，19 岁的哥白尼进入克拉科夫学院读书。克拉科夫是当时波兰的首都，而克拉科夫学院是中欧继布拉格大学之后的第二所大学，深受人文主义

的影响。学院的教授们曾勇敢地为受到迫害的布拉格大学教授杨·胡斯（约1369—1415年）辩护。

在克拉科夫学院人文学系读书时，哥白尼目睹身历了新的世界观和科学思想同旧的中世纪观念的斗争。在这里，他受到了良好的数学和天文学教育，并学会了使用天文观测仪器。他同老师一起观测过月蚀和日蚀，并对一些天文现象发表过自己独特的见解。学院的数学和天文学教授沃伊切赫对哥白尼产生了很大影响，他不但引导哥白尼走上了天文学研究之路，而且以人文主义思想培养了哥白尼的公民感情。他的科学精神使哥白尼大胆地怀疑当时公认的法则，并由此而取得了具有划时代意义的伟大成就。

天文学在当时是一门显学。之所以如此，首先是由于天文学对于正确使用复杂的教会日历十分重要。为了计算那些不固定的宗教节日在每一年中的确切日期，为了编制日历和计算时间，天文学是不可少的。其次是当时人们对于占星术的迷信，王公、贵族和军事指挥人员都需要占星家来为他们的每一项重要决定预测吉凶，就是普通老百姓也离不开占星家对时令和气候的预报。而占星家的角色通常都是由天文学家担任的，占星术实际上就是天文学的某种变种。其三是当时已日渐发展的远洋航行的需要，在茫茫海洋中，人们主要依靠观测天象来辨认方向和确定位置。

克拉科夫学院的天文学教学和研究在欧洲享有声誉。1459年，学院开办了占星学系，这个系培养出来的学生，在不少国家的天文学发展中起过积极作用。例如，15世纪后期，在意大利的博洛尼亚大学天文学系有5位来自波兰的教师担任教职。曾给过哥白尼不少帮助的沃伊切赫，是当时欧洲最有名的天文学家之一，他发现了月亮的轨道并不是如人们所想象的圆形，而是椭圆形的；通过反复观测，他认为月亮始终是以同一个面对着地球的。

在克拉科夫学院，哥白尼大量阅读了古典学术名著，并从中发现了同当时流行的托勒密学说不同的观点。菲洛劳斯和阿利斯塔克的见解可能引起了哥白尼的兴趣，因为他们关于宇宙体系的提法同教会所支持的地球中心说是不一致的。这种矛盾促使哥白尼对托勒密的体系产生怀疑，在克拉科夫学院，是具有对学术问题进行怀疑和探索的气氛的。

在克拉科夫学院学习4年之后，哥白尼于1495年回到瓦尔米亚舅舅身边。一年后，他启程前往意大利的博洛尼亚，去读那里的大学。这时的意大利是欧洲科学文化的中心，伟大的文艺复兴运动即发端于此。哥白尼在博洛尼亚大学学习的科目有法律、天文学、数学和希腊语。这所大学气氛活跃，学术辩论盛行。哥白尼在这里有机会同著名的天文学家和占星家诺瓦拉（1454—1504年）探讨自己感兴趣的天文学问题，并一起进行天文观测。同诺瓦拉就托勒密宇宙体系的问题及改进这一体系的可能性所作的深入交谈，激励哥白尼构思新体系、改革天文学。

1497年，在当主教的舅舅的帮助下，哥白尼得到了弗龙堡的神父职位。这使他能够利用神职人员的特权和报酬从事学习和研究工作。1501年7月，哥白尼回国并作了短暂逗留，很快又得到去意大利威尼斯共和国的帕多瓦大学学习医学的机会，条件是学成后回弗龙堡担任当地教会的医生。学医并未使哥白尼放弃对天文学的爱好，因为那时的医学与占星术和天文学是有联系的，人们一般都相信天象变化对人的身体有影响，甚至不少药物的使用也要根据行星的位置来确定，所以，哥白尼在帕多瓦大学继续从事天文观测和研究。他在这个时期的笔记中写道：“菲洛劳斯承认地球是动的，听说，萨摩

斯的阿利斯塔克也是这种看法……这是可信的。……但这种事只有敏锐的天才经过长期研究才有可能解决。”

在博洛尼亚大学和帕多瓦大学的学习，使哥白尼掌握了当时天文学的所有主要成就，为他日后的研究打下了基础。而意大利的人文主义精神和科学精神的熏陶，则使他养成了作为一个优秀科学家应该具备的素质。1503年的秋天，他回到了波兰。

(2) 提出新体系

哥白尼回国后，先是当他舅舅——瓦尔米亚主教瓦兹洛德——的保健医生兼顾问和秘书，后来又担任了弗龙堡神父会的行政和财政管理工作。与此同时，他系统地研究了天文学。形成假设哥白尼发现，观测精度的提高使托勒密体系必须变得更加复杂，而且它终不能与观测结果相吻合。在古希腊学者的地动思想启发下，哥白尼形成了一个比托勒密体系更简单而又更完善的假设。

约在 1510—1514 年间，哥白尼写了一篇关于自己的天体运动假设的文章，并把它寄给了自己的友人。这篇文章简明扼要地阐述了日心说的基本思想，其要点是：地球的中心不是宇宙的中心，而只是重心和月球轨道的中心；所有的天体都围绕太阳运转，因此太阳位于宇宙中心附近；地球围绕自己的轴心每昼夜旋转一圈，围绕太阳每年旋转一圈；在天空中看到的所有运动，都是由地球自己的运动造成的；人们感觉到的太阳的运动以及行星向前或向后的运动，都是由地球的自身运动使人产生的错觉，地球的运动足以解释人们在天空中观察到的各种现象。

哥白尼的这些见解，否定了托勒密关于地球是宇宙中心、包括太阳在内的所有天体都围绕地球运动的学说，同时也使以这一学说为基础的世界观和哲学体系发生动摇。哥白尼的思想起初没有引起人们的兴趣，或者说没有得到应有的评价。对于同以教会权威和《圣经》论述为基础的现有宇宙观相对抗的哥白尼的成果，似乎还没有人敢于明确表示赞同。他的文章在友人中流传，但大家都保持沉默。宗教改革的旗手路德也对哥白尼持轻蔑的否定态度，说这个蠢人想把全部天文学颠倒过来，试图说明不是太空、太阳和月亮，而是地球在运动、在转圈。

但随着时间的推移，由于哥白尼不断对当时天文学界的一些重要问题发表独到而又有说服力的见解，他在学术界的名声也越来越大，他的文章的抄本在欧洲流传。1539年，被哥白尼观点所吸引的一个 20 多岁的青年、维滕贝格大学的数学和天文学教师雷蒂库斯（1514—1576 年），慕名来到弗龙堡，向哥白尼求教。

当时，哥白尼正在撰写他的主要著作《天体运行论》。这项工作从 1515 年开始，断断续续已进行了多年。雷蒂库斯同哥白尼一起研究探讨了 1 年多，在 1540 年出版了一本著作，名为《哥白尼崭新著作初释》，这是对哥白尼的天体运动新观点的首次解释。雷蒂库斯在书中说，哥白尼的观点已经被以前多个世纪的观察所证实，无疑也将被后代的发现所肯定。雷蒂库斯强调了哥白尼同古代学者之间的思想联系，从而使他在人文主义者中间声誉日隆。此外，雷蒂库斯还积极活动，向政界和学术界要人宣传解释哥白尼的学说，批驳一些人对哥白尼的诬蔑和诽谤。

《天体运动论》在雷蒂库斯的劝说下，哥白尼决定出版自己的著作。

1542年，当他的著作在纽伦堡付印之时，他给罗马教皇保罗三世写了一封信，说明了自己的学说形成的条件，希望教皇向他提供庇护，使他的思想免遭被定为异端邪说的命运。

哥白尼在信中写道：“我深深地意识到，由于人们因袭许多世纪以来的传统观念，对于地球居于宇宙中心静止不动的见解深信不疑，所以我把运动归之于地球的想法肯定会被他们看成是荒唐的举动。”他表示，他是在阅读研究古代学者著作的过程中受到启发而开始考虑地球的运动。既然前人可以随意想象出圆周运动来解释星空现象，那么他也可以假定地球有某种运动以便更好地解释这些现象。

他写道：“从地球运动的假定出发，经过长期的、反复的观测，我终于发现：如果把其他行星的运动同地球运动联系起来考虑，并按每一行星的轨道比例来作计算，那么，不仅会得出各种观测现象，而且一切星体轨道天球之大小与顺序以及天穹本身，就全部有机地联系在一起了，以至于不能变动任何一部分而不在众星和宇宙中引起混乱。”

他表示，“有真才实学的数学家，只要他们按照科学的要求，深入地而不是肤浅地了解和鉴定我立论的依据，就会同意我的看法。”他也预见到，有人会以圣经的章句曲解和非难他的理论，但他对这种意见“决不予以理睬”。他在信中还强调，他的辛勤劳动是会有某些益处的，例如，它将有助于正在考虑中的历法改革。

哥白尼希望把他给教皇的信作为自己著作的序言，但这个想法没有实现。因为在他的著作付印之后，为他联系出版事宜的雷蒂库斯去莱比锡大学任教，把具体印刷出版事务交给路德牧师、数学家安德烈·奥塞安德尔负责。后者担心有关地球运动的理论会触怒路德派领导人，就按自己的想法对哥白尼的著作作了一些修改，并为它写了一个序言以取代哥白尼给教皇的信。他在序言中强调，哥白尼的论断只是假设，书中有不少荒谬的东西。

1543年春天，哥白尼的《天体运行论》出版。这年的5月24日，哥白尼死于脑溢血。

《天体运行论》共有6卷。第1卷是基本部分，它对一个新的宇宙体系作了非常明晰和极为简洁的解释。哥白尼用普通人能够理解的语言介绍了自己天文学理论的概貌：宇宙是球形的，它由以太阳为中心的天体组成；地球进行着由西向东的旋转运动，它不在宇宙的中心，也肯定不是行星轨道的中心；天穹的周日旋转只是一种视运动，实际上是地球运动的反映。哥白尼画了一张图表对其体系进行解释。这是一组8个同心圈（纽伦堡1543年出版的《天体运行论》中这张图被画成了9个圈，这是与原稿不符的，且未经哥白尼核对和认可），在圆圈之间的环状带上，从外向里依次标有数字1到7，第一条圆环表示恒星，以下由土星、木星、火星、地球、金星、水星各占一个圆环，而在中心圆中写着太阳。一般认为，哥白尼图中的圆环表示的，是互相邻接的天球。根据欧多克斯、亚里士多德等古代学者的说法，行星是被巨大的旋转天球携带着绕地球转动的，而哥白尼把古希腊以地球为中心的天球理论改造为以太阳为中心的新的天球理论。

哥白尼还计算出了太阳的直径与围绕其旋转的行星直径的比例，确定了土星、木星、火星、地球、金星、水星等天体对太阳的顺序和它们围绕太阳旋转一周的时间。他指出，土星围绕太阳一周的时间为30年，木星12年，火星2年，地球1年，金星270天，水星80天。这一计算结果同实际时间的

误差不大，如土星绕太阳旋转一周的实际时间是 29 年又 167 天，木星为 11 年又 315 天，火星为 1 年又 322 天，地球为 1 年，金星为 225 天，水星为 88 天。如果考虑到哥白尼时代观测器材的简陋，那么他的计算的精确度是令人惊叹的。他还明确地指出了地球的自转、绕日周年旋转和倾斜面的运动。

《天体运行论》的第 2 至第 6 卷分别叙述了其他行星运动与地球运动的关系，把其他星体运动都与地球运动联系起来，从而说明其他行星和天球的运动和现象。

(3) 哥白尼学说的意义

哥白尼提出日心说，是人类对自然认识史上具有划时代意义的转折点。哥白尼体系不仅意味着天文学基本概念的变革，也意味着人对自然的理解的重大变革。在当时人们的思想仍受到宗教神学和经院哲学左右的情况下，它也标志着欧洲人价值观念的深刻变革。当然，这一系列变革并非是由哥白尼一个人实现的，在他之后，经过布鲁诺、第谷、刻卜勒、笛卡尔直至牛顿等众多科学家的努力，终于完成了由他开始的天文学革命。

作为一种新的天文学理论，哥白尼的体系也不是完美无缺的。例如，他没有摆脱天球理论的影响，坚持认为天体的运动必定是圆周的和匀速的，而且过分地相信托勒密观察结果的精确性，以致刻卜勒后来也批评他“更多地解释托勒密，而不是解释大自然”。但哥白尼终究是取代托勒密学说的新体系的创立者，他的贡献使天文学从中世纪走向近代。

3. 哥白尼学说的传播和发展

(1) 变革的趋势

在哥白尼去世后的几十年中，他的学说的拥护者为数不多。大多数人仍然不能想象，他们生活的地球竟然是在旋转着的。但是，哥白尼的体系和计算结果，开始被采用或引起讨论。

《天体运行论》出版后，维滕贝格大学教授埃拉斯姆斯·莱因霍尔德（1511—1553 年）受到激励，决定利用哥白尼的研究成果来修改旧的天文图表而编制一套新的。哥白尼依据日心说所编制的星表，能够计算出太阳、月球和行星在任何时候的位置。但由于他所能利用的观测数据较少且不够可靠，他的星表的精确度还不太高。莱因霍尔德借鉴了哥白尼著作中提供的模型、计算方法和某些观察结果，在普鲁士公爵的赞助下，经过七年努力，在 1551 年发表了自己的工作成果，其名称为《普鲁士星表》。莱因霍尔德的星表在精确度上提高了一步，它成为教皇格列高利十三世在 1582 年颁行的新日历的主要依据。“格列高利历”一直沿用至今。

16 世纪后期，一些重要的天体观测和发现，使天文学的根本变革日益临近，并使哥白尼学说所体现的精神和代表的方向具有了更为现实的意义。

1572 年，天文学家发现了一颗新星，据说这颗星的亮度仅次于太阳、月亮和金星，有时甚至在白天也能看到，并且在整个 1573 年中始终能够看到，直至 1574 年初方才消失。这颗新星的发现，使历来关于崇高的天既不变化，也不生成或衰败的观念受到了冲击。1577 年，又发现了一颗新彗星，对它进行的观测表明，它径直穿过了被认为是形成天空的不可刺透的透明天球。于是，天球的真实性便成了问题。著名的天文学家布拉赫·第谷因此而表示，

他再也不相信天球的存在了。天文学界出现了一种倾向，认为“天文学彻底革新”的时机已经到来。有人认为，需要有一种既不是哥白尼体系而又能取代托勒密体系的新假说；也有人指出，应该有一种比托勒密和哥白尼的观察更好的观察。

正是在这一背景下，一些卓越的学者在理论阐述或实际观测方面发展或完善了哥白尼的学说。而从另一角度来说，哥白尼学说在真正对天文学产生根本性影响之前，也还需要经受批评和考验。

(2) 布鲁诺的宣传和超越

接受和发展日心说。乔尔丹诺·布鲁诺（1548—1600年）是文艺复兴时期反对经院哲学的思想家，也是天文学家和数学家、哥白尼学说最早的支持者之一。

1562年，布鲁诺到那不勒斯学习古典文学、逻辑和雄辩术，三年后进入修道院，成为多米尼克派修士，并继续学习和研究。在文艺复兴精神的影响下，布鲁诺形成了非正统观点。1576年，由于阅读异教书籍和谈论异教思想，地方教士要审判他。于是，他先逃亡罗马，后又到日内瓦，并转而信奉加尔文派。但新教同样是不容异说的，布鲁诺在日内瓦曾因自己的观点而遭拘捕。1581年，他来到巴黎。当时天主教正与胡格诺派斗争，他被法王亨利三世任命为王室神学教师。次年去伦敦，在牛津大学作了一系列演讲，阐述哥白尼的学说，批驳托勒密的体系和亚里士多德的观点。

布鲁诺摒弃了地心说，宣传哥白尼关于地球是绕太阳旋转的行星的思想，并比哥白尼更进一步，超越了他关于恒星固定在一个以太阳为中心的天球上的观点。他认为，宇宙在时间和空间上是无限的和永恒的，宇宙没有中心，太阳系只是其中的一个天体系统；恒星之间有着极大的距离，它们散布于无限的宇宙之中，以它们为中心，存在着无数象太阳系一样的体系。他还预见到，太阳围绕着它自己的轴转动，太阳系的行星数量不止已知的那些，地球的两极呈扁平状等等。

布鲁诺宇宙观的基础，是认为“物质”和“形式”紧密结合为“一”。他指出，统一的物质实体是宇宙万物普遍的、共同的本质，是万物的本原和原因；不存在宇宙之外的别的推动力量，宇宙便是其自身运动的原因。

1584年，布鲁诺先后出版了《论无限性、宇宙和诸世界》等三种著作，系统地论证了日心说理论的真实性，阐述了宇宙是无限的观点，全面地批判了亚里士多德物理学。

为真理献身布鲁诺是近代科学革命的哲学代表，他强调，自然界是唯一的认识对象，而只有理性才能真正认识自然，只有最符合于自然真理的哲学才是最好的哲学。他指出，真理并不存在于感觉之中，譬如，在人们的感受中，地球不动而太阳在围绕地球运转，但这只是一种错觉。布鲁诺也是近代科学的殉道者，他认为，为了追求真理和美好的事物，应该具有牺牲精神，如果个人在追求真理过程中遭受危难和不幸，从永恒的观点来看，可以被认为是善事或引向善的先导。

布鲁诺的言论对教会权威和经院哲学构成了重大威胁，甚至在较为自由的英国也不能被容忍。1585年10月，布鲁诺回到巴黎，同天主教徒公开论战。随后，他离开巴黎去德国，1588年出版了一本宗教哲学方面的著作，主张所有宗教在互相了解和自由辩论的基础上和平相处。1591年8月，布鲁诺

回到意大利，次年5月因宣扬异端的罪名而被捕受审。由于布鲁诺坚持自己的信念，在被监禁8年之后，教皇克莱芒八世下令，将他处以死刑。1600年2月17日，布鲁诺被宗教法庭烧死在罗马鲜花广场。在临刑之际，布鲁诺依然宣称：“火并不能把我征服，未来的世界会了解我，知道我的价值的。”

(3) 第谷的观测

在16世纪下半期，编制出能准确表示行星实际运动的星表，是不少天文学家努力追求的目标。第谷（1546—1601年）便是这些天文学家中最著名的一位。

心向天空。第谷于1546年12月14日出生于一个丹麦贵族之家，13岁时就进入哥本哈根大学。在他的学习科目中，除了语法、修辞、逻辑和音乐外，还有几何、天文和算术。1560年8月21日，他惊奇地看到了一次在预报时间发生的日全食，从而对天文学产生了强烈兴趣。于是，他白天在学校上课，而把晚上的部分时间用于观测星空。1562年，他到莱比锡大学学习法律，但仍迷恋于天文学。1563年8月17日，他第一次作了天文观测记录，描述了木星与土星相合的情况。借助于极为简陋的观测器材，第谷发现，根据已有星表计算出的行星位置与实际观测到的行星位置之间存在着偏差。这使他下决心献身于天文观测工作。从此，他开始了长期而又系统的观测，以编制一个精确可靠的星表。

在欧洲各地游学数年之后，第谷约在1570年回到丹麦。1572年11月，他遇到又一次重大的天文事件：发现仙后座中出现了一颗亮度超过金星的新星。在这颗新星可见的约一年半时间里，他不断跟踪它的亮度和色彩的变化，反复地测量了它与其他星体的角距。根据观测结果，他发表了一篇《论新星》的文章。他指出，这颗新星相对于周围的恒星没有明显的周日视差，而且它也没有象行星那样的自身运动，因此，它应当是在极远的恒星区域。这一结论具有十分重要的意义，因为在当时，亚里士多德的宇宙学教导说，恒星区域是不可能发生物理变化的。

从尤拉纳斯堡到布拉格。第谷成了享誉欧洲的天文学家。1576年，丹麦国王腓特烈二世（1534—1588年）为把他留在丹麦而赐给他一笔经费，让他在文岛建立天文台。第谷把他在文岛上建造的城堡称为尤拉纳斯堡——天上的城堡。他和他的家庭从1576到1597年在这里住了20多年。在尤拉纳斯堡，除了有一些天文观测室外，还有图书馆、仪器制造厂、印刷厂和化学实验室，并且集中了一些能工巧匠。在自己的孩子们和助手的帮助下，第谷进行了长期的系统而又有规律的天文观测。他使用的仪器已是当时可能有的最好的仪器，但仍然是比较简单的。他借助于这些仪器，用肉眼观察天空。1577年，通过对大彗星的观测，他又一次证明，彗星离地球肯定比月球遥远得多，因为彗星没有显示出明显的周日变化。在他于1588年出版的《论天上世界的新现象》一书中，详细叙述了他对彗星的观测和结论。当时的尤拉纳斯堡成了欧洲天文研究和发现的中心。

在1588年腓特烈二世死后，第谷从王室得到的资助越来越少，尤拉纳斯堡的维持也越来越困难。1597年，第谷最终离开文岛前往德国。在汉堡，他写了一本名为《力学重建的天文学》的书。1598年，德皇鲁道夫二世（1552—1612年）邀请他到布拉格，并于次年资助他在布拉格附近的一个城堡建立天文台。1600年，第谷邀请年轻的德国天文学家刻卜勒当自己的助手。但是，

他在布拉格还未来得及进行系统的工作，就于1601年10月24日去世了。

无与伦比的观测者。第谷对于精密天文学的一系列问题作了深入的研究。在16世纪最后的20多年中，他在实践中使用了望远镜出现之前所有可能的观测方法，极大地改进和完善了观测仪器。他的观测结果达到了光学仪器被应用于天文观测之前的最高精度。据此，他确定了许多重要的天文学常数，编录了一千颗恒星的位置。他跟踪行星运动的整个过程，而不仅是在这些行星轨道的某些特定位置分辨出它们。

第谷采用了反复观测的方法，力求把误差减小到最低限度。在他的星表中，标准星座标的误差率只有25秒左右。由于意识到任何精密的仪器都难免造成误差，他通过组合观测的方法，测出误差并以此修正由该仪器测得的结果。他还注意到大气折射对观测精度的影响，并力图加以修正，编制出了最早的大气折射表，虽然他对折射产生的影响估计有误。

在理论上，第谷既没有完整地继承托勒密，也没有全面地接受哥白尼，而是提出了自己的折衷性体系。他没有放弃地球在宇宙中心静止不动的观点，认为有关地球在运动的说法违背了亚里士多德的物理学，如果地球是旋转的，那么一枚朝地球旋转方向发射的炮弹将比朝相反方向发射的炮弹射得更远，而这种情况是不存在的；此外，如果地球绕太阳运动，那么恒星的视位置应产生周年视差移动，但这种移动尚未被测出，即便存在也肯定极小，以至于恒星只能位于离地球遥远到难以置信的距离。正是由于拘泥于上述认识，他认为沉重静止的地球位于宇宙中心。但在他的体系中，围绕地球转动的只有太阳和月球，而水星、金星、火星、木星和土星等行星则是绕着太阳运动的。通过自己的体系，他既证明了托勒密体系的缺陷，也指出了哥白尼体系的不足。

尽管第谷本人没有直接发展哥白尼的学说，但他对积累天文现象所作的贡献是空前巨大的，他的卓越观测成果，为刻卜勒的工作奠定了基础。

(4) 刻卜勒的研究

1601年，第谷临终时把大量宝贵的观测记录传给了年轻的助手刻卜勒（1571—1630年），希望他利用这些资料改进天文图表，进而证明第谷的理论。但刻卜勒日后取得的成就，远远超出了这个范围。

《宇宙的奥秘》。刻卜勒出生于符腾堡，父亲曾任职于当地新教教会。他在少年时进入符腾堡隐修院学习，曾把当牧师作为理想的职业。1587年开始，他就读于蒂宾根大学，在这里听了赞成哥白尼日心说的麦斯特林教授的天文学课程，并因此而成了哥白尼学说的信徒。1591年，他获得硕士学位。为了谋生，他于1594年中断了在蒂宾根大学的神学课程，到奥地利南部的格拉茨地方担任路德派学校的数学教师。他同时还编写占星历书，以贴补生活之需。

刻卜勒的思想中具有毕达哥拉斯神秘主义的某些痕迹，他认为自然界具有数学的简单性，行星是依照几何定律运动的。1596年，他出版了自己的第一本著作——《宇宙的奥秘》。该书以5种正多面体的几何结构，来解释当时已知的包括地球在内的6大行星与太阳的距离。作为哥白尼的信徒，他希望自己的构想能够证明哥白尼的学说。他甚至在做这项工作时不断地祈求上帝，“如果哥白尼说的是真的，那就让我成功吧！”他进行了大量的计算，以验证自己的想法是否与哥白尼的轨道理论吻合。根据上述构想计算出的结

果，与通过实际观测推算的距离基本相符，虽然并不完全一致，但刻卜勒认为这是观测的误差所致。这本在哥白尼的《天体运行论》问世 50 多年后出版的著作，是对哥白尼体系所作的第一次重要的公开辩护，但刻卜勒也修正了哥白尼。他在确定行星轨道时，不是以地球偏心轨道的中心为参考，而是以太阳作为参考，因为据此得出的数据与他的正多面体结构的构想更为吻合。

《宇宙的奥秘》出版后，刻卜勒把它寄给了第谷，并由此而同他建立了通信联系。刻卜勒在书中表达的关于宇宙和谐的思想，受到第谷的赏识。1600 年，刻卜勒到布拉格同第谷会面，并留下来为第谷整理行星观测资料。第谷逝世后，刻卜勒把根据这些观测结果编制准确的星表和探索与哥白尼学说一致的行星理论作为自己的任务。前一项任务于 1627 年取得了结果，刻卜勒编制出了望远镜出现之前最好的星表，它以第谷和刻卜勒的保护人鲁道夫二世皇帝的名字命名，称“鲁道夫星表”。后一项任务的进行，则导致了宇宙天文学的重大突破。

发现行星运动定律。在探索行星运动规律时，刻卜勒注意到，太阳不仅位居中心，而且也是力量的中心。他起先认为，太阳有一个“运动精神”，它推动行星沿着各自的轨道运动，行星离太阳越近，受太阳运动精神的影响也就越大。后来，他对上述表达作了一个重大的修改，即用“力量”一词代替了“运动精神”的提法，从而使自己的天体物理体系的意义更加完整，并因此而使得对宇宙的解释从有机转向机械。刻卜勒指出，很有可能，“天体机器并非神圣的有机体，而只是一个时钟结构……因为各种各样的运动是通过物体的一个单一而十分简单的磁力产生的，正如钟内的所有运动都只是一个十分简单的钟锤所产生。”他的这一思想大概受到了英国科学家威廉·吉尔伯特（1544—1603 年）的影响。吉尔伯特在 1600 年出版了关于磁性研究的著作，其中有关于地球是一个巨大球形磁场的思想。

刻卜勒的最大成就，是发现了行星运动的三大定律。

刻卜勒对火星的运动进行了长时期的艰苦研究。他在用哥白尼的匀速圆周运动理论计算火星轨道时，得出的结果同第谷的观测数据至少相差 8 弧分。这个误差在当时条件下不算很大，但刻卜勒相信第谷的观测误差不会大于 4 弧分。于是，他放弃了行星作匀速圆周运动的理论，而在反复计算之后得出了新的结论：行星绕太阳运动的速度是变化的，其轨道是椭圆形的曲线。

1607 年 10 月，刻卜勒在给友人的信中表示，在他即将出版的书中将提出一种新的哲学或天体物理学，以取代亚里士多德的天体神学或形而上学。1609 年，他的《新天文学》一书出版，他认为，此书探索的是“运动的自然原因”。而在他之前，还没有人用天体力学去解释行星的运动。这是一项具有革命性意义的研究。以前，天文学只是为了产生一种能使行星位置与观测一致的天体几何学；而刻卜勒的目标是寻找天体运动的真实物理原因，而不仅仅是去发明或修正几何结构。

在《新天文学》中，刻卜勒提出了火星运动的两条定律：1. 火星的轨道是一个以太阳为一焦点的椭圆；2. 太阳到火星的矢径在相等的时间内扫过相等的面积。随后，他把这两条定律推广到其他的行星、月球以及木星的一颗卫星。

1619 年，刻卜勒又在《宇宙和谐论》中提出了他关于行星运动的第三条定律：各个行星运行周期的平方与其离开太阳的平均距离的立方成正比。在这里，运行周期指的是行星沿轨道运行一周所需的时间，离太阳的平均距离

指的是行星绕日运行椭圆形轨道离太阳的最大距离与最小距离之和的一半。

用刻卜勒三定律计算出的行星轨道与第谷的观测是吻合的，与近代观测的结果也是一致的。全部九大行星——包括当时尚未发现的——都是按照这三个定律而围绕太阳旋转的。

刻卜勒极大地发展了哥白尼的学说。事实上，到最后他除了保留哥白尼的两个最基本观点——太阳静止地位于中心以及地球自转和公转——之外，几乎放弃了哥白尼学说中所有别的东西。他不仅建立了一个新的宇宙天文学体系，而且为整个天文学提供了一个新的动力学基础。行星运动定律的发现，成为后来牛顿万有引力概念产生的基石。

刻卜勒的个人遭遇是令人同情的，伴随他走完人生旅程的，基本上是贫困、孤独和疾病。但他在逆境中奋斗不息，为天文学和物理学的革命作出了卓越的贡献。

(5) 伽利略的发现

当刻卜勒正在孜孜以求地计算行星轨道、进行天文学理论的改造之时，在意大利，另一位伟大的科学家伽利略(1564—1642年)也在从事天文研究。

望远镜中的星空。在用望远镜观察天体并宣布一系列重大发现之前，伽利略已是享有盛誉的物理学家和数学家。

1564年2月15日，伽利略出生于意大利的比萨。他的父亲是个破落贵族，酷爱音乐和数学。伽利略幼年时期就已表现出对周围事物的强烈兴趣，而且喜欢探寻究竟。父亲希望他学医，认为这样既能发挥他的才能，也可找到收入丰厚的职业。18岁时，伽利略遵从父命进入比萨大学攻读医学，但数学和物理更使他着迷。在数学教师的帮助下，他从学医改为学数理。

在天文学方面，伽利略很早就接受了哥白尼的学说。他在1597年给刻卜勒的信中写道：“我许多年来已经是哥白尼理论的信徒。这个理论给我解释了许多现象的道理，而若按照那些公认的观点，则它们根本无法理解。我已搜集了许多论据来驳斥这些观点，但我不敢公布这些论据。”伽利略在信中提到，伟大的哥白尼成为人们嘲笑的对象，这使他担心公开发表自己的见解会造成麻烦。很显然，这种担忧并非是多余的，布鲁诺就是由于信奉包括哥白尼学说在内的“异端邪说”而在三年后被宗教法庭烧死的。

然而，作为一个科学家，伽利略不能不同他已证实的谬误作斗争。1604年，一颗新星的出现和对它的观测，使他同刻卜勒紧密合作，同亚里士多德派进行了论战。根据亚里士多德派的观点，这颗新星是不可能存在的。

1608年诞生的一项发明，为天文学开辟了一条新的道路。这一年，有个名叫汉斯·利帕希的荷兰制镜工匠制成了一种奇妙的“眼镜”即后来所称的望远镜，用它看远处的物体就象近在眼前一样。伽利略听到这个消息后受到启发，立即动手自己制造这种仪器。最初制成的望远镜结构比较简单，即把透镜安置在铜管的两端，用它进行观察，比用肉眼观察可以近3倍、放大9倍。后来经过改进，观察距离可近30倍，形状放大可达1000倍。

当伽利略把他的望远镜对准天空时，他获得了前所未有的重大发现。1610年3月，他出版了一本名为《星的使者》的小册子，报道了自己从望远镜中看到的一切。望远镜清楚地把无数前所未有的恒星展现在他眼前，这些恒星的数目比已知的要多10余倍。望远镜中的月球表面，并不象人们原来认为的那样平滑和光亮，而是粗糙不平，就象地球表面一样到处是巨大的突起物、

深深的峡谷和蜿蜒弯曲的东西。望远镜使有关银河系或银河的争论有了结果，因为银河系只不过是无数聚集在一起的星星而已。伽利略还宣布了一个他认为是最重要的发现，即有 4 颗星围绕着木星按自己的轨道运行。伽利略指出，这是最令他惊奇并促使他提醒所有天文学家注意的现象，因为它证明地球不是宇宙中唯一有自己卫星的行星，也证明一个像地球那样的星体可以在别的星体围绕其运行的同时，自己又围绕另一个星体运行。他认为，这是支持哥白尼体系的显著而又极好的证据。

在《星的使者》发表之后，伽利略继续用自己的望远镜发现了一些重要的现象，并为证实哥白尼体系提供了更多的依据。按照托勒密的学说，金星光亮的一面将始终朝着太阳，而不可能完全朝向地球；而哥白尼曾预言，金星像月亮那样也会出现相变。约在 1610 年底，伽利略发现了金星的周相：当它呈圆形盘状时，比它呈月牙状时小得多。这一发现有助于说明金星也是环绕太阳运行的。伽利略还注意到了土星的外形。他在 1610 年 7 月 30 日给朋友的信中写道：“我已经发现，土星由 3 个球体构成，他们几乎相触，从不改变相对位置，并沿着黄道带排成一行，中间的球 3 倍于另外两个。”但他后来又注意到，中间大球两边的小球消失了。实际上，他是首次发现了土星环，只是由于其望远镜的能力所限，而未能确定，因为从地球上看来，土星环的形状是变化不定的。1610 年 10 月，伽利略还观察到了太阳黑子。在此前后，刻卜勒和法布里修斯以及沙伊纳等人也注意到了太阳黑子的存在。伽利略确认了黑子位于太阳本身之上的观点，并根据太阳黑子由东向西的移动而确定太阳围绕自己的轴转动。

伽利略的成功使他声名远播。1611 年他前往罗马，在那里受到教皇保罗五世的接见和耶稣会神父们的欢迎。未来科学协会的先驱天文学学会为他举行了宴会并向他表示敬意。但是，还有许多教会权威人士和学者或者拒绝用望远镜来观察天体，或者认为通过望远镜得到的观察结果是虚幻的和不真实的，或者不接受伽利略对于望远镜中看到的一切所作的解释。

但伽利略对哥白尼学说的热情有增无已，因为他的发现证明了哥白尼关于地球只不过是太阳系中“另一颗行星”的观点是正确的。1613 年，他发表了《关于太阳黑子的信》，表达了自己对哥白尼学说的信念。此书在欧洲广为流传，也引起了教会的不安。虽然伽利略力图证明《圣经》和哥白尼的理论都是正确的，说上帝通过《圣经》的语言和自然的语言这两种形式来沟通真理，他还是在 1615 年受到警告。次年初，有关太阳位于宇宙中心和地球在运动的观点，也被宗教法庭宣布为虚妄的异端邪说。

《关于两种世界体系的对话》。在此后的 10 余年间，伽利略潜心于自己的研究工作而很少发表言论。但到 1632 年，他发表了《关于两种世界体系的对话》这部新著，再次震动了学术界和思想界。为了使自己的见解能为平民百姓所理解，伽利略此书没有使用当时学术著作惯用的拉丁语，而使用了意大利语。为了避免过于直接的表态触怒教会，他以三个朋友谈话的形式表达了支持或反对哥白尼体系的辩论。

《对话》没有公开为哥白尼的体系辩护，但在实际上为这个体系作了有力的说明。书中以望远镜观察到的月球表面、新星、太阳黑子等无可回避的事实，驳斥了亚里士多德的学说。在谈到是所有天体 24 小时内绕地球旋转一周、还是地球在这个时间内绕自己的轴转动一周而引起星空的视运动问题时，《对话》使人感到，地球转动的说法更可信服。《对话》解释了人们观

察到的行星的停止和逆行现象，认为这是由于地球的周年旋转而引起的。

当时，被奉为权威的亚里士多德学说，阻碍人们接受太阳居于中心和地球运动的新体系。亚里士多德认为，如果地球沿着绕太阳的轨道运行，那么恒星的视在位置就应发生变化；如果地球是转动的，那么一个垂直上抛的物体不应落到把它抛出的那个位置而应稍为偏西，因为该物体在空中时地球已朝东转过了一点，但在事实上物体一般都落到原来的位置；如果地球是转动的，那么地球表面不很靠近两极的物体将被离心力甩出地球表面。《对话》一一反驳了这些观点。该书认为，由于恒星与地球的距离极为遥远——至少是太阳与地球距离的 1 万倍，所以地球绕太阳运行时的恒星视差不易被觉察。该书引用惯性定律解释了上抛物体落回原地的的问题。例如，从一艘静止的或正在航行的船只的桅杆顶部落下的石头，都是落在桅杆脚下。在船只静止的情况下，桅杆、石头和空气同等地共有地球的自转运动，因此石头坠落时通过的空气将不影响其坠落的方向。如果在船只航行时石头的坠落有微小的偏离，那就是由空气的阻力所引起的，因为相对于航船来说，空气处于静止状态。至于离心力的问题，《对话》认为，由于地球绕自己的轴转动的速度较慢，所以离心力比引力要小得多，地球表面的物体因此而不受地球自转的影响而留在其表面。

《对话》是继哥白尼的《天体运行论》和刻卜勒的《新天文学》之后又一部伟大的天文学著作，它明白无误地传递了关于日心说宇宙的信息。特别是由于它通俗易懂，使得哥白尼的学说得到了空前的传播。伽利略收到了不少对他和他的著作表示支持和肯定的信件。有人赞扬他用简洁的语言表达了新的理论和新的观测成果，使普通人也能懂得其中的一部分。有人祝贺他在公众中取得了成功，给了哥白尼体系以生命力，并且揭示了自然的奥秘。还有人则认为，他的论据比哥白尼的论据更加有力，他的新提法和新发现意味着新时代的开端。

宗教法庭的审判。教会方面对于伽利略和他的著作，有着另外的看法。在天主教受到新教猛烈攻击的情况下，教皇乌尔班八世希望通过对伽利略的《对话》作出反应，以表示罗马教廷对于保持基督教义纯洁性的决心。某些敌视伽利略的教会人士，也趁机指责伽利略在《对话》中影射教皇是愚蠢的地心说捍卫者。于是，伽利略在 1633 年 2 月被宗教法庭传到罗马接受审讯。那时伽利略年已 70，且身患重病。6 月 16 日，根据教皇乌尔班八世的裁决，《对话》被彻底禁止，伽利略必须公开宣布放弃自己的见解，并且要受到无限期软禁。6 月 22 日的早晨，伽利略跪在宗教法庭面前，手摸福音书宣布：他相信教会主张和教导的一切都是真理，放弃并诅咒已遭指控的谬误和邪说，永不再以书面或口头形式发表任何可能使自己受到怀疑的见解。然而，伽利略完全是在受到巨大压力甚至被威胁要施以酷刑的情况下，无可奈何地被迫屈从的。据说，在公开认错后，伽利略曾顿足道：“但是，地球确实在运动呀！”虽然有的学者认为这句话纯属传奇，但伽利略确实依然执着地追求科学。作为虔诚的基督徒，他不能想象同教会对抗。但作为杰出的科学家，他不能放弃对自然的探索。

伽利略被隔离居住于佛罗伦萨城外的一所房子。在这里，他继续进行研究，只是回避了可能同教会冲突的问题。1636 年，他完成了《关于两种新科学的谈话》一书。由于意大利已经禁止出版他的著作，此书于 1638 年在荷兰出版。在生命的最后 4 年，伽利略双目失明，但在自己学生的帮助下，他依

然不断工作，直到逝世。

伽利略是用望远镜观察天体的第一人，他的发现，证实和发展了哥白尼的学说，为天文学革命作出了具有永久意义的贡献。

从哥白尼开始，经过第谷、刻卜勒，再到伽利略，天文学经历了革命性的变革。这个过程逐渐揭示了宇宙的奥秘，并为稍后英国科学家牛顿对物理世界的伟大综合奠定了基础。

三、认识地球——地理学的重建

1. 探险和发现

(1) 托勒密地理学说的复兴

中世纪的欧洲一度像患了健忘症一样，经历了对自然认识史上的大中断时期。

古希腊学者在运用数学和天文学研究地球方面，已经取得很高成就。如埃拉托色尼已较为准确地计算出了地球的周长，还首先在绘图时使用东西和南北两种走向的平行线，虽然他只是使这些线通过一些重要的地点，它们之间的距离也还是不规则的。希帕恰斯进一步提出，可以使这些平行线之间的距离相等，绘制出网格状的全球地图。他通过天文观测来确定地球表面一些点的位置，并把地球表面分成 360 个部分，即现在所说的“度”。托勒密整理和总结了古希腊的地理知识，写成《地理学指南》。他采用并改进了地图的网格体系，还确定地图上方为北，右方为东，并设计了把地球的球面投影到平面图上的方法。

但进入中世纪以来，地理知识几乎泯灭，基督教信仰掩盖了古代地理学家通过艰辛和严谨的努力描绘出的世界面貌：托勒密依据天文资料在经纬线组成的方格上绘出的已知陆地、山川、河海的轮廓，被以《圣经》故事为依据的想象中的世界形状所取代。地理学已成了神话、传说和教条的大杂烩。事实上，在中世纪的学校课程中没有地理学，连“地理学”这个词在英语中出现也已是 16 世纪了。

12 世纪中叶，在中国具有悠久传统的方格地图制作方法通过阿拉伯人传到了欧洲，这对于欧洲人重新发现古典地理学起了促进作用。

蒙古的征服和欧亚之间陆上交通的阻断，使航海探险受到刺激。但对于欧洲人来说，要驶出地中海前往亚洲，中世纪流行的基督教地图显然是于事无补的。于是，托勒密的地理学说被重新认识。这是文艺复兴时期恢复古代学术的潮流中的一个重要方面。

15 世纪初，托勒密的地理学著作被译成拉丁文，并开始在欧洲流传。拉丁文译本的第一次印刷出版是在 1475 年。很快，托勒密的学说和地图被奉为经典，受到普遍尊重。但由于托勒密掌握的可靠资料有限，他的世界地图也就存在一些重大的缺陷，如他对地球圆周的估计大大小于实际，又把亚洲的东部边缘远远向东延伸，从而使亚洲东端与欧洲西端之间未知地区的范畴明显缩小了。这些错误对近代初期的航海探险活动，产生了很大影响。不过，尽管有种种不足，托勒密地理学说的复兴，仍应被认为是重建地理学的开端。

(2) 葡萄牙的航海活动

远航的动因。地理大发现是具有划时代意义的重大事件，它同伽利略用望远镜发现月球上的山脉和木星的卫星一样，对人类认识自然、发展科学起了巨大的推动作用。

然而，地理发现的直接动因，却是商业利益。

在中世纪的欧洲，来自东方的调料或香料，由于其神奇的调味、药用等功效而极具诱惑力。由于它们产自遥远的地方，要通过漫长的海路或陆路经阿拉伯而运到欧洲，其价格之昂贵令现代人难以置信。例如，胡椒在 11 世纪

的欧洲是以颗粒来计算的，其价格同白银一般。不少城市和国家把它视同贵金属，当作支付手段。“胡椒袋”经常被用来称呼某些巨富之人。但是，如果知道了这些东方之物到达欧洲的艰难旅程，对其稀罕珍贵的程度也就不难理解了。由于埃及和叙利亚控制了红海并使欧洲与东方分开，欧亚之间的所有交易都要经过阿拉伯商人来进行。西方各国摆脱这种状况的要求日趋强烈。十字军东征在一定程度上也包含着基督教的欧洲为打开红海通道以与东方建立直接贸易的历史性努力，但是这一目标没有达到。正是在这种情况下，才产生了探索另一条通往东方的海上通道的愿望，而这一愿望却导致了一个新时代的开始。

亨利的怀疑和希望。根据托勒密对地球的描绘，大西洋是一个无边的未知水域，沿非洲海岸向南也是无法通行的，因为这块大陆似乎一直往南延伸，直至同南极大陆相连，其间没有海峡存在。这种地理学观点对葡萄牙来说，是令人沮丧的。这个位于欧洲最西端的国家与当时被认为是唯一的通航之海的地中海无缘，它面临的只是一片水的荒漠——大西洋，而在它南面的非洲，是一个在欧洲人心目中神秘莫测的大陆。在葡萄牙向海外发展自己利益的欲望面前，存在着看来是无法逾越的障碍。

葡萄牙王子亨利（1394—1460年）对葡萄牙的这种命运表示了怀疑。如果托勒密的意见是错的呢？要是他真的错了，葡萄牙将是开辟新航路的先锋，因为它将比别的欧洲国家处于更好的位置。

亨利的怀疑并不是没有依据的。西来的海浪经常把陌生的树木残枝冲上葡萄牙的海岸。古希腊历史学家希罗多德曾经提到：腓尼基的一支船队曾驶进红海，两年之后，却出人意外地通过地中海西端的直布罗陀海峡而返回了祖国。12世纪中叶，一个阿拉伯学者曾在一幅地图上准确地画出撒哈拉大沙漠那边的一个“富有的国家”，即现在的几内亚。

作为葡萄牙的王子，亨利在1415年就随父亲远征摩洛哥，在占领休达后就任当地总督。1419年改任葡萄牙南部的阿尔加维省总督。但亨利对权势并无兴趣。探明未知世界和为葡萄牙开辟新利益的欲望，推动他以数十年精力去组织远航探险。他在萨格里什半岛——欧洲西南角的终端——修建了城堡，吸引和招聘了一大批海员、地图绘制者、天文学家、旅行家、仪器制作者和造船工匠，其中不仅有葡萄牙人，还有犹太人和阿拉伯人、意大利和德意志人以及斯堪的那维亚人，后来还加进了非洲西海岸的土著。萨格里什成了葡萄牙航海探险的大本营。

亨利相信，非洲是可以绕过的大陆，在某个地方必定存在着一条尚未被发现的通向印度的海上通道。在那时，亨利的这种想法是极其大胆的，也是充满幻想的，然而，正是这种信念，揭开了欧洲人探索神秘海洋的序幕。

开始探险。从1420年开始，亨利陆续向海外派遣船队，沿摩洛哥的大西洋海岸向南探索。其总的目标是寻找一条绕道非洲通往印度的海路，但在开始的时候，亨利显然只是希望了解比博哈多尔角更远的地方，因为那时还没有人确切知道这个海角以南的情况。博哈多尔角是加那利群岛之南，今西撒哈拉海岸稍微突出的一个海岬。这里海域的暗礁、险滩和激流被葡萄牙水手视为畏途，没有一条船能够通过这里而又安全返回。据传说，海角那边是“黑暗之海”，航海者被恐惧所控制，没有人敢航越博哈多尔角。

为了航越令人生畏的博哈多尔角，葡萄牙人设计制造了一种新型的远洋探险船只。当时，在地中海上航行的船只，虽然载重已有达到600吨以上的，

但一般都只适合于顺风航行。而为了探索未知的海洋，需要能够在陌生的水域作长途航行，并能逆风行驶而返回葡萄牙的性能更好的船只。亨利王子在萨格里什造出的探险帆船载重量约 50 吨，长 70 英尺，有两根或三根桅杆，配有两三张三角帆。这种船不仅能顺风行驶，也能顶风行驶，而且吃水浅，便于进入近海水域探索或进行维修。与老式的威尼斯帆船比较，这种船更灵活、安全和快速。

在 1424—1434 年间，亨利先后 15 次派船队去作通过博哈多尔角的航行，但都未成功，直到 1434 年方才出现转机。这年，年轻的探险家埃亚内斯驾船进入了博哈多尔海角以南的水域。但他没有沿海岸通过此角，而是绕过了它。他在接近博哈多尔角时，没有进入危险区域，而向西航行一段距离后再转向南方。这时，他发现已绕过了这个海岬，而且在其以南的海洋上航行并不困难，沿岸地方富饶，物产丰盛。

越过博哈多尔角具有巨大的精神意义，它使葡萄牙的航海者消除了心理上的障碍，克服了迷信的束缚，发展了进取精神。在此之后，亨利派出的葡萄牙探险队，一次比一次航行得更远。

1445 年，迪尼斯·迪亚斯（活动时期约为 15 世纪中期）船长到达了塞内加尔河口。后来，他又发现了非洲最西端的佛得角，并因看到海岬上长满树木和香气芬芳的植物而将其称为“绿角”。

1446 年，葡萄牙船只发现了冈比亚河。

1457 年，为亨利效力的威尼斯人卡达·莫斯托（1432—1488 年）发现了佛得角群岛，还曾到达今几内亚比绍海岸。卡达·莫斯托写过关于西非的最早的介绍文字，其中包括对部落生活习惯、热带植物和动物的生动描述。

亨利在世时，他派出的船队最远到达的地方是塞拉利昂或象牙海岸。亨利自己从未直接参加远航探险，也未写过航海方面的著作。但他是第一位有计划地进行海上探险的组织者，并把毕生精力和全部财产用于这一事业。虽然亨利没有看到自己愿望的实现，他的船队甚至还未到达赤道，葡萄牙也还没有成为海上强国，但他的活动所取得的成果，为葡萄牙在海上的发展奠定了最初的基石。

到达东方。亨利开创的事业，在他死后的几十年中取得了长足的进展。最初的探险虽然成果有限，但却激起了普遍的热情。15 世纪 70 年代上半期，葡萄牙船只驶过非洲西南端的帕尔马斯角，向东进入贝宁湾，然后折向南，越过了赤道。1482 年，迪奥戈·康（活动时期为 1480—1486 年）发现了刚果河河口，并在那里树立了一根带十字架的石柱，以便作为葡萄牙发现此地的证据。这种方式后来便成为探险发现的习惯。

在 1485 到 1486 年间的第二次远航时，他到达了今西南非洲的海岸。

为建立同印度的贸易并同传闻中的阿比西尼亚基督徒国王结盟，葡萄牙国王若奥二世派出了两支探险队。走陆路的由他的侍从科维良（约 1460—1526 年）为首，取道巴塞罗那，再乘船到那不勒斯和罗德岛，随后进入穆斯林地区，到亚丁后前往印度。

在返回开罗后，他曾给若奥二世写信，详细叙述了他的经历和他获知的有关阿拉伯航海的情况以及印度的贸易情况。他指出，葡萄牙船只只要绕过非洲找到马达加斯加岛和东非的索法拉海岸，就能顺利地进入东方海域，到达印度的卡利卡特。

走海路的探险队由巴托洛缪·迪亚斯（活动时期约于 15 世纪后期）率领。

在探险队的3条船中，有一条是专门用来贮藏补给品的。这种前所未有的做法，使探险船队能够更深更久地进入海洋。1488年1月6日，探险队的船只被风暴刮得远离海岸，但继续向南行驶。风暴过去后，迪亚斯向东航行，数日不见陆地，就折向北，于2月3日重见陆地，而这已是非洲的东海岸，迪亚斯和他的探险队实际上已经绕过了非洲最南端的海岬，只是还没有看见它。他们继续沿海岸向东北方航行，到达了今南非开普省东南海岸的阿尔戈阿湾。这时已能确定，由海路可以到达印度，当地的穆斯林水手可以把他们引向目的地。迪亚斯想进入印度洋，实现亨利王子以来葡萄牙不断追求的绕道非洲到达印度的理想。但船员们已不愿继续航行，迫使迪亚斯掉头返航。在归途中，他们看到了非洲南端的海岬。由于探险队曾在这里遇到过狂风巨浪，迪亚斯称此岬角为风暴角。后来，葡萄牙国王认为通往富饶东方的航路有望，故称其为好望角。

在迪亚斯的惊人发现之后，葡萄牙由于国内的混乱和同西班牙的矛盾，整整10年没有采取进一步的行动来发展这一成果。直到1495年曼努埃尔一世即位后，才开始实施开辟从海上直达印度的航路的计划。

经过两年准备，1497年7月，伽马（约1460—1524年）率领由4艘船组成的船队驶离里斯本。他们经过加那利群岛和佛得角群岛，绕过好望角，于次年4月到达今肯尼亚的蒙巴萨和马林迪。在一个阿拉伯舵手的引导下，船队穿越印度洋，于5月20日到达印度南部商港卡利卡特。到达印度的航路终于被打通了。

伽马于当年8月底离开卡利卡特返航，为证明他已到达印度，船上还偷带了几个印度人。1499年9月回到里斯本时，4艘船只剩下了2艘，170名船员仅55人生还。不久，葡萄牙国王又组织了更大的船队，以期大规模开展同印度的贸易。1500年3月，由卡布拉尔（1467—1520年）率13艘船只出航。4月22日发现了一处陆地，后来以“巴西”命名。9月抵达印度卡利卡特。由于同当地穆斯林商人发生争执，有不少葡萄牙人被杀。卡布拉尔在进行报复之后，于1501年1月返航。1502年2月，伽马再次奉命前往印度，并建立葡萄牙在印度洋上的霸权地位。伽马的船队到达卡利卡特海面后，炮击城市，屠杀渔民，迫使卡利卡特统治者臣服葡萄牙并驱逐阿拉伯人，击溃了阿拉伯舰队。伽马于1503年回国，但他在印度海域留下了5艘船只，从而使亚洲海面上出现了第一支欧洲的长驻海军力量。

从亨利到伽马，葡萄牙的航海探险活动终于准确地查明了非洲的地理轮廓，对托勒密的论断作了重大修正，发现了通往东方的航路。这些成就不仅改变了人们的地理概念，使他们开始认识前所未知的世界，而且也改变了东方和西方之间的关系，从而推动了世界历史的进程。新航路的开辟，使世界贸易的中心和文化传播的中心从地中海转到了更加辽阔的大西洋和其他海洋的沿岸。

(3) 发现美洲

西航去东方的设想。15世纪中后期的葡萄牙是远航探险计划的发源地，这里聚集了许多渴望发现新航路、新陆地的航海家。1476年，出生于热那亚的西班牙犹太织工家庭的克里斯托弗·哥伦布（1451—1506年）来到了里斯本。

哥伦布14岁就上船出海，曾当过海盗。在热那亚时，他大概已学会了绘

制地图，并具有了比较丰富的航海经验。那时的热那亚是欧洲航海业的中心，在造船以及航海器材和航海图的制作方面均有较高水平。1476年，他服务的那条船被法国舰队击沉，幸好出事地点离葡萄牙海岸不远，他靠一根漂浮的长桨上了岸，尔后到了里斯本。那时他的兄弟巴托洛缪·哥伦布正在里斯本经营绘制、出售航海图的生意。

在亨利王子之后，葡萄牙船只继续进行着沿非洲海岸的探索，但葡萄牙王室也考虑过向西航行以到达东方的可能性问题。因为既然地球是圆的，向西越过大洋为什么不能到达印度呢？1474年6月25日，佛罗伦萨的一位占星家和宇宙志学者保罗·托斯卡内利曾通过一位葡萄牙牧师向当时负责远征和发现事务的若奥王子——后来的若奥二世——提供过西航的建议，并附上了一张他绘制的地图。他认为，从葡萄牙海岸出发向西，经过一定航程之后，就能到达那个出产各种香料的富庶地区，这是一条比绕道非洲更短的海路。但葡萄牙的航海家们对此表示怀疑，他们有理由认为，托斯卡内利低估了向西航行到印度群岛的距离。于是，托斯卡内利的信件和地图被束之高阁。

这时正在葡萄牙的哥伦布，一面经常出海，一面收集各种有关航海的资料 and 消息，并阅读各种宇宙志的书籍。大约在1480年，他看到了托斯卡内利的上述信件和地图。据说，他还与托斯卡内利通了信，探讨西航的问题。根据自己的经验和来自各方面的知识，哥伦布形成了与托斯卡内利的看法基本一致的计划。哥伦布确信，地球是圆的，从西方的边缘到东方的边缘的陆上距离非常遥远，而西班牙到印度之间的海路距离很近。此外，他还对神圣的以斯拉（活动时期约于公元前5世纪到前4世纪）关于地球表面是6份陆地和1份海洋的说法深信不疑。根据一系列错误的判断，哥伦布计算出亚洲的位置几乎正好是在美洲的大西洋海岸。

1484年，哥伦布向葡萄牙国王提出了关于开辟西方航线到达印度群岛的计划，并希望国王投资于这项探险活动。国王的顾问们认为，哥伦布大大低估了西航到亚洲的路程，因而他的要求没有被接受。尤其是在1488年迪亚斯绕过好望角并发现确有一条通向印度的东方航线之后，哥伦布在葡萄牙就失去了任何希望。

哥伦布登陆美洲。由于上述原因，哥伦布把希望寄托到葡萄牙在海上的竞争对手西班牙身上。1492年，西班牙国王在几经犹豫之后，终于同意资助哥伦布的探险计划。他得到了海军上将的名义和百万金币的装备。8月3日，哥伦布的3艘帆船驶离海岸，开始了历史性的航行。为了避开北大西洋强劲的西风，他先向南航行至加那利群岛，然后借助于东北贸易风，转航西方。经过60多天的航行，哥伦布和他的船员在10月12日凌晨登上了陆地。他以为自己已经到达了目的地亚洲的边缘，但实际上这里是巴哈马群岛中的瓜纳哈尼岛。这是欧洲人第一次发现并登上新世界的土地。随后，哥伦布又到了一些岛屿，寻觅想象中的黄金，最后在海地岛（他命名为埃斯帕诺拉）建立了一个据点，并留下了部分船员。1493年，他返航西班牙，受到隆重欢迎。他满怀信心地报告，他已到达了“印度群岛”。

1493年9月，哥伦布率领1000多海员和17条帆船第二次启程西航。到达埃斯帕诺拉后，发现当初留下的水手已全部被当地土著所杀，于是船队到了今多米尼加北部海岸，在这里建立了欧洲人在美洲的第一个城市伊萨贝拉。随后，他又发现了牙买加。当他在瓜卡纳亚博海湾沿古巴海岸向西航行时，他认为是沿着马可·波罗所说的中国南部海岸航行。而在他到达古巴西

端的科尔特斯湾时，海岸线开始折向南方，他却以为自己已经到了黄金半岛（马来半岛）东海岸的开端，并相信在其终端会出现通往印度洋的海路。然而，就在他只要再继续向前航行几十英里就能发现这里只是一个岛屿的时候，由于船只破损，给养不足和船员的不满，他决定返航。

1498年3月，哥伦布第三次西航，发现了特立尼达岛，随后还登上了南美大陆，但他又把自己登陆的土地误认为是海岛。回到伊萨贝拉后，由于同西班牙国王派任的总督发生矛盾，他被押回西班牙。但在两年之后，他又获准探索经过新领地通向新海洋的航路。于是，他最后一次向西航行，途中发现了马提尼克岛。在漂泊了两年之后，于1504年11月返回西班牙。1506年5月20日，哥伦布死于贫病交加之中。

哥伦布发现了新大陆，但他自己至死都以为是到了东方的印度群岛。

维斯普奇到达南美。在哥伦布第三次西航启程一年多之后，佛罗伦萨的商人和航海家维斯普奇（1454—1512年）也从西班牙南部的加的斯港出发向西航行，想找到哥伦布还没有找到的通往印度的海路。

维斯普奇出身于一个有名望的家庭，青年时代就服务于显赫的美迪奇家族。他对宇宙志、天文学有浓厚兴趣，博览群书，广为收集这类书籍和地图。1491年，他被派往西班牙的塞维利亚，管理美迪奇家族在那里的产业。经人介绍，他结识了哥伦布。在更多地了解海上探险事业之后，他的注意力逐渐从商业转向了航海。

在塞维利亚，维斯普奇自己筹集资金准备远航。在1499年5月开始的第一次向西航行中，他看到了哥伦布第三次探险所到之地以南的陆地。从这里继续沿海岸向东南方航行，发现了亚马逊河的入海口。维斯普奇得出结论：这是一块大陆。由于船只损坏及风向水流不利等原因，他被迫返航，归途中曾到过特立尼达。

通过这次航行，维斯普奇感到经验比理论更有价值，因为他的所见所闻否定了原来人们对未知地区的想象，如认为不可能有人生活在炎热地带等等。在航行中，他还在解决确定经度的问题上取得了进展。在向西横渡大洋的航行中，如何确定经度是一个难题。哥伦布远航时，只是用磁罗盘定出方向后凭经验和肉眼观察来估计航速和距离，而不能确定具体的方位。维斯普奇随身携带着有关月亮和行星的天文图表，一路上反复琢磨，最后得出了结果：在晚上观察一个行星与另一个行星的会合及其位置，尤其是月亮和其他行星的会合及位置，就可以计算出向西航行的距离。虽然在缺乏精密仪器的情况下，这种观测和计算的结果还不够精确，但维斯普奇运用这一方法算出的每一经度的长度和据此得出的地球赤道的周长，达到了当时的最好成绩。他算出的地球赤道周长只比实际长度少了50英里。

1501年5月，维斯普奇从里斯本启航，开始第二次探险。在朝西南方向航行64天后，他到达了巴西海岸，然后继续沿海岸向西南偏西方向航行，探索了大约从南纬5°到南纬50°之间的海岸线，发现了里约热内卢湾、拉普拉塔河口，直抵圣胡安湾，这里离南美大陆的南端已经不远了。他更加确信，这块新土地不是亚洲的一部分，而是一个新的洲。1502年9月回到里斯本后，他曾详细写下了他所见的南半球的天象、地理、植物、动物以及居民的人种特征和生活习惯。

但维斯普奇更感兴趣的不是这块新大陆，而是找到通过这里到达印度群岛之路。1505年初，他应西班牙宫廷之召，就任一个官方委员会的成员，并

受命在赤道以北向西航行，寻找哥伦布没有找到的海峡。1508年，他又被任命为西班牙首席领航员，负责所有航海事务。他在最后一次航行中染上了疟疾，于1512年逝世。

在维斯普奇逝世前几年，一个名叫马丁·瓦尔德塞米勒（约1470—1518年）的德意志地图绘制家，在1507年出版了一种木刻版世界地图。为了纪念亚美利哥·维斯普奇，瓦尔德塞米勒把哥伦布最先登陆和维斯普奇最先确认是一个洲的新大陆命名为“亚美利加”。起先，亚美利加只指南美洲，到1538年，麦卡托（1512—1594年）在绘制其世界大地图时，把这个名称扩大到了新大陆的北部。

卡伯特初探北美。与维斯普奇发现南美洲差不多同时，服务于英国的意大利航海家卡伯特（约1450—约1499年）出于同样的动机，到达了这个世界大陆的北部地区。

卡伯特出生于热那亚，后迁居威尼斯，学会了航海技术。他也象哥伦布、维斯普奇等探险家一样，对于向西航行可能到达亚洲抱有希望。约1484年，卡伯特来到伦敦，并于次年获得了英王亨利七世颁发的特许状，授权进行远航和探索尚未发现的土地，并享有当地的商业垄断权。显然，卡伯特的计划之得到支持是与哥伦布已经取得的成就有关的。哥伦布为西班牙发现新土地，引起了英国商人的激动，也促使英国王室采取行动。

1497年5月，卡伯特从布里斯托尔港启航，向西绕过爱尔兰后转向北，然后再朝西行驶，于6月24日在今纽芬兰岛的南部登陆。他在这里没有发现居民，于是继续沿海岸探索，到了今卡伯特海峡内的一些地方。卡伯特实际上已经到达了北美，但他也错误地认为，他已到达了亚洲的东北海岸。8月初，他回到布里斯托尔，宣称他将重返登陆地点，并从那里继续向西航行直到日本。1498年，他获准进行第二次探险，但这次出发后他再也没有回来。

(4) 环球航行

发现新的海洋。到16世纪初，人们终于认识到，从欧洲向西航行去东方的大洋上，横亘着新大陆这个屏障。为了在这个屏障上找到一个缺口，航海家们进行着不懈的努力。虽然这种努力未获成功，但在此过程中，人们进一步认识了新大陆。

1513年，一个名叫巴尔博亚（约1475—1519年）的西班牙人，成了站在新大陆上看到后来被称为“太平洋”的水域的第一个欧洲人。

出身于小贵族家庭的巴尔博亚，25岁时开始航海，随一个探险队去西班牙岛（即海地），后来又到了西班牙在达连湾东岸的殖民地，在那里组织建立了一个永久性居民点，就任当地行政长官，并在1511年由西班牙国王任命为达连临时总督和军事指挥官。由于一个偶然的时机，他从当地土著那里得知，越过南方的山脉，就能看到另一个大海，海边到处都是黄金。于是，他带了几百人越过热带丛林和沼泽，在1513年9月25日从山顶看到了南方的海洋。当时之所以把太平洋称作“南方的海洋”，是因为巴尔博亚越过的巴拿马地峡是东西走向的。4天后，巴尔博亚一行到达了海滨，举行了接收这个海洋和海洋周围土地的仪式。欧洲人终于发现了渴望已久的新的海洋。

1517年，巴尔博亚准备进一步勘查“南方的海洋”。但因同新任西班牙总督的矛盾，他被逮捕并被押往达连，于1519年1月被处死。

麦哲伦的计划。随着欧洲人发现美洲和太平洋，人类生存的这个星球

的形状和大小第一次被比较正确地认识了。一支支的船队开辟了一条条的航路，一次次的探险查明了一块块的土地。不过，已经在西印度群岛站稳脚步的西班牙，仍然希望把这里作为前往东方的立足点。此外，根据 1494 年的托德西利亚斯条约，西班牙和葡萄牙对新世界的主权以佛得角群岛以西 370 里格（约 1200 海里）处的南北向直线为分界线；这条线还应延伸到地球的另一边，就如用刀切一个苹果一样。但当时没有人知道，在已发现的新大陆与亚洲之间还有什么，地球那一边的分界线将如何划出。为了弄清这些问题，还必须进行新的探索。西班牙国王多次派出探险队，试图绕过新大陆去东方，但新大陆如巨墙一般挡住了前进的道路。

终于，一个葡萄牙贵族来到西班牙，并以西班牙的名义，完成了绕过新大陆到达东方的伟业。他的名字叫费尔南德·麦哲伦（1480—1521 年）。

麦哲伦年轻时曾是葡萄牙宫廷的侍从，1505 年 25 岁时，随葡萄牙船队去印度，1511 年参加过攻打马六甲海峡的行动，后来当上了一条船的船长。1513 年在同北非的摩尔人作战时受伤，从此终身跛足。由于在葡萄牙郁郁不得志，他于 1517 年去了西班牙。与他一同投奔西班牙的，还有他的朋友、宇宙志学者鲁伊·法莱罗。此人虽未上过船，但被认为是天文学和制图学方面的权威。他发明了自己的经度算法，制作了可能是当时最好的海图和航海仪器，并为麦哲伦后来的事业提供了巨大帮助。

在去西班牙之前，麦哲伦已是一个具有丰富经验的航海家。他曾四次绕过好望角，他会准确使用航海仪器，他对东方海洋的了解和对航海知识的掌握，在整个葡萄牙除了已经年迈的达·伽马之外，是无人可比的。他已同法莱罗一起制订了一个绕过新大陆到达东方的方案，他确信在大西洋和新发现的南方的海洋之间有一条海峡，他能够找到它并通过它实现环球航行。

16 世纪初年，曾有一条葡萄牙探险船在新大陆靠近南纬 40° 的地方发现了一个海湾，它在这个海湾里航行了两昼夜，仍然看不到边。由于暴风雨，这条船没有继续向前即返航了。而它的船员们认为，这是一条东西向的宽阔海峡，可能连接两个海洋。据此，葡萄牙宫廷的制图家在地图上标明了这一点，麦哲伦曾在秘密档案中看到了这张图。但那条葡萄牙探险船在南纬 40° 附近发现的“海峡”，实际上应该是拉普拉塔河的入海口，而葡萄牙宫廷保存的地图上还没有标出拉普拉塔河。所以，当麦哲伦断定自己能找到海峡的时候，是过分地相信了上述资料和地图的真实可靠程度。然而，正是这一错误的判断鼓舞和引导麦哲伦去探索和发现他那个时代地理学上的最大奥秘。

实现环球航行。1518 年 3 月，西班牙国王接受了麦哲伦提出的探险计划。经过一年半的准备，麦哲伦于 1519 年 9 月 20 日率领了 5 条帆船离开了西班牙南部港口圣卢卡尔，开始了他的著名远航。

经过两个月的航行，探险船队从加那利群岛到了巴西的东端，并由此沿海岸向西南方向航行，仔细搜寻可能的海峡通道。1520 年 3 月，船队到了约在南纬 49° 的圣胡利安港，并在此休整过冬，直至 10 月份南半球的春天到来时才继续南航。10 月 21 日，在航经克鲁斯河河口 4 天之后，他们又看到了一个像大河河口或海湾入口的地方，这是在南纬 52°。麦哲伦进入了这个迷宫般的水域。这里水道曲折，岛屿密布，随时都能把人引入歧途，而狂风暴雨也随时可能把木帆船掀翻、撞碎。凭借着无畏的勇气和熟练的航行技术，经过艰难的勘测和摸索，1520 年 11 月 28 日，麦哲伦和他的探险队终于走出了这个后来被称为麦哲伦海峡的水域，看到了一望无际的海洋。由于在此后

的航行中，他们再没有遇到风暴，就将这个海洋称为“太平洋”。

麦哲伦首先沿南美洲西海岸向北航行了一段距离，然后转向西北，于1521年2月在西经158°处越过了赤道，3月6日到达关岛。在停留了3天之后。他们又航行了一个星期，来到菲律宾群岛，这是欧洲人从未到过也从未提及过的一个群岛。3月底，船队驶抵马萨瓦岛。在这里，当年麦哲伦在马六甲买的一个奴隶、这次随他远航的仆人，听到了自己的母语。麦哲伦意识到，他已到达了12年前他随同伽马的船队绕过非洲到达的马来语地区。他终于找到了向西航行通向东方的航路，而这是哥伦布、维斯普奇和其他许多探险家所未能找到的。他实际上已经完成了环球航行，他已经证明了地球是圆的，在海洋上朝着一个方向航行，最终能够回到出发地点。

4月27日，麦哲伦在同马克坦岛的土著发生冲突时被杀。船员们分乘剩下的两条船，于11月8日抵达印度尼西亚东北部的马鲁古群岛，即摩鹿加群岛——欧洲人梦寐以求的“香料群岛”。在这里又留下了一条必须修理的帆船，只有“维多利亚号”一条船开始了绕地球半圈的回程航行。1522年9月6日，“维多利亚号”在经过了将近3年的艰苦航行之后，回到了西班牙的圣卢卡尔港。这次人类历史上空前的航行，证实了所有的海洋都是互相连接不可分割的，纠正了原有宇宙志中的错误概念，从而使人类认识了自己生活的这个星球的真象。

(5) 深入未知世界

美洲与亚洲间的直航。在麦哲伦的探险队首航太平洋后，又有不少航海家探索了这个烟波浩淼的大洋。

1565年，西班牙人乌尔达内塔(1498—1568年)开辟了一条从西班牙的美洲殖民地到亚洲殖民地之间的直接航线。乌尔达内塔曾在摩鹿加群岛进行过8年的探险，后来奉西班牙国王之命，率探险船队从墨西哥远航至菲律宾，然后返回美洲。在经过5次失败的尝试之后，他终于在1565年4月到达宿务岛，并在6月1日启程返航。由于他选择了较高纬度地区航行，因而避开了台风的影响，回到了巴拿马地峡。他开辟的这条“马尼拉帆船航线”，建立了美洲和亚洲之间的直接联系。

寻找南大陆。在南北美洲的轮廓逐渐显现，亚洲和非洲的形状更加明确时，欧洲的宇宙志学者和航海探险家对传说中的南大陆产生兴趣。麦哲伦穿过以他自己的名字命名的海峡之后，一些地图仍把这个海峡南边的陆地看作是未知的南大陆的北缘。

西班牙航海家曼达纳在1567年率远征队从利马出发，去探寻这个据说存在于南部海洋中的大陆。他们未能找到这个大陆，但到达了距澳大利亚不远的海域，发现了所罗门群岛，然后向北越过赤道，再向东航行到北美的加利福尼亚，从那里沿海岸南下回到利马。

16世纪70年代，英国航海家和海军将领德雷克(约1540—1596年)的著名远航，可能也包括了寻找南大陆的目的。他也认为，南大陆与南美洲之间只相隔了一个麦哲伦海峡。在1578年8月穿越这个海峡时，他探索了海峡以南的火地岛等岛屿。

1605年，西班牙的托雷斯从秘鲁出发去寻找“未知的南方陆地”，结果发现了新赫布里底群岛，继而又到达了新几内亚的南部海岸。不久，荷兰人扬斯聪最先进入今卡奔塔利亚湾而到达澳大利亚。另一些荷兰探险家在1616

—1630 年间探索了澳大利亚西岸和西南岸的部分地区。1642 年和 1643 年，荷兰航海家塔斯曼发现了今塔斯马尼亚岛和新西兰。

上述探险活动发现了澳洲大陆，但对它的详细情况以及它与想象中的南大陆的关系尚未弄清。

开辟西北通道的尝试。寻找能够替代麦哲伦海峡到达亚洲的通道，是 16 世纪和 17 世纪初航海家们的重要目标。当时人们认为，绕过美洲北部海岸到东印度群岛是可能的方案。虽然寻找这条西北通道的努力最终归于失败，但为此目的而进行的探险航行也导致了不少重要的地理发现。

1534—1541 年间，法国探险家雅克·卡蒂埃曾三次到达北美洲的大西洋海岸，他是受法王弗兰西斯一世的派遣去寻找香料和黄金，并探索去亚洲的西北航道的。在首次航行时，他进入了圣劳伦斯湾，并到了安提科斯提岛，抓了两个土著居民后返航。第二次，他在那两个土著的带领下，溯劳伦斯河而上，到达了今蒙特利尔。第三次，他仍未能到达比蒙特利尔更远的地方，而且，他从这里带回去的黄金、钻石也都不是真的。卡蒂埃探险的失败，使法国在此后半个世纪中没有积极进行海外开拓。

英国人弗罗比歇（1535—1594 年）也曾先后三次为寻找西北通道而远航。1576 年，他的 3 条船经过格陵兰到了今巴芬岛，并把该岛南端的海湾（今弗罗比歇湾）当成了他要寻找的通向太平洋的海峡。1577 和 1578 年，他又两度到达这里，发现了今哈得逊海峡。

另一个英国探险家戴维斯在 10 年之后继续为此努力。在首次航行中，他沿南格陵兰海岸绕行至巴芬岛东南的坎伯兰半岛，并认为坎伯兰湾可能就是通道。第二次航行时，他探索了格陵兰的西南海岸并深入其内地，然后沿坎伯兰半岛和拉布拉多半岛的海岸返航。他于 1587 年进行的第三次探险，直抵远达北纬 $72^{\circ}12'$ ，处的格陵兰西海岸。现在把格陵兰和巴芬岛之间的那个海峡叫作戴维斯海峡。

哈得逊（—1611 年）也是有名的英国航海家。1609 年，他与荷兰东印度公司签订合同探寻经北冰洋到亚洲的航路，但因风暴而改航向西，寻找西北航道。在北美洲海岸，他南至今南卡罗来纳，北达今哈得逊河口。1610 年的航行中，他驶抵格陵兰后进入现在以他的名字命名的哈德逊海峡，然后到达今哈得逊湾，但终未找到可通向太平洋的航道。

北极探险的开始。与寻找西北通道差不多同时进行的，是探索沿欧洲北部海岸去中国的航路。

1553 年，由威洛比和钱塞勒（？—1556 年）率领的 3 艘英国探险船去寻找这条东北航路。途中，由于暴风雨的袭击，威洛比不幸遇难，3 条船只剩下了钱塞勒指挥的那一条。他继续沿挪威海岸航行至瓦尔德，从那里进入白海，到了俄国的北德维纳河河口。当地统领把这一消息报告莫斯科后，钱塞勒被伊凡四世召到首都，商谈了英俄间海上贸易的问题。钱塞勒于 1554 年返航回国，次年创办莫斯科公司，独家经营对俄贸易。他于 1555 年再度赴俄，1556 年回国时遇难身亡。

1556 年，曾同钱塞勒一起进行航行的巴勒在这一方向上继续往东航行，到达了伯朝拉河口和新地岛。

北极的风暴和冰雪使探险航行充满了困难和危险，但勇敢的探索者仍在不断延伸向东以及向北的航线。

荷兰人巴伦支（约 1550—1597 年）曾三次到北极探险，“巴伦支海”即

为纪念他而命名。1594 年他到了新地岛的北角；次年经过瓦加奇岛进入喀拉海；1596 年发现了熊岛和斯匹次卑尔根群岛。在试图环绕新地岛的航行中，他的探险队被冰块包围而遇难。

哈得逊对北极探险也作出了贡献。1607 年春天，他受莫斯科公司之聘，进行了力图在北极附近找出一条通往中国和日本的航道的探险。他首先向北航行，直到北极浮冰带的边缘，再转向朝东，到达斯匹次卑尔根群岛后，沿着巴伦支的路线作进一步探索，但因遇到冰原而被迫返回。

2. 地图绘制

(1) 阿比安父子

16 世纪，地图绘制技术有了显著进步。萨克森的阿比安父子为此作出了贡献。

彼得·阿比安（1495—1552 年）在 1520 年绘制了一张世界地图，其中用亚美利加这个名字来称呼新发现的南北美洲。在 1524 年的一本著作中，他对绘制和使用地图的基本知识作了介绍。稍后，他又通过《宇宙结构学图册》解释了宇宙结构学、地理学和地图绘制术的区别：宇宙结构学研究整个宇宙，地理学研究作为一个整体的地球，而地图绘制术则研究各个特定的局部。他介绍了确定地球纬度和经度的一些方法，对已知世界进行了全面综合，编制了一个地名索引，一些重要地方还注明了经纬度。书中的世界地图，采用了新方法绘制，赤道和纬度线为直线，中央一条子午线也是直线，但其两边的其他子午线都是曲线，而且其曲率依次逐渐增大，图面被划分成 36 条块，它们在赤道处宽度相等。这种制图法此后被长期使用。

彼得·阿比安死后，他的儿子菲利普·阿比安（1531—1589 年）曾接替了他在因戈尔施塔得大学的教职，但后来又转往蒂宾根大学任教。在菲利普·阿比安的学术活动中，最重要的一项是自 1554 年开始对巴伐利亚所作的历时 7 年的考察，其成果是绘制了《巴伐利亚地图 23 种》。这些地图被认为是精确地形图绘制的开端。

(2) 麦卡托与投影法

自从 15 世纪 70 年代托勒密的《地理学指南》拉丁文译本出版以来，欧洲的地图绘制和出版十分活跃。这既是当时地理学发展的促进因素之一，也是其结果之一。

出生于佛兰德的麦卡托，是 16 世纪中后期最杰出的地图绘制者。他是鞋匠的儿子，在伯父的资助下进入卢万大学读书。起先学习哲学和神学，后来转向数学和天文学，还学会了仪器制作和测量术。毕业后，为了生计而开设一家作坊，专营科学仪器制造和地图铜版的镌刻。他曾因制作的仪器十分精巧而受到查理五世皇帝的资助，但他在绘制地图方面的才智和成就更为卓越。

麦卡托的第一幅地图作品是巴勒斯坦地图，于 1537 年问世。接着，他耗时 3 年，完成了《对佛兰德的最精确描绘》。随后，又精心绘制了洛林地图。1552 年，他迁居普鲁士的杜伊斯堡，并担任了克利夫斯公爵的宇宙志专家。在这里，他相继出版了第一幅近代欧洲地图和英国地图。在欧洲地图上，他纠正了托勒密对欧洲的东西跨度所作的夸大估计，并使地中海的范围不像托

勒密描绘的那么巨大而比较接近实际。

1569年，他出版了用自己发明的投影法绘制的《根据航海资料修正描绘的新的和不断扩展的世界》。这是一幅具有划时代意义的世界地图，尺寸为2米乘以1.32米。图中的赤道为一条直线，相继的子午线是与赤道垂直的等距平行直线，纬线是垂直于子午线的直线，但各条相继的纬线在靠近两极时，间隔距离渐大，因此，在任何区域中纬度都按照与经度相同的比例放大。这种地图为航海提供了极大便利，因为在此之前，地图无法体现地球的球形，由于子午线集中到南北两极的一个点上，海员们难以在图上详细精确地绘出航线。

麦卡托解决这个难题的方法是这样的：他把一个桔子当作地球，按经线走向把桔子皮切割开，然后将其剥下依次平摊于桌上；他设想这些桔皮片是有弹性的，把每片桔皮窄而尖的两端压延伸展开，使其成为长方形；然后把所有的长方形拼接起来，原来球形的表面就成了一个大的长方形平面，只是越靠近两极的区域，其尺寸也就越是放大。这就是麦卡托投影法。根据这个方法绘制的地图，有平行的经线和平行的纬线组成的坐标方格，在上面可以方便地按同一角度画出跨越子午线的罗盘方位。

麦卡托还把包括法国、德国、荷兰、意大利、希腊等国在内的103幅地图编成地图册，分3册先后出版。“地图册”这个名词，就是由他首先使用并逐渐为人们所熟知的。不过，地图册的主要发明者，是与他同时代的奥特利乌斯（1527—1598年）。

(3) 地图册的出现

奥特利乌斯生于安特卫普的一个商人之家，没有上过大学，但很有才华。他作为一个地理学家的生涯是从地图制版开始的，而他同麦卡托的私交则加强了他对制图术的爱好。

奥特利乌斯首先是为了出售地图养家活口而从事地图制版、装饰和出版的。他经常奔波于英国、法国、德国、意大利等欧洲国家之间，买进当地制作的地图，再带回安特卫普，经修饰、裱装后出售。这些地图对安特卫普的商人十分有用，因为在当时宗教和王朝战争连绵不断的情况下，他们需要可靠的地图的帮助，以选择安全和便利的航线来运输自己的货物。

一个名叫霍夫特曼的商人收藏了各种各样的地图，但感到使用不便，于是就请奥特利乌斯制作一些规格统一的地图，并把每30张合订成一册，以便于携带和收藏。奥特利乌斯在完成这项工作时，生产出了一种新书，即地图册。由于地图册很受欢迎，奥特利乌斯在麦卡托的帮助下，又收集了许多当时最好的地图，并把大地图缩小到标准尺寸，编成地图册出版。他的最主要作品，是包括了70幅地图的《世界概观》，这本地图册于1570年5月印刷出版。它的第一页是一幅世界地图，接着是4幅已知的四大洲的地图，再往后便是国别和地区的专图。地图册中有文字说明，还附有编者所参考或复制的地图的原作者姓名。

奥特利乌斯的地图册，迅速由拉丁文译成荷、德、法、西、意、英等各种文字出版，到他逝世时已有28种版本。

奥特利乌斯的工作十分严谨，地图册中凡不是他自己绘制的地图，都是从现有地图中挑选出来并作了修改的，而且都注明了它们的出处。麦卡托曾赞扬他小心细致地为作者的辛勤劳动增光，同时又忠诚地改正了他们的错

误，从而反映了地理的真实面目。

3. 地理学研究

(1) 明斯特尔和克鲁弗尔的著作

16 世纪上半期，一个德意志学者因其地理学著作而闻名，他就是明斯特尔（1489—1552 年）。

明斯特尔曾就读于海德堡大学，后来在巴塞尔大学教授希伯来语。自 30 年代始，他的一系列地理学方面的作品相继问世，其中有《德意志记述》、《欧洲地图》、《新世界》等。他还编纂了托勒密等古代学者的地理学著作。1544 年，他的名著《宇宙结构学：概论》在巴塞尔出版。这是第一部用德语写成的介绍已知世界的巨著，共分 6 册，卷首有 24 幅双页地图。第一册的内容是综述托勒密的学说和介绍对世界的新发现。第二到第六册分别论述西欧国家、德国、波罗的海国家和希腊、亚洲和“新大陆”、非洲。书中还附有许多木刻插图，描绘各地自然景观和风土人情。虽然这部著作使用的有些材料的可靠程度不够高，尤其是最后两册，但它仍反映了当时对地理学的认识水平，且文笔优美，因此，仅德文版就出了 40 种，还译成多种欧洲文字出版。

1624 年，德意志贵族克鲁弗尔（1580—1622 年）出版了一部与明斯特尔的《宇宙结构学：概论》类似的著作，书名是《古今地理学引论》，共 6 册。第一册根据托勒密的基本观点叙述了全球地理，其余各册分别叙述各地区的地理：第二册——西欧；第三册——德国、北欧和意大利；第四册——东欧；第五册——亚洲；第六册——非洲和美洲。对各地区的叙述，主要集中于其地理范围、地形、地貌、政治区划的变动以及物产和人种等。这部著作在问世之后的一个多世纪中，是享有盛誉的地理学权威之作，曾有多种版本和译本。

克鲁弗尔在古地理学和考古学方面，也有研究。他认为，古代历史应建立在可靠的古代地理知识的基础之上，而获得这种知识的途径，除了研究古代文献之外，就是对古代文明的遗址作直接的考察。他曾游历欧洲，致力于收集从挪威到意大利这一广大地区的地形的第一手资料。1616 年，他的《古代德意志》一书出版，这本书是以塔西佗的著作作为楷模而写成的。此后，他又着手有关意大利的古地理学和考古学的研究，其成果《古代意大利》在他逝世两年后出版。他在书中指出了意大利古文献中所存在的某些错误，修正或摒弃了早期罗马史中属于传说的部分内容。

(2) 卡彭特为地理学定义

任职于牛津大学的英国地理学家卡彭特（1589—1628 年？）也许是近代第一个明确地为地理学定义的学者。

卡彭特认为，地理学是一门“教导怎样描述整个地球的科学。”他对地理学进行了正规的学术性研究，对地理学的术语作了严格定义，其主要成果是 1625 年出版的《分两册论述的地理学，全球和局部》。

卡彭特把地理学分为全球性的和区域性的。他的著作的第一册，论述了地理学的定义和分类、地球的引力、地磁、地球运动、地球表面、地球测量和经纬度的确定。在第二册中，他把一个地方的地貌定义为该地方的大小、边界、自然特征和性质、地磁、空气等因素的综合；探讨了地理勘察和地图

绘制的原理、水文地理和导航技术；描述了陆地、河流、山脉、峡谷、平原、岛屿等各种类型的景观并加以定义；叙述了历史上著名的洪水和地震，以及国家的地理条件与国民气质之间的联系。卡彭特的这部著作是 17 世纪上半期有代表性的地理学著作，出版后产生了较大影响。在地理学的重建过程中，它占有一个重要的位置。

(3) 瓦伦纽斯的《普通地理学》

德国地理学家瓦伦纽斯（1622—1650 年）在 17 世纪地理学发展中的作用是不可忽视的。

瓦伦纽斯出生于汉诺威，起先曾学医，后来改学地理。1649 年，他曾出版了一本介绍日本、暹罗和非洲情况的书。1650 年，他在 28 岁的时候去世。但也在这一年，他的杰出的地理学著作《普通地理学》出版。

瓦伦纽斯在广泛的科学基础上，创立了普通地理学。他认为，地理学是解释地球及其各个部分的外表、位置、大小和运动情况的学问，地理学知识所根据的原理，包括纯数学的命题、天文学以及经验和观察。他把普通地理学分成三部分：关于地球本身的绝对地理学，关于地球同宇宙其余部分的关系所引起的各种现象的相对地理学，关于各个地方相互关系的比较地理学。他的著作也分成了与此相应的 3 册。例如，第一册包括的内容有：关于地球的外形、地球的运动及其在宇宙中的位置、地球的物质组成；关于各个主要大陆、岛屿、半岛、山脉、地峡、矿藏、森林和沙漠；关于各个主要海洋、海湾和海峡，以及湖泊和河流；关于海洋与陆地的转换条件以及发生过这种变迁的地区；关于地球的各种散发物升腾而构成的大气现象，等等。

瓦伦纽斯因其《普通地理学》一书而被认为是推动近代地理学发展的主要人物之一，他在一个多世纪里被公认为这一领域的权威。牛顿曾在 1672 年将此书修订后出版，并让听他的地理课的剑桥大学学生使用。

(4) 阿格里科拉的开创性工作

德意志采矿和冶金学家阿格里科拉（1494—1555 年）被认为是矿物学之父，他在地学研究方面也作了许多开创性的工作。他的《论地下矿藏的源地和成因》、《论化石的性质》、《论金属》等著作，都包含了他在地学方面的见解和成就。

阿格里科拉最早明确地论述了水和风在自然景观形成中的作用。他指出，雨水、洪流和江河的冲刷既能造成山坡、丘陵和山脉，又能把它们推倒夷平；强劲的风既可以把砂土聚集在一个地方，也可以把它们刮走。他还解释了地震和火山喷发的原因，认为地球内部的热量或某种地下火使地下产生大量水汽并形成巨大力量，当它试图从最近的地方突破时，就造成了地震和火山爆发。

阿格里科拉探讨了矿床的成因，认为地下水侵蚀地球内部的物质，而这些物质在地下水流经的通道中沉积而生成矿石。在《论化石的性质》一书中，他详细地研究了地壳的成分——当时“化石”这个名词被用来称呼从地下发掘的各种物质。他把地下的无生命物质分成两大类，一类为流体或气体，一类为矿物。矿物可以是由不同物质组成的混合物，如土、石和金属组成的块体，也可以是由同种物质凝结而成的简单矿物或复合矿物。简单矿物有 4 类：土（粘土、白垩、赭石以及其他遇水会变成紧密粘土的物质）、凝固溶液（盐、

硝、矾、硫等遇水会液化的物质)、石(各种宝石)、金属(金、银、铜、铅、锡、铁等及其合金)。复合矿物指的是那些由两三种简单矿物组成,但已完全融合以至其最小部分也包含了其整体中所包含的各种物质。这种复合矿物不同于前述混合矿物,因为混合矿物中每种作为组分的简单矿物都保留着自己的形态,能够用火、水、甚至用手把它们分离。方铅矿、黄铁矿等属复合矿物。

阿格里科拉依据矿物的外在性质和形状、颜色、光泽、味道及溶度和熔度等,对约 80 种矿物进行了描述和分类,而这中间至少有 20 种是人们尚未描述过的。

四、研究生命——生物学和医学的飞跃

1. 解剖学的变革

(1) 人体知识的源流

盖伦的影响。直到16世纪初期，欧洲人关于人体的知识，主要来源于古代医学家盖伦（公元129—199年）的著作，而不是人体本身。

盖伦是同亚里士多德、托勒密一样对后世产生了重大影响的古代学者。他出生于小亚细亚的帕加马，从15岁开始，先后在士麦那、科林斯和亚历山大等地学医，28岁时回到家乡做角斗士的医师。当时是禁止尸体解剖的，但他在为角斗士治疗创伤时得以观察伤口内部。公元161年，他到罗马行医并讲解医学，取得很大成功，并当了马可·奥勒利乌斯（公元121—180年）的宫廷医师。他“瞧不起众多人的意见而渴望寻求真理和知识”，曾广泛收集整理医药方面的资料。他对人的脉搏进行了研究，认为脉搏不是像人们认为的那样输送空气，而是输送血液。盖伦把生命过程解释为精气转化的过程：血液在肝脏中产生并具有了“自然精气”，它像潮水涨落一样通过静脉流到身体各个部分，然后再通过这些静脉流回肝脏；心脏的右心室是静脉系统的一部分，流入右心室的血液在把杂质释放到肺里后，一部分流回肝脏，另一部分透过多孔壁进入左心室，在那里同来自于肺的空气相混合，转变为一种更为精细的物质，即“活力精气”；这些活力精气通过动脉传送到身体各个部分，而进入脑的那一部分转化为最高形式的“动物精气”，并通过空心的神经传遍全身。他认为，人体的健康取决于4种体液即粘液、黑胆汁、黄胆汁和血液的平衡。盖伦最主要的著作《论人体各部分的用处》详细介绍了人体的肢体和器官，并说明了它们的特定作用。他接受了亚里士多德关于“在自然中一切都是有目的的”观点，认为人体各个部分都执行事先安排好的功能。

但是，盖伦本人并没有解剖过人体，因为当时罗马习俗不允许对人体进行解剖。据他自己说，他只有两次研究过人的骨骼结构。不过，他解剖过猴子和猪，然后把自己在“最近似人类的别种动物身上”所发现的东西假定为也将在人体上发现。

盖伦的学说中有很多错误，但他强调经验和实践，反对学究式的医学。然而，在他之后的一千多年中，他的医学著作成了医学的金科玉律，医师们因循他的学说，也接受了他的全部缺陷。而且，当盖伦的著作随着阿拉伯——伊斯兰势力的扩张而传到西欧时，它已不完全是盖伦的原文，并被加上了批注。

近代之初，盖伦的学说借助于文艺复兴而在欧洲产生了新的影响。1476年，盖伦主要著作的拉丁文译本印刷发行。1525年，威尼斯一家印刷厂最先出版了盖伦著作的希腊文原文版本。盖伦的观点广泛传播，其正统地位也因此而得到加强。盖伦被认为是永远正确的，盖伦的学说成了僵硬不变的教条。有的医师由于把盖伦的一些著作从希腊文译成拉丁文，而增强了自己在医学界的声誉和地位。

人体解剖学的初创。虽然宗教和道德的因素对于直接研究人体起着阻碍作用，但对人体疾病的治疗，要求人们必须认识自身。大约从14世纪初开始，出于医学需要而对人体进行解剖的事例多了起来。1316年，在意大利的

博洛尼亚出现了一本解剖学概要，书中把中世纪阿拉伯学者的一些意见充实进了盖伦的学说。这本书的作者是位医师，名叫蒙迪诺（约 1270—约 1326 年）。他是大约 1700 年以来作人体解剖公开讲座的第一人。在维萨留斯的《人体构造》问世之前，蒙迪诺的解剖学著作一直是权威的教材，它的首次印刷发行是在 1478 年。

1328 年，腓特烈二世皇帝出于对人类消化过程的兴趣，命令萨莱诺医科大学每 5 年进行一次公开解剖。1348 年，由于黑死病流行的缘故，帕多瓦的市政当局下令，任何死因不明的人，均需由医生证明没有黑死病症状后方可下葬。而在那时，确认是否黑死病的主要方法，是检查体内淋巴结是否肿大，这就需要解剖尸体。在 1410 年，希腊籍对立教皇亚历山大五世突然死去之后，他的尸体也被作了解剖。在这个过程中，解剖学从偶然为了某个特殊问题解剖尸体发展而为系统地研究人体。人体解剖成了意大利各个医学流派都普遍采用的做法。

但是，从总体上说，对人体的认识基本上还没有超出盖伦的水平。解剖人体本身遇到的具体困难，也妨碍了这种认识的深化。那时没有冷冻条件，因此，解剖必须在尸体腐烂之前匆忙进行。解剖通常从最易腐败的腹部开始，然后是胸腔、头部和四肢。此外，被解剖的尸体来源主要是被处死的罪犯，这种尸体一般都已受到损害，而且不经常有。因此，即便在最好的大学里，解剖也只能每一年或二年进行一次。那时，解剖通常由理发师或外科医生动手，医学教授则高坐于讲座之上，手持解剖学教材，依次念其中的内容，另有一人则根据教授所念内容用指示棒指出人体的某一部分。

达·芬奇的实践。文艺复兴时代的全才达·芬奇（1452—1519 年）在解剖学方面也很有成就。他曾经亲手解剖人体，观察并记录了在他之前人们没有见过的东西。他还打算写一篇关于解剖学的论文，但没有完成。

达·芬奇没有遵从盖伦的学说，而独立地研究了人体。他的笔记表明，他曾亲自解剖过 10 具以上的人体。他认为人体的各个部分应该从各个方面来观察，并绘制了人类骨骼的正面、背面和侧面的图解。达·芬奇指出，要想正确认识人体，就须进行系统的、反复的解剖。例如，为了完全了解动脉和静脉，需要 3 次解剖；为了了解体膜，又需 3 次解剖；了解神经、肌肉和韧带，也需 3 次解剖；了解骨骼和软骨，还需 3 次解剖；而要了解女性生育的奥秘，仍需 3 次专门的解剖。他曾画了 750 幅解剖素描，准确地描述了肌肉及其对骨骼的作用，最先绘出了小肠和小肠的盘绕圈以及盲肠，详细地显示了心脏的活动。他还制作了人体各个部分的模型，其中包括一个眼睛的玻璃模型，它被用来探索眼睛的结构和视神经传递视觉印象的理论。

由于达·芬奇在人体解剖学方面所作的这些开创性的工作，他可以被认为是近代解剖学的先驱。但令人遗憾的是，他的这些成就主要地只是表明了他个人的才智和见识以及文艺复兴开创的时代精神，而没有能够对当时人们对于人体的普遍认识产生影响，因为他的上述工作和成果当时没有发表，他的手稿到 19 世纪末才被学术界发现。

(2) 维萨留斯的功绩

开拓进取。推翻盖伦的理论，为近代解剖学奠定基础的，是比利时医师、解剖学家维萨留斯（1514—约 1564 年）。

维萨留斯出生于布鲁塞尔，其父是查理五世皇帝的药剂师。他 16 岁时进

入卢万大学，3年后转往巴黎大学，学习动物解剖学。1536年，他从巴黎回卢万时，途中在布鲁塞尔参加了一次人体解剖。死者是一个18岁的贵族姑娘，死前长期面色苍白，呼吸困难，她的家人怀疑可能是中毒。维萨留斯记述道：“由于解剖是由一个完全不懂技术的理发师进行的，我不得不插手工作，尽管我只在巴黎看到过一次延续了3天的粗糙的解剖，此外我一次也未见过。”

回到卢万大学后的次年，1537年，维萨留斯获得了医学学士学位，随即又赴帕多瓦大学，通过了医学博士的考试。帕多瓦大学是当时欧洲最有名的医科大学，维萨留斯获博士学位后被留下担任外科学和解剖学讲座的教师。那时他23岁。维萨留斯非常厌恶当时以传统方式进行的人体解剖，说这是一个可憎的过程、混乱的场面，它所教给学生的东西，还不如屠夫在屠宰场里能够教的。他一改当时解剖学教师只念书不动手而由理发师和外科医生解剖的通行做法，亲自解剖人体并向学生演示。那时，解剖学使用的教科书仍遵循盖伦的学说，但维萨留斯已明确指出了实际人体与盖伦学说不符的地方。由于即使在帕多瓦这样最好的医科学校也很少有解剖人体的机会，维萨留斯绘制了大型解剖挂图，以备在没有可供解剖的尸体时让学生观看。挂图上人体的每一部分都以术语标出，足以让学生了解人体结构。使用挂图进行解剖学教学，是一个发明，因为即便是16世纪被重新发现并经认真编纂、翻译印行的盖伦的著作也没有解剖图。

1538年，维萨留斯出版了一套6幅解剖图，其中3幅是请画家代画的3个方向的人体骨骼图，3幅是他手绘的静脉、动脉和神经系统图。这些解剖图还没有摆脱盖伦的影响，其中某些器官和血管的形状仍是动物的而不是人体的。但同年他出版的另一本书，引起了人们的注意。这是一本对现有的以盖伦体系为基础的解剖学手册进行修订和增补的书，其中否定了盖伦的某些观察结果。

1539年，维萨留斯从帕多瓦刑事法庭那里获准对被处决的犯人进行解剖研究。这些机会使他进一步认识盖伦的“人体”解剖，实际上只是对一般动物的认识，而对真的人体来说，它经常是不正确的。1540年在博洛尼亚作公开解剖之前，他拼好了一具猿猴的骨骼和一具人的骨骼，以便证明盖伦的某些观点是从猿猴身上得出的，而同人的骨骼结构有很大差别。他明确地对生表示：学习人体解剖学的唯一方法，是直接的解剖和观察，而不是死读现有的解剖学著作，同时，他决定根据自己对人体的观察和研究写一本全新的解剖学著作。

《人体结构》。1543年8月，维萨留斯所著《人体结构》一书出版。发生在这一年的另一件科学史上的大事，就是哥白尼的《天体运行论》问世。如果说《天体运行论》意味着人类对宇宙认识的突破，那么《人体结构》则标志着人类对自身认识的飞跃。

《人体结构》有663页，其中附有许多质量很高的图片。维萨留斯很重视这些解剖图，认为它们对于正确表现他亲眼看到的东是十分重要的。除了自己绘制外，他还聘请了提香派画家和威尼斯最好的木版制版工匠精心制作。

在《人体结构》的序言中，维萨留斯直言不讳地批评了倍受尊崇、不能怀疑的医学权威盖伦，同时明确指出：盖伦对人体骨骼的解释主要基于猿猴的骨架，他的观察结果有许多是错误的，甚至他对猴子的观察也是如此。

《人体结构》论述的内容，从人体的骨骼开始，然后依次是肌肉、血管、神经、腹部器官、胸部和心脏，最后是脑。维萨留斯根据自己的观察和研究，对盖伦的一系列错误作了修正。例如，他通过对下颌骨、胸骨和肱骨的比较研究，确认盖伦实际上把动物的结构引伸到人类；他指出，盖伦以某些动物的肝脏类推而错误地把人类的肝脏描述为多页的；人脑中不存在盖伦所说的那种在有蹄动物脑中发现的“奇妙的网络”等等。在心脏方面，他否定了盖伦关于左右两个心室之间的中膈是多孔的、因而一部分血液能通过它从右心室进入左心室的说法，指出，心脏的中膈组织并无孔状结构，所以，血液能从右心室通过它而到达左心室是令人怀疑的。关于中膈存在微孔的说法是盖伦生理学的本质部分，对它的否定使盖伦学说的基础受到动摇。

维萨留斯还画出了门循环的略图。他表明了动脉和静脉的细微末端在人体组织内密切接近的情形，还清楚地描述了门静脉和腔静脉之间的联系：“这些静脉的最微小支脉都彼此连合，在许多地方看来还结为一体而呈连续状。”但他未能进一步去猜想和探测血液的实际运动。

维萨留斯强调，解剖学的知识应建立在解剖的直接经验基础上，所有的医学院学生、解剖学家和医师都应自己进行解剖以产生新的知识。在书的最后，他介绍了他的解剖方法和使用的器械，它们在很大程度上成为现代解剖技术的基础。

《人体结构》出版之后，维萨留斯到西班牙去当了查理五世皇帝的宫廷医生，后来又为查理的儿子菲力普二世服务。1564年，他在朝圣归来时死于途中。

在西班牙期间，维萨留斯没有停止对解剖学的研究。根据新的发现，他修订、重版了《人体结构》。这部具有划时代意义的科学巨著虽然曾受到非难，仍然很快产生了影响。不到半个世纪，欧洲的医科学校就普遍采用了维萨留斯的观点和方法。维萨留斯指出的认识人体的道路，从根本上改变了欧洲的解剖学。

2. 血液循环的发现

(1) 先行者的探索

塞尔维特、雷·哥伦布发现肺循环继维萨留斯在认识人体结构方面迈出决定性的一步之后，西班牙的塞尔维特（1511—1553年）初步认识了人体的血液循环。

塞尔维特是一个神学家，同时也是个医学家。他曾就读于巴黎大学，与维萨留斯是同学。在神学上，他认为基督教正统教义中关于三位一体的观点是谬误，主张一位论。1546年，他完成了《恢复基督教的本来面目》一书的初稿，后来经过修改，于1553年将其秘密印行。正是在这本书中，塞尔维特在论述圣灵和再生之间的关系时发表了他对人体血液循环的见解。

塞尔维特认为，血液从右心室向左心室的流动，不是如盖伦所指出的那样经过心脏中膈，而是要经过肺部形成循环。他对这一过程作了具体的描述：血液从右心室进入肺，在这里它同吸入的空气相混合并排出杂质，然后通过肺静脉进入左心室。

塞尔维特仍然受到盖伦关于人体工作过程的理论的影响，他是在研究所谓“活力灵气”如何产生的问题时提出上述见解的。他说，活力灵气起源于

左心室，肺尤其促进其形成。但他发现的肺循环，即小循环，对于认识生命过程具有重要意义。

塞尔维特的观点当时没有得到广泛传播，因为他的著作秘密印行后，他就因自己的神学观点而遭到宗教法庭的逮捕和审讯。在受审期间，他设法逃脱到日内瓦，但又落入了同样不能容忍他的思想的加尔文派手中。加尔文曾亲自参与了对他的审讯，并坚持以异端罪判处他死刑。1553年10月27日，塞尔维特被烧死，他的那本著作也被禁遭焚，只有不多几本幸免于难而流传下来。

1559年，意大利的解剖学教授雷亚尔多·哥伦布（1516—1559年），提出了同塞尔维特类似的观点。哥伦布是维萨留斯在帕多瓦大学的继任者，他的研究产生了一些重要的结果：血液从心脏的右侧通过肺流到左侧；心脏在不断地收缩和扩张，心脏扩张时动脉收缩，而心脏收缩时动脉则扩张。

法布里修斯发现静脉瓣膜。1603年，意大利帕多瓦大学的教授法布里修斯（1537—1619年）出版了《论静脉瓣膜》一书，公布了他的新发现。

约在1574年，法布里修斯在作人体解剖时发现，人体四肢的静脉内壁有小瓣膜，它们使血液只朝一个方向流动。他还注意到，人体躯干中的大静脉内没有这种瓣膜。在《论静脉瓣膜》这本书中，他首次清晰地描述了静脉内壁上的半月瓣。这些小瓣膜朝心脏的方向打开，但朝相反方向关闭。对于这种瓣膜的作用，他是这样解释的：“我的理论是，大自然形成它们是为了在某种程度上使血液流动缓慢，并且防止全部血液涌入双足、双手及手指并聚集在这些部位。”因此，瓣膜的形成是为了保证身体各部分能得到适当量的血液。由于仍然遵循盖伦关于血液运动是一种涨落的观点，法布里修斯未能发现瓣膜的真正作用，即对血液循环本身的影响。

法布里修斯在生物学，尤其是胚胎学和肌肉活动力学方面很有造诣。他曾研究了人和许多动物的胚胎发育，首次详细地描述了胎盘。他还最先描述了喉的构造，最先发现了瞳孔可因光线的强弱而改变大小。他还是一个著名的医生，曾经为伽利略治过病，由于在欧洲声誉卓著，有许多国家的学子慕名而来。

(2) 哈维与生命科学革命

从医生涯。在法布里修斯的众多学生中，有一个来自英格兰的青年，他就是威廉·哈维（1578—1657年）。

哈维出生于一个富商之家，15岁时就进入剑桥的格维尔和凯厄斯学院学医，这是当时英国医学教育的中心。1599年，他来到帕多瓦大学深造。法布里修斯作为帕多瓦大学的医学教授，给了他许多帮助和启发。法布里修斯大概很器重哈维，后者有一段时间曾住在他位于帕多瓦郊外的乡间小屋中。直到很多年之后，哈维仍记得法布里修斯是如何向他解释那些奇妙的静脉瓣膜的。

1602年，在帕多瓦获得医学博士学位后，哈维回到伦敦开业行医。在伦敦，他结交了包括弗兰西斯·培根和托马斯·霍布斯在内的许多著名学者。从1615年起，他定期在皇家医学院讲课。1618年后，曾任英王詹姆士一世和查理一世的私人医生。这一经历后来给他带来麻烦，内战时期，他的家遭到洗劫，收藏的解剖标本以及手稿、图表等均被毁掉。直到1648年，他才返回伦敦。哈维于1657年逝世，享年79岁。

《心血运动论》。哈维在行医的同时，进行着研究工作。他仔细地观察病人，解剖过人体和多种动物，还曾用皇家园林中的鹿进行过实验。1628年，他发表了《动物心血运动的解剖研究》（简称《心血运动论》）一书，第一次阐明了血液循环的原理。

《动物心血运动的解剖研究》是一本只有72页外加两幅插图的小册子，但它彻底改变了这方面现有知识的框架结构，意味着生命科学的革命。

医学权威盖伦认为，静脉血由肝脏形成后流入右心房、右心室，并经室间隔上的微孔流入左心；血液运动犹如潮水涨落，原动力在于动脉的收缩。直至16世纪，这种观点仍然支配着人们的认识。在哈维之前，塞尔维特和哥伦布建立了肺循环的概念，法布里修斯发现了血管中的瓣膜，但他们都未能从根本上改变盖伦的结论。

哈维的著作，表达了正在兴起的那种时代精神。他在书中首先强调，他信奉的不是书本而是实践，不是哲学家的观点而是自然的结构，他的观察和发现都是“从解剖活的动物中得出的”。他具体地论述了心脏、动脉、静脉的结构以及血液运行的问题，批驳了流行的观点，明确地提出了自己的新思想。他指出，虽然已有一些杰出而博学的人说明了这一主题的某些方面，但他的这本书是“唯一的一本反对传统的著作，而且它断言血液是沿着躯体内一条先前没被认识到的循环路线旅行的。”

哈维认为，心脏的作用就如用一个泵，它通过收缩和扩张发生作用：收缩时将其容纳的血液排出，扩张时则吸收新鲜血液，这种有规律的重复收缩和扩张，使血液保持在血管中运动，而心脏和血管中的各种瓣膜则保证这种运动朝一个方向进行：动脉中的血总是朝离开心脏的方向流动，而静脉中的血总是朝向心脏流动。他详细地描述了血液流动的通道：血液从左心室被压到主动脉中，进入动脉系统，然后通过静脉返回心脏，进入右心室；心脏的运动迫使血液从右心室进到右心耳，再通过肺动脉进入肺脏，并由肺静脉流回心脏，进入左心耳，从这里被送入左心室，再一次被压进主动脉和动脉系统。这是一个连续不断的循环，直到生命结束。

哈维通过定量检测证实了自己的发现。那时，定量方法虽已在配药方面使用，赫尔蒙特和圣托里奥也曾将其用于生物学实验，但它尚未被普遍认识。哈维实际测量了人、狗、羊的心脏容量，然后用脉搏的速率乘以这个数，得出了单位时间内从心脏进入动脉的血液的量，他估算，一个普通成年人在半小时内大约有83磅血从心脏输送出来。仅仅是这个量的结论，就动摇了盖伦学说的基础，因为如此大量的血是不可能如盖伦所说的那样由肝脏将被消化食物“乳糜”造成的，它也超出了所有静脉在任何给定时间里所能容纳的血液量。哈维由此断言，血液是围绕着一个环路而不停地流动的，即进行着循环的运动；凭借心脏的搏动，血液被输送，这也是心脏搏跳运动的唯一理由。

哈维指出，有许多理由可以称血液的流动为循环运动。这些理由是他通过对80多种不同的物种如哺乳动物、蛇、鱼、虾、蛤蟆、蜥蜴等进行活体解剖、肉眼观察、实验和计算得到的证据。他的结论改正了一个持续了一千多年之久的错误，并在实际上成为现代生理学的基本概念。而他在得出这个结论过程中采用的方法，也被作为发展生物学和建立生命科学的手段而被确立下来。

由于当时条件的限制，哈维的血液循环理论也存在着缺陷，其中最主要的是，他不能回答血液是怎样从动脉进入静脉的。他还没有显微镜，而要了

解动脉末端与静脉末端连接的确切情形，是要借助于显微镜才能做到的。但是，尽管哈维未能发现这一点，但他仍然坚持相信血液的大循环是一个简单的事实，认为动脉和静脉之间是由一些尚未被发现的“奇妙的技巧”连接起来的，大自然一定会造就这种循环。哈维的这一预言，在他逝世三年之后就得到了证实。博洛尼亚的医学和解剖学家马尔比基（1628—1694年）在显微镜下看到了蛙肺中连接动脉和静脉的毛细血管，揭示了肺的结构和功能。不久，列文虎克（1632—1723年）证实和扩展了这一发现。

哈维对生物科学作出的伟大贡献，是17世纪最引人注目的科学事件之一。血液循环的理论造成了具有深远影响的生物学革命。

3. 医学的转折

(1) 医学需要改变

在中世纪的欧洲，医学是一门玄秘的学问，通常与占星术和巫术有密切联系。这种情况在近代初期仍无多大改变，医学甚至未能充分地利用当时在解剖学、生理学、化学等方面的进步。受过训练的职业医生很少，且一般都供职于宫廷或受雇于贵族和富商。另一方面，什么人都可以充当医生。英国在1509年才开始实行资格考试的办法，只有通过这种考试的人才能开业行医，但也仍然允许没有证书的人治疗常见的小毛病。至于外科手术，通常是由理发师来操刀进行的。正因如此，达·芬奇曾提醒说：努力保持健康，就能更成功地远离医生。亨利八世在授权他的私人医生利纳克雷（约1460—1524年）组建伦敦皇家内科医师学会的文件中也指出，有许多不懂医学甚至目不识丁的人，竟用种种怪异的疗法为人治病，实际上使人受到悲惨的伤害和摧残。

即便是有学问的医生，遵从的也都是传统的观念和认识。根据盖伦的学说，流行的医学理论认为，人体内有4种体液，即血液、粘液、胆汁和忧郁液，人的健康取决于这四种液体的平衡，而所有疾病都起因于这些液体的比例失调。无论是服药、放血或发汗、泄泻，目的都是要使体液恢复到适当的比例。此外，由于很少注意区别因治病而出现的康复和与治疗无关的康复，正规的医生也会用汞无意识地毒害自己的病人，也会由于轻易放血或使用某种药物而使病人死亡。从另一方面来说，病人对于违反传统的新发现或新方法也没有兴趣。一个非常典型的例子是，大名鼎鼎的哈维在发表了有关血液循环的理论之后，上门请他治疗的病人却大大减少了。

然而，在近代初期，医学终究也走出了重要的几步。

(2) 帕拉塞尔苏斯指点方向

否定传统。一个狂傲不羁的瑞士人首先起而否定传统，为医学的未来依稀地指出了方向。

帕拉塞尔苏斯（1493—1541年）本名提奥费拉斯图斯，出生于瑞士东部地方，是一个医生的私生子。后来，他随父亲移居奥地利卡林西亚的一个矿区。帕拉塞尔苏斯自幼就对医学、矿冶、化学有浓厚的兴趣，14岁时开始游学欧洲，曾在好几所大学学习过，对传统的教育和医学极为不满。1516年，他在具有革新精神的费拉拉大学获医学博士学位，然后又周游欧洲和中东各地。1524年返回奥地利时，他已是一个有名望的医生。大概就是在此期间，

他开始使用帕拉塞尔苏斯这一笔名，意为超过塞尔苏斯——古罗马的名医。

帕拉塞尔苏斯曾在斯特拉斯堡开业行医，也去过巴塞尔为著名的出版家约翰·弗罗本（约 1460—1527 年）和杰出的人文主义学者伊拉斯谟（约 1466—1536 年）治过病。这两位名人欣赏帕拉塞尔苏斯的见识和才干，在 1527 年为他争取到了巴塞尔市政医师和大学教授的位置。

帕拉塞尔苏斯立即表现出了自己的不同寻常。他不但拒绝按通行的方式去作就职宣誓，而且经常发表离经叛道的观点，攻击医学机构，同流行的盖伦学说唱反调。更有甚者，在 1527 年 6 月 24 日，他竟然当众烧掉了一本盖伦的著作和一本著名阿拉伯医学权威阿维森纳（980—1037 年）所著的《医典》。他向自己的学生宣布，他讲授的医学课程是以自己治疗病人的经验为依据的。他违反医学界的传统，不用拉丁语而用当地语言讲课，并且允许兼作外科手术的理发师到课堂上听讲。

帕拉塞尔苏斯的所作所为，是医学界不能接受的。人们认为，他“对传统科学和医学的全部谴责，是与他的粗鲁及不愿对习俗和权威让步的态度相匹配的”。正是由于这种情况，他在巴塞尔的任职生涯很短暂。弗罗本去世之后，他因失去了有力的支持而处境日益困难。由于同一位高级教会人士就医疗费用问题发生争执，以及在对簿公堂时同法官闹翻，他在 1529 年被迫离开巴塞尔，浪迹中欧。他先后到过纽伦堡、因斯布鲁克和蒂罗尔的矿区、奥格斯堡、乌尔姆、巴伐利亚、波希米亚，最后于 1541 年 48 岁时逝于萨尔斯堡。

标新立异。帕拉塞尔苏斯在医学史上占有重要地位。他的基本观点动摇了占统治地位的古代学说，在一定程度上影响了医学发展的方向。

当时，关于疾病的概念是含混不清的。根据体液学说，疾病不是由于特殊的动因引起的，每个人的体液构成的不同，都有可能导致疾病，或者说，有多少人就可能有多少疾病。而帕拉塞尔苏斯则认为，疾病的发生是由于外部因素侵蚀身体的结果，每一种疾病都有其特殊的起因，这种原因主要是无机界和空气中的有毒物质，当它们进入人体并占据某一部位而影响身体机能时，就发生了疾病。因此，治疗疾病的方式，也应不同于传统医学中为求体液平衡而采用的放血、泄泻、催吐等，而要寻找特殊的東西来治疗不同的疾病。

当时的医生在使用药物治疗时，一般都用草药，因为植物被认为是对人体有益的有机物，而当时的植物学在很大程度上就是“草药学”。帕拉塞尔苏斯则相信，对各种疾病应采取不同的治疗方法，可以用上帝创造的一切东西，包括矿物、植物、动物，来治疗疾病。他认为，有关无机物有毒因而不宜用于人体的意见，是可笑的，因为即便饮食过量都是有毒的。他研究并制备了许多无机化合物，用于治疗人体疾病。他在这方面的工作，使炼金术开始转向寻找有用的治疗物质，推动了医药化学的形成。

帕拉塞尔苏斯率先开始研究职业病，主要是矿工职业病。这显然与他的经历有关。童年时，他随父亲在奥地利南部的一个矿区城镇生活，年轻时曾在蒂罗尔一家炼铁厂工作，流浪时也到过很多地方的矿区。这使他有可能仔细地观察和研究矿工的工作条件及其职业病，摸索和试验治疗方法。他认为，矿工病是通过呼吸和皮肤接触进入体内的矿物引起的，各种矿物引起的病变和症状不同，如汞中毒的症状有颤抖、肠胃功能紊乱、口腔溃疡、牙齿发黑等。他还提出，可以通过在中毒病人身体上开口及制造局部溃疡的方式，使

聚集在身体某一部分的汞流出，也可采用沐浴疗法。他曾写了一本关于矿工职业病的专著，但此书直到他逝世 25 年后才出版。

帕拉塞尔苏斯在医学的其他领域也有建树，如 1530 年他写了一篇当时最精确的有关梅毒的论文；1536 年发表了《外科大全》。由于众多正规医生的抵制和敌视，帕拉塞尔苏斯这个反叛者的大多数著作在其生前未能出版。但他也获得了众多的追随者，以至于在他死后约 30 年，整个欧洲出现了一股推崇他的医学和化学思想的倾向，印刷机使他的著作和名声广为传播。

帕拉塞尔苏斯的主要价值，在于他引发了对古代和中世纪医学的不满以及对医学新方向的探索。16 世纪下半期，著名的法国思想家蒙田（1533—1592 年）曾在自己的作品中多次谈到帕拉塞尔苏斯及其影响。他指出，人们认为帕拉塞尔苏斯正在推翻古代医学的规则，他和他的追随者不仅仅改变了一张药方，而且改变了人体医学的整个关系和秩序。

(3) 圣托里奥与计量方法

医疗仪器的使用。与哈维使用计量方法论证血液循环差不多同时，有一些杰出的医生也已将此方法用于诊治疾病和研究人体。

意大利医生圣托里奥（1561—1636 年）是最先在医疗中使用计量仪器的人。在他之前，甚至在他之后的很长时间内，对疾病的诊断完全是定性的。如发热病人的症状被描述为发烧，其病情的变化被称为热退了或发烧更厉害了，而没有能够用一种客观标准来测量和表示这些症状和变化。人们已知通过皮肤能够排出人体的挥发物质，并相信这与健康或患病有一定联系，但却无人想过要对这种情况进行定量分析。

圣托里奥是威尼斯一个贵族家庭的长子，14 岁时进入帕多瓦大学，依当时习惯先修哲学，而后学医，并在 21 岁时获得医学博士学位。在此之后，他旅居东欧多年，曾任波兰国王的私人医生。1599 年回意大利，就任母校帕多瓦大学的医学教授。1629 年辞去大学中的职务，回故乡威尼斯开业行医。

圣托里奥与伽利略曾是帕多瓦大学的同学，但他们之间关系的更重要方面是学术上的沟通。圣托里奥在把计量方法引入医学实践时，成功地利用了伽利略的一些发明和发现。

他巧妙地把伽利略用来测量空气温度变化的测温计改造为测量人体温度的体温计。当时的空气测温计，已在“热学”部分介绍。圣托里奥改造而成的体温计，是一根呈连续 S 形弯曲的细玻璃管，其顶部为一球形玻璃泡，管上有用玻璃珠标示的刻度。使用时将管子开口的下端放入一个盛水的小容器中，病人用手握住球泡部位或将其含于口中，玻璃泡中的空气受热膨胀后，细管中的液体平面即发生变化，以此测量人体温度。圣托里奥认为，这样可以了解病人病情的变化，为预测疾病发展提供依据。这种体温计显然还是十分粗糙和简陋的，但却是具有开创性的。圣托里奥正是利用它发现了人体健康时的大概体温和患病时的体温变化。

人的脉搏快慢向来被认为是人体健康或有病的一种症状。15 世纪时，库萨的尼古拉曾尝试用水钟来测量脉搏速率，但操作麻烦且不可靠。圣托里奥利用摆的原理，设计了一种能比较精确地测量脉搏的仪器。据说伽利略曾用自己的脉搏来计算比萨大教堂吊灯晃动的摆幅，而现在圣托里奥却巧妙地用摆来计算脉搏。他的脉搏计主要部分是一根悬着一个小铅锤的长线，使用时将线的长度调节到其摆动速率与病人脉搏跳动一致，于是，线的这一相对长

度便表示病人的脉搏速率。脉搏计的水平部分是一支标尺，利用它可以方便地读出线的长度。但圣托里奥的脉搏计还不是以标准的时间单位为基准的，因此精确度仍不太高。直到 1690 年，才由福耶尔制成了测量脉搏率的秒摆，并用它研究了脉搏率和呼吸率之间的关系。

为了探索空气湿度对人体的影响，圣托里奥设计了一种简易的湿度计。他把一根绳子水平拉直固定于墙上，其中央部分悬挂一个重物。由于空气湿度的变化，绳子会绷紧或松弛，从而使悬于其上的重物高度发生变化，这种变化可通过墙上的纵向刻度表示出来。这个看起来十分粗糙的器材是圣托里奥把计量方法用于医学目的的又一创造。

用数量解释生命过程。圣托里奥尊重和信奉盖伦的学说，但并不盲从，而且致力于用自己在实践中获得的经验去纠正传统医学中的错误。他曾对自己的朋友伽利略说过，他遵循两条原则，一是希波克拉底所说的医学是加法和减法，即把不足的加上去，把多余的减除掉；二是实验。他曾试图用实验和测量来证明盖伦的学说，但是当他把盖伦的体液理论转化为数量的时候，他就在实际上否定了盖伦的定性的学说。如在盖伦体系中，四种体液分属热、冷、干、湿等不同性质，他们之间的区别是绝对的。但圣托里奥分别用体温计和湿度计来测量热、冷、干、湿，也就使这四种性质都成为相对的。为了研究体液的平衡，需要准确地测量进入和排出人体的一切物质。圣托里奥着手用数量来研究人体新陈代谢和解释生命过程。他设计制作了一只“静态椅”，吊挂在一杆大型提秤上。在进食、排泄、运动和性活动之后，他都要坐在这个椅子上称量自己的体重；同时，他还称量了所有食物和排泄物，并把这一切全都记录下来。这一实验和计量工作，他坚持了 30 年，其成果是在 1614 年出版了一本名为《医学统计方法》的著作。

《医学统计方法》是第一部研究基础代谢的学术著作。圣托里奥依次在感觉不到的出汗、空气和水、食和饮、睡和醒、运动和休息、心境和性欲等方面，表述了自己的实验和计量结果。他得出结论，肉眼可见的排泄物总量少于摄入量，体重的增加比所有可见排泄物的重量轻得多。他认为人体健康的保持，在于人体在摄取和排泄两方面的适当平衡。

圣托里奥具体分析摄入量多于排泄量的问题，他认为“感觉不到的出汗”是消耗摄入物质的重要过程。当时“出汗”仍可按其拉丁文原意被理解为蒸发、呼吸。圣托里奥强调“感觉不到的出汗”，意在突出他所指的并不是看得见的排泄物。他解释说，这种感觉不到的出汗或者通过布满全身的细孔进行，或者通过呼吸进行，它所排出的东西超过了其他排泄物的量。如果一天摄入 8 磅食物和饮料，一天内感觉不到的出汗排出的量通常为 5 磅，这个量相当于 5 天排出的粪便的量。任何医生如不考虑这个过程，那就只会欺骗病人而不能治好疾病。

用计量方法来说明人们早已认识到的“感觉不到的出汗”，这在医学上确是闻所未闻的新鲜事。就如圣托里奥自己所说的那样，在他之前还没有人能够测量出感觉不到的出汗，也没有人敢于探索这一过程。他通过 30 年的经验和建立在计量基础上的推理，把医学引入一个新的领域。

(4) 对某些疾病的认识和治疗

传染病。在传统的医学体系影响下，欧洲的医生在治疗病人时，通常是设法调整想象中的四种体液的比例，而对各种具体疾病的特殊性很少重

视。16世纪以后，这种情况逐渐发生变化。除了帕拉塞尔苏斯以外，还有一些医生比较仔细地观察和描述了不同的疾病。

人们对于严重影响健康和威胁生命的传染病的认识有了发展，例如，1494年时，有人对“爱疫”（梅毒）这种疾病进行了研究，并外用汞来进行治疗。帕拉塞尔苏斯使这种疗法得到更广泛的应用。1530年，意大利医生弗拉卡斯托罗（1478—1553年），发表了《梅毒或法国病》一书，系统地论述了这种由他命名的疾病的症状、起因和治疗方法。1540年，法国医生帕雷（1510—1590年）研究了梅毒的遗传性问题。另一位意大利医生马蒂奥利（1501—1577年）开始用内服汞的方法来治疗这种病人。

黑死病肆虐以来，人们对流行性传染病极为关注，检疫期的方式作为重要预防手段而得到推广。1533年，巴黎曾发布瘟疫法令，要求发现瘟疫患者立即呈报当局并予以隔离，同时应清扫道路和贫民住区，及时处理瘟疫死者住所等。

对传染病最有研究的是弗拉卡斯托罗。他是哥白尼在帕多瓦大学的同学，对天文学也有研究，曾在1538年提出过行星围绕恒定的中心旋转的假说。但他的职业是医生，一直在家乡维罗纳开业行医。他在医学上的最大和主要的成就是在巴斯德之前300多年就提出了病菌学说。1501年，他对斑疹伤寒进行了专门研究。1546年，概括他对传染病研究成果的《论传染与传染病》一书出版。他在书中指出，各种传染病均由不同的能够迅速繁殖的微小物体引起，这些微小物体由感染者传给受染者的方式，有直接接触、通过受污染的物体、经由空气3种。他对传染、传染病、病菌的性质和疾病传播方式的阐述，是这方面最早的科学的解释，并被日后医学的发展所证明。

弗拉卡斯托罗在当时就很有声望，多次受到宫廷延聘，但他宁愿留在维罗纳。只有一次，他应教皇保罗三世之请，在特兰托会议上担任医官。在此期间，他曾指出特兰托有流行鼠疫的危险。根据他的建议，会议移到了博洛尼亚的教皇领地。弗拉卡斯托罗在1553年因中风而去世。

在弗拉卡斯托罗之后，法国医生巴尤（1538—1616年）在这一领域也颇多建树。1578年，他首次对百日咳这种具有很强传染性的急性呼吸道疾病作了详尽的说明。1580年，在巴黎大学医学院院长任上，他汇编了1570—1579年间流行病的明细记录。他还曾仔细地描述了鼠疫、白喉和麻疹等流行病。巴尤写了一本关于流行病学的专著——《论流行病》，但此书直至他逝世20多年后的1640年才得以问世。巴尤对流行病的研究，使他成为现代流行病学的奠基人之一。

创伤治疗和外科手术。著名的法国医生帕雷在这方面作出了重大贡献。帕雷年轻时曾在巴黎一家医院当理发师兼外科医士的助手，学习解剖学和外科技术，后来担任了外科军医。当时，外科医生普遍认为枪伤有毒，所以使用煮沸的接骨木油来处理伤口，而这种方法给伤员带来巨大的痛苦。在一次战斗中，由于这种油的供应中断，帕雷只能用自己调制的由玫瑰油、松节油、蛋黄等的混合物来代替沸油外敷伤口。他意外地发现，用这种方法处理的伤口没有发炎，也没有肿胀，而伤口用沸油处理的伤员都发高烧，伤口发炎。由此，他对枪伤的性质和治疗方法有了新的认识。1545年，他在《火绳枪和其他火器造成的伤口的治疗方法》中报告了自己的发现。1552年，他又在实践中证实，结扎血管比烧灼血管有更好的止血效果，而且使伤员较少痛苦。在此之前，维戈已于1514年采用了结扎动脉的方法来防止大量出血，

但普遍使用的方法仍是用烙铁烧灼血管。

帕雷虽是外科医生，但他认为外科手术只应在万不得已的情况下施行。他最早放弃了在施行男性疝气手术时一并切除其性器官的手术方法，并推广了疝带的应用。他还虚心学习一些民间的疗法，如用剁碎的洋葱加盐医治烧伤和烫伤等。由于医术高明，他先后侍奉过四位法国君主，并被认为是近代外科学之父。

4. 动物学和植物学的初创

文艺复兴时期，由于古典学术被重新认识，人们对于大自然的兴趣也不断增长。空前的地理发现和旅行探险使人们有可能看到许多前所不知的动物和植物，而印刷术的普遍应用，使这一切能在更大范围内传播并产生影响。近代早期，涌现了一批新的博物学家，建立了一些动物园和植物园。近代动物学和植物学渐具雏型。

(1) 动物学

格斯纳与《动物志》。直至世界历史进入近代之时，欧洲人对动物学的了解，主要仍来自于希腊时代流传下来的知识，其中虽有一些事实，但也包含了宗教、神话、伦理、传说的内容。远航归来的海员们带来了有关前所未有的动物的消息，但其中也不乏虚幻和迷信的成分，如有人声称看到了头在肩下的人或无头的人，以及海妖、人鱼等等。这类传闻促使一些学者努力去观察和了解事实。瑞士博物学家格斯纳（1516—1565年）就是其中的佼佼者。1551年到1587年，他编著的5卷《动物志》相继出版。编写此书，起因于他在欧洲巨商富格尔家族的图书室中看到一部公元2世纪时希腊百科全书的手稿。他由此受到启发，决定把一切关于动物的情况收集起来，汇总成书。《动物志》全面总结了当时欧洲有关动物的知识和传说，书中虽然仍有不少夸大和想象的内容，如300英尺长的海蛇、狮身人面兽等等，但也有大量实际的描述。而且，格斯纳还在书中附了千余幅木刻画，为他所提到的众多动物提供了画像。这部著作标志着动物学的新方向。

格斯纳是一个百科全书式的人物。他出生于贫寒之家，在艰难的生活中自学成才，懂得多种语言，一生著作70余种，涉及内容几乎无所不包。除了《动物志》外，4卷本的《通用目录学》因收录了以往所有拉丁文、希腊文和希伯来文的著作目录，而使他成为目录学始祖；20卷本的《康拉德·格斯纳图书总览》将人类文化知识分门别类加以论述。他还为一部论述植物学的著作收集了大量材料，并准备了千余幅插图，虽然这部著作没有完成。他有关昆虫的笔记表明了他在这方面研究的成果。

研究的展开。法国博物学家贝隆（1517—1564年）曾在维滕贝格大学攻读植物学，40年代后期曾游历地中海中部各国，以鉴定古代作家描述过的动物、植物和事物。1553年，他发表了这次考察的结果，其中介绍了不少欧洲人还不知道的动植物和文物遗迹。贝隆著于1551年的《海洋鱼类自然史》，以亚里士多德的分类办法为基础，探讨了海洋鱼类。但他把海豚也列入其中，并作了仔细研究，甚至包括其胚胎。此后，他又发表《鸟类自然史》，分类描述了约200种鸟，并附有插图。他在书中还将鸟和人的骨骼作了比较。但就如他对鱼类的介绍那样，他在分类问题上也未作深入研究，因而把蝙蝠也

当作鸟类而作了探讨。但贝隆的著作对动物学的发展是具有很大促进作用的；他的某些研究成果在一定程度上为现代胚胎学和比较解剖学的形成起了开拓作用。

隆德莱（1507—1566年）也是法国博物学家，还曾担任过解剖学教授和枢机主教的私人医生，对疾病诊断和药物制剂发表过不少见解。他的主要著作，是1554年出版的《水生动物》。书中详细描述了约250种海洋动物，其中主要是地中海的，几乎每种动物的叙述都配以插图。但隆德莱也同贝隆一样，并未试图对水生动物进行分类，而把鲸、海豹、海生无脊椎动物都当作鱼类。

意大利学者阿尔德罗范迪（1522—1605年），在1599年出版了自己3卷本的研究鸟类的著作。3年后，他又出版了关于昆虫的著作。阿尔德罗范迪对动物及其生活的描述，不像格斯纳那样全面而又具体，但他着重于从解剖学角度对动物进行分类，因而比格斯纳更接近于科学的动物学。阿尔德罗范迪也是一个学识渊博的人，曾得过医学学位，在博洛尼亚大学讲过逻辑学和博物学，后来还创建了一个植物园。他受到教皇格列高利十三世的欣赏，被任命为药物检查官。他的著作的出版也受到教廷的财政资助。

（2）植物学

基础的奠定。15世纪以来，由于对自然的兴趣的增长，人们开始注意观察和研究自己身边的植物，并因此而发现，有许多植物是古代植物学权威提奥弗拉斯特和第奥斯科里斯所不曾指出过的。作为这种观察、研究和发现的结果，出现了专门描述某些地区植物群的著作，这些著作一般都附有木刻制版的插图。有三位德国学者在这方面做了开创性的工作，他们是：

布伦费尔斯（1488—1534年），其主要著作是两卷本的《药用植物图说》，1530年出版。书中对各种植物作了描述和医疗效果的介绍，并附有详细准确的插图。这些插图是由画家直接根据植物的自然状态临摹下来的。这本书虽然仍遵循第奥斯科里斯的意见，但它表现出的对植物的细致观察和忠实描述，开始了植物学的新方向，其作者后来被林奈（1707—1778年）称为现代植物学的奠基人之一。

博克（1498—1554年），他像布伦费尔斯一样，努力推动表述繁琐的中世纪植物学向现代科学的方向发展，这种新的植物学是以对自然的观察和描述为基础的。他的主要著作《新草药志》出版于1539年，该书不仅描述细致准确，而且还打破常规，对700种左右的植物根据相似结构作了分类。在1546年再版时，博克又增加了详尽的插图。

富克斯（1501—1566年），他的一部被认为是博物学历史上具有里程碑意义的著作《植物志》，于1542年问世。富克斯童年时随祖父在乡间生活，知道了不少植物的名称，后来曾在蒂宾根学医。他对植物的治疗作用很有兴趣，并以自己对古代学术著作的深入理解和对周围事物的观察能力而对植物学作出了贡献。他的书条理清晰，描述精细，术语准确，插图逼真。他在序言中指出，每幅插图都是根据植物的本来形状和特点绘成的，而且尽量画出它们的根、茎、叶、花和果实。特别值得提及的是，他是按字母的顺序，描述了众多植物的形状、生存环境、性味、药用功能和最佳采集时间的。

上述三位植物学家同时也是医生，因为直到16世纪中叶之前，植物学似乎还是从属于医学的学问，人们主要关心植物的医疗作用。但是，重大的

转折已在这时开始。一些大学逐渐把植物学从医学中独立出来，作为这门学科教学研究手段的植物园也相继出现。

曾在 1573 至 1587 年间任维也纳皇家花园主管，而后在荷兰莱顿大学执教的克鲁西乌斯（1526—1609 年），也为新植物学的建立作出了贡献。他曾考察过法国、西班牙和葡萄牙的罕见植物群，并在 1576 年发表了考察的成果。1583 年，他又根据在奥地利和匈牙利的考察结果，出版了关于中欧罕见植物群的研究著作。此外，他还提出了新的园艺栽培法，从世界各地移植了郁金香、马铃薯和栗。他在植物园中栽培郁金香的成功，对荷兰郁金香球茎业的形成有直接促进作用。

在 16 世纪的著名植物学家中，意大利的马蒂奥利（1501—1577 年）所做的工作也是有特色的。他毕业于帕多瓦大学，写过医学方面的著作，还曾担任神圣罗马皇帝斐迪南德一世和马克西米连二世的医生。他对古希腊植物学家第奥斯科里斯有专门研究，在 1554 年出版了《评第奥斯科里斯》一书。此书用意大利文写成，为医生和药剂师鉴定和利用草药提供了便利。随后，他又把第奥斯科里斯的著作译成拉丁文，并附上了自己的以观察为基础的详尽注释和评论，还用各种语言注明了植物的名称。马蒂奥利使第奥斯科里斯的学说以比较完整的形式被欧洲学术界所认识，同时也以自己在观察中得到的新知识丰富了植物学这门科学。

为植物分类。在近代初期，洛贝尔（1538—1616 年）是最早将植物分类的植物学家。

曾在蒙彼利埃大学学习医学的洛贝尔认为，医学和植物学都必须建立在精确观察的基础上。他收集了约 12000 种植物，并尝试按照叶的形状把他们分成科。据此写成的《植物新志》，于 1570 年出版。这本书被后世认为是现代植物学的里程碑，其中由他提出的一些植物的属名沿用至今，而他关于确定植物的属和科的见解后来被林奈接受和发展。1576 年，他的两卷本《植物志》面世，其中包括了《植物新志》的第二版和新增的《植物探微》，以及近 1500 幅由当时最有名的一些植物学家提供的植物版画。

洛贝尔对于植物的亲缘关系有很强的辨别能力，但也有一些分类被证明是不正确的，例如，由于他把叶子的形状作为分类的基础，结果将蕨类植物与某些单子叶植物划为同一类群。

洛贝尔于 1584 年去英国担任宫廷植物学家，掌管皇家花园。为了纪念他在植物学上的贡献，一些观赏花卉被命名为 *Lo-belias*（半边莲属）。

瑞士植物学家博欣（1560—1624 年）在根据植物的亲缘关系对植物进行分类方面取得了新的进展。他的《植物图鉴》一书于 1623 年出版。这部以 40 年心血熔铸而成的科学著作，对约 6000 种植物作了描述。博欣以简明扼要的文字表现了植物的主要特征，如形状和大小、根和茎的分布、叶、花、果实和种子的性状等。按照植物主要特征上的相似性来对植物进行分类的做法，比洛贝尔以叶子形状分类更进了一步，意味着博欣更深入地认识了植物的亲缘关系。

博欣整理了当时十分混乱的植物名称，提出了双名命名制。那时，人们已知的植物数量已远远超过了古代学者的了解和描述，但在为新发现的植物命名时，却还没有共同遵循的依据，经常出现用旧名称来称呼新植物，用不同名称来称呼同一植物，以及用同一名称来称呼不同植物等情况。博欣的著作在对约 6000 种植物进行描述的同时，采用了双名命名的办法。他区分了植

物的属和种，每种植物通常都给予一个由属名和种名构成的双名。这一方法后来由林奈进一步完善了。

博欣曾在帕多瓦大学师从法布里修斯，回到瑞士后，在巴塞尔大学担任植物学、解剖学和医学教授。除了上述贡献之外，他还广泛研究了法国、德国和意大利的植物群，发现了不少新的植物品种。他所作的开创性工作，为他在植物学发展史上赢得了一个重要的位置。

在博欣对植物进行自然分类研究的时候，有些意大利植物学家在进行人为分类方面的研究。1583年，比萨大学的医学教授、植物园园长切萨皮诺（1519—1603年），出版了他的著作《植物十六卷》。该书除以第一卷介绍亚里士多德和苏格拉底等人提出的植物学原理外，其他15卷分别对1500多种植物进行描述和分类。切萨皮诺主要从哲学和理论角度来研究植物的分类法，并以性状比较稳定的植物果实作为分类的基础。这样的分类方法比较适合于各种实用目的。他的植物学观点对于以后包括林奈和雷（1628—1705年）在内的许多植物学家均有影响。

五、数学的发展

近代初期，随着自然科学的发展，数学的作用越来越大，不少著名的学者都指出了数学的极端重要性。伽利略曾经认为，宇宙就如同一本大书，科学写在其中。它展现在人们面前，任人们观看、阅读，但任何人都必须首先学会理解书上的语言、学会阅读这本书所用的字母，才能懂得这本书。它是用数学语言写成的，它的印刷符号是三角形、圆以及其它几何图形。没有它们，人就只能在黑暗的迷宫里徘徊。刻卜勒对数学和自然科学之间的关系是这样表述的：上帝在创造世界时受到数学考虑的指导，同时又使人类的心灵能够洞察数量关系；人演习数学就是认识已在自然界中物化的上帝的思想。笛卡尔也说，在一切世俗的科学中都应该运用数学的概念和证明，应该遵循次序和测量两大原则，即在一系列演绎过程中各种命题的排列顺序和数量处理。

这一时期，数学的主要成果表现在符号代数、解析几何、微积分的早期工作和对数方法等方面。

1. 符号代数

(1) 数字系统和数学符号

15 世纪中叶以来，一大批欧洲数学家为修辞性代数向符号性代数的发展作出了贡献。

中世纪后期，希腊—阿拉伯的数学知识已在欧洲传播。西班牙的摩尔人学校中所使用的数学教科书被译成了拉丁文。巴思的阿德拉德把阿拉伯文的《几何学原理》译成拉丁文后，很快就被作为大学的标准教科书。阿拉伯数系也在欧洲缓慢地确立下来。皮萨的列奥那多（约 1170—约 1250 年）曾从北非的阿拉伯人那里学到了大量数学知识，并在 1202 年出版的算经中首先介绍说，用 9、8、7、6、5、4、3、2、1 这 9 个数和符号 0 可以写出任何数。

15 世纪，由于印刷术在欧洲的推广，许多古希腊数学著作得以出版。这种情况推动了欧洲数学的发展。

文艺复兴时代的数学家为现代数学的符号系统奠定了基础。1489 年出版的一部算术著作中，使用了加法符号“+”和减法符号“-”作商业方面的计算。半个世纪后，荷兰的斯蒂文等人将其作为运算符号使用。到 17 世纪初，这些符号得到了广泛的使用。1557 年，有人提出了使用等号“=”的建议。大约过了 100 年，这个符号被普遍接受。1631 年，英国数学家奥特雷德（William Oughtred, 1574—1660 年）在《数学精义》一书中引入了乘法符号“×”。除法符号“÷”出现稍晚，首先见于瑞士数学家拉恩（J.H.Rahn）在 1659 年出版的著作中。17 世纪初，哈里奥特（Thomas Harriot, 1560—1621 年）首先引进了“大于”符号“>”和“小于”符号“<”。法国学者查克特在 1484 年的手稿中使用了根号。这种符号到 16 世纪初逐渐为人们所认识。笛卡尔在 1637 年把各种不同的表示代数数量的幂的方法发展为指数记号。意大利的帕齐奥利（约 1445—约 1514 年）在其 1494 年发表的著作中，对未知量及其幂、加和减等词使用了缩写。德国多明我会修士约尔达努斯·内莫拉里乌斯曾用任意字母代替词首或其他缩写方法，来标志已知和未知的代数量。

1585年，斯蒂文提出使用十进小数以取代六十进小数。他提供的书写十进小数的方法是：在每个数字后面添一个指标，以表明它在个位数右边的位置，如将十进小数0.3469写成 $3\ 4\ 6\ 9$ ，或写成 $3\ 4\ 6'''9''''$ 。到17世纪初，又出现了两种新的十进小数书写法，即苏格兰的纳皮尔（1550—1617年）使用的在个位数后加一个点的方法，和法国的维埃特（1540—1603年）提出的以一个逗号为前缀的十进小数书写方法。

(2) 维埃特

法国数学家维埃特在1591年出版的《分析术引论》中，系统地采用符号来代替原先的缩写词以表示量和运算。由于对代数学发展的这一重大贡献，他被称为现代代数符号之父。他还把代数应用到三角学，表明了怎样用代数方法以各种方式变换各个三角比并使它们互相关联。他的《应用于三角形的数学定律》也许是西欧关于如何利用6种三角函数解平面和球面三角形的第一部系统论著。在方程理论方面，他提出了二次、三次、四次方程的解法，给出了对不能直接求解的方程求近似根的法则。他逝世后出版的《论方程的整理与修正》一书，总结了他在这个领域的工作成果。

维埃特被认为是法国当时最优秀的数学家。在西班牙同法国胡格诺派的战争中，他曾利用自己的数学才能破译了被截获的西班牙军事文件。当时，这份文件使用了复杂的密码，西班牙国王腓力二世曾认为这种密码是不可能被破译的。所以，当腓力二世发现法国人已经了解他的计划时，便向教皇控告对手使用了妖术。

维埃特还用无穷乘积来表示 π ，计算出了到小数第10位的 π 的值。

(3) 塔尔塔格利亚、卡尔达诺和费拉里

发现三次方程的求解方法，是16世纪代数学的一大成就，而塔尔塔格利亚（1499—1557年）被认为是首先发现这一求解规则的数学家。

塔尔塔格利亚在1534年来到威尼斯，担任数学教师。在不久举行的一次数学竞赛中，他使用了解三次方程的规则而获胜。但他当时没有公开自己的解法。1537年，他的研究射击弹道的著作《新科学》出版后，米兰的数学家和医生卡尔达诺（1501—1576年）要求他公开三次方程的解法。塔尔塔格利亚以保密为条件将解法告诉了卡尔达诺，而卡尔达诺在1545年出版的《大衍术》一书中发表了这个解法。

在卡尔达诺的书中，还有四次方程的解法。这是由他的学生费拉里（1522—1565年）在塔尔塔格利亚的三次方程解法的基础上发现的。卡尔达诺自己在方程理论方面也有成就，他研究了方程的负根和虚根，并预见到方程的根与其系数之间的某些关系。他还写了一本关于赌博的书，最先较系统地计算了一些概率。

费拉里出身贫寒，年仅15岁时就到卡尔达诺家当仆人，同时开始学习拉丁语、希腊语和数学，1540年接替卡尔达诺在米兰的数学教师工作。卡尔达诺的《大衍术》发表了他对四次方程的解法之后，他与塔尔塔格利亚之间就谁首先解出三次方程的问题发生了争论。在1548年10月米兰的公开数学竞赛中，费拉里获得了胜利。

2. 解析几何

解析几何亦称坐标几何，它采用代数的记号和方法来表示并解决几何学中的问题，建立了几何曲线和代数方程之间的对应，从而使几何和代数的方法和知识可以一起用来解决几何或代数中的问题。

古代巴比伦、埃及和希腊、罗马的一些数学家，已经知道图形的几何与数的代数之间的某些对应，但那时的代数的记号和方法尚处于比较原始的状态，那时的数学家也还处于对现实世界的完全依赖和附属的状态，因此，建立几何与代数之间的对应的工作受到了限制。

直到 17 世纪初期，由于代数学渐趋完善并日益成为研究自然科学的重要工具和手段，解析几何的发展出现了一个突进。

(1) 笛卡尔的《几何学》

1637 年，笛卡尔的《几何学》作为其《方法谈》一书的附录而问世。《几何学》的第一和第二部分论述解析几何，第三部分论述方程理论。

笛卡尔把代数思想和记法引进了几何学。他用字母标示直线段，通常用 a, b, c, \dots 标示已知的或变化的线段，用 x, y, z 标示未知的或变化的线段，构成了字母或字母组合的乘积和幂，采用了至今还使用的那种书写指数的系统。他使用分析法来解几何问题。这种方法假定问题已经解出，然后写出在作图中涉及到的各种直线的长度之间必定成立的全部隐关系，每一个关系都由一个方程表示，因而该问题的解便归结为所有这些联立方程的解。

笛卡尔的解析几何学的基本概念，是二维平面上的点与有序实数偶之间的对应，获得这种对应的办法，是使平面上两条相交直线与点一起成为一个坐标系。在这个平面直角坐标系中，每个点有一个以有序实数偶 (X, Y) 为标志的唯一表示，反之，每个有序实数偶表示一个唯一的几何点。在建立起点与有序实数偶之间的这种对应之后，几何曲线与代数方程之间的关系便十分清楚。例如，给定一个简单的线性方程，就有与它相对应的几何曲线，这条曲线由平面上所有的其坐标 (x, y) 满足这个方程的点所构成。相反，给定了一条几何曲线，也就有与它相对应的代数方程，使其所有点的坐标满足这个方程。

(2) 费马的创见

与笛卡尔同时代的法国数学家费马（1601—1665 年）也独立地发明了把代数应用于几何问题的方法，提出了用可以导出曲线特征性质的方程来表示曲线的思想。

费马的职业是律师，曾担任图卢兹议会的顾问，数学是他的业余爱好。在研究古代几何学的基础上，他发现，如果通过坐标系把代数运用于几何，将使轨迹的研究更易于进行。在《平面和立体的轨迹引论》这部著作中，费马提出，使两条直线彼此成一定角度，最好是直角，将其交点作为原点，使离原点的距离分别同方程的两个变元成正比，就能方便地表示出方程。在他的著作中，还第一次出现了表示一条通过原点的直线的方程。他还用自己的符号写出了抛物线方程和等轴双曲线方程。

费马也是最早发现极大值和极小值问题的一般解法的数学家之一，并因此而对从解析几何向微积分的过渡产生了推动作用。费马生前发表的研究成果甚少，他的大部分著作和学术通信都是在他逝世后才出版的，上述《轨迹

引论》就是在 1679 年问世的。

(3) 德扎尔格的方法

当笛卡尔和费马发现解析几何学的基本原理时，另一个法国数学家德扎尔格（1591—1661 年）也提出了一些对几何学日后发展具有重要意义概念。

德扎尔格生于里昂，是一个职业建筑师，曾作为军事工程师在军队中服务，后来担任过枢机主教黎塞留和法国政府的技术顾问。他在 1628 年与笛卡尔相识，随后成为巴黎一个数学家组织的成员。他最主要的著作是《试论锥面与平面相截的结果的初稿》，1639 年出版于巴黎。他在对圆锥曲线的研究中，引入了射影几何学的主要概念。他用一个平面以不同方式截割锥面或柱面，得到了各种类型的圆锥曲线，并且提出了根据锥面底部的圆的几何性质推导出圆锥曲线的几何性质的方法。

德扎尔格的这一创新对帕斯卡产生了重要影响，受到其赞赏并被进一步应用。但在他们两人都辞世之后，德扎尔格的方法很快遭到冷落。直至 19 世纪中叶射影几何学重新引起人们的兴趣之时，德扎尔格的思想的重要意义，才获得普遍的承认，并成为迅速发展起来的射影几何学的基础。

3. 微积分的酝酿

微积分作为数学的一个分支，其形成是与牛顿和莱布尼兹的名字联系在一起。他们在积分学和微分学这两个数学领域之间建立了联系，并引入了微分、积分运算的通用符号和方法，从而使微积分成为科学研究的强有力工具。

但是，积分学中的问题早在古希腊时就已出现，而导致产生微分学的问题也在 17 世纪初期就已提出并得到部分解答。

17 世纪初，在处理无限小量的数学方法方面，取得了明显的进展，而微积分正是在此基础上形成的。

在 1615 年出版的《测量酒桶体积的新科学》一书中，刻卜勒比较系统地研究了确定旋转体体积的问题。那时，测量酒桶容量的方法十分粗糙，只是将一根量杆插入桶底来估算，而很少考虑桶的弯曲情况。刻卜勒提出，把桶的纵剖面绕它的轴旋转，便可得到一个与桶有相同容积的主体；把这个旋转体分割为无数个基元，然后把它们加在一起，便可得到其容积。刻卜勒在自己的著作中，把这种方法运用于 90 多种特殊情况。但刻卜勒的方法还有待于发展和完善，因为在某些情况下，他只能满足于可能是正确的结果。然而，他的无限小量的概念提供了一种新的途径。不久，意大利数学家卡瓦列利以此为基础提出了自己的方法。

卡瓦列利（1598—1647 年）在少年时代就因接触了欧几里得的著作而对数学产生浓厚的兴趣。他认识伽利略后，就自认为是他的学生。1629 年，在博洛尼亚大学担任数学教授时，他提出了确定几何图形面积的不可分法。6 年后，他出版了一本有关这个问题的专著。不可分法公布后，受到一些数学家的批评。为了答复批评意见，卡瓦列利后来又写了《六道几何习题》，具体地解释了他的不可分法的原理。

不可分法也被别的数学家所使用。法国数学家罗贝瓦尔（1605—1675

年)宣称,他独立地发明了这种方法。他研究了确定立体的表面积和体积的方法,事实上进一步改进了卡瓦列利在计算某些较简单的问题时所用的不可分法,成功地求得了许多曲线的面积。

4. 纳皮尔与对数

17 世纪初,计算技术有了一个重大的进步,这就是对数的发明。借助于这种方法,乘法和除法化归为加法和减法,开方化归为简单的除法。

首先提出这种方法的,是苏格兰的纳皮尔(1550—1617 年)。纳皮尔是一个教会和国务活动家,数学是他的业余爱好。而在数学中,他特别热衷于研究设计便于计算的方法。大约从 1594 年开始,他着手构筑他的计算体系。通过排出一个固定数(作为基底)的各次幂的表,便能迅速地算出根、积和商。1614 年和 1619 年,纳皮尔所著的两本有关对数规则的书先后出版,系统地介绍了对数及其构造方法。

伦敦的亨利·布里格斯(1561—1631 年)是纳皮尔的朋友,他立即认识到了对数的实用价值,并在 1624 年出版的《对数算术》一书中给出了前 30000 个自然数的常用对数,直到小数 14 位。后来,荷兰数学家阿德里安·弗拉克在 1628 年对此作了补充,使之覆盖了从 1 到 100000 的一切数。刻卜勒对纳皮尔的发明也十分重视,并按照自己的思路构思了对数表,并于 1624 至 1625 年间发表。

对数的发明,使得需要进行大量繁杂计算的数学家、天文学家等能够极大地减轻负担,因此,这种方法很快就被普遍接受了。

六、物理学的成就

1. 力学

16 世纪，对于力学问题的探讨日趋活跃。1544 年，曾用数学方法推演杠杆原理的古希腊学者阿基米德的著作出版。此后，出现了欧洲学者采用同样方法进行力学研究的趋势。西蒙·斯蒂文（1548—1620 年）是最先在这一领域作出显著成就的学者之一。

(1) 斯蒂文与静力学

斯蒂文是荷兰人，年轻时曾在商店里当过伙计，后来成为军事工程师，还担任过行政和军事后勤职务，是那个时代多才多艺的科学技术专家。他设计的一种水闸系统成为荷兰的重要防御手段，依靠它可以用水来驱赶敌人。他发明了一种挂帆的水陆两用马车，可乘坐 20 多人，专在海滨使用。他在筑垒、机械、航海以及天文学、数学和光学等许多领域，都有发明、改进或提出独到见解。

1586 年，斯蒂文发表了三部关于静力学的著作。在《静力学原理》中，他以独特的思路提出了斜面定律。他设想了一个实验：一个竖立的三角形或三角形截面的棱柱，其底边是水平的，AB 和 BC 是两个高度相等的斜面，AB 的长度是 BC 的两倍，一根由等距等重的球组成的闭合的链吊挂于这个三角形之上。当链处于平衡状态时，底边以下悬的球的作用可以忽略不计，而 AB 斜面上的球产生的沿斜面的总拉力等于 BC 斜面上的球产生的总拉力。由于 AB 的长度是 BC 的两倍，它上面的球数也应是 BC 斜面上球数的 2 倍，这样，AB 斜面上每个球产生的沿斜面的拉力，只有 BC 斜面上每个球产生的拉力的一半。斯蒂文由此而得出了“斜面定律”：当斜面高度相等时，同一球所产生的沿斜面的拉力与斜面的长度成反比；当斜面长度最短时，即等于斜面的高度时，球产生的压力最大，等于球自身的重量。通过对斜面上由两根分别与该斜面平行和垂直的绳索支承的物体的考察，斯蒂文提出了力的平行四边形法则。由于这个法则，可以把复杂的力分解为简单的力，力的定量研究成为可能。这种力的三角形与力的平行四边形的图解等价，给静力学的研究以新的推动，而在此之前，静力学是以杠杆理论为基础的。

斯蒂文在流体静力学方面也有重大发现。他通过实验证明，容器中的液体对容器底部的压力与容器的形状无关，而只是由液体的高度和容器的底面积的大小决定的。他注意到，一根细管中少量的水，能够对一个大容器底部的一个插塞施以巨大的压力。他的这个发现与后来由帕斯卡提出的定律是相通的。

斯蒂文在 1586 年还发表了一个实验报告，这是一个自由落体实验。斯蒂文和他的朋友取两个铅球，其中一个的重量为另一个的 10 倍；使这两个铅球同时从 30 英尺高度坠落，结果这两个球基本上是同时落地。这一实验结果，否定了亚里士多德关于落体通过规定距离的时间与落体的重量成反比的观点。

斯蒂文在力学方面的成就是开创性的，但在当时却未被重视，直到他的著作在 1608 年被译成拉丁文后，才在欧洲得到广泛传播。

(2) 伽利略的研究

伽利略不仅在天文学方面作出了杰出的贡献，在力学方面也取得了卓越成就。他用科学实验和数学分析相结合的方法研究力学问题，探索落体运动、惯性运动的规律，为现代力学奠定了基础。

落体定律。据说，1590年时，年轻的伽利略在比萨斜塔上做了一个著名的实验，证实了“物体下落的速度与物体的重量无关”，从而否定了亚里士多德关于较重的物体下落得比较快的断言。虽然学术界对这次实验是否确有其事尚有争议，但伽利略从1590年到1609年进行了深入的研究，并证实了以下结果：所有物体在真空里的下落速度一样快；运动是匀加速的。

在1638年出版的《关于两种新科学的谈话》一书中，伽利略总结了他对力学问题的研究和思考。关于落体运动，他通过书中人物之口指出，如果完全排除空气的阻力，那么所有物体下落的速度是一样的。他认为，甚至不用做许多实验，就可以通过简单扼要而又具有约束力的结论来证明，较重的物体是不可能比较轻的物体向下运动得更快的。根据较重物体下落得较快的断言，如果把两个自然速度不同的物体结合在一起，速度慢的物体就会障碍速度快的物体；假定将一块以8个单位的速度下落的大石头与一块以4个单位的速度下落的小石头连接起来，其速度应小于8个单位，而这两块结合在一起石头要比那块以8个单位的速度向下运动的石头更重，这样一来，不就出现了重量较大的物体比重量较小的物体运动得更慢的情景吗？伽利略以简单的逻辑推理，驳斥了直至那时仍支配着人们认识的亚里士多德的观点。

伽利略还首先使用了匀加速的概念和惯性的概念来解决落体定律问题。他所说的匀加速，指的是在相等时间内速度的增加也相等。而用惯性来描述自由坠落的物体时，便得出了这样的结果：重力一直作用于该物体，其效应累积起来，使该落体的速度均匀增加。伽利略由此而指出：自由落体的速度与时间成正比地增加；下落的距离与时间的平方成正比地增加。

当时，还没有办法直接测量垂直坠落物体的加速度，伽利略便利用了斜面来进行实验。他相信，物体的自由下落和物体在斜面上向下滚动是相同的过程。他用一块开了槽的长木板作为斜面，让一个铜球顺槽滚下。他发现，物体在下落时得到的动量随着斜面的倾斜度与其长度的比例变化而发生变化；对于任何规定的倾斜度，距离与经过它所需时间的平方成正比。不过，伽利略在做这个实验时还不知道滚球的转动惯性的作用。

摆的等时性及其他。伽利略早在1582年刚满18岁时，就发现了摆的等时性原理。在比萨大教堂，他无意中发现，大吊灯被修理工触动而摆动时，随着摆幅逐渐变小，摆动的速度也逐渐变慢。通过仔细的观察和计算，他发现无论吊灯的摆幅大小如何，左右摆动一次的时间是一样的。后来，他又用不同重量的东西悬在不同长度的绳上作各种摆动实验，并用沙钟计算时间，结果终于推翻了亚里士多德关于“摆幅越小需时越少”的观点。他以数学公式表达了摆动的规律，即摆动的周期与摆的长度的平方根成正比，而与摆锤的重量无关。

摆的等时性原理为制造摆钟提供了依据。后来，伽利略想到了这种可能性，并让自己的儿子和学生试制。但是，当时还未能发明使摆能够长时间持续摆动的装置。

伽利略还研究了抛射体的运动、物体的碰撞动力学等问题。此外，在流体力学方面，伽利略提出了一个重要的概念，即流体由孤立的粒子构成，它

们在受到压力的情况下便会运动，从而把压力传遍整个流体。这个概念事实上成为流体力学的基础。在气体力学方面，伽利略通过实验证明，空气具有重量。他还估算出水比空气重 400 倍左右。这个数据同实际的 773 倍相比尚有距离，但在伽利略的时代，衡器的精确度还不高，误差是很难避免的。

(3) 托里拆利的发现

创立流体力学。托里拆利（1608—1647 年）生于意大利北部的一个贵族之家，20 岁时到罗马，师从著名数学家和水利专家卡斯特利。卡斯特利是伽利略的朋友，竭力推崇和宣传伽利略的思想。在他的影响下，托里拆利对伽利略和伽利略的事业心向往之。1638 年，伽利略的《关于两种新科学的谈论》出版之后，托里拆利深受启发，并由此而对运动力学的问题进行了深入的研究。1641 年，他的《论重物》一书在佛罗伦萨出版。3 年后，此书译成拉丁文出版时改名为《论自由落体和抛射体的运动》，托里拆利在书中总结了自己的力学研究成果。他也同伽利略一样，证明了沿相同斜面落下的物体的速度相等。此外，他还确定了与水平面成任意角抛出的物体的运动轨道具有的抛物线性质，以及其他一些构成弹道学基础的原理。

创立流体力学是托里拆利最主要的成果之一。他研究了水从容器壁上小孔中流出的情况，注意到容器侧面小孔中流出的水呈抛物线状，并证明了射流的速度与小孔以上水面的高度的平方根成正比。这个公式被称为“托里拆利公式”，它纠正了托里拆利的老师卡斯特利的一个错误。卡斯特利曾经认为，液体从容器细孔中流出的速度与细孔上面的液面高度成正比。托里拆利的发现，奠定了流体力学的基础。

1641 年 10 月，托里拆利终于得到阿尔切特里会见伽利略。当时，伽利略已重病在身，且双目失明。托里拆利一面帮助他整理论著，一面在他指导下进行研究。1642 年伽利略去世后，托里拆利接替了他曾担任的托斯卡纳大公的宫廷数学家职位，并继续在力学方面进行卓有成效的研究。

获得真空。不久，托里拆利还发现了大气压力。当时，人们已经知道，抽水唧筒不能把水提升到超过 10 米的高度。伽利略逝世前曾对这一现象予以注意，但未来得及探明其中的原因。托里拆利和伽利略的另一个学生维维安尼通过实验发现，比重较水约大 14 倍的水银可以被提升的最大高度大约是水能被提升的高度的 $1/14$ 。由此，他们得出了一个重要的结论：唧筒提升液体所能达到的高度与液体的比重有关。

在取得这一成果的基础上，托里拆利和维维安尼又做了一个新的重要实验，在一根 1 米长、一端封闭的玻璃管中装满水银，用手指堵住管口后将玻璃管倒立于盛有水银的容器中，然后移开手指。于是，玻璃管中的水银柱下降到离容器中水银面以上 76 厘米处。玻璃管顶部出现了 24 厘米的空间。这是人类首次有意识地造成的真空状态，后来被称为“托里拆利真空”。托里拆利还观察到，水银柱的高度会出现微小的变动。他认为，这是由于大气压力的变化而造成的。据此，他发明了水银气压计，并进一步发现了气压的变化与气温的变化有关。

托里拆利 39 岁时英年早逝，但他在力学研究方面的成就，使他在科学史上据有重要位置。

(4) 帕斯卡的成果

托里拆利的同时代人帕斯卡（1623—1662年），也做了一系列重要的力学实验并获得了有意义的结果。

帕斯卡从小擅长数学，16岁时就发表了关于圆锥曲线的论文，随后在数学研究方面取得了不少成果，并为帮助父亲计算税收而制造了一个计算装置，它被认为是第一架数字计算器。不久，他的兴趣转向力学问题。

帕斯卡在得知托里拆利所做的真空实验后，用汞和水重复了这个实验。不久，他又设计了一个新实验，进一步证明了托里拆利的发现。他让自己的亲戚皮埃尔在家乡克勒蒙菲朗的多姆山上，从山脚到山顶，在不同高度观测托里拆利气压计中水银柱的高度，发现越往山上走水银柱高度越低。他自己在巴黎的高层大楼上做了同样的实验。帕斯卡由此得出结论，大气压力随高度的变化而变化，高度越高，压力越小。他提出，可用气压计作为测量高度的仪器。虽然这种测量直到18世纪初才开始实际进行，但帕斯卡的发现在以后的地学研究乃至现代航空技术中都得到了广泛应用。

帕斯卡还同皮埃尔一起，对同一地点大气压力的变化进行了观察和测量，对气压变动与天气情况的关系作了初步探索，为利用气压计预测天气开辟了道路。

在实验过程中，帕斯卡对托里拆利的水银气压计作了改进，还发明了注射器。

在流体力学领域，帕斯卡也有重大贡献，其中最主要的是提出了关于液体压力的一个定律，即帕斯卡定律。帕斯卡通过实验发现，在密闭的容器中，静止流体的某一部分发生的压力变化，都能毫无损失地传递到流体的各个部分和容器壁。例如，在水力系统中的一个活塞上施加一定的压力，必将在另一个活塞上产生相同的压力增量。如果第二个活塞的面积是第一个活塞的10倍，那么作用于第二个活塞上的力也将增大为原来的10倍，而两个活塞上的压强仍然相等。这个定律后来成为各种液压机械的工作原理，得到极为广泛的运用。

(5) 居里克的实验

居里克（1602—1686年）的工作对于研究气体的物理性质极有价值。他生于马德堡，曾先后就读于莱比锡大学和莱顿大学。在当时有关真空问题的争论的影响下，他开始研究气体力学。

为了产生局部真空，居里克发明了空气泵，并利用它做了一系列实验。他曾把一个装满水的木桶封闭起来，并用沥青将其缝隙填死，然后用泵将水抽出。但空气仍能通过微孔进入木桶内。于是，他改用铜制容器，并将容器中的空气抽出。但抽到一定程度时，铜制容器便被压扁。居里克认识到，这是由于空气压力的作用以及容器没有制成真正的球形。他又制作了一个铜球，终于成功地获得了很高的真空度。上述这些工作，都是在著名的1654年公开实验之前就已完成的。

1654年，居里克在雷根斯堡为国王斐迪南三世和帝国会议演示了大气压力的存在。他在两个空心的铜制半球之间放上垫圈，并将其合在一起，形成一个直径35.5厘米的球体，然后通过球体上的气嘴将其中的空气抽出，关上阀门。两个半球被空气压力紧紧地压在一起，最后用16匹马才将其拉开。这就是“马德堡半球”实验。居里克第一次显示了大气压力的巨大力量。为气体力学作出了开拓性的贡献。

居里克用天平比较了一个容器在被抽空前后的重量，证实了空气是有重量的。他在空气和真空性质方面还有其他发现，如：被抽空的容器的视在重量在不同日子中存在着差异，是由于大气压力的微小变化以及大气对悬浮容器所产生的阿基米德上推力的作用；光线能够穿过真空，而声音则不能，等等。

居里克的研究及其成果，最早是由维尔茨堡大学教授朔特（1608—1666年）在其《流体——气体力学》一书中进行介绍和论述的。居里克的有趣实验吸引了玻意耳，并促使他进一步深入地研究居里克实验中所涉及的问题。在罗伯特·胡克的协助下，玻意耳改进了居里克的抽气机，并用它作了大量实验。玻意耳发现了空气的“弹性”，即在恒温条件下，空气的体积与压力成反比。这个发现后来被称为玻意耳定律，虽然玻意耳当时还没有认识到这个发现的重要性。玻意耳的其他实验，还表明了空气对于燃烧、动物的呼吸、声音的传播等都是不可缺少的。

(6) 建筑中的力学

材料。达·芬奇在自己的笔记中曾谈到了关于柱和樑的强度，这表明他曾对材料在应力下的性能进行过实验研究。虽然他使用的方法还较粗糙，表达也还欠严谨，但他仍提出了一些很有价值的见解，并表明自己已经超越了纯粹根据经验来决定建筑中如何使用材料的时代。达·芬奇注意到，由一组柱子紧密结合在一起而构成的一个立柱所能够承受的荷载，要数倍于这些柱子在各自独立状态下所能承受的荷载。他指出，一根规定截面积的支柱的承载能力与其高度成反比。他还试图算出支柱的高度和直径发生变化时，其承载能力的变化。他对樑也作了类似的实验，得出了关于规定截面积的樑的承载能力与其跨度成反比的结论。

到17世纪初，伽利略对材料强度的问题进行了深入的研究。在《关于两种新科学的谈话》这本书中，他详细考察了材料力学的一系列问题，如樑的抗断裂力及其与樑的长度、厚度、截面积等因素的关系、金属丝的抗拉性等等。由伽利略开始，许多学者在这一领域展开了研究。瑞典学者沃茨、法国建筑师布隆代尔、意大利学者马什蒂和格兰蒂等人，曾对伽利略关于樑的强度的结论作了某些修正。法国物理学家马略特（1620—1684年）通过对樑的实际试验而提出，纤维在不同荷载下的延展程度也不同，延展程度与荷载成正比，但延展有一个度，超过这个度纤维就不能承受荷载而断裂。

结构。在文艺复兴的影响下，古典式建筑重新流行。同时，出现了一些介绍和说明古典建筑结构的著作，其中最具有代表性的，是卓越的意大利建筑师帕拉第奥（1518—1580年）所著的《安德列·帕拉第奥的建筑学》。

帕拉第奥早年曾在建筑工地当石工，1540年开始从事设计，并多次到罗马考察和测绘古罗马建筑遗址，1544年出版了《古罗马遗迹》一书。他设计的具有古典主义风格的宅邸和别墅式样长期被人模仿，18世纪在欧洲达到鼎盛并传播到世界其他地区。

在4卷本的《建筑学》中，帕拉第奥用许多自己的设计来说明古罗马的设计原则。其中第一卷研究了材料、柱式和装饰；第二卷是他本人的建筑设计图和古代建筑的复原图，图上均按比例标出尺寸；第三卷是桥樑、会堂等公共建筑的设计和城市规划；第四卷是古罗马神殿的复原图。帕拉第奥研究了跨度与拱座厚度的关系，认为拱座的厚度不应少于拱跨的 $\frac{1}{5}$ ，但也不必

多于其 $1/4$ 。但他没有考虑到拱高对于拱的水平推力的影响，并以为半圆形拱对其拱座没有水平推力。他的这种有关拱的力学观点在很长时间内没有受到怀疑。

17 世纪上半期，法国建筑师德朗在《拱的建筑》一书中，提出了一种确定拱座应有厚度的作图方法。这种方法对半圆形、弓形和尖形的拱都适用，其主要之点是根据拱的弧度来决定拱座的厚度。不过这个方法也有缺点，它未把拱座的墩的高度和拱的荷载这两个因素考虑进去。

2. 光学

(1) 光学原理的探讨

莫洛利克。莫洛利克（1494—1575 年）生于意大利的墨西拿，曾当过牧师和数学教师，同时也是物理学家和天文学家。他在物理学方面的主要研究工作集中于光学，如光的直线传播，光在平面镜、球面镜、柱面镜和锥面镜上的反射和光的折射等问题。他指出，凸透镜是会聚的，而凹透镜是发散的；光线在通过具有平面平行界面的透明板时，其方向不变，仅平行于其本身有一位移。他还研究了虹，最先指出虹有 7 种颜色。而在此之前，人们普遍认为虹只有 3 种颜色。在视觉理论方面，他指出，光线在眼睛的晶状体中折射，就象在透镜中折射一样，并在视网膜上引起视觉。他最早说明了眼睛近视和远视的原因，认为这分别是由于晶状体的曲率过大或不足造成的。

莫洛利克在 1567 年写了一本书，名为《论光》，但当时未能出版，直到他逝世后 30 多年，才于 1611 年问世。

刻卜勒 刻卜勒也是当时主要的光学家。在 1604 年，他凭直觉、但又是最先明确地提出了光度学的基本定律，即照度与离光源的距离的平方成反比。他还通过几何构造正确解释了以前的光学家们曾讨论过的问题：为什么太阳光从一个小孔进入暗室时，不论这个孔的形状如何，在屏上形成的图像总是圆的。他以一本书代表发光体，在书和墙之间放置一个中间有一角孔的屏，然后在书的一角系上一根线，再将线穿过角孔拉直至墙壁，线端系一支粉笔。拉直这根线并沿角孔边沿绕转时，粉笔在墙上画出了一个与角孔相似的图形。再将线的另一端依次系在书的其他位置并重复上述过程，结果在墙上画出了许多部分重叠的角孔图形，这些图形构成了一个总的轮廓，呈现出这本书的形状。

此外，刻卜勒还论述了光的折射和视觉理论。

在 1611 年出版的《屈光学》中，他描述了望远镜的原理，介绍了具有凸透镜目镜的望远镜的结构，提出了近似的折射定律和透镜公式。他对眼睛功能的解释比前人更为准确，如认为视网膜是眼睛接受晶状体所形成的图像的部位，视力是对刺激视网膜的感觉等。

斯涅耳。在刻卜勒之后，荷兰莱顿大学的数学教授斯涅耳（1591—1626 年）取得了一个进展。约在 1621 年，他通过实验发现了光穿过两种互相接触的媒质的界面时，其穿行路程与两种媒质的折射率之间的关系。但斯涅耳的这一发现当时没有公布。后来，著名荷兰物理学家惠更斯可能看到了斯涅耳的手稿。他在 1703 年出版的《光的折射》中，提到了斯涅耳的发现。于是，光的折射定律被称为斯涅耳定律。

笛卡尔。1637 年，笛卡尔的《屈光学》一书出版。笛卡尔论述了光的

传播、反射和折射定律。他认为，光是一种作用或压力，它从发光体经过媒质传到人的眼睛；光是“即时”传播的。他力图从力学上证明反射和折射定律，假定光的本性是一种由发光体产生的推力或运动倾向，它同一个实际运动的物体遵循同样的力学定律，如同一个被击出的小球一样，在碰到坚硬平滑的表面而反射时，其入射角必定等于反射角。他提出，光由媒质中的运动构成，因此，它碰撞在柔软松散的空气微粒上比碰撞在较坚硬紧密的水或玻璃的微粒上更容易减弱，就象一个球在地毯上不如在光滑的桌面上容易滚动一样。在一系列研究的基础上，笛卡尔最先在数学上导出了光的折射定律，这条定律在实验上已由斯涅耳在 1621 年左右确立。

格里马尔迪。意大利博洛尼亚的格里马尔迪（1618—1663 年）是耶稣会学校的教师，讲授哲学和数学，但光学是他的主要研究对象。他发现了光的衍射现象，并对其作了系统的研究，提出衍射的某些规律。

格里马尔迪在做实验时注意到，让日光从一块有划痕的金属板反射到一个屏上，能产生色带。这一发现成为发明反射光栅的先声。根据有划痕的金属板对光的作用，他在一定程度上解释了鸟类羽毛、昆虫翼的闪光颜色的产生。他认为，颜色就是“光的变态”，这种变态也许就在于光的运动类型和速度的变化。当眼睛受到速度不同的光振动的刺激时，就出现了不同的颜色。格里马尔迪还用棱镜得到了太阳的光谱。

格里马尔迪对光所作的实验和思考的成果，在他的主要著作《关于光、色和虹的物理数学研究》中得到了表述。这本书是在他逝世两年后的 1665 年出版的。

(2) 光学仪器的发明和改进

望远镜。最早利用透镜的光学性能，是同改善视力的目的联系在一起。大约在 14 世纪前，就已有使用眼镜的记录。14 世纪初，威尼斯的眼镜制作业大概已有一定规模。那时，为了防止眼镜制作者用玻璃代替水晶欺骗顾客，还制订了专门的法律。14 世纪中叶，戴眼镜已成为上层人士的一种时尚，不少人甚至在请人绘制肖像时都要求画成戴眼镜的。但从使用眼镜到发明望远镜，经过了大约 300 年的时间。

16 世纪后期，意大利学者波塔（1535—1615 年）讨论了有关望远镜的原理。在 1558 年出版的《大自然的魔术》一书中，他提出可以把凸透镜和凹透镜结合起来使用以观察远处和近处的物体。据说，意大利在 1590 年就已有望远镜，它由一个凸面物镜和一个凹面目镜组成，但当时可能没有受到特别的注意。

关于望远镜的最早发明者，有种种不同的说法。其中较为普遍的看法是：17 世纪初，荷兰制镜工匠汉斯·利帕希偶然地把目光穿过两个透镜观看远处教堂顶上的风标，他惊奇地发现，风标被放大了。于是，他开始制作“远距离观望仪器”。他最初制成的望远镜比较简单，由一个双凸透镜作为物镜和一个双凹透镜作为目镜。1608 年 10 月，荷兰议会审议了利帕希的专利申请。根据议会的决议，成立了一个专门委员会与利帕希商谈，并探讨是否可将这种仪器改进为可用双眼同时观察。利帕希得到了一笔经费，两个月后制成了一个双筒望远镜。但他未能获得专利权，因为当时还有其他人试图获得这项专利。正是在这时，望远镜在欧洲各国传开了。1609 年，在巴黎、法兰克福、米兰、威尼斯和伦敦，都已能买到这种可用来观看远处景物的仪器。

伽利略在 1609 年听到了有关荷兰人制造出了一种观察远处的物体就象近在眼前一样清楚的仪器的消息。作为杰出的科学家，他敏锐地意识到了这一发明所具有的科学可能性。依靠自己精深的光学知识，他独立地制成了由一个平凸透镜和一个平凹透镜组成的望远镜。这种望远镜本质上是与荷兰望远镜相同的，但比荷兰工匠制作的更好。

望远镜一出现，首先被认为对于军事和航海具有重大意义。但当伽利略用它进行天文观察并获得重大发现之后，望远镜就成了人们认识自然、发展科学的新工具了。

不久，刻卜勒在 1611 年出版的《屈光学》中，解释了荷兰望远镜或伽利略望远镜的光学原理，并进一步提出了使用两个双凸透镜的望远镜结构，即后来所称的“刻卜勒望远镜”。这种望远镜可以获得比荷兰望远镜更宽阔的视野，镜筒也可以更短。他还证明，一个凹透镜和一个凸透镜在适当距离上的组合，能够得到比单用一个凸透镜时更大的图像。这一见解后来导致了远距离照像透镜组合的发明。

刻卜勒在望远镜光学原理方面很有研究，但他自己没有制作望远镜。第一架被称为“刻卜勒望远镜”的天文望远镜，大约是在 1613—1617 年间由耶稣会教士沙伊纳制成的。沙伊纳还发明了在用望远镜作天文观察的时候保护眼睛的方法，即把有色玻璃片安装在透镜前面以减低光的强度。

在此后的时间里，望远镜的结构和性能不断获得改进，尤其是牛顿在 1668 年超越了折射式望远镜的框框，制成了第一架反射式望远镜。

显微镜。显微镜大约和望远镜产生于同一时期，而且，究竟是谁最先发明了显微镜也是不明确的。很可能显微镜最早也出现于荷兰，是米德尔堡一个名叫扎哈里亚·詹森（1580—1638 年？）的眼镜工匠制成的。他的显微镜由一个作为物镜的双凸透镜和一个作为目镜的双凹透镜所组成，镜筒长约 18 英寸（约 45 厘米），直径约 2 英寸（约 5 厘米）。而最先把显微镜用于科学研究的大概也是伽利略。约在 1610 年，他用显微镜研究了昆虫的运动器官和感觉器官。1614 年，他详细描述了显微镜下的苍蝇。

17 世纪中叶，英国物理学家罗伯特·胡克（1635—1703）制成了以一个半球形单透镜作为物镜和一个平凸透镜作为目镜的显微镜。这个显微镜有一拉筒，可调节距离。镜筒安装在一个支架上，可以变化角度。为了增加被观察物体的亮度，还使用了一个带球形聚光镜的照明灯。胡克后来出版了一本名为《微观画集》的书，具体地介绍了显微镜及其用途，并描述了自己在显微镜中看到的世界。他画出了雪片的晶体结构、苍蝇的眼睛、蜜蜂的螫刺器官、羽毛的结构、霉菌的形状等许多人们前所不知的东西。他还第一次使用“细胞”这个词来称呼软木的蜂窝状结构。胡克的工作使显微镜迅速流行，促进了人们对微观世界的认识。

3. 热学

(1) 对热现象的研究

近代前期，对热学的研究尚处于起步阶段。

关于热的本质，还存在着不同的看法。弗朗西斯·培根在其 1620 年出版的《新工具》一书中，认为热是一种运动。而差不多与他同时代的法国学者卡桑狄（1592—1655 年）则指出，热是由特殊种类的原子组成的。

这种分歧在一定程度上是对热的传统认识上的差异的延续。柏拉图曾强调热是一种运动，而亚里士多德关于火的概念则认为，火是四种物质元素之一。而在近代初期，人们也还很少明确区分热和火。

然而，用实验方法研究热现象的过程也已开始。如关于热的幅射问题，意大利学者波塔在 1589 年就已认为，凹镜能够反射热、冷、光和声。他描述了这样一种情况：在镜前放一支点燃的蜡烛，当眼睛位于共轭焦点时，眼睛能感觉到蜡烛发出的热和光；而如果把雪放在蜡烛的位置上，冷也会被反射。弗朗西斯·培根曾经作过用取火镜来聚焦看不见的热的实验，发热体是被加热的铁、石头或沸水。

到 17 世纪下半期，玻意耳、胡克、马略特等著名学者把热学研究向前推进了一大步。

(2) 温度计

随着对热现象研究的展开，出现了测试温度的仪器。一般认为，近代第一个温度计，是伽利略根据空气受热膨胀的原理制作出来的。伽利略的学生维维安尼认为，伽利略约在 1592 年就已发明了这种测量冷热程度的仪器。伽利略的朋友卡斯特利，也曾详细地描述了他在 1603 年目睹的伽利略使用温度计检测冷热程度的演示。这种温度计是一根下端开口、上端为一球泡的细玻璃管。伽利略先将玻璃泡加热，然后将开口的一端浸入水中。随着玻璃泡温度的下降，泡中的空气收缩，玻璃管中的水上升到容器内的水面以上。玻璃管上标有刻度以显示冷热的程度。

这种温度计后来由伽利略的朋友、帕多瓦大学的医学教授圣托里奥加以改进后用于测量人体温度。弗朗西斯·培根在《新工具》中，也描述了一种和伽利略的测温计类似的仪器。这种空气温度计的缺点，是受空气压力变化影响而不很精确，但在 17 世纪上半期是被广泛采用的。

1632 年，法国医生让·莱伊首先提到了液体温度计。他提出，可以把伽利略的测温计倒过来用，即在玻璃泡中装满水，把它放在发烧病人的手中，水受热膨胀而在玻璃管中上升，以此来显示温度的高低。但他很可能没有把玻璃管开口的上端封死，而管子若是开口的，水的蒸发就会影响测量的可靠性。

约在 17 世纪 40—50 年代，托斯卡纳大公斐迪南二世实现了液体温度计的一个重大改进。他用染色的酒精代替水作为测温液体，并把玻璃管密封。其刻度是用细小的玻璃珠直接制在玻璃管上的。这种温度计制作时在玻璃泡的大小、玻璃管口径、酒精的量这三者关系上都保持一致，因而它们显示的刻度也都基本一致。

此后，玻意耳、胡克、惠更斯、哈雷、牛顿以及其他不少科学家，都曾为确定温度计的定点而提出过方案。但温度计趋于完善已是 18 世纪的事了。

4. 磁学

(1) 吉尔伯特的实验与发现

1558 年，中世纪法国学者帕雷格伦纳斯（生卒年不详）写于 1269 年的《关于磁石的书信》的手稿发表了。帕雷格伦纳斯详细介绍了作为航海仪器的罗盘，描述了磁石的性质，讨论了磁石两极的确定、磁极的相互作用、接

触引起的磁化以及磁感应等问题，还推测磁力可以转化为动能。帕雷格伦纳斯的作品问世说明了近代初期人们对磁的现象的兴趣增长，同时也促进了磁学研究。

1600年，近代磁学的奠基人、英国物理学家威廉·吉尔伯特（1544—1603年）所著《论磁石、磁性物体和大磁体地球》一书出版。吉尔伯特曾在剑桥大学学医，1569年获得医学博士学位，后来在伦敦行医，1600年成为伊丽莎白一世女王的御医。但吉尔伯特的主要兴趣和成就不是在医学方面，而集中于磁和电的研究。他的著作总结了自己多年工作的成果，其中包括对自己所做的600多个实验的介绍。

吉尔伯特发现，磁体永远有两个极：北极和南极，在分割磁体时，也永远不会得到只有一个磁极的磁体；同名的磁极相互排斥，异名的磁极相互吸引；在磁体影响下，铁制物品可以获得磁性；如果在天然磁石两极包上铁，能够使其磁性显著增强。

吉尔伯特最重要的科学贡献，是发现了地球本身是一个巨大的磁体。他的这一结论是从实验中导出的。他用一个球形磁石和一根罗盘用指针做了这个实验，把指针放在球形磁石的表面，按指针所指的方向在球形磁石表面画出一条环形线。然后相继改变指针在球面上的位置，每次都得到一条环形线。所有的环形线都通过球形磁石上两个相对应的点，这两个点就是磁石的两极。吉尔伯特发现，在移动指针时，它对于球形磁石表面的倾角随着它与两极在距离的变化而变化。这使他联想起磁倾针在地球不同纬度上倾斜度的变化。在此之前，已有人注意到了磁倾角的问题，如德国牧师哈特曼在1544年发现了磁化针对于水平面的倾角；英国学者诺曼在1576年用自己制作的磁倾针在伦敦测量了磁倾角，并得出其值为 $71^{\circ}50'$ 。吉尔伯特认为，球形磁石的磁性对应于地球的磁性，即地球就是一个巨大的球形磁体，而他用于实验的球形磁石就是一个微形地球。他还猜想，其他天体，特别是太阳和月亮，也象地球一样具有磁性。这个观点后来被刻卜勒接受和发展了。

吉尔伯特的实验和研究还发展了有关电的知识。在他之前，人们对电的认识基本上停留在古希腊哲学家泰勒所描述的琥珀经摩擦会产生电的水平上。吉尔伯特设计制作了一台验电器，由一个尖顶支枢支承一根能够灵活转动的指针。他把钻石、宝石、玻璃、水晶、硫磺、树脂等各种物体摩擦后靠近指针，看指针是否被吸引向这些物体。通过这样的实验，他得出结论：琥珀的性质是许多其他物质共有的。他把这些物质称为“带电体”，而把金属物质列为“非带电体”的主要项目。他当时还不知道，金属这类导电物质在摩擦时产生的电荷会很快失去。

在吉尔伯特之后，对磁和电的现象的研究进展缓慢，很长时间内没有多少新的发现。

(2) 其他磁学著作

和吉尔伯特同时代的巴洛（？—1650年）是英国索尔兹伯里的副主教，也热衷于对磁的研究。他在1613年出版了《磁的广告》一书，其中最主要的内容，是改进了励磁方法和安装罗盘指针的方法，并区分了铁的磁性质和钢的磁性质。

17世纪上半期，还出现了一些介绍利用磁作为治疗疾病和创伤办法的书，如比利时医生赫尔蒙特（1577—1614年）的《磁学论》、德国耶稣会教

士阿撒纳修斯·基歇尔（1601—1680年）的《磁石，或论励磁的方法》等均以此为主题。但基歇尔的书中也提到了一些有意思的实验和见解。他曾用天平来衡量磁石的磁力，还用磁的作用解释了自然界的一些现象，如鸟类的飞行等。

1629年，意大利耶稣会教士卡贝奥也写了一本名为《磁的哲学》的书，其中特别注意到了铁的磁化。

5. 声学

(1) 伽利略和梅森：振动与音调

近代对声学的研究也始自伽利略。他对摆的振荡定律的发现，引起了他对弦的振动以及和应振动现象的注意。他做了这样一个实验：用一块薄铁片在一块黄铜板上以不同速度来回划动，每当产生一个清晰的律音时，就记下铜板上留下的一条条等距离线痕的数量。划动的速度较快时，获得的律音较高，铜板上留下的线痕数目较多且间距较小；而划动速度较慢时，获得的律音较低，线痕的数量较少而间距较大。通过这样一个简单的实验，伽利略首先指出，振动频率是决定任何发声体所产生的律音音调的主要因素。

法国学者梅森（1588—1648年）也做了很多实验，研究弦的振动。他确定了一个律音的音调与产生该音的给定材料的弦的长度、粗细和张力之间的关系。他对用金、银、铜、黄铜、铁制成的弦作了比较，发现当弦的长度、粗细和张力都相等时，产生的音调和金属的比重成反比。

(2) 卡桑狄：声音的速度

关于声音的速度问题，在17世纪上半期引起了学者们的注意。亚里士多德曾认为，在空气中，高音的传播速度比低音快。但卡桑狄（1592—1655）认为，这个结论是不正确的。他做了一个实验，让一门炮和一支枪朝某个方向射击，让一些人在一定的位置上注意射击的闪光和声音。他测量了他们从看到闪光到听到声音之间的时间间隔，然后把从他们到发射地点之间的距离除以这个时间，从而得出了声音的速度。实验和计算结果表明，炮和枪的射击所产生的声音的速度是一样的。由于当时条件的限制，他得出的声音在空气中的速度与实际音速比较高出了不少。而在有关风向是否影响声音速度的问题上，他错误地认为不论风向如何，声音的速度都是一样的。这一看法直到18世纪初才得到纠正。

七、化学的演变

在近代前期，化学处于从炼金术向现代化学过渡的时期，其标志是以医药化学和冶金化学为代表的日用化学不断发展，人们开始通过定量实验来认识酸、碱、盐等物质的性质及其反应。不过，科学的化学理论尚未形成，化学的实践在总体上也还未能摆脱炼金术及其思想的影响。

但是，这一时期化学的进步，酝酿了决定性的变革。正是在广泛地总结该时期化学实践的基础上，玻意耳在 1661 年出版了《怀疑的哲学家》一书，对亚里士多德的“土、气、火、水”四元素理论和帕拉塞尔苏斯的“盐、硫、汞”三要素学说作了全面批评，提出了自己的新的化学元素概念，奠定了使化学成为一门实验科学的基础。

1. 医药化学

(1) 帕拉塞尔苏斯、利巴维乌斯和赫尔蒙特

近代前期，有许多化学发现都是在寻找治疗物质的过程中产生的。帕拉塞尔苏斯是近代欧洲医药化学的先驱。他把医学与化学结合起来，制备了多种含汞、硫、铁和硫酸铜的化学药品。他认为，化学是关于物质转化的学问。他的工作影响了 16—17 世纪的不少化学家。

德国医生利巴维乌斯(约 1540—1616 年)在研究治疗手段时有许多重要的化学发现，并编写了第一部近代化学教科书。这本名为《炼金术》的书，内容广泛，其中不仅介绍和评价了已有的理论，而且详细地叙述了他对许多化学现象的观察、分析和探讨。他发明了制备硫酸铵、硫化锑、盐酸、琥珀酸和四氯化锡的方法，介绍了制作冰糖、用发酵和蒸馏方法从谷物、水果中提取酒精的过程。他提出了一种确定矿质水的简易方法：把一块称量过的白布浸入待检水中，然后将其取出晾干，再重新称量。如布的重量增加并出现斑点，即可确认水中含有矿物质。他还建议，让矿质水蒸发后比较其残渣重量和蒸发掉的水的重量，以此对矿质水进行分析。利巴维乌斯的许多开创性工作，促进了近代化学的发展。

赫尔蒙特是医学家和生理学家，也是炼金术向化学过渡时期的代表人物之一。在从医过程中，他深受帕拉塞尔苏斯医药化学观点的影响，孜孜不倦地从事这方面的研究，并取得了远胜于帕拉塞尔苏斯的成就。

赫尔蒙特最先科学地指出了气体及其变化的物质性。后来被普遍使用的“气体”(gas)这个术语，就是由他从帕拉塞尔苏斯用以表达空气的希腊词“chaos”中引出的。他注意到，存在着许多种不同的气体，可以根据一些气体具有的较明显的物理性质对它们进行分类。他接近于发现二氧化碳，指出在木炭燃烧、蔬菜汁液发酵、肠对食物的消化等过程中都产生出同样的气体。

赫尔蒙特还提出了一种观点：水即便不是物质的唯一组织成分，也是其主要成分；一切盐、粘土和有形物体实际上都只是水的产物。为了表明水是怎样转化为木的，他做了一个有名的实验：在放置 200 磅经干燥处理过的土的陶盆中栽种一棵柳树，5 年间只给它浇水，结果得到了一棵重 164 磅的树，而土经干燥后只比原来少了约 2 盎司。不过，赫尔蒙特没有注意到，树木是否可能从空气中获得什么东西。

赫尔蒙特还利用一些化学原理来治疗疾病，如用碱中和消化液中过量的

酸。

(2) 格劳贝尔

格劳贝尔(1604—1688年)出生于巴伐利亚,曾相继在维也纳、萨尔茨堡、法兰克福和科隆居住过,最后逝于阿姆斯特丹。同帕拉塞尔苏斯和赫尔蒙特比较,他是个更注重实际的实验家,他对化学理论的兴趣,远不如他对化学发现可能带来的利益的关注,因为他主要以出售化学品和药物谋生。

格劳贝尔最主要的学术著作,是1648年出版的《蒸馏术解说》和1658年出版的《化学著作》。他长于蒸馏和化验,在其著作中详细描述了各种不同的蒸馏方法、蒸馏器和蒸馏产物的可能用途。由于他在化学方面的研究成果,后人有时把他称为德国的玻意耳。

格劳贝尔用普通的粗盐和矾制备了盐酸,他称之为“盐精”,并介绍说用它代替醋可以使肉更松软可口。在制备“盐精”过程中产生了一些残渣,格劳贝尔起先不知其为何物以及有何用途。据说,一件偶然的事情使他发现了其价值。格劳贝尔有一次生病发高烧,人们让他服用了一口井中的水,结果烧就退了。此后,格劳贝尔分析了这口井中的水,发现其晶体的组成同他制备“盐精”后的残渣的结晶物相似。于是,他把这种物质称为“怪盐”,后来人们把它称为“格劳贝尔盐”,实际上是硫酸钠—砒硝。格劳贝尔向人们推荐使用这种“灵验的内服药和外用药”。

后来,格劳贝尔还发现,蒸馏硝石和矾油的混合物可以获得硝酸。他还制备了很多其他物质。在他出售的化学药剂中,有把锑灰同酒石一起加热制得的“万用药”,有用矾油和氨水制备的一种硫酸铵等等。

格劳贝尔的一些发现,显示了化学的工业价值和商业价值,如他用金、铜、锰等金属使人造宝石着色的方法;用硝酸银染黑有机物的方法等。他还建议开发德国丰富的矿物资源,并认为不应将其作为原料输出,而应在加工后作为制成品输出。

2. 冶金化学

意大利冶金学家和武器制造家比林古乔(1480—约1539年)以《论高热技术》一书而闻名。这部出版于1540年的书是冶金学方面的第一部系统的著作,其中也谈到了利用化学方法提取某些金属的方法,如利用汞合金作用提取银。

阿格里科拉的《论金属》一书中也有相当部分涉及化学,介绍了各种用于熔炼的化学品及其作用。阿格里科拉论述了用汞回收黄金、用镪水分离金和银、利用某些化学作用制作彩色玻璃的方法,以及制造盐、苏打、明矾、硫酸盐、硫、沥青的方法。

埃尔克(约1530—约1594年)也是奠定近代前期冶金学基础的重要人物之一。他曾在维滕贝格大学读书,后来当过化验师。在其《主要矿石的加工和采矿方法说明》这部著作中,他系统地论述了当时对银、金、铜、锑、汞、铋和铅的合金等进行检验的技术、制取和精炼这些金属的技术以及制取酸、盐和其他化合物的技术。实际上,这是一部最早的关于分析化学和冶金化学的著作。

莱伊(1582—1630年?)是法国化学家、医生。为了回答别人向他提出

的为什么锡和铅在焙烧时重量会增加的问题，他写了《医学博士让·莱伊论焙烧时锡和铅重量增加的原因》，其中包括一篇序言、28 篇论文和一篇结语。这本书出版于 1630 年，但在很长时间里，书中表达思想和莱伊本人均未引起人们注意。

莱伊提出了同当时流行的土和水是重的、空气和火是轻的这一理论相悖的观点，认为自然界的一切物质都是重的。他发现，空气也是有重量的，而且可以用多种办法增加其重量。他特别提到，如果把空气加热，它的较轻部分将被逐出，而它的较重的部分将保留下来，即加热过程使空气的密度增加。在此之后，他回答了为什么“把 2 磅 6 盎司英国精锡放在一个铁制容器里，再放在开口炉上强烈加热 6 小时，其间不停地搅拌，但不添加任何东西，结果回收到 2 磅 13 盎司的白色粉末”的问题。他的答案是：“这个重量增加起因于空气。”他认为，由于激烈而长时间的加热，容器里的空气变得更稠密、更重，且还具有一定的附着力；它同粉末的微粒混和粘合在一起，使重量增加。他还指出，粉末重量不会无限增加，当它同凝聚空气混合达到饱和状态时，它就不能再吸取更多的这种空气。针对有人观察到铅在焙烧过程中重量有损失的情况，莱伊认为，造成这种不同结果的原因在于用以实验的铅是不同的，可能一种是纯净的铅，另一种是已经熔融过的铅。

莱伊的见解淹没了 100 多年，直到 18 世纪后期拉瓦锡发现金属在焙烧中因吸收“非燃素空气”而增重时，才受到人们的注意。

八、技术进步：工业革命的先声

从 15 世纪中叶到 17 世纪中叶，在技术发展的历史上是一个承先启后的过渡时期。一方面，中世纪后期以来，无数实用的微小的技术改进得到了继承和发展并用于实践；另一方面，这一时期的技术进步为即将到来的工业革命做了准备。导致近代前期技术进步的原因，首先与这个时期的一系列基本特点有关。15 世纪开始的地理大发现，为欧洲各国向海外扩张创造了前提，随之而来的国际贸易的发展，又提出了增加生产的要求。与此同时，15 世纪中期以来，欧洲人口的增长也为国内市场的发展提供了推动力，这同样也刺激了对产品的需求。而采用新的技术（包括生产工具和工艺）是增加生产、提高生产率的主要途径之一。作为生产力一部分的技术的进步，归根到底又对这个时代的经济和社会产生了重大影响。

1. 活字印刷术的普及

活字印刷术在中国宋代就已发明。欧洲是在 15 世纪中叶才开始使用这种技术的。

1454 年，在美因兹的谷滕堡，用活字版印刷而成的《圣经》问世。印刷商舍费尔（约 1425—1502 年）年轻时曾在巴黎当抄写员，依靠以此挣来的一点钱上学读书。后来在美因兹的谷滕堡一家印刷厂当学徒。他是欧洲第一个用字模铸出铅字并用来印刷书籍的人。他一生印过 300 多种书，也是第一个在书上印上出版日期、地点和印刷者姓名的印刷商。

活字印刷技术很快就在欧洲流传开来。1480 年时，拥有印刷机的城镇有 100 多个；20 年后，这样的城镇已有近 250 个。16 世纪上半期，美洲也开始享受到活字印刷带来的好处。而到 16 世纪中叶，铸字、印刷机器、操作方法

等趋于成熟，直到工业革命时代为止没有大的变化。

活字印刷术的普及使铸造铅字成为一种专门技术，不久就出现了印刷用铅字的买卖交易，铅字的规格也趋于标准化。1540年，意大利学者比林古乔在其著作中介绍了铸字方法，据说这是欧洲最早的见诸于文字的铸字技术资料。1567年，法国印刷厂主普朗坦（约1520—1589年）对铸字方法作了更详尽的描述。普朗坦曾在安特卫普从事书籍装订业，后来转向印刷业。他也是最早使用铜版印制书籍插图的出版商之一。到17世纪中期，生产铅字的技术已有很大的进步，有一种机器每天可生产4000个活字。铸字的金属材料也有了变化，用掺入了锑的合金取代了最初的锡铅合金，从而使活字更加坚硬耐磨。

印刷机也经历了一个发展过程。起初，印刷机都用木材制作，每天约能印300页纸。而在16世纪末，改进后的印刷机和新的操作方法使效率明显提高，每天能印1000多页。

活字印刷术的普及，使知识的传播形式发生了革命性的变化。传播范围和速度都十分有限的手抄本，被大量机器印刷的书籍所取代。例如，还在1501年，托勒密的《地理学指南》就已出了7版，这无疑对欧洲人的地理观念以及地理探险活动产生了重大影响。近代前期，欧洲的一系列科学发现和技术发明，都是借助于印刷术而得以广泛流传和普遍应用的。可以说，活字印刷术使欧洲进入了一个新时代。

2. 采矿和冶炼

(1) 技术书籍

1505年，关于矿石开采和贵金属冶炼的两本实用技术书《矿山手册》和《试验手册》在德国问世。这大概是欧洲在矿冶方面最早的技术书籍。由于适应了正在兴起的采矿冶金业的发展，这两本书很受欢迎，如《矿山手册》在短期内就多次再版。

之后，比林古乔的《论高热技术》于1540年在威尼斯出版。书中系统而又广泛地论述了冶金技术，并介绍了铸造工艺及有关的机械装置。

1556年出版的阿格里科拉的《论金属》，是集采矿冶金知识之大成的著作。这部共分为12篇的著作，对采矿和冶金的每个过程都作了详尽的描述和评论，对各种矿脉形态、采矿冶炼工具都画出了插图。

阿格里科拉对当时还流行的带有迷信色彩的找矿方法进行了批评，认为可以通过对自然现象的观察找到金属矿脉，并特别指出了有泡沫的泉水、暴露于地表的露头、植物的异常等情况。他介绍了不同种类的矿脉以及利用罗盘等仪器测矿的方法，阐述了勘探、开采、筛选、熔炼矿石的原理和操作，描绘了各种机械和器具。他还专门谈到了矿工的常见疾病和事故，提出了预防的办法。

(2) 采矿和选矿

近代前期，对于有色金属矿开采的热情，使得用于采矿的机械装置的发明和制造十分活跃。

矿石从矿井内部提升到地面，在16世纪初，还主要是由靠人力或畜力拉动的绞盘来实现的。不久，水车提供的动力被用于这一目的。但由于使用水

力所需的设备较为昂贵，所以起初只是在一些开采贵金属矿的矿区使用。

随着矿井越来越深，排水成为一个困难的问题。15 世纪后期，在萨克森的一些矿井中开始挖掘水平巷道用以排水。同时，也采用了排水装置把水提升到地面排出。

提升水的装置是多种多样的，从带勺斗的链式装置到利用空气或流体力学原理的泵，都被普遍采用。16 世纪中叶，中欧的链式装置每小时可从 60 米深的矿井中抽出 15000 升水。那时还出现了一种大型水车，它带动缆索可将盛水的大皮囊或装矿石的勺斗从 200 多米深的井下提升到地面，8 小时可排水 100 立方米，相当于 600 多个工人或 35 马力的工作量，而操纵这种机械只需两个人。水泵的制造技术有了明显提高，空吸泵的使用比较广泛。为了适应深矿井提水的需要，发明了由多个空吸泵组合起来使用的串连吸入泵。正是空吸泵的发展和普及，促使当时最优秀的科学家去研究真空问题。伽利略、托里拆利、帕斯卡都曾在这个方向上努力并作出了贡献。

矿山抽水装置很快被用于城市供水系统，奥格斯堡、伦敦、巴黎先后建造了利用水力驱动的提水装置，被提升到水塔的水通过较细的管道输送到城市各处。

在中世纪，矿石的碾磨和粉碎，主要靠手工劳动。15 世纪，这道工序开始使用机械，出现了专门的捣碎机，每台机器的捣锤从起初的一个发展到后来的 3—4 个，其所需的动力可由水车提供。到 16 世纪时，出现了综合运用各种手段处理矿石的选矿厂。在这里，矿石被筛选、冲洗、焙烧、捣碎，成为纯度较高的矿砂。

这个时期的矿山机械，普遍使用了曲柄、连杆和齿轮。这些机械虽然主要仍用木材制造，但一些易磨损的零部件已采用了铜、铁甚至钢等金属材料。

(3) 冶炼与煤的利用

15 世纪时，使用鼓风设备的立式高炉逐渐发展起来，取代那些须设在能够利用自然风力的地点的卧式炉。新型高炉容量大、炉温高。产铁量增加。那时炼铁工艺主要采用“直接法”，即将木炭与矿石混合放入熔炉内燃烧，使铁矿石熔化凝聚。然后将熔炉打碎，敲掉矿渣，就获得了炼就的铁。

16 世纪，由于冶炼业的发展，木柴作为主要燃料日益短缺，这种情况促使人们把目光转向煤。煤虽然很早就被开采利用，但它作为一种新的主要能源而发挥作用、产生影响则是在 16—17 世纪。

1612 年，西蒙·斯特蒂文特获得了用煤冶炼铁矿石的专利。在此之前，人们已尝试过用煤炼铁，但煤在燃烧时挥发的硫化物影响铁的质量，使铁容易碎、不能锤打加工。斯特蒂文特的发明，是先“消除煤中一切可能使金属变坏或变质的东西”。也许，他已能将煤制成焦炭。

不久，达德利于 1619 年在他父亲设于伍斯特郡的铁厂中进行了试验。他改变了高炉的结构，用煤炼出了优质的铁，而且成本比原先用木炭降低了 30% 左右。

与此同时，煤在其他生产部门中也得到利用，如烧制玻璃，烘烤用于酿造啤酒的麦芽等。据说，用煤烘烤的麦芽酿出的啤酒有独特的优点。人们还发现，烘烤麦芽可与使煤转化为焦炭结合起来进行。在英国内战时期，德比郡成功地实现了二者的结合。

(4) 铸造和锻造

用生铁或铜浇铸出各种器物的技术在这一时期有了较大进展。例如，在用生铁浇铸炮弹时，开始用多坑铸模取代单坑铸模；在浇铸大批量产品时，逐渐使用了木制的或金属制的铸模，这种铸模分解为几块，以便浇铸后能将它们取出。16世纪时，还出现了彼此分离的沙箱和粘土型芯的技术。

在将生铁锻成熟铁时，使用了简单的机械锻锤。在当时的一些铁工厂中，这类锻锤的重量可达300公斤，每分钟可锤击60—120下。1557年，在波希米亚的一个铁工厂中，每个锻锤的日产量为73公斤锻铁。

3. 玻璃制作

制造玻璃的历史十分悠久，但不少技术和方法在漫长的历史过程中已经失传。中世纪后期，玻璃制造技术在威尼斯已达到很高的程度。虽然威尼斯当局竭力限制玻璃制造工艺的外传，但到16世纪中期，欧洲各地差不多都已了解意大利人的技术。

1612年，在佛罗伦萨出版了一本名为《论玻璃技术》的书，这也是第一部有关玻璃制造的专著。作者内里是一个神职人员，在游历意大利和低地国家时，收集了许多玻璃制造技术方面的资料。

1615年，由于官方禁止使用木柴作为制造玻璃的燃料，英国人改造了玻璃熔炉，使之适合于烧煤，同时也采用了一些新的设备和工艺。

近代初期流行的哥特式建筑风格刺激了对彩色玻璃的需求。1540年，德国人许雷尔把提炼铋剩下的矿渣同玻璃一起熔化，结果得到了钴兰色的玻璃。16世纪末，利巴维乌斯发明了制造红宝石色的玻璃的方法，即在烧制玻璃的材料中加入黄金。随后，格劳贝尔发明了使用金属作为制造有色玻璃添加材料的更为简便的方法。而内里则提出，可用溶解于硝酸和盐酸混合液中的黄金给玻璃着色。但这时有关制造彩色玻璃的技术，在很大程度上是对这些技术的重新发现。因为远在古代人们就能制造出彩色的玻璃。

建筑业的发展，产生了对平板玻璃的需求，威尼斯和纽伦堡的工匠开始摸索制作这种玻璃的技术。但适用于制作镜子的大片玻璃，大概直到17世纪中叶才能生产。

4. 机械制造

(1) 动力机械与利用蒸汽的尝试

对水力和风力的利用，是有悠久历史的。利用这类自然力的机械装置，在近代前期也发生了一些变化。

15世纪中叶，欧洲出现了一种新型的卧式水车，其叶轮安装在一根横轴上。这种水车很快在欧洲各地流行。在这种水车的基础上，陆续又作了一些改进，例如把轮上的叶片改为水斗，从而使水车在水流较小的地方也能运转，增强了适应性。那时的水车还都是用木材制造的，能够产生的动力也有限，一般只是用它来带动一副磨或一个杵锤等简单的工具。到16世纪，水车提供的动力逐渐增大，叶轮的直径原先平均为2—3米，现在可加大到5—6米。阿格里科拉曾介绍过一种轮径达10米、可产生10马力动力的大型水车。同时，出现了以水力为动力的锻锤、鼓风机和抽水机。

在没有水力资源可以利用的地方，人们便寻找别的动力来源。在沿海地带，使用风车是很普遍的，尤其是在荷兰。荷兰人在 14 世纪时对风车作了改进，使它能够方便地适应风向的变化。在近代前期，由于风车的改进，它所能提供的动力，大致比以前提高了 20%到 40%。

工业生产发展的需要，推动人们去寻找新的动力来源。

16 世纪中叶，意大利学者卡尔达诺在一本汇集物理实验和发明的书中，提到了利用蒸汽作为动力以及通过冷凝蒸汽来制造真空的方法。1601 年，意大利物理学家波塔描述了一种利用蒸汽压力排除液体的装置，他还设计了可冷凝蒸汽获得真空而后借助于大气压力使水进入容器的装置。

17 世纪上半期，人们开始尝试利用蒸汽来驱动机器。意大利人布兰卡在 1629 年谈到了一种气轮机，它利用蒸汽对叶片的冲击使叶轮转动，并通过齿轮的传动而带动某种机器。一年后，英国发明家拉姆齐的一项使用蒸汽动力的发明取得了专利，它能把深矿井中的水提升到地面，使磨矿机连续运转。

这些发明都只是对蒸汽的初步利用，而且事实上没有普遍推广应用，制造使用气缸和活塞的蒸汽机的努力，是到 17 世纪末期才开始的。

(2) 金属加工机械

近代初期，螺杆在机械中逐渐被普遍应用。达·芬奇在自己的笔记和图样中，曾介绍了使用螺杆的机械装置。起先，制作螺杆的材料主要是硬木，到 16 世纪中叶，才逐渐使用青铜。螺杆的制作，在很长时间内用的是凿子凿和锉刀锉的办法。1569 年，法国一位工程师贝松（1540—1576 年）介绍了他的螺纹车床。这种车床除了能够加工螺杆外，还可在安装凸轮和模板后加工更精密的金属制品。贝松的创造对机床制造和仪器制造有重要意义，但在很长时间内没有得到普及。直至 18 世纪初期，能够加工金属件的车床仍是不多的。

螺旋压机的出现及其实际应用，大概是在 15 世纪末 16 世纪初。据说，在制作教皇尤里乌斯二世的印玺时就使用了螺旋压机。这种压机主要用于制造硬币。16 世纪中叶，以奥格斯堡和苏黎世为中心，硬币压机的使用范围很快扩大。

与锻锤有相关联系的冲压锤，也在 16 世纪初期出现，它被用来冲制铜碗之类的金属器皿以及硬币。冲压锤对劳动生产率的提高作用明显，以至于亚琛的行业公会作出规定，不能直接使用这种机械获得制成品，只能用普通的压延锤制造铜片或铜板，进一步的加工则应该用手工操作。

金属滚轧机械也出现于 15 世纪末，达·芬奇曾描述了一种滚轧机。差不多同时，德国的达·芬奇式的人物丢勒（1471—1528 年）介绍了纽伦堡已在使用的拉制金属丝和制钉的机械。

(3) 纺织机械

纺织业是近代前期较早引入各种机械设备的生产行业之一。例如，大型的梳麻机逐渐取代了手工梳麻；毛纺业中开始使用悬挂式洗羊毛机；丝绸业中采用了大型的整经滚筒；英国首先使用机械来漂洗布匹和使布面起绒；荷兰发明了织带机，它能同时织几条带子，并将织好的带子卷在轴上。

有些纺织机械在近代之前已在欧洲使用，但在近代前期有了改进。意大利在中世纪就已经使用纺纱机，到 16 世纪后期，一个佛罗伦萨女工已能同时

管理 500 个“纺锤”。中国在公元前数百年早已发明的提花织机，在中世纪就已传到意大利，但在很长时间里没有什么变动，直到 16 世纪末和 17 世纪初，才相继出现了一些新式的机械织机。

针织品是 15 世纪末开始流行的，但初时完全是靠手工编织。随着人们对舒适美观的针织品如毛线帽、毛线袜等的需求不断增长，针织机械也应运而生。

1589 年，英国人威廉·李设计制造出了第一台织袜机。这是一种用脚踏板驱动机器，起先只能织出平面织物，然后再缝合成袜子。后来，李对它进行了改造，使之能直接织出成形的袜子。使用这种织袜机的工效，比手工劳动要高 5—10 倍。但也正因如此，李的发明被认为是有害的。因为它可能剥夺大批工人的生计。李也未能获得这项发明的专利。在这种情况下，李被迫离开英国，带了 10 来个工人到法国里昂办厂。但在法王亨利四世死后，他因外国人和新教徒的身份而受怀疑，被迫放弃自己的工厂去了巴黎，在那里默默无闻地生活，直至去世。他的同伴们回到了英国的诺丁汉，机器编织最终在那里发展起来。

5. 火炮的发展

火药发明于中国，大约在 13 世纪时传入欧洲。15—17 世纪频仍不断的陆战、海战和海外征服，使欧洲迅速地发展了利用火药的近代武器——火炮。

15 世纪，欧洲各国先后制造出了滑膛炮，出现了用铸铁制成的炮弹。不久，根据用途、口径、炮筒长度的不同，炮的种类进一步划分。16 世纪初，纽伦堡的制炮工匠们开始采用标准口径。炮弹的弹头被制成空心的，内部装填炸药；而装发射药的弹筒用纸板和皮革制成。把数门小口径炮紧密排列而组成的多管炮，也已出现。

火炮除了用于陆战，也开始用于海战。15 世纪中叶时，欧洲各海洋国家的大型战舰大多已安装了火炮。起先，这种铜制火炮安装在舰首或舰尾的甲板上，可以移动。到这个世纪末，出现了舷炮，即把火炮安装在战舰的两侧，在船的舷侧开一些用于射击的炮孔。当时，大型战舰装备的火炮已达 100 多门。舷炮的使用，对海战的战术及船舰的构造都产生了很大的影响。此外，在海军装备的火炮中，射程更远的长筒炮逐渐取代了中短筒炮。在 1588 年英国和西班牙的海战中，由于英国舰队装备的长筒炮占了 95%，只有 5%是中短筒炮，而西班牙舰队的长筒炮只有 56.5%，中短筒炮则占了 43.5%，结果英国舰队凭借火炮方面的优势和据此而采取的新战术，战胜了西班牙的无敌舰队。

九、中国科技的进展

1. 天文学

从明朝开国至万历年间的 200 年中，政府严禁民间私人研习天文历法，规定“习历者遣戍，造历者诛死”。这道禁令严重地阻碍了天文学的发展，但由于天文学家、航海家与工艺家共同不断的努力，天文学说与天文事业仍有不同程度的发展。

(1) 天文学理论和天文观测

明朝的天文学理论，较前有一定的进步。董谷作《豢龙子》一书，对宇宙起源问题提出了朴素唯物主义的设想，认为宇宙没有开端，也没有终极，而某一具体的天体系统则有一个生灭发展的过程。明邢云路著《古今律历考》一书，认为“星月之往来，皆太阳一气之牵系也”。明确提出行星运动是受太阳牵引的结果，这与刻卜勒的思想有异曲同工之妙，且已开了万有引力说的先河。明末宋应星在《天工开物》中著有《谈天》、《论气》等篇，认为“盈天地皆气也”，把“气”作为构成物的基础，具有唯物主义色彩。他还对日食作出了比较科学的解释。以上都说明明朝的天文学说对传统理论有所突破。

明朝的天文设施、历法推算与仪器制造，较前更完善与精密。洪武十七年（1384年）在南京鸡鸣山设观象台，台内设有天体仪、浑仪、简仪等。50年后，又复制了一套浑仪、简仪置于北京齐化门。这两件仪器今尚存于南京紫金山天文台。明朝还在司天台设立回回科，把元代设在上都的回回天文台人员召回北京，翻译了《明译天文书》等。成化年间，贝琳又译出《七政推步》，介绍了回回历法的推算方法。明末光学仪器专家孙云球在苏州自制“千里镜”，据民国《吴县志》上说，在城郊七里外的虎丘山上用此镜观察城内，景物如在眼前，可见“千里镜”已大大超过目测能力，这可以说是我国自制望远镜的开始。此后，徐光启用望远镜亲自进行月蚀观察，发出了“与目测迥异”的感慨。

在天象观测中，1572年与1604年对超新星爆发的观测是中国天文学家的一大贡献。1572年的超新星，我国比西方的第谷早发现3天，多观察了一个多月，而且观察周密，记录尽善。

明朝天文学的另一个贡献，是航海天文学所取得的举世瞩目的成就。明茅元仪所编《武备志》中，记载过洋牵星图4幅，为郑和七次下“西洋”的航海图，描述了从中国刘家港经南海、东南亚海域、印度洋直达非洲东海岸的线路，这是航海天文学的宝贵资料。书中还介绍了测量星辰地平高度的方法——牵星术。用大小不同的牵星板进行观察，确定星辰高度，并与罗盘相配合，以解决海上的航向问题。

(2) 西方天文学的传入与《崇祯历书》

明朝末期，随着一些耶稣会传教士来到中国，西方天文学知识逐渐传播，促使中国传统天文学向近代天文学转变。

利玛窦（1552—1610年）首先介绍了有关日月蚀的原理，七曜与地球体积的比较，西方已测知的恒星，天文观测仪器的制造等。随后，熊三拔（1575—1620年）著《简平仪说》、《表度说》，详细介绍了简平仪的用法以及根据天文学原理测日定时的方法。1610年来华的阳玛诺（1574—1659年）著《天问略》，用问答形式说明了天象原理，并附有图片。

崇祯年间，成立了历局并聘用龙华民（1559—1654年）、邓玉函（1576—1630年）、汤若望（1591—1666年）等耶稣会教士参与历法修改，并翻译西方著作，编制天文图表，制作观测仪器等。在编纂《崇祯历书》时，确定

了利用西方的方法“入大统之模型”的方针。这部长达 137 卷的历书于 1634 年完成，其中采用了丹麦天文学家第谷的宇宙体系。此体系认为，日月在不同层次围绕地球运转，其他行星围绕太阳行转，这虽是介于哥白尼与托勒密之间的折中体系，但在中国第一次冲破了地球中心说，这不能不说是一个很大的进步。《崇祯历书》引入了明确的地球概念和西方经纬度测定计算方法，使天文计算，特别是日、月蚀计算比传统方法更加精确。《崇祯历书》首先采用 360 度制，一天为 96 刻，经度以 12 次为系统，纬度从赤道起算至 90 度。这个计算方法也比传统方法简便。此外，《崇祯历书》以本轮、均轮体系解释天体运动的速度变化，使中国天文学从代数系统转向几何系统。《崇祯历书》的编就，说明中国天文学走向了一个新的阶段。

2. 地理学

明代地理学的成就，主要表现在航海地理学的进展和溶洞、植被的考察研究方面。

(1) 航海地理

明朝航海地理是随“三保太监”郑和下“西洋”而发展起来的。明永乐三年（1405 年）至宣德八年（1433 年），郑和率领一支庞大的船队七次往返于太平洋与印度洋上。其舰船多至 200 多艘，将士与技术人员多达 27000 多人，宝船长 150 米，帆 12 张，有罗盘导航等设备。其活动范围从北纬 27 度至南纬 7 度，东经 180 度至东经 44 度，共计航程 10 万余里，到过东南亚、南亚、阿拉伯和东非许多国家和地区。这比哥伦布发现新大陆要早半个多世纪，可以说是世界航海史上空前的壮举。

郑和船队在远航中，绘制了精确的航海图。他们在没有前图的情况下，坚持探路观察，详细记录了沿途山、滩、礁、沙，并利用指南针测定方向，利用带坠的绳子测定深度，用绳子系上鸡毛测定流速，然后把测定所得形象地标在一张对景图上，最后把不同海域所获得的对景图排列成航海图。这张航海图，至今仍保存于茅元仪所编《武备志》之中，全图分 20 幅，42 面，堪称精细。图上起点为南京龙江关（下关），经长江口，沿东海、南海，直至海外国家。图上标有航线的精密针位，以“更”（一更相当于 60 里）计算距离，海岛画有内外线，它标明平潮时的礁石、浅滩、港口等。由于此图“详而不诬”，具有极高价值，故受到当时及后世学者的赞扬。

其次是关于海路与外国情况的记载。郑和的随员中有马欢、费信、巩珍等人，他们把航海所见记录下来，分别著有《瀛涯胜览》、《星槎胜览》、《西洋番国志》三书，内容是记述航行与沿途国家的政治、经济、气候、水文、物产、民族、风俗、宗教、历史等。这些内容远远超过元代汪大渊《岛夷志略》之所记。汪大渊所叙海路仅限印度半岛西岸与波斯湾口，而《星槎胜览》等书记述了更西的佐法尔、阿丹（今亚丁）、刺撒（今索马里北部）、木骨都束（今摩加迪沙），直达马达加斯加。三书所载的有关非洲的知识，不仅超过了古人，而且也超过了同时代的欧洲。此外，三书所记明王朝与南洋诸国的友好往来和中国人民至南洋谋生居住的情况，是中外关系史上宝贵的资料。

(2) 溶洞、植被研究

明代对于溶洞、植被的考察研究成果，在徐宏祖（字振之，别号霞客，1586—1641年）所著《徐霞客游记》中得到集中反映。徐霞客从小热爱大自然，钻研地理学，他从21岁起至54岁止，走遍华东、华中、华南与西南各省，游历名山大川，进行实地考察。他考察了华南石灰岩地貌，详尽地记录了各种溶洞的方向、高深，宽窄的具体数字，揭示了溶蚀地貌的特征，订定了石峰、环洼、石梁等地质地理名词，并对溶洞、钟乳石、石笋等成因进行了研究，得出石灰岩易为雨水与地下水所溶蚀而发育成为溶洞等比较符合科学的结论。这在世界上实属首创，比系统研究溶岩地貌的西方人克维治克要领先200余年，至今仍有应用价值。同时，徐霞客还记录了由于高度与纬度不同，气候差异而形成的不同植物群落。他指出，在高山之上，由于地势高，气温低、风速大，树木生长缓慢，故多为伏地矮小之树。在山顶上更往往只有荒草，而无树木；山上植物的花期，也比山下要迟。他对植物的生态作了科学的分析，论述了植物垂直分布不同状况及其原因，促进了植物地理学的发展。

(3) 西方地理知识的吸收

明朝后期，中国地理学家学习了西方的地理知识与绘图技术。利玛窦在万历十一年（1583年）受广东肇庆地方官的委托，根据所携图册，采用华名、华里和华辰计算，绘出了一幅世界地图《山海輿地全图》。虽然此图未经利玛窦复校，且刻工不慎，印刷错误尚多，但这是向中国第一次介绍地圆学说、地球大小、五洲的概念、五带的划分等，扩大了中国知识分子的眼界，其功不可没。图中标洋名、国名、地名，如大西洋、亚细亚、欧罗巴等也为中国所承认，一直沿用到现在。此图出版后，经过多次重刻，先在广州始印，十余年后在苏州翻印，万历二十八年（1600年）经利玛窦亲自修订后在南京刻印。1602年，李之藻请利玛窦再次增订，在北京印发。

与此同时，还出现了介绍世界各国概况的地理著作《职方外纪》。《职方外纪》为西人艾儒略（1582—1649年）增订翻译，华人杨廷筠汇记。此书图文并存，卷首为五大洲总图，卷一至卷四分别述说亚洲、欧洲、美洲和南极地方，每卷都有总说与分说，介绍各国风土物产，条贯十分清楚。卷五为“四海总说”，介绍海名、海岛、海族、海产、海舶、海道等。由于西方世界地图和地理学说在中国的流传，使中国人开始了解全球的地理概况，增长了不少地理知识，这在中国地学史上是一个明显的进步。

3. 医药学

明朝对医药事业比较重视。在明廷设有太医院，院内分置大方脉、小方脉、妇人、疮疡、针灸、眼、口齿、接骨、伤寒、咽喉、金镞、按摩、祝由等十三科。朝廷命令那些医家子弟学习医学，每三年或五年进行一次考试，凡是三次考试不及格，要遭到斥落。地方各级政府都设官医，替人治病。同时，从中央到地方还设置生药库、惠民药局，派专职人员从事药物的研究，并对民间开放。这些措施无疑促进了医药学的发展。

(1) 针灸术

针灸术在明朝有较大发展。明英宗正统年间（1436—1449年）复制了针灸铜人，置于太医院中，并重新刻了“铜人腧穴图经”刻石。铜人全身遍布穴位，按十四经系统凿孔成穴，旁注穴名，共有359个穴位名称。

明初精通针灸术的名医，有活动在江浙一带的滑寿（别号樱宁生），他钻研张仲景、刘守真、李明之三家学说，并师从高洞阳，学习针灸疗法。由于刻苦钻研，尽得洞阳之医术，著《十四经发挥》，尤重任、督二脉，把它们置于“经”之列。因“督任二脉，则包乎腹背，而有专穴，诸经满而溢者，此则受之，宜于十二经并列。”滑寿还考察了647个穴位，并作了详细记录。他的针灸术愈人众多，获得好评。

高武（字梅孤）作《针灸聚英》一书，汇集诸家针灸学说，记其异同，故以“聚英”命名。高武根据滑寿《十四经发挥》的顺序，论述脏腑、经络、穴位、主治及取穴的方法等，其论点精当、条贯清楚。此外，杨继洲的《针灸大全》对于针道源流、周身经穴及制针、补泻等法，亦有所阐明。李时珍亦做《奇经八脉考》一书，评析阴维、阳维、阴、阳、冲、任、督、带八脉之病源治法，十分精详。

（2）瘟病原理的修正

在病理学方面，明人重建了瘟病学原理。过去的医家一直把瘟病作为伤寒的一种，把一些流行病称为触犯了寒气而造成。明代医学家经精心研究，认为瘟病不能与伤寒混淆。吴有性（1592—1627年）就是研究瘟病的著名专家之一。他目睹当时瘟病流行，罹疾者众，甚至有阖门死亡的，受到很大刺激。因此深入探求瘟病产生的原理，著《瘟病论》二卷。他认为，瘟疫的流行乃天地之间的一种“戾气”所致，这种戾气通过触觉器官、尤其是通过呼吸道传染致病；并指出，戾气不止一种，不同的戾气可使人患不同的病，因此必须对症治疗。吴有性的“戾气”说，已从感性上认识到细菌传染的原理及其途径。这比列文虎克发现细菌要早，可视为细菌学说的先驱。

（3）种痘法

种痘法的发明反映了明朝免疫学的成就。种痘法对预防“天花”具有良好疗效。天花又称“痘疮”、“疱疮”，据传是从汉代战俘中传入。此病传染面很广，危害极大，重则致人于死命，轻则结痂成麻点，给患者身心带来严重损害。因此，自古以来，就有人探索预防天花之法，但均未获成功。直至明代中叶，在宁国府太平县（今属安徽省）才有预防天花的“痘法”发明，从此流传全国。其具体方法，有痘衣、痘浆、旱苗等。痘衣法是天花患者的内衣给接种人穿上，使之感染，产生免疫功能而达到预防的目的。痘浆法是用棉花等物蘸上患者的疮浆，塞入接种人的鼻孔。而旱苗法最为先进，即是把天花患者红润的疮痂阴干后研成粉末作为痘苗，用管子吹入接种人的鼻孔，其中经多次接种疫苗的，疗效尤佳，因经辗转洗炼，“火毒汰尽，精气独存，所以万全而无害也。”种痘术发明后，逐步传至世界各地，17至18世纪由俄罗斯传入欧洲，同时日本也从我国直接传入。此法直至18世纪末，才被琴纳所发明的牛痘接种法所代替。种痘法，是我国人民对世界医学杰出的贡献之一。

（4）外科术

在治疗术中，明朝外科医学有一定的进展。薛立斋（1488—1558 年）、王肯堂（1549—1613 年）等著《外科心法》、《疡科准绳》等书，对于外科的诊治、手术及各种疮痛的病因都有深入的探讨。稍后的陈实功（字毓仁，1555—1636 年）在当时取得了外科医学的最高成就，他著有《外科正宗》四卷，分别记载了外科 100 多种疾病的病理、症状、治疗方法及药物制作等，其中对肿瘤、皮肤病的记述尤为详尽。他的医术十分高明，创造了用细铜筋丝摘除鼻息肉的方法，还进行了断喉吻合手术。对上颌骨脱臼复整法，咽喉、食道内铁针取出术也都作了记载与整理。

(5) 李时珍与《本草纲目》

明代对于药物学的研究，可以说已进入当时世界的最先进行列。这当以李时珍（1518—1593 年）及其编写的《本草纲目》为标志。李时珍出身于医学世家，曾任太医院院判，他阅读了大量的药学书籍，如《神农本草》、宋代《开宝本草》、《嘉祐本草》等，发现这些古代本草书中存在不少错漏，可谓“草木不分，虫鱼混淆”，如：将不能药用的兰花当成兰草，把有毒的钩吻当作补益的黄精。因此，他决心在药物的实地调查与研究的基础上，对过去的本草书进行修改与补充。他深入到山野矿区作了很多调查工作，特别是对白花蛇、穿山甲、曼陀罗花等药理作用及铅银等毒性做了研究，并纠正了过去药书上对这些药物所作的错误结论。经 36 年的努力，他终于写成《本草纲目》五十三卷，书中载有药物 1892 种，其中新药占 1/6 强，收集医方 1100 多个。

《纲目》对药物进行了科学的分类，由原来的上、中、下三品分类法，重新按矿物、植物、动物分为 16 部，计水、火、土、金石、草、谷、菜、果木、服、器、虫、鳞、介、禽、兽、人。每部再细分为若干类，如：谷类分为麻麦稻类、稷粟类、菽豆类、造酿类四种；草类分山草、芳草等九种；又如动物中，按低级向高级进化的顺序分立虫、鳞、介、禽、兽、人六类。这种分类方法，纲目清楚，比较符合科学。其中，李时珍的植物分类法的建立，要比瑞典生物学家林奈早 200 年。总之，《本草纲目》在实践观察中，提高了对药物的认识，纠正了过去医书记载的错误，总结了药物的各种效用，书中还充实了有关药物，特别是进口药物的一些内容，具有十分重要的医学理论价值与实用价值。

《本草纲目》自 1590 年出版之后，获得社会广泛的赞誉。17 世纪初，日本学者林罗生在长崎得到明刊本《本草纲目》，即献给日本的最高统治机关德川幕府。此外，还经节译传到英、法、德等国家。

4. 数学

明朝商业经济较前有很大发展，对商业应用数学与珠算术的进步起了推动作用。西方数学知识的传入，为中国数学的近代化打下了基础。

(1) 商业应用数学和珠算术

明朝商业应用数学的代表作是吴敬（字信民）所编十卷本《九章算法类比大全》。该书卷一至卷九分述方田、粟米、衰分、少广、商功、均输、盈朒、方程和勾股，每卷都有应用题及其解法。应用题共列 1329 个，主要分成

两大类，有摘自古代算术书的“古问”与解决当时社会实际问题的“比类”；还有一部分是用诗词提问的。第十卷讲开方，在卷前有“乘除开方起例”，叙述大数、小数、四则运算及度量衡单位等问题，还列出了一些应用问题的解法。该书的应用题大部分与商业有关，如合伙经营（类似今天的股份制）的投资与利润分配、利息计算，以货物作价抵补运费及加工费的算法等等。因《九章算法类比大全》具有实用价值，在当时社会上广泛流传。

明朝商业经济在数学中的另一反映，是珠算的普及应用。据说珠算发明于宋，逐步推广于元，而普及使用是明朝的事。它在明朝逐步代替了古代的筹算。珠算是算盘中分上下两格，横向排上较多的竖圆梗（一般在9根以上，且成单数）。梗上穿上算珠而组成。上部二个算珠（实际仅使用一个），每个作“5”；下部5个算珠，每个作“1”。人们拨动算珠，进行加、减、乘、除的运算，并在运算中形成一套口诀，这比笔算、筹算更加便捷，适宜于应用，故至今天仍为商店中常见的运算工具。珠算发明以后，传至日本、朝鲜与东南亚各国。在珠算大普及的基础上，程大位（字汝思）总结了珠算的经验，于1592年编《算法统宗》十七卷。此书除用珠算解决实际应用之外，还最早使用珠算方法，解决开平方与立方问题，并记载了“丈量步车”，用以测量田地。《算法统宗》出版以后，社会多有购买使用的。明末科学家李之藻编《同文算指》，也从该书中摘录了不少应用问题。

(2) 西方数学知识的传播

耶稣会教士带来的西方数学，主要是《几何原本》与《同文算指》二书。《几何原本》原称《欧几里得原本》，为古希腊数学家欧几里德所作的名著，被西方奉为数学经典。万历三十二年（1604年）秋，利玛窦与徐光启通力合作，经他口授，由徐笔述译出六卷。这是西方数学名著被译成中文的第一部，它对沟通中西文化起了重要作用。从此“几何”两字成为中国数学上的专有名词，书中所译名词，诸如点、线、面、平行线、锐角、直角、钝角等一直延用至今。《同文算指》是利玛窦与李之藻合作译述而成，李之藻用力尤勤。此书把克拉维斯《实用算术概论》与程大位的《算法统宗》融为一体，是中西数学的综合体。全书共十卷：前编二卷，论整数与分数的四则运算；通编八卷介绍比例、比例分配、多元一次方程组、开方等。此书吸收中西之长，全面介绍了西方的笔算方法，这对西方算法在中国的推广，起了很好的中介作用。

5. 声学与光学

(1) 朱载堉的音律理论

明朝声学研究的进展引人注目。当时，当之无愧的声律大师应是皇室后裔的朱载堉（1536—约1610年）。他早先跟从舅父学习，后独居19年，钻研乐律与历数，著有《乐律全书》与《律吕正论》等书。他创造的新法密率确定了两个相邻半音的频率比值，不仅解决了十二平均律的计算问题，还通过实验解决了依据十二平均律的定音。他所设计的36异经管律，音高上的误差是很小的。朱载堉在音乐史上最早用等比级数划分音律，这是对声学与音乐的一大贡献。根据《律学新说》的序言，此理论的建立是在万历十二年（1584

年)之前,比法国人梅森的同类发现要早52年。

(2)方以智的《物理小识》

明末出现了一部百科全书式的著作——方以智所著《物理小识》,共12卷。方以智是崇祯进士,明亡后出家为僧。他自幼喜好技艺,兴趣广泛。《物理小识》是他长期观察自然现象、钻研各种自然科学知识的总结。所谓“物理”,是探求万物之理。他认为“一切物皆气所为也”,反对“离气而言理”。这一思想具有唯物主义色彩。他特别强调“质测”(即对客观事物的实际考察)在科学实践中的作用,认为“通几”(对事物发展变化内在根源的探索)是在质测中产生并得到验证的。

《物理小识》的内容广泛,包括力学、热学、磁学、光学、天文、历法、地理、医药、饮食、金石、草木等。书中讨论了杠杆原理和螺旋原理的运用,虹吸现象,表面张力,潮汐与月球运行的关系,地方时、时间与空间的关系,凝固、溶解、蒸发、凝结等热学问题,以及声的发生、反复与共振,磁的磁针指南、磁偏角等。

在光学方面,方以智对于光的小孔成像、光的反射与折射、透镜的焦点等作了深入研究。他综合了前人的研究成果,对于晶体色散问题作了精彩的概括。他看到人工烧制的三棱晶体与自然晶体将白光分成五色,将此与日光照射飞泉产生的五色现象联系起来,认为这都是白光的散折。推而广之,虹霓的彩色、日月之晕、五色云的产生,都与晶体色散是同一原理。这说明明代末对色散现象的本质已有较全面和深透的认识。

6. 农学与水利学

明朝对于农业水利十分重视,建国之初便采取了奖励农耕与水利的各种措施。因此,这方面的研究也取得了一定的成果。

(1)农学与农业技术

在农业实践的基础上,明末学者徐光启(1562—1633年)认真总结了农业生产的经验,写出了农学专著《农政全书》。该书不仅重视当时老农的耕作实践经验和前人的著述,还吸收了西方的科学技术。全书分为16卷,分农本、田制、农事、水利、农器、树艺、蚕桑、牧养、食物、制造、营造、救荒等12类。全书旁证博引,仅引证前人的著作即达200余种之多。徐光启强调以农为本,破除农业生产中的保守思想,主张开拓创新。他十分重视粮食作物的种植,尤其是红薯的栽培,在书中详细介绍了红薯育种、移栽、管理的经验与储藏的方法。他对于棉花减产的原因作了分析,认为是由于种植太密、土地肥力不足所造成,因此要“精揀核、早下种,深根短秆,稀料肥壅”。这些经验至今仍可应用。

宋应星(1587—?)的《天工开物》一书也记载了不少作物栽培与养蚕等方面的知识。他特别注意环境变异对作物的影响,论述了气候与作物种群变化的关系,详细记载了品种选择、肥料施用等经验。他对浸种、育秧分栽期作了科学论证,认为以30天分栽最为适合,并确定了秧田与本田的比例关系公式,提出了通过人工选育、培养适应“高山可插”的新稻种的想法。宋应星还总结出用石灰改造酸性土壤,促成土壤团粒结构的形成,用含磷的禽

兽骨灰蘸稻秧促进秧苗生长，用砒礞作农药拌种，杀灭虫害等宝贵经验。在养蚕方面，提出了将一化性蚕雄蛾与二化性蚕雌蛾杂交培育良种和根据蚕体变化、行动反常、食欲不振来诊断蚕病的方法。宋应星不仅重视农业实践，而且注意理论上的提高。他认为，由于“土脉历时代而异，种植随水土而分”而变异出不同的品种。即使同一品种在同一地区种植，也会因土壤肥瘦不同和小气候的变化而结出不同果实。《天工开物》这种因地制宜发展农业的思想，实际上反映了宋应星的进化论观点。

明朝进一步发展了“一岁数收”技术，它综合运用各种生产要素，通过间作、套作、混作、轮作等，充分利用天时与地利，合理安排种植以增加收获的次數。同时，由于新的航路的开辟，一些新的农作物也在此时引入中国。玉米是16世纪经海路传入中国南方而逐步推广至北方。甘薯是福建人陈振龙在从事海外贸易时，从吕宋带回的。烟草也在明朝中叶经过菲律宾传入我国。在明朝，由于引进了玉米等高产作物，加上耕种技术的改进，农业产量有较大提高。

(2) 水利学与水利建设

明朝在水利建设方面取得了一定的成就，在水利建设中很注意治水与治田的结合，以达到以水养田，以田促产的目的。同时，也很注意灌溉、泄洪与交通运输的综合开发。

明朝水利建设的成就之一，是大运河的疏浚。由于山东境内的大运河有些地段较高，给航行带来了困难。为了解决这一难题，明廷在永乐年间特派工部尚书宋礼整治河道。宋礼听从汶上老人白英的建议，采取了筑坝、开河、导泉、控湖及建闸等一系列增高水位、保证通航的措施，较好地解决了这一难题。接着，陈瑄进一步开展河运的建设。他于永乐十三年（1415年）开淮安城西渠20里，由管家湖至鸭城口入淮，并筑堤为道，建四闸控制，又浚仪正、瓜洲两港，凿徐州、吕梁二洪石滩，修昭阳湖、南旺湖长堤，开泰州白塔河通江，作为运河过江的另一条水道。陈瑄还开控高邮湖内运渠40里，筑堤把河与湖隔开，并从淮水至临清建节制闸47座，为运河的漕运畅通打下基础。

在漫长的封建时代，如何治好黄河，是历朝政府的一大难题。万历年间，潘季驯（1521—1595年）对治黄经验进行了全面认真的总结，著有《海防一览》40卷，并测制了详细的黄河全图。他在书中提出“束水攻沙”的治河方针，具体做法是增筑堤岸防止河水外溢，建坝减水，以堤束水，最后以水攻沙。这一办法对于治理黄河起了良好的作用，至今仍可作为治黄的参考。他还提出对黄河“开导上流，疏浚下流”的全面治理的方针，并取得了一定的效果。

明朝水利建设的再一成就就是盐碱地的改造。河北省东部由于水流不畅，土壤盐碱化现象较严重。为了改造这片土地，保证京师的粮食供应，汪应蛟在天津驻兵时，募民垦田5000亩，其中2000亩为水田，获得每亩4—5石的好收成，这是京东种植水稻的一次很好的尝试。在明朝后期，袁黄提出了改造盐碱地的方案，其作法是在潮水浸渍的地方，“挑沟筑岸或树立桩橛”以阻拦潮水，然后开出土地，用小沟排水。先种“水稗”，至“斥卤既尽”时，

便种水稻。无疑，袁黄的意见是可取的。与袁黄同时的徐贞明，在 1585 年兼领垦田使，受命兴修京东水利。他主张在海河上开渠灌田，下游开支河分泄洪水，低洼淀泊留以蓄水，淀泊周围开辟圩田。他上任以后，在卢龙一带试种，次年即得水浇田 3.9 万多亩。

《农政全书》亦有专章论述水利。《农政全书》记述了水利学科的发展，总结了水利建设的一些规律，它讲究泉水、海水，河塘与泾溪的充分利用，介绍了穿水、挖塘、建筑水库的方法。《农政全书》还吸收了《泰西水法》的主要内容。《泰西水法》六卷，是意大利传教士熊三拔所编著，于万历四十年（1612 年）刊行。书中论述龙尾车、玉衡车、恒升车及水库的性能和作用等。这是第一部介绍西方水利经验的专著，经徐光启对泰西水法的大力赞扬并吸收入《农政全书》后，西方水利学逐步对中国的水利思想与水利建设产生影响。

7. 矿冶技术

明代洪武末年，政府取消了限制民间开采铁矿的禁令，调动了民间开矿的积极性，促进了矿冶技术的发展。从开矿、选矿、冶炼都有科学的安排，矿冶的规模与设施在世界上属于比较先进的行列，黑色金属与有色金属产量有很大提高，其生产规模也是前所未有的。明中叶以后，较大的铁场至少有六七个高 1 丈的炼铁炉，较小的铁场也有高炉三四个。河北省武安县发掘的明代炼铁炉高达 1 丈 9 尺，内径 7 尺，外径 10 尺。

(1) 采矿

明代的采矿技术，继承和发展了传统的锥凿、錘击、斧劈等法，还发明了“烧爆”与“火爆”二法。“烧爆”，据一些专家的研究，是用火烧矿床以后，再用水淋，利用热胀冷缩的规律，使矿爆裂、分解，而进行开采。至于“火爆”采矿法，可能是利用火药爆矿技术，炸开矿床，击碎矿石，而进行开采。据说用火爆法采矿时，“山陵震裂”、“鸟惊兽骇，若蹈汤火”，因而人们估计只有用火药爆炸时才能产生如此巨大的爆破力与冲击力。

特别要指出的是，明朝采矿中的采煤技术有很大提高，它不仅继承了宋代找煤、选择井位，布置井巷，支护、通风、排水等经验，而且掌握了排除瓦斯（毒气）的技术。《天工开物》上说，当时有经验的人从地表情况测知煤在何处，经挖井开掘至煤端时，就采取措施，防止毒气薰人。他们的办法是“将巨竹凿去中节，尖锐其末插入炭中，其毒烟从竹中透上，人从其下施钁拾取”。他们已经懂得了瓦斯的比重轻于空气，集中于煤层上部的规律，利用“筒引法”，把瓦斯导出矿外。同时，明人还掌握了防止塌陷的技术。因在一座井下，煤的分布纵横交错，采煤工随着煤的分布而斫取，会形成坑道。为了防止这些坑道坍塌，当时工人根据力学原理在基部打上木桩，上面支上木板，以保证安全。

(2) 选矿

明代选矿技术也有所发展，很多地方利用了盘选、磨矿、磁选等技术。

盘选法是利用水的力量，淘汰杂质，选出精矿石。把现形的铁矿石取来，放在木盘中进行淘洗。这种淘砂的木盘是以两块梯形木板为底，两块钝角等腰三角形木板为边组成，略似于今天的淘金斗。一些锡矿石也是用这种方法选取。《天工开物》讲，湖南衡阳、零陵的山溪中和广西南丹州的河流中产一种呈黑色的水锡，把它粉碎后用箴箩在河中淘洗，即可得到矿砂。

磨矿技术是：先将矿石打碎，再用臼舂成细末，然后用大桶盛水，把矿末投入水中搅拌，搅到一定程度，一些“细粘”就浮在水面上，一些梅砂悬浮在水中。再把细粘和梅砂用尖底淘盆进行淘洗，然后取得精矿。而沉在水底的粗矿肉，也要用船形木盘进行选取。

磁选是用磁石的引力进行选取。明代青花料的选取就是用这一种办法。明代王宗沐记载这种选法说：“首用锤碎，……敲青后，取其奇零琐碎碾碎，入注水中，用磁石引杂后，真青澄定，每斤可得五、六钱。”

(3) 冶炼

在冶炼技术方面，在明代已懂得用炼焦法治炼金属，也就是将煤炼成焦炭，用来“煎矿煮石”。这种经过高温干馏所得到的固体产物，所含硫分、灰分等挥发物少、热值大，用来冶炼矿石，“殊为省力”，效果特好。

在冶炼中，为了使燃料充分氧化，提高温度，一定要进行鼓风。明朝发明了活塞式木风箱，对木扇作了重大改进。它利用活塞进行推动，使空气加大压力，自动开闭活门，可连续供应较大的风压和风量。这不仅增加了炉内温度，而且也使熔炉容量的扩大成为可能，使冶金的产量与质量都有很大提高。这种活塞式木风箱的发明，也比欧洲早得多。

明朝冶炼技术的另一个成就是炒钢法的形成。这是一项生熟铁冶炼连续生产的工艺，其过程是在离生铁流出的地点数尺以内，挖一个比铁水出口低的方塘，周围筑上短墙。铁水流入塘内，几个人执持柳木棍排立在墙上。炼铁时，一人用力快速地撒上晒干的污潮泥，众人拿起柳棍迅速搅动，即时炒成熟铁。柳棍每炒一次，烧折二、三寸，再用，要及时更换。这一工艺，促使生铁中的碳氧化成二氧化碳，使碳的含量减少，又因污潮泥中含有硅酸铁，硅能与氧化铁化合成一种渣，使熟铁凝成块状。这种使熟铁连续生产的工艺可免去生铁再溶化的过程，节省了时间与开支，提高了生产效率。

明代冶炼的再一成就，是“灌钢法”的进一步发展。所谓“灌钢法”，即熟钢的制法。明代的灌钢法有两种。一种是团钢法。宋代灌钢法是把生铁块嵌在盘绕的熟铁条中，用泥封起来进行加热。明代的团钢法则把生铁放在捆紧的若干熟铁片上，用涂泥的草鞋覆盖在上，然后加热。这正如《天工开物》所说，“凡钢铁炼法，用熟铁打成薄片如指头阔，长寸半许，以铁片包夹紧，生铁安置其上，泥涂其底下，洪炉鼓鞴，火力到时，生钢（即生铁——作者注）先化，渗淋熟铁之中，两情投合，取出加锤，再炼再锤；不一而足，俗名团钢，亦曰灌钢者是也。”这一工艺增加了生熟铁之间的接触面，使生铁中的碳能迅速均匀地渗透到熟铁之中，草鞋的覆盖可使生铁在还原状况下逐渐得以熔化。另一种是唐顺之在《武编》中所记载的，“以生铁与熟铁并铸，待其极熟，生铁欲流，则以生铁于熟铁上，擦而入之。”其具体过程已不很清楚，有人认为这种工艺和盛行于苏州、芜湖的制钢法相近。灌钢

法的日趋完善，表明以生铁为基础的钢铁技术体系已经逐步形成，具备了向现代炼钢技术转化的条件。

在有色金属的冶炼中，中国明代的炼锌技术在当时世界上处于领先地位。锌，在明代称为“倭铅”。明代运用从炉甘石中炼锌的方法，已能获得含锌 99% 的锌锭。其方法是把 10 斤为单位的炉甘石（碳酸锌）装入泥罐内，用泥封裹，并把表面磨光，慢慢风干，再把炉甘石泥罐放在层层堆成的煤饼之上，再在下面把煤饼点燃烧旺，罐里的炉甘石熔化成团待冷却后把熔化物取出，这就得到锌。炼锌的难度是很大的，要使氧化锌还原为锌，所需温度比锌的沸点还高，而气化的锌与空气接触会重新变成氧化锌。因此，炼锌极其困难。欧洲直到 18 世纪前半世纪，由于中国炼锌技术的传入，才开始有炼锌的历史。

8. 印刷、烧瓷和盐糖制作

明代由于人们日益增长的生活需要，在一系列的轻工产品的制作技术方面，有新的发展与提高。

(1) 印刷

明中叶以后，城市经济空前发达，市民文化应运而生，促进了印刷工艺水平的提高。当时出书的内容很是丰富，除了印刷前代流传下来的经史子集之外，当代的文学作品、医农书籍、日用便览、蒙童读本也大量被印刷出来。明朝印书业分布地点很广，一些新兴的刻书中心，如南京、北京、苏州、徽州、湖州等逐步形成，一些老的刻书中心，如福建建阳等地也保存下来。除国家宫廷、国子监刻书以外，一些藩王、地方政府也热衷于刻书；还有许多私家刻书，以牟取利润。

在印刷技术上，已出现了铜活字印刷。江苏无锡的华燧在 1490 年和 1495 年分别印行的《宋诸臣奏议》与《容斋五笔》是我国现存最早的铜活字印刷品。在明朝，常州人还创制了铅活字，可惜未能推行。明朝印刷术还有套印、饧板、拱花技术的发明。彩色套板是将同一板面分成几块同样大小的木板，每板各用一色，逐次印在同一纸上而形成多种色彩。饧板是将同一板面分割成大小不同的板块，分别刷上不同的颜色，逐个拼集套印在同一板上。由于这些木板如饧钉小饼，很是零碎，故称饧板。套印与饧板的发明，使版面鲜艳多彩，引人注目。明末安徽休宁人胡正言用饧板印的《十竹斋画谱》、《十竹斋笺谱》，可以说是饧板的代表作，其深浅浓淡、阴阳向背，与原画相去无几。明朝印刷书籍还多用插图，板式字体亦有变化。板式，明初多用黑口，嘉靖后用白口，万历后黑白口并用。字体，明初用赵孟頫体，中期用欧阳询、颜真卿体，万历后用宋字体，为今天广泛使用的印刷字体打下了基础。在装订技术方面，明朝初期用包背装，在书页边栏的空白处打孔，穿上纸捻，然后加上包装的封面。明朝中叶，为了克服包背装不便于裁切书背的缺陷，而改用线装，它把包背装完整封面裁成两半，分置于书身前后，然后把它们连同书身一起打孔穿线，装订成册。这样不仅外观好看，而且便于改装，书页也不易散乱，故直至现在还在应用。线装的出现，说明我国装帧技艺已进入新阶段。

(2) 烧瓷

明代制瓷技术较元代有新的的发展。单色釉的品种增多，出现了鲜红、宝石红、翠青、娇黄、孔雀蓝等。彩瓷中青花瓷的制作十分精致，上海博物馆收藏的成化年间（1465—1487年）所制孔雀绿釉青花鱼莲纹盘，它的釉色与孔雀翠绿的羽毛极为相似。它是用青料绘成图案，不加白釉即行烧制，烧成后再抹上绿釉，经低温焙烤而成。青花是明代瓷器生产的主流，产量大，品种多，在制瓷技术上也有所创新。在明朝成化年间还创造了一种斗彩瓷，斗彩又称“逗彩”，它是釉下青花与釉上彩饰相结合而成，两彩互相辉映，争妍斗艳，故称斗彩。它的制作过程是，先用青料绘出花纹轮廓，加上白釉烧成后，再按青料的轮廓填绘红、黄、绿等各种色彩，最后加以烘烤而成。至明朝后期，在斗彩的基础上，又创作了“五彩瓷”。它用多种彩色在直接烧成的瓷器上，描上各种花纹，再经烘烤做成，其颜色十分艳丽。

明代瓷器与历朝一样，在国外享有盛誉。16世纪时，龙泉青瓷传到法国，受到法国人的青睐。法国人就用名剧《牧羊女亚司泰来》的男主人公“雪拉同”的服色来命名龙泉青瓷，此名一直沿用到现今。

(3) 制盐

明人对于盐的分类、性质、用途作了深入的探求。李时珍《本草纲目》中“食盐”、“戎盐”、“光明盐”诸条中，详细记载了它们的产地、形态、采集方法、性味及医药用途等。他认为“盐为百病之主，百病无不用之”，如服补肾之药应该用盐汤，补心之药应用炒盐，同时亦指出哪些疾病应该忌服盐汤。宋应星对食盐作了精深研究，指出盐的来源不一，有海盐、池盐、井盐、土盐、崖盐、沙石盐之分，并详细地记载了各种盐的煎炼方法。如海盐的制法就介绍了草灰取盐法、沙席渗盐法、直接晒盐法等多种方法。对于井盐的提炼，也从凿井用具的使用到卤水的提汲，一直到井盐的熬制，讲得十分详细。

明朝的晒盐技术，进步最为明显。从元代开始，北方的长芦盐区已直接利用海水进行晒卤、晒盐。至明代，这一方法已日益推广，并在一些技术细节上作了改进。晒盐是在近海滩涂上修筑多级落差蒸发池，先将海水引入最高一级，隔数日后，把海水引入下一级，在这个过程中，海水一面逐渐流动，一面逐渐蒸发浓缩，形成浓卤，最后放入结晶池晒盐。这一技术在明朝中叶后得到较快推广，如淮北五大盐场至嘉靖八年（1529年）已全部采用了这一技术。在井盐的制作中，对于凿井的方法，护井技术，利用火井熬盐等，也作了改进。

(4) 制糖

明代制糖技术，包括蔗糖的熬制与饴糖制作两个方面。

蔗糖的熬制比前代更加完备。甘蔗砍下后，放入糖车中进行轧榨，取其糖汁。浆汁从槽规流入缸内。每一石浆汁，放石灰五合。取汁煎糖时，把三口锅并列如“品”字，先把稠汁聚入一锅，然后逐步加稀汁在两锅之内，最后用适当火力熬制成糖。

饴糖的制作是将稻麦之类浸湿，待到它们生芽后晒干，然后煎炼成糖。明朝麦芽糖的加工食品，以宫中制成的“一窝丝”最为有名。它的表面白而发光，有的外面还滚上芝麻，内部松虚多孔，吃起来松甜可口，颇受老幼欢

迎。这是明朝人的一个创造。它之所以称为“一窝丝”，是因为用饴糖拔丝而成的缘故。

9. 机械制造

(1) 纺织机械

明代的纺织技术，由于棉花种植的普及和人们对棉布的迫切需要而发展起来。当时纺织器械较前有了改进。

在元代，黄道婆推广了一种脱去棉籽的搅车，它是利用曲柄、杠杆等构件，进行搅动而脱籽。至明代万历（1573—1620年）时，一种更为先进的太仓式搅车诞生了。它利用辗轴、曲柄、杠杆、飞轮等原理，省功而提高了轧棉的效率。据说一人一日可出花30多斤。而美国至18世纪还是用人力摘除棉籽，一人紧张劳动一天还不一定能清拣出一磅棉花。至1793年，美国人才发明了轧棉机。

其次是弹棉工具的改进。黄道婆曾用四尺长、装绳弦的大弹弓。到明末，对黄氏弹弓再作改进或“以木为弓，蜡丝为弦”，用弹椎击棉；或采用“悬竿弹棉法”，用一根竹竿把弹弓悬挂起来，减轻弹花者左手持弓的负担，充分利用了振荡原理，提高了开松率，使弹棉的速度越来越快。

再次，是纺车的改进。南宋时已在麻纺车的基础上发明了一锭的棉纺车，黄道婆用脚踏发动的三锭纺车，使效率大为提高。而在明末清初，更改进为同时能纺四锭线的纺车，而达到了单人纺车的极高水平。

织布与印染技术也有所发展。当时织出的丝、棉产品，可以说流向了世界各地，著名的有漳缎、提花绒丝织物、双面丝绒、双层棉、妆花缎等。

(2) 西方机械制造术的影响

西方传教士来华后，介绍了一些西方的机械及其制造技术。

宋应星是最早接受这类知识的代表之一。他在《天工开物》中，介绍了一些西方兵器的制作。而在中国具有近代意义的第一部机械工程方面专著，是邓玉函与王征合译的《远西奇器图说录最》（简称《奇器图说》），该书在天启七年（1627年）刻于北京，共2卷。书的内容很注意介绍那些关系到国计民生、简便易行的实用性器械，也介绍一些精妙绝伦的观赏器具，尤其重点介绍了荷兰数学家斯蒂文、德国矿冶学家乔治·鲍尔（1494—1555年）、意大利科学家拉梅里、古罗马建筑学家维脱鲁维的科学成就。《奇器图说》卷二所叙诸器，来源于《数学通论》一书第十章。书中图说之部，则多采自拉梅里之书。

王征还把中西科学结合起来，根据西方机械原理，发明了虹吸、鹤饮、轮激、风碓、自行磨、自行车、轮壶、代耕、连弩等几种器械。这些器械的制作方法，都著录在他所撰的《新制诸器图说》一书之中。王征还著有《额辣齐亚牖造诸器图说》，收录了他制作的天球自旋，地埴自收，日晷自移，水轮自汲，大船自去，风车行远，云梯直上，自转常磨，自行兵车，活台架炮，妙轮奏乐等24种新器。所谓“额辣齐亚”，是拉丁语“天主圣宠”之音译，表示这些东西是由于天主的启示所造出，因为王征是个虔诚的天主教徒。此外，王征还对龙尾车、恒升车、活杓、活闸、活辊木、运重机器、千步弩、

生火机等进行了改进制作。

明朝后期，一些科学家对中国传统工艺如舟车的制造技术等进行了总结。《天工开物》对各种产品从原料到制成品全部生产过程的工序、方法，都作了较详细的且附有图解的说明，便于后人理解各种生产工具的内部构造、制作过程和使用方法。其中关于某些器械的记载，至今仍有一定价值。

10. 建筑

明朝继承和发展了古代建筑的优良传统，在房屋、园林建筑、防御工程（如长城的修筑）等方面取得了巨大的成就。

(1) 宫殿

在房屋建筑方面，南京与北京的皇宫建筑最为雄伟。南京明宫自明初朱元璋建筑后，迭经天灾兵燹，至今仅剩残垣颓壁。而北京明故宫经近 600 年的沧桑，大部分依然保留下来。北京明宫自永乐五年（1407 年）始建，经 14 年方才建成，有著名建筑师蒯祥参预其事。这个宫殿群在景山之南，正阳门之北，南北长 960 米，东西长 760 米，建筑房屋 9 千多间，建筑面积约 15 万平方米。四周城墙高 10 米，并围有一条 52 米宽的护城河，宫城南面正门为午门，北为玄武门，东为东华门，西叫西华门。宫墙的四角峙立着高大的角楼，以备警戒之用。其主要宫殿均位于全城的中轴线上，从南至北，依次为奉天殿（皇极殿）、华盖殿（中极殿）、谨身殿（建极殿）、乾清宫、交泰殿、坤宁宫，这些宫殿都建在用汉白玉围砌的高基上。如奉天殿面宽 11 间，高达 26.92 米，东西宽 63.96 米，南北进深 37.20 米。殿内用 72 根高柱支撑，内设雕刻得非常精致的御座，殿外装饰有琉璃九龙壁。北京故宫建筑的斗拱、梁枋、藻井天花、门窗格扇、花罩栏杆，采用砖雕、石雕、贴金、镏金、彩画等工艺，把它们装饰得十分精巧，胜过天工，集中体现了我国传统建筑艺术独特的民族风格。

(2) 园林

由于明朝经济的发展，皇家园林与私人苑囿在构筑艺术上都超越了前代。在造园艺术高度发展的基础上，计成写出《园冶》一书，提出“人作”与“天成”相结合的造园理论，强调“借景”处理的重要性，把人工建筑与自然景物融为一体。他论述的“借景”中有远借、邻借、仰借、俯借、应时而借等多种借法，内容十分丰富，立论也很精辟。明朝园林建筑理论还强调建筑与绘画、书法、诗词、雕刻等密切配合，在各种艺术的协调中产生诗情画意。总之，明代园林建筑设计力求自然，强调利用对景手法，处理水面，堆砌假山，建造楼阁。

在园林建筑的实践方面，明宫园林可谓集园林艺术之大成，除了布置精巧的御花园之外，还有规模巨大的西苑。西苑在明宫西北，包括今北海在内，此地原为金朝离宫，从元代起成为御苑。明代继续修建了不少亭台阁榭，堆砌假山，布置极为优美。私人园林盛于江南地区，多为官僚士大夫、富商巨贾所构筑，当时“士大夫富厚者，以治园林，教歌舞之隙，间及古玩。”

这些人把修筑园林作为主要的消费之一。私家园林的主要特点是小巧玲珑，构筑精致，甚至“不逾半亩，层楼复阁，已觉邈焉旷远”。也有些园林依照地形修得回廊曲折，嘉树满庭，亭台交辉，还辟出一些地方点缀竹篱茅舍，充满都市与乡野的综合情趣。如苏州拙政园，全园以水池为中心，环池建筑屋榭馆阁，并用漏窗、回廊相互联系，使之与山水互相掩映，成为名闻遐迩的名园。

(3) 城墙

明朝城墙建筑，是在对外战争中发展起来的。如在抗倭斗争中，一些土城就改成了砖石城墙，其建筑材料日益丰富，工程技术也有很大改进。其中，明长城的修筑规模，可谓前所未有的。

明朝建立之初，就意识到来自北方蒙古的威胁，因此特别注意北部的边防。从明初开始，用了 100 多年的时间，修筑了一条西起嘉峪关，东至山海关全长约 6700 公里的明长城。明长城在山西以东都用砖石砌成，以石灰浆勾缝，十分牢固，使砖构建筑技术进入了一个新的发展阶段。城墙根据自然地形，大部分修筑在山脊上。坡度不大时，随地势平行砌筑；如坡度较大，则采取水平跌落砌筑。山西以西大部分用土夯土版筑，因地基打得扎实，仍较牢固。东部城墙高约 8 米，墙基宽 6 米，墙顶宽 5 米左右，墙顶设置垛口，里边设置女墙。北京南口、八达岭一带墙高 8.5 米，基厚 6.5 米，顶部厚度达 5.7 米，没有三道防护城墙，气魄更是雄伟。西部城墙高约 5 米，基部宽约 4 米，墙面宽约 2 米。长城每隔一定距离，设有传报军情的烽火台。明朝政府还在长城险要的地方设置了不少关城，关城建有望敌楼、甕城，十分壮丽，著名的有居庸关、山海关、嘉峪关。这些关隘在国防上起了重要作用。

就科学技术发展的历史而言，近代前期是一个承先启后的时期，也是一个发生革命性变革的时期。

这一时期，在欧洲诞生了近代科学。由于资本主义生产发展的刺激和推动，也由于文艺复兴造就的社会气氛和时代精神，科学摆脱了神学和经院哲学的束缚，获得了独立发展的可能性。在理性精神的指导下，一大批杰出的科学家在古代和中世纪学术遗产的基础上进行了创造性的工作，用经验方法（包括观察和实验）与数学方法的结合去发现原理、建立定律，并检验知识的正确与否，为科学的发展开辟了新的道路。

在这个时期，天文学中首先出现了重大突破。哥白尼提出了具有划时代意义的太阳中心学说，第谷在天文观测方面取得了卓越的成果，刻卜勒发现行星运动定律，伽利略通过望远镜观察了人们用肉眼不能看到的天体情况并得出重要结论。宇宙的神秘面纱，由此而被一步步地揭开。

一系列远航探险的成果，导致了地理学的重建。绕过非洲到达东方的航路的开辟、美洲的发现、环球航行的完成等等，一点点地弄清了人类生活的地球的真实面貌。同时，地图绘制水平有了很大提高，麦卡托用投影法绘制了带有经纬线组成的坐标方格的世界地图；出现了一批地理学著作，地理学及其术语开始有了明确的定义。

在生命科学中，维萨留斯的《人体结构》标志着人类对于自身的认识的飞跃，塞尔维特和法布里修斯分别发现了肺循环和静脉瓣膜，哈维提出了血液循环的理论，揭示了生命运动的过程，从而彻底改变了这方面现有知识的框架结构。人体医学有了长足的进步：帕拉塞尔苏斯关于致病原因和治疗原

则的见解为医学的近代化指出了方向，圣托里奥率先将计量方法用于诊疗疾病和研究人体，弗拉卡斯托罗提出了病菌学说并对传染病作了科学的解释。人们对于不少疾病的认识不断深化，治疗方法也逐渐改进。此外，近代动物学和植物学也在这一时期渐具雏形。

近代实验物理学的基础也是在这一时期奠定的。伽利略、斯特文、托里拆利、帕斯卡、居里克等学者发现了许多重要的力学原理，莫洛利克、刻卜勒、斯涅尔、迪卡尔、格里马尔迪的工作推动了光学的进展，吉尔伯特在磁学方面作了大量实验，伽利略、梅森、卡桑狄在声学方面进行了开创性的研究。

数学在科学研究中发挥着越来越大的作用，其本身也获得了重大进展。这一时期，数学的符号系统基本形成，代数学趋于完善；笛卡尔和费马找到了把代数应用于几何的方法，发现了解析几何学的基本原理；刻卜勒和卡瓦列利在处理无限小量的数学方法方面所做的工作，为牛顿和莱布尼茨创立微积分作了准备。

炼金术逐渐向近代化学过渡。帕拉塞尔苏斯、利巴维乌斯、赫尔蒙特、格劳贝尔在医药化学方面起了奠基作用，而阿格里科拉、埃尔克则在冶金化学方面进行了开拓。正是在这一时期化学实践的基础上，玻意耳提出了新的化学原素概念，在使化学成为一门实验科学的道路上，迈出了重要的一步。

这一时期，技术的进步也引人注目。采矿、冶金技术的发展和煤的用途的扩大，预示着铁和煤的时代即将到来。风车和水车的改进，为工业提供了更多的动力。利用蒸汽作为动力来源的尝试已经开始。在各个生产部门中，机械装置的使用越来越多。

概括地说，在近代前期的欧洲，科学发展的外部障碍逐渐被打破，科学研究的方法趋于成熟，近代科学的各个学科体系已经大致形成，各种技术不断地得到改善。一系列重大发现和发明的产生，意味着人类对于自然的认识达到了前所未有的广度和深度。所有这些都为近代科学技术的进一步发展和繁荣奠定了坚实的基础，同时也为工业革命准备了条件。

近代前期，中国在科学技术方面也取得了不少成就，为充实人类知识宝库、发展人类文明作出了贡献。李时珍、徐光启、徐霞客、宋应星、朱载堉、方以智等著名学者，对于从实践中产生的丰富经验进行了总结和研究，推动了医药学、农学、地理学、物理学等学科的发展。此外，中国人在应用数学、天文历算、纺织、烧瓷、冶炼、航海等方面也都有建树。但是，由于各种原因，这一时期的中国科技，在总体上已落后于西方。

