

学校的理想装备

电子图书·学校专集

校园网上的最佳资源

世界现代后期科技史

 **eBOOK**
内部资料 非卖品

内容提要

本书反映的是 1918 年至 1945 年世界科学技术史的概貌。书中着重介绍了作为现代物理学两大支柱之一的量子力学的诞生及其所带来的物理学革命；介绍了在计算工具历史发展的基础上诞生第一台电子计算机的过程；对这一历史时期新能源等领域中的科学技术成就作了较为详尽的论述；还就两次世界大战给科学技术带来的影响作了较为客观的反映。

本书通俗易懂，以史为主，史论结合，并对这一特定科学技术发展阶段中的重要人物和重要事件作了专章介绍。适于具有中学以上文化程度的读者阅读，亦可作为物理学、计算机科学以及科学技术史等方面的教学人员、研究人员的参考用书。

世界现代后期科技史

一、概述

在人类的历史长河中，20 世纪 20—40 年代是一个短暂而又非同寻常的时期。

在这一段时间里，人类尚未抚平第一次世界大战的创口，又经历了另一场规模更大、更为残酷的世界大战。历史上仅有的两次有众多国家卷入的战争，给我们的星球，给爱好和平的人们带来了深重的灾难，但也从另一角度促进、加速了科学技术的发展。

这又是一段创造奇迹的时期，科学和技术的许多方面在第一次世界大战结束到第二次世界大战爆发之间的 20 年时间里获得奇迹般的发展。作为现代数学基础理论三大支柱的抽象代数、拓扑学、泛函分析，溯源于 19 世纪末，奠基于 20 世纪初，而形成于两次世界大战之间。微观领域的物理学革命，也是在这一历史时期中，突破了旧量子论的 10 年徘徊，建立起了真正反映微观领域物质运动规律的量子力学理论体系，使人类对自然界的认识真正从宏观世界深入到微观世界。

相对论和量子力学理论的创立是 20 世纪上半叶物理学革命的两大战场。由科学巨匠爱因斯坦在世纪之初创立的相对论，使人类的认识由低速领域扩大到高速领域；由宏观领域延伸到宇观范围；从我们生存的三维空间到时间、空间共同构成的四维时空，人们第一次深刻认识到时间和空间的相互依赖；认识到时间和空间的相对意义；认识到时间、空间与物质运动的相互依赖，而且，这种依赖关系不仅表现在时间、空间对物质运动的依赖，还表现在对物质分布的依赖。广义相对论则在更深的层次上揭示了这种依赖关系。

相对论所揭示的高速领域物质运动的规律，为全面描述处于高速运动状态的微观粒子的运动规律打下了基础。它所揭示的质量、能量关系，还从理论上预言了物质内部蕴涵着的极大能量，预示了核能开发的可能性。

在爱因斯坦创立相对论的过程中，量子理论的革命也已奏响了序曲。

19 世纪末 20 世纪初，自然科学有了一系列新的重大发现。

1887 年，赫兹发现了一种无法用经典理论解释的“光电效应”现象。1897 年，电子的存在得到 J. J. 汤姆逊等人的确证，这是人类认识到的第一个基本粒子，是构成原子的要素之一。电子的发现动摇了原子不可分的经典观念，说明原子中还包含着更小的物质微粒。1895 年，伦琴发现 X 射线——发自原子内部的高频电磁波，进一步向人们提供了来自原子内部的信息，而且，这种射线的发现还直接导致了次年物质放射性的发现。在不断深入探究物质的放射性，发现更多放射性元素的过程中，卢瑟福与皮埃尔·居里夫妇等科学家作出了杰出的贡献。

实验向人们证实：一些物质自发放射出的射线中，有 α 射线、 β 射线和 γ 射线，其中， α 射线是带正电的二价氦离子，贯穿本领较小； β 射线是

高速运动的电子流，贯穿本领大；射线则是一种贯穿本领极强、不被磁场偏转的电磁波辐射。在放射性衰变过程中，一种元素的原子可以转变为另一种元素。到此，“原子不变”、“原子是不可再分”的经典结论已被彻底否定。新的发现引导人们去研究这些现象的本质，去揭开原子内部结构的秘密。新的发现也在呼唤着反映微观世界结构和描述微观世界运动规律的新的科学理论的诞生。

然而，早期量子理论的出现并不直接源于这几个重大发现，而是源于对黑体辐射问题的研究，具体他说是源于“绝对黑体辐射能量分布密度的公式与实验结果不符”的事实。在解决上述矛盾的过程中，普朗克提出了一个能与实验相符的公式，然而，根据旧有的理论却无法对这个与实验相符的公式作出令人满意的解释。于是，他不得不于1900年提出了一个革命性的“能量子”的假说。

五年之后，爱因斯坦发展了“能量子”概念，提出“光量子”理论（这一年，爱因斯坦同时创立了“狭义相对论”），对“光电效应”作出了满意的理论解释，而且，第一次提出了“光具有波动性和粒子性这两重性质”。

普朗克和爱因斯坦的工作为量子力学奠定了重要的基石。约20年后，爱因斯坦关于“光的二重性”观点启发了德布罗意，后者对“光的二重性”的拓广，直接推动了量子理论的发展。

另一方面，在前面所述的重大发现的基础上，人们提出了关于原子结构的各种模型和设想，如1902年，W·汤姆逊即开耳芬勋爵的“面包葡萄干”模型；1911年，卢瑟福的“太阳系模型”等。但是，这些模型都先后被否定了。1913年，玻尔在卢瑟福模型的基础上，结合普朗克的量子概念，提出了“原子结构的量子化轨道理论”。这一理论虽然突破了经典理论的许多框框，成功地解决了卢瑟福模型的困难，而且还解释了许多微观实验事实，但是，这一实际上还是基于经典理论基础上的模型，仍然面对许多无法解释的难题。

1923年后，早期量子理论的困难才有了突破性进展。首先是德布罗意，在爱因斯坦“光量子”论的启发下，提出了实物粒子的“波粒二重性”，使量子理论由“早期阶段”而转入新的量子理论——量子力学的形成阶段。作为反映微观世界运动规律正确理论的量子力学是沿着两条不同道路发展的。一条是源于德布罗意的“物质波”，并由薛定谔完成的“波动力学”；一条是海森堡等通过对玻尔的“对应性原理”等理论进行深入的、批判性的研究后面形成的“矩阵力学”。后来证明，这两种描述微观世界的理论是完全等价的，只是形式不同，因此合称量子力学。1928年，狄拉克相对论性波动方程的导出，标志着量子力学的最终建成，并实现了量子理论和相对论的统一。

之后，围绕量子力学理论的物理解释，科学界展开了一场规模和深度空前的争论，对垒双方的代表分别是科学巨匠爱因斯坦和哥本哈根学派的领袖

玻尔。这一场旷日持久、至今仍未平息的学术论争，将人们对自然界的认识不断引向深化。

作为现代物理学两大支柱的量子力学和相对论的建立，是发生在 20 世纪的最深刻的科学革命。这两个理论的共同之处是，对经典物理理论的突破，对传统的错误或狭隘观念的否定，扩大了人类所认识的自然界的领域，并极大丰富了人类的思想宝库。它们的诞生带来了物理学及其他学科领域的革命性变化，导致一系列新学科和边缘学科的出现，如核物理学、物性物理学、基本粒子物理、天体物理、宇宙学、量子化学、量子生物学等，为新的技术革命奠定了坚实的理论基础，对 20 世纪乃至今后几个世纪的科学和技术的进步，都是极大的推动。

而量子理论发展与相对论创立的一个明显不同之处在于它的研究的群体性，至今生命力不减当年的相对论基本上是由爱因斯坦独自闯关过隘创立的，而量子理论则先后有许多科学巨人为之献出了毕生精力。这种科学研究的群体性特点在 20 世纪后来的科学和技术研究中，均表现得十分突出。例如，在核能的开发和利用过程中，在第一批原子弹的研制过程和第一台电子计算机的研制过程中。

1905 年，爱因斯坦在创立狭义相对论时，提出了著名的质量能量关系式 $E=MC^2$ ，从理论上预言了物质内部蕴涵着极大的能量。但从理论预见到 30 年代末真正为打开核能库的大门作好准备，这中间凝聚了许多科学家和技术人员的心血。

在物理学一系列重大发现和量子力学理论的推动下，30 年代核物理学的研究蓬蓬勃勃，正是这种研究直接导致了核能的开发。1932 年 2 月，卢瑟福的学生查德威克宣布发现中子；1934 年，费米领导的研究小组成功地利用中子轰击原子核，创造了一系列新的放射性同位素并发现了“慢中子效应”。这一效应的发现被誉为“核时代的实际起点”。

1938 年，哈恩和斯特拉斯曼经过对有关实验结果的慎密分析后指出，利用中子轰击铀核将产生“重核裂变现象”。1939 年 2 月，麦特纳与弗瑞士撰文解释哈恩的重核裂变实验，并指出，重核裂变的同时发生了“质量亏损”的现象，根据爱因斯坦质能关系式，核分裂必然伴随着巨大的能量释放。同年，费米和其他科学家发现了重要的“链式反应”的原理，证明在极短的时间原子内部可以释放出极大的能量。

核物理学的研究成果为核能的开发和利用、为研制原子武器奠定了基础，但从理论到工程实践，从科学家的实验室到制出实物还需要进行大量的应用研究、工程研究和生产工艺等方面的研究，要解决许多极为复杂的技术问题，而且，需要大规模有组织的协作和投入大量的人力、物力和财力。所有这些在和平时期是很难想象的。第二次世界大战的形势促成美国下决心研制原子武器，希特勒在欧洲的法西斯暴行迫使当时世界上许多最优秀的科学家云集到美国，这些都构成了原子弹研制成功的先决条件。

1941年12月6日，在珍珠港事件的前一天，美国科学研究发展总局局长宣布了全力以赴地制造原子弹的决定。1942年，盟国的原子能计划进入一个崭新的阶段，美国原子能研究的最高控制权也转移到了军政委员会。同年8月13日，研制原子弹的全部计划为保密起见而取名为“曼哈顿工程”。为实现这一“工程”，美国动员了50余万人，其中有15万科技人员，耗资22亿美元，动用了全国1/3的电力，在不到四年的时间里制造了三颗原子弹。

原子弹的制成充分表现出了科学研究的群体性特点，同时表明，任何一项重大的发明和技术成果的取得，都是科学技术历史发展的必然，但是，除了理论成熟、技术条件具备之外，社会需要也是不可或缺的重要条件。第一台电子计算机的研制也充分证明了这一点。

计算工具经历了人工计算工具、机械计算机、机电计算机、继电器计算机等的千百年革新演进，到20世纪30年代，在程序自动控制、系统结构、数据的输入输出以及数据存储等方面为现代电子计算机的产生奠定了非常成熟的技术基础。其实，电子管在20世纪初（1906年）已经问世，逻辑电路的理论早在19世纪末也已建立，现代计算机的基本设计思想和完整的蓝图在她诞生之前100多年，已经由英国数学家巴贝吉给予了天才的描绘。也就是说，电子计算机的研制更早些时候已经具备了必要的理论和技术条件，但是，第一台电子计算机ENIAC于四十年代才诞生。对此，ENIAC设计方案的提出者莫希莱曾回答说：“一部分原因是在此之前还没有这种迫切的需要。需要是个奇怪的东西，人们往往需要某种事物，但又不知道他们需要它。”

美籍保加利亚学者阿塔纳索夫和德国工程师朱斯等分别在30年代末和40年代初对电子计算机的研制作了饶有成效的探索，但他们都因缺乏经费，得不到政府的支持而未成功。他们研制计划的夭折和后来第一台电子计算机ENIAC的成功再次说明了现代科学技术发展的鲜明社会化特征。制造电子计算机不可能再象帕斯卡加法机、莱布尼兹计算机和巴贝吉差分机那样，可以靠某个杰出的科学家个人的努力来实现，它需要雄厚的技术基础，需要大量的资金投入，需要多学科的科学家、工程技术人员和科技管理人员的密切配合，更需要国家财政的全面支持。

第二次世界大战中，由于战时弹道研究实验室火力表计算和研究的需要，美国军械部和莫尔学院于1943年6月签订合同，投入40万美元，实施ENIAC的研制计划。1945年底，第一台电子计算机的研制工作全部完成，实际耗资48万美元。可以说，战争的需要是第一台电子计算机诞生的直接动因。

20世纪的两次世界大战对科学技术发展的影响是深远、巨大而复杂的。特别是第二次世界大战对相关应用技术和应用学科的促进，不仅仅表现在核技术和计算机技术方面，构成我们现代文明的许多中枢技术，如广播和电视使用的超短波技术、雷达技术、自动控制技术、喷气机技术、火箭技术

等，也都是在前人科学研究的基础上，于 20 年代开始萌芽、成长，30 年代先后进入了成熟阶段，第二次世界大战中开花结果的。战争还根本改变了科学技术在人类社会中所处的地位，并使其出现了一系列崭新的特点。

这一历史时期中得到发展的科学和技术，大大推进了 20 世纪人类社会的发展和科技的进步。人类的许多梦想，对能源的渴求，探索太空、探索微观物质的奥秘的希冀，真正解放智力、运筹信息的愿望，……，已经变成现实或正在变成现实。

二、从量子论到量子力学的物理学革命

不论在物理学史还是在科学技术史上，19世纪末至20世纪初都是一个非常重要的时代，是一个“科学时刻在活跃、在跳动”的时代，是一个不断有新的发现、有新的理论突破的时代。在这个时代诞生的革命性理论——相对论和量子理论，成为现代科学、特别是现代物理学的两大支柱。相对论源于对“静止以太”存在的研究，或者更确切地说是源于对经典物理学内在矛盾的研究；而量子力学则主要源于新的实验事实、新的物理发现与现存理论的矛盾，描述黑体辐射能量密度分布的公式与实验结果不符导致“能量子”假说的诞生；电子、X射线及放射性等微观领域的一些重要发现，与人们固有的原子理论相悖，促使人们对原子结构作深入的探究。两个似乎不相干的领域中展开的物理学革命，最终诞生了与相对论并驾齐驱的另一理论体系——量子力学，一种反映微观粒子结构及其运动规律的科学理论。随着量子理论的建立和发展，原子结构理论成为它的一个分支，而最终得到了明确、透彻的理论阐述。

1. 物理学的几项重要发现

早在19世纪初，就有人对原子不可分的千古定论提出过挑战，但直到19世纪末，物理学的几项重大发现才揭开原子内部之谜，并进一步引导人们去探索原子的内部结构，并揭开微观物理学革命的序幕。

(1) 电子的发现

电子的发现是科学家们对“阴极射线”长期探究的结果。早在1836年，法拉第（1791—1867）就注意到低压气体中的放电现象，并预言这种放电现象将给以后的电学研究带来很大影响。

1855年，德国的玻璃技工盖斯勒（1815—1879）利用托里拆利真空原理制成了简易的水银真空泵——盖斯勒泵，并制成了低压气体放电管——盖斯勒管，为人们进一步研究低压气体中的放电现象及其本质创造了条件。1857年，普吕克尔（1801—1868）利用改进了的盖斯勒管和盖斯勒泵研究气体放电效应时发现，当管中的气压足够低并在封入管内的两极间加上高电压时，就有一束射线从管中的阴极发生，在对面的管壁上留下了绿色的荧光。之后的实验证明，这种射线能被磁场偏转，而且是直线传播的。

德国物理学家戈尔茨坦（1850—1930）于1876年证实了普吕尔发现的现象，并把这种射线称为“阴极射线”。德国的物理学家赫兹（1857—1894）等认为，阴极射线是一种电磁辐射现象。

1879年，英国物理学家克鲁克斯（1832—1919）亲自改进了真空泵，提高了放电管的真空度，制成“克鲁克斯管”。实验发现，阴极射线能推动放入管中的云母风车转动，克鲁克斯认为，阴极射线实际上是一种高速带电的

粒子流。

1892年，人们发现，阴极射线能够穿透金属片而发生漫射现象。德国物理学家勒纳德（1862—1974）于1894年设计制作了一种带有小窗的新型盖斯勒管，小窗是用很薄的铝箔做成的，阴极射线可以通过小窗漫射。他研究了从小窗飞出的射线（也称勒纳德射线）的性质，证明了阴极射线漫射的说法，还发现其能使照相底片感光的作用。勒纳德的实验被看作是以太振动说的证据。

“阴极射线”是“粒子流”还是“电磁辐射”？两种观点在一段时间里相持不下。英国物理学家、剑桥著名的卡文迪许实验室的负责人J.J.汤姆逊（1856—1940）从1881年就开始研究阴极射线，他赞成“粒子流”的观点。1894年，汤姆逊用实验测得阴极射线速度要比光速小得多，进一步确信，阴极射线不是一种电磁辐射。1897年，他通过对勒纳德实验的分析认为，这个实验恰恰证明了：阴极射线是粒子流，而且组成射线的粒子比原子小。之后，他用实验证实了佩兰（1870—1942）于1895年得出的关于“组成阴极射线的粒子是带负电荷”的结论。

为了进一步搞清这种粒子的本质，汤姆逊于这一年对这种粒子的荷质比（ e/m ）即粒子所带电荷 e 和质量 m 的比值，进行了一系列的测量。他分别利用了热学的方法和电、磁场偏转法。利用电、磁场偏转法时，他重新设计了真空管，对管中由阴极发出的射线分别施加磁场和电场的作用，通过对粒子在电场、磁场中偏转情况的测定，计算出粒子的荷质比。实验中他还发现，粒子的荷质比并不因为电极材料和管内气体的改变而有所变化，因此证明，不同物质发出的阴极射线粒子是相同的。和在电解过程中测定的氢离子的荷质比相比，阴极射线中粒子的荷质比要大得多，说明新粒子和氢原子比，要么电荷量很大，要么质量很小，或两者兼是。但由电磁场可使阴极射线强烈致偏来分析，新粒子的质量应比氢离子小得多。汤姆逊最后采用了英国物理学家斯通尼（1826—1911）于1891年提出的说法，称阴极射线粒子为“电子”。

1883年，爱迪生（1847—1931）在研究白炽灯时发现，灯泡中与灯丝相对的金属片的表面会发出淡蓝色的亮光，即炽热的灯丝有带电粒子发出，这种现象称为爱迪生效应。汤姆逊研究了爱迪生效应，测量了由炽热灯丝发出的带电粒子的荷质比，发现其数值与阴极射线粒子的数值相同。

1896年，塞曼（1865—1943）和洛伦兹（1853—1928）根据洛伦兹的电子论，对“塞曼效应”作了进一步的理论分析，并计算出电子的荷质比值，与汤姆逊的实验测定是基本一致的。因此可以说，到1897年，电子的存在得到了确证，汤姆逊因此获得1906年诺贝尔物理奖。

但是，电子的电荷和质量仍有待进一步确定。汤姆逊的学生汤森（1868—1957）、汤姆逊本人以及威尔逊（1869—1959）分别对电子的电荷进行了测定。1898年，汤姆逊测得电子的电荷值 e 为 3.3×10^{-10} 静电单位。

美国物理学家密立根(1868—1953)分析了前人测定电子电荷实验存在的问题,提出克服误差的若干措施,设计了著名的“密立根油滴实验”。从1906年至1917年,他多次改进实验,以提高精度,最后测得的电子电荷值为 $4.774(\pm 0.005) \times 10^{-10}$ 静电单位。(目前的精确值是 4.083×10^{-10} 静电单位。)

密立根的油滴实验,是让带电小油滴在两个水平放置相距一定距离的金属平板间上下运动,板间有空气。首先观察测定小油滴在重力作用下,自上而下运动的速度。然后,在两板间加上恒定电场,小油滴将在重力和电场力的合力的作用下徐徐上升,可再测得油滴上升的速度。利用测得的两种速度、油滴与板间空气的粘滞系数以及油滴荷电数、空气密度和重力加速度等可以计算出电子电荷 e 的值。密立根还证明了,电子的电荷值 e 是电荷的最基本单位,其他所有带电物质的电量都是 e 的正整数倍或负整数倍。因此,测得了电子电荷精确值的密立根精巧实验,还有另一重要意义,即给出了物理学一个十分重要的物理常数。

电子是人类认识的第一个基本粒子,是原子的构成要素,电子的发现动摇了原子不可分的经典结论,引导人们进一步去探索原子内部结构的奥秘。

(2) 伦琴发现 X 射线——短波段的一种电磁波

1879年,英国物理学家克鲁克斯在研究阴极射线的实验时还发现,放在放电管附近的照相底片上有被感光的迹象。但是他以为是底片的质量有问题而未加探究,失去了发现 X 射线的机会。

1895年,德国物理学家伦琴(1845—1923)在研究阴极射线时偶然发现,放在高真空放电管附近的照相底片被感光了,而且底片是用黑纸严密包着的。伦琴当时是德国维尔茨堡大学的校长,更是一位有见识、严谨诚实的实验家。他认为这一现象说明,放电管内发射出了某种能穿透底片包装纸的射线。伦琴进一步的实验发现,即使把放电管用黑纸包起来,这种射线也能使放在装置附近的涂有亚铂氰化钡的屏发生荧光,即使将屏放到离装置两米远处,也能观察到这种荧光。伦琴确信,这种新奇现象无法用已发现的阴极射线来解释,因为实验已经证明,阴极射线在空气中只能传播数厘米。

伦琴选用了多种物品,如2至3厘米厚的木板,几厘米厚的硬橡胶,15厘米厚的铝片等,将它们逐一放在放电管和荧光屏之间进行实验,几乎所有的物质都能被这种射线穿透。因此,伦琴认为,这种新射线的显著特征是具有极强的贯穿能力。更令伦琴感到新奇的是,如果把手放在放电装置和屏之间,那么,在淡淡的手的轮廓中可以看到透明度较差的骨骼的影象,即骨骼处的影象较黑。伦琴的实验还表明,和阴极射线不同,这种射线在磁场中不产生偏转。因此,他断定,这种由阴极射线引起的、在放电装置的玻璃管壁上发生的射线和阴极射线是性质完全不同的射线。伦琴感到,这种射线的本质和产生的原因,仍然是个谜,因此他用数学中常用来表示未知数的字母 X,命名他发现的这种新射线为 X 射线。后人也称这种射线为伦琴射线。

1895年12月28日,伦琴向德国维尔茨堡物理学与医学学会递交了题为《一种新的射线——初步报告》的论文。X射线的发现很快轰动了科学界。阴极射线发现后,由于工业的需要,其研究受到重视,一般的实验室都配备有阴极射线管,因此,当时世界上每个有名望的物理学家,每个有条件的实验室几乎都进行了验证X射线的实验。这种射线在医学上有非常重要的应用价值,更引起人们极大的关注和兴趣,并引发了一大批与之相关的专利。

伦琴因发现X射线获得1901年的诺贝尔物理学奖,诺贝尔奖金是1901年开始颁发的,因此,伦琴是第一位获得诺贝尔奖的科学家。这位今后人尊敬的科学家,把得到的诺贝尔奖金捐赠给了维尔茨堡大学,并拒绝了有关专利权。

错过了发现X射线机会的,不仅有克鲁克斯,还有美国的古德斯比德和德国的勒纳德。古德斯比德曾意外地得到过X射线的照片,但他以为是阴极射线产生的效应;勒纳德也在伦琴之前发现了X射线的感光效应,但也没有抓住这一重要事实的本质和意义。

X射线的发现得到世界公认后,有的人企图贬低和抹杀伦琴的功绩。但是,柏林科学院在致伦琴的贺词中给予了公正的评价:“科学史告诉我们,在每一项科学发现中,功劳和幸运独特地结合在一起;在这种情况下,许多外行人也许认为幸运是主要的因素。但是,了解您的创造个性特点的人将会懂得,正是您,以摆脱了一切成见的、完善的实验艺术和最高的科学诚意及注意力结合起来的研究者,应当得到作出这一伟大发现的幸福。”

X射线的发现促使许多国家的科学家对这种射线的本质及其产生的原因开展进一步的研究。

1912年,德国物理学家劳厄(1879—1960)利用有规则间隔的原子的晶体作为天然的光栅,研究X射线的衍射现象,并最终得到X射线的衍射图,证明X射线是一种波长很短的电磁波,其波长在0.1埃到0.5埃之间。与此同时,他还证明了晶体的原子点阵结构。劳厄因此获得1914年诺贝尔物理学奖。

同年,英国物理学家布拉格父子(W.H. Bragg,1862—1942;W.L. Bragg,1890—1971)研究出计算X射线波长的新方法。

X射线是发自原子内部的一种高频电磁波的本质得到确定,但是,这种高频电磁波的产生机制,直到量子力学建立之后,才获得了解释。

X射线的发现导致一系列划时代的重大发现和新的技术学科的诞生。首先,它直接导致放射性的发现,接着又导致X射线光谱学、放射化学、放射医学等技术学科的产生,在后来的医学、工业、晶体结构分析方面有着广泛的应用。X射线的发现在现代科学发展史中占重要的地位。

(3) 放射性的发现

X射线是伦琴在进行阴极射线研究时发现的。而产生X射线时,放电装置的玻璃管壁同时发出荧光,因此,人们曾一度误以为荧光是X射线的来源。

1896年初，彭加勒（1854—1912）在法国科学院会议上展示了伦琴寄给他的关于X射线的论文和照片，并提出，被日光照射而能发荧光的物质也应发出一种不可见的、有穿透能力的、类似X射线的辐射。

法国科学家贝克勒尔（1852—1908）的父辈在荧光物质研究方面颇有成就，他对彭加勒的观点产生很大兴趣，并很快就着手进行有关的实验。他用一种能发出荧光的铀盐——硫酸钾铀酰作实验材料，把它放在用黑纸包严的照相底片上面，然后一起放到阳光下照射数小时。之后，黑纸包中的底片果然感光了，贝克勒尔认为，太阳照射使铀盐发出荧光，伴随着荧光现象确实发出了射线使底片感光，而且这种射线可能就是X射线。

但不久以后，贝克勒尔准备用铀盐再进行一次实验时，意外的结果却推翻了他的设想。这次实验恰好遇上连日阴雨，他只好把用黑纸包好的铀盐和照相底片放在一起，搁于室内。数天以后，他却发现照相底片已强烈地感光了，上面留下铀盐包的像。贝克勒尔一开始认为，这一现象是因为荧光物质发出射线的期限比这种物质发出荧光的期限长的缘故。又经过反复的实验，贝克勒尔发现，他实验研究用的所有铀盐，不论是否发荧光，都能自发地产生一种射线，而且，这种射线不仅能使底片感光，还能使气体电离。贝克勒尔这才悟出：铀盐发出的神秘射线与荧光现象并没有关系。后来，他用纯铀粉作实验，也得到同样的结果。在1896年5月18日提交的报告中，他指出，所有研究过的铀盐，不论是发荧光的还是部分荧光的，结晶的、熔融的或是在溶液中的，都具有相同的性质，因此可以得出以下的结论：在这些盐类中，铀的存在是比其他成分更重要的因素。

铀盐发出的射线曾被称作贝克勒尔射线，后来被命名为 射线，它向人们揭示了一种天然的放射现象。

贝克勒尔对铀射线的性质又作了一些研究之后，认为对这种射线已了解得比较透彻了，便离开了这一课题。他没有再研究其他物质是否也具有这种自发放出射线的性质，也没有对铀射线的本质再作深入的探讨。

然而，贝克勒尔的研究工作却引起另外两位科学家的兴趣。他们是居里夫妇——波兰物理学家玛丽·居里（1867—1934）和法国实验物理学家皮埃尔·居里（1859—1906）。正是他们把物质的这种自动发射出射线的性质称为“放射性”。

居里夫人原名玛丽·斯科罗朵夫斯卡，1867年11月7日出生于波兰一个中学教师的家庭，1891年到法国巴黎，在艰苦的生活条件中勤奋求学。她曾两次荣获诺贝尔奖，是科技史上最杰出的女科学家之一。

1898年，居里夫人首先研究了贝克勒尔关于铀射线的报告，并重复了铀的放射性实验。经过努力的探索，她认识到铀盐的这种放射本领是铀原子的特性。她决定探索别的元素是否也有这种天然的放射性质。于是，她检查了所有的化合物，不久便发现，钍的化合物也能自动发出与铀射线相似的射线，而且强度也差不多。之后，她的检查范围由盐类和氧化物等简单化合物，

扩大到对矿石特别是沥青铀矿和辉铜矿等。她发现，这些矿石中的放射性，比根据铀或钍的含量计算出来的要强得多，经过反复验证后，她确信，矿石中一定含有一种比铀的放射性还要强的元素。

居里夫人的研究太重要了。皮埃尔·居里决定暂时停止他在晶体方面的研究，和妻子共同探索这种元素的存在。他知道，要从成吨成吨的沥青铀矿中，浓缩分离出放射性元素，需要付出非常艰苦繁重的劳动。夫妇俩废寝忘食，昼夜不停地开始寻找新元素的工作。他们原以为，新的放射性元素在矿石中的含量约百分之一，后来才知道，这种矿石的最富矿含新元素也不到百万分之一，也就是说，成吨的沥青铀矿中仅含有一克这种新物质。

1898年7月，他们终于克服种种困难，分析出了这种类似铋的物质，其放射性比铀强400倍。7月18日，居里夫妇把新的发现报告给法国科学院。他们命名这种新的放射性元素为钋（Polonium），以纪念居里夫人的祖国波兰。居里夫人自幼热爱祖国，到法国求学并与皮埃尔·居里结婚后便定居法国，但她时时刻刻怀念着被沙皇俄国侵占的祖国。她用自己的科学成就为祖国赢得了荣誉。

接着，居里夫妇经过几个月的不懈努力，从沥青铀矿所含的各种元素中又分析出一种新的放射性元素——镭（Radium），其拉丁语原意就是“放射”。1898年12月，他们宣布发现镭的消息，再次轰动物理学界。镭、钋等新的放射性元素的发现动摇了当时流行的物理学、化学的经典概念，有的人便对新元素持怀疑态度，而且当时尚未测出镭的原子量。为了证实镭的客观存在，他们决心提炼出纯的含镭物质，并测定出镭的原子量。为此，居里夫妇用了三年时间，进行了极其艰苦劳累的工作，终于从沥青铀矿中提炼出了0.1克纯氯化镭，并初步测得镭的原子量为225。他们分析了镭的光谱，确定了镭的放射性强度是铀的200多万倍，发现这种物质烧灼皮肤，可摧毁带病的人体细胞。镭、钋等放射性元素的相继发现是对科学的重大贡献。1903年，居里夫妇和贝克勒尔同获诺贝尔奖。

继镭之后，又陆续发现了一些新的放射性元素，促使人们对放射性的本质作更深入的研究。当时在加拿大工作的英国物理学家卢瑟福（1871—1937），从1899年起就开始研究这一问题。卢瑟福出生于新西兰一个手工业工人家庭。1895年，大学毕业后，在英国剑桥著名的卡文迪许实验室实习。当时领导这个实验室的是卓越的物理学家J.J.汤姆逊，后由他推荐，卢瑟福于1898年到加拿大麦基尔大学任物理学教授。1907年，被聘为英国曼彻斯特大学教授，1918年，接任了卡文迪许实验室负责人的工作。卢瑟福是实验大师，同时又非常注重科学理论，是理论与实践结合并卓有成效的科学家。

卢瑟福在研究新的放射性元素发出的射线时发现，射线由两种不同的部分构成，一种贯穿本领小，另一种贯穿本领大而且能被磁场偏转。这两部分射线后来被命名为α射线和β射线，构成射线的粒子分别被称为α粒子和β粒子。

粒子。

1899年至1900年，有三个重要实验分别证明了射线是高速运动的电子，其荷质比与阴极射线粒子的荷质比有相同的数量级。

关于射线的本性，人们探索了多年，直到1909年，根据光谱分析才确认其为带正电的二价氦离子。

1900年4月30日，法国化学家维拉德（1860—1934）宣布，他在放射性元素发出的射线中发现了另外一种贯穿本领极强但不被磁场偏转的射线——射线。1914年，卢瑟福根据晶体对射线的衍射实验，证明了射线是一种电磁波辐射。

卢瑟福根据大量放射性现象，大胆提出了“放射性衰变”的理论，在总结镭和铀的放射性衰变规律的基础上，提出了放射性物质衰变过程所遵守的指数定律。他的研究工作得到了英国青年化学家索迪（1877—1956）的合作。他们认为，放射性现象是原子自行衰变的过程，在这种过程中，一种元素的原子可以转变为另一种元素的原子，同时释放出射线、射线及射线。1913至1914年间，索迪的研究证明，一切放射性元素都要变成稳定的元素铅，进一步为放射性理论提供了可靠的证据。

人们还发现，镭不仅能自发地产生辐射，而且还自发地释放出热量。卢瑟福和索迪的研究指出，这些能量是来自原子内部的，其之巨大，是化学能所无法比拟的。

放射性现象的发现和放射性理论的产生对传统观念和经典物理学的某些定律产生了巨大的冲击。放射性元素自发放出热量冲击着经典热力学定律；放射性元素可以自发辐射并转变成另一种元素，冲击着元素永恒不变、一种元素不可能变成另一种元素的传统观念。

电子的发现告诉人们，原子中还包含着更小的物质微粒；X射线虽然是电磁波，但它似乎也只能发自原子内部，这些已经向旧的原子观发出挑战，而放射性现象的发现及放射性理论的建立，更是严重动摇了“原子是物质的不可分的基石”的观念。劳厄在其著作《物理学史》中指出，几乎没有任何东西象放射性那样对原子概念的变化有那么大的贡献。物理学的这些重大发现打开了微观世界的大门，揭开了经典物理学向微观领域的现代物理学迈进的序幕。

（4）光电效应现象的发现

法拉第（1791—1867）在他的《关于光线振动的思想》一文中，指出了电磁波存在的可能性；而麦克斯韦（1831—1879）则通过他的数学，光辉地预言了电磁波的存在。

1886年，赫兹开始利用实验验证麦克斯韦电磁波的存在。他的实验利用了一个与感应线圈连接的未闭合电路（初级电路）产生电振荡，再用另一个简单的未闭合线圈作为探测器。于是，在黑暗中观察到了探测器气隙中微弱的电火花，从而证实了电磁波的存在。

实验中，赫兹偶然发现，当把探测器线圈暴露在初级电路气隙的电火花中时，探测器气隙中的次级电火花将会增强。

为了解释这种现象，他在初级和次级电火花之间，更换了几十种物质进行实验。经过一年多的反复工作，最后作出结论，认为这是紫外光效应，即初级电路的电火花发出的紫外光，照射到探测器装置所引起的一种现象。这种现象就是后来的所谓“光电效应”现象。

约 10 年后，科学家发现了电子，人们认识到，赫兹在验证电磁波的实验中发现的光电效应现象，实际上是紫外光照射到探测器的金属表面，使电子大量逸出，从而增强了次级的电火花。在光电效应中逸出物体表面的电子，则被称为“光电子”。

赫兹之后，物理学家们对光电效应现象又进行了许多研究，例如，俄国物理学家斯托列托夫从 1888 年到 1900 年，用精确的实验方法研究了光电效应；德国物理学家勒纳德于 1902 年，也进行了这一方面的研究。

人们发现，在光的辐照下，金属或其化合物中的电子若获得足够能量，便能越过表面，从物体内部逸出，并总结出了这种光电效应现象的一系列实验规律：

对每一种金属材料，都存在一个确定的临界频率 ν_0 ，若入射光的频率 ν 低于这一频率，则光强度再大，也不可能有光电子逸出。频率 ν_0 是金属的特性。

光电子的动能有一定的分布，其最大值为：

$$E_m = h(\nu - \nu_0)$$

式中的 h ，是普朗克（1858—1947）常数。

单位时间单位面积上逸出的光电子数，与入射光的强度成正比。

光电效应是瞬时发生的，光辐照与发射出光电子之间的时间延迟在毫微秒数量级，即使光的强度很弱，也是如此。

光电效应现象的这些实验规律，是无法用经典物理理论来解释的。因为，按照麦克斯韦经典电磁理论，光波的能量分散在波阵面上，金属中的电子要积累能量需要一定的时间，即不可能在毫微秒的瞬间产生光电效应；另外，光波的能量只与光的强度（振幅）有关，一定强度的光照射一定时间后，电子应该总能获得足够的能量，逸出物体表面；而且，按照光的波动理论，光电子的能量应该随着光的强度的增加而增加，而与光的频率无关。

总之，光电效应给经典物理带来了又一道难题。直到 1905 年，爱因斯坦（1879—1955）提出光量子假说后，这一现象才得到令人信服的解释。

世纪之交科学上的这些重大发现，是许多眼光敏锐、善于观察的科学家勤奋、严谨工作的成果，当然，也包含着不少失之交臂者的深深遗憾。新的实验事实、新的物理发现与已有理论的矛盾，呼唤着新的理论、新的思想的诞生。虽然新的理论的突破口，产生于一个似乎与这些发现不相干的问题——“黑体辐射”问题的研究，但是，这些重大发现在新理论诞生、发展的征

途上起到了十分重要的作用。

2. 早期量子论

从普朗克因克服“紫外灾难”，提出“量子”假说，到玻尔（1885—1962）修改卢瑟福的原子结构太阳系模型，提出关于原子结构的量子化轨道理论，是量子理论的早期发展阶段，这一段的有关理论被称为旧量子论。

（1）“紫外灾难”和黑体辐射问题

1859年，德国物理学家、光谱发明者基尔霍夫（1824—1887）从热力学的平衡条件出发，得到了著名的基尔霍夫定律，即物体发射本领与吸收本领的比值，是一种仅与温度和频率有关，而与物体材料无关的普适函数。

1860年，基尔霍夫提出绝对黑体的概念：一个物体能全部吸收投射在它上面的辐射而全无反射，那么，这个物体就称为绝对黑体。

1879年，德国物理学家斯特潘（1835—1893）经过实验得出黑体辐射总能量与其温度之间的关系，即黑体辐射能量密度的积分，与它的绝对温度 T 的四次方成正比。

1884年，奥地利物理学家玻尔兹曼（1844—1906）根据热力学定律导出了斯特潘的实验公式，从理论上给予了解释。这个公式后来便被称为斯特潘—玻尔兹曼公式。即：

$$E = T^4$$

式中， E 为“斯特潘—玻尔兹曼”常数。

1895年，德国物理学家维恩（1864—1928）从理论上分析了，通过对一个带小孔的辐射空腔的研究来代替对绝对黑体的研究的可行性。1896年，他根据热力学并结合经验数据，推算出一个描述黑体能量密度分布的公式，即维恩公式：

$$(u) = B\nu^3 e^{-\frac{A\nu}{T}}$$

这个公式在高频区与实验结果相符，但在低频区则与实验结果明显不一致。

英国物理学家瑞利（1842—1919）认为，空腔内的电磁辐射会形成驻波，他从统计力学、热力学和经典电磁理论出发，于1900年推导出另一个辐射能量密度与频率的关系公式，1905年经另一位英国物理学家金斯（1887—1946）修正后，被称为瑞利—金斯公式：

$$(u) = \frac{8p}{C^3} KT$$

这个公式与维恩公式相反，在低频区与实验结果相符，然而，随着频率的增加，能量密度也单调地增加，以至于趋向无穷大。人们把这一公式在频率较高的紫外一端发散的问题称为“紫外灾难”。由经典物理理论严格推导出的瑞利—金斯公式的失败，使许多物理学家明显感觉到经典物理学所面临

的危机。

(2) 普朗克的“量子”假说

德国著名物理学家普朗克自 1874 年 10 月进入慕尼黑大学后，很快被物理学所吸引，他没有听从老师约里的劝告，仍然决心献身于理论物理研究。1897 年，他把注意力转向黑体辐射问题。1900 年，他尝试用内插法建立一个与实验结果相符的普遍的辐射公式，使其在低频区与瑞利—金斯公式相符，在高频区与维恩公式相符。1900 年 10 月 19 日，在德国物理学会的会议上，普朗克在《维恩的辐射定律的改进》论文中公布了自己的新辐射公式，即普朗克公式：

$$(u) = \frac{8\pi\nu^3}{c^3} \cdot \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

这个公式后来也被称为黑体辐射公式。德国物理学家鲁本斯（1865—1922）当天晚上就将普朗克公式与有关的实验数据进行了比较，发现新的辐射公式与实验完全符合。普朗克第二天就接到鲁本斯报告的喜讯，兴奋之余立刻又感到：“如果仅仅把这个新公式看作是一个侥幸揣测出的内插公式，那么，它的价值也只是有限的。因此，他立即着手研究这个新的辐射公式的真正物理意义，他必须为他自己巧妙地创造出来的公式寻找到某种理论上的根据。在倾全力紧张攻克这个问题的过程中，他发现，必须放弃经典的能量均分原理，他又回到了熵和几率的关系上，从计算频率为 ν 的振子的几率入手，并运用玻尔兹曼的方法解决了问题的关键所在。玻尔兹曼是热力学第二定律的统计解释者，1877 年，在讨论能量在分子间的分配问题时，他就把实际连续可变的能量分成分立形式加以研究。

1900 年底，普朗克完成了对他的黑体辐射公式的推导。在推导中他大胆引入了如下的假设：组成黑体的振子的能量不能连续地变化，当它吸收或发射频率为 ν 的电磁波时，只能一份一份地吸收或辐射能量，每份能量是一个最小能量单元的整数倍，普朗克称这个最小的、不可再分的能量单元为“量子”，或“量子”。量子对于不同频率的辐射具有不同的数值，但都等于频率和一个常数的乘积，即：

$$= h\nu$$

式中， ν 为频率， h 称为“普朗克常数”，这是物理学中一个十分重要的物理常数。

1900 年 12 月 14 日，普朗克向德国物理学会宣读了他的论文《关于正常光谱的能量分布定律的理论》，提出了这个革命性的量子假说：辐射的发出和吸收都是量子化的。“量子”的概念成功地解决了黑体辐射的“紫外灾难”问题，但更重要的是，它打破了经典物理学中一切过程都是连续变化的观念，为物理学领域的又一革命理论——量子理论的诞生奠定了第一块基石。

1900 年 12 月 14 日被认为是量子论的生日。1918 年，普朗克因为“发现了基本量子，从而对物理学的发展做出了杰出的贡献”而获得诺贝尔奖。

从根本上改变了人们关于能量的概念的“量子”假说与物理学中早已习惯的思维方式相去甚远，与一般人的常识也不相容。物理学界当时对此假说反应冷淡，人们接受普朗克的黑体辐射公式，但不接受量子观点。

普朗克本人接受过经典物理学的严格教育，并为其做出过很大贡献。他的“量子”假说是大胆的革命性的，但也因迫于实验事实而不得不迈出这一步。他本人为这种违背经典物理学的量子论也感到困惑不安，他认为，经典理论给了人们许多有用的东西，因此，必须以最大的谨慎对待它，维护它。因此，普朗克在提出“量子”概念后，又花了相当长的时间，试图将这种概念纳入经典理论中。1911年，在《论量子发射的解说》一文中，他企图取消能量吸收过程的量子特性而代之以连续的过程。1914年，在《量子解说的另一种表述法》一文中，他把发射过程的量子特性也取消了。但是，就在普朗克徘徊动摇的这一段时间里，量子论又有了新的突破性进展。

(3) 爱因斯坦的“光量子”理论

1905年春，爱因斯坦写出了三篇重要的论文。其中两篇是关于布朗运动和狭义相对论的。在三篇论文的第一篇论文《关于光的产生和转化的一个启发性的观点》中，爱因斯坦大胆地推进、发展了普朗克的“量子”假说，提出“光量子”假说。

论文的开头，他便指出：“在物理学家关于气体或其他有重物所形成的理论观念同麦克斯韦关于所谓空虚空间中的电磁过程的理论之间，有着深刻的形式上的分歧。”很明显，爱因斯坦是为了消除分立的质点与连续的场之间的形式上的分歧，而提出光量子假说的。

我们知道，普朗克的量子假说仅仅局限于对能量的吸收和发射的特性上，即只考虑“黑体”器壁上“振子”能量的量子化，对黑体空腔内电磁辐射的处理还是沿用麦克斯韦的电磁场连续的理论。爱因斯坦则假设，光同原子、电子一样也具有粒子性，光不仅在吸收和发射时是不连续的，光在空间的传播也是量子化的，光是一束粒子流。爱因斯坦称这种粒子为“光量子”（后来简称光子），每个光子的能量同普朗克的量子一样，也满足 $\epsilon = h\nu$ 的公式，其中， ν 是光的频率， h 也是普朗克常数。

根据这种假说，爱因斯坦以最简练、明晰的方式解释了由赫兹所发现的光电效应现象，并给出了光电效应的“爱因斯坦公式”，它现在的形式是：

$$h\nu = \frac{1}{2} m v^2 + W$$

由前面叙述表明，光的波动理论解释不了光电效应现象，解释不了为什么微弱的紫光也能在瞬时之间从金属表面“打出”电子，而很强的红光，照射时间再长也不能使电子获得足够的能量，逃逸出物体表面。

而由爱因斯坦公式，可以这样解释光电效应现象：光由光量子组成，每个光量子具有能量 $h\nu$ ，光子进入物体后，与其中的电子相互作用，电子吸收了光量子的能量；电子由物体表面逸出，必须克服物体表面势垒的阻挡，即

必须消耗一定量的功，这种功称为物体材料的逸出功 W ，也称为材料的功函数；如果电子吸收的光子能量 $h\nu$ 小于逸出功，就不可能发生光电效应；如果电子吸收的光子能量大于逸出功，则余下的能量转化为电子的动能

$\frac{1}{2}mv^2$ 而逸出物体表面。

紫光的频率比红光高，紫光的每个光量子能量足够大，因此，尽管用微弱的紫光也能使金属中的电子获得足够的能量，消耗于逸出金属表面所需作的功；很强的红光只是光量子的数目多，而每个光量子的能量并不大。光在传播中，能量也是不连续的，集中了一份足够能量的光子，与电子在瞬间作用后，自然能瞬间发生光电效应。

以上的解释只考虑到自由电子情形。如果物体中的电子是束缚的，则光子通过与电子相互作用而传给束缚电子的能，必须使电子能克服其在原子壳层中的结合能（电离能），方能逸出。

爱因斯坦的光量子说和光电效应公式，很好地解释了前面给出的关于光电效应的一系列实验规律，反过来，这些实验规律也有力地支持了光量子论。这一理论还能十分简单地解释斯托克斯荧光定则和气体光致电离等。

但是，光量子论仍然遭到几乎所有老一辈物理学家和一些年轻物理学家的反对，普朗克当时还在为自己的“能量子”感到困惑不安，自然更不能接受爱因斯坦的“光量子”。1915年，美国实验物理学家密立根（1868—1953）宣布，他经过多年的反复实验，终于严格证实了爱因斯坦公式的正确性。20年代发现的康普敦效应进一步提供了光量子存在的确凿证据。这些实验事实使得包括普朗克在内的物理学家们改变了对“光量子”假说的态度。普朗克欲将“能量子”假说纳入经典物理学的努力的失败，也使他最终相信量子论的正确，并认识到量子假说的革命意义。

量子论早期发展的历史说明了，人类在认识微观世界基本特征的道路上的最初几步是多么艰难。新思想、新理论的产生，要冲破旧的传统观念的束缚，往往需要强有力的实验事实的支持。

从某种意义上说，爱因斯坦的光量子论复活了牛顿关于光的微粒说，但这是在更高水平上恢复了光的粒子性。而且，爱因斯坦并没有否定光的波动性，他认为，光的粒子性和波动性各自反映了光的本质的一个侧面。爱因斯坦首次揭示了光的波粒二重性，使惠更斯和牛顿彼此对立的光学理论在新的概念、新的高度上得以统一。后来，德布罗意（1892— ）和薛定谔（1887—1961）把爱因斯坦的这种观点又加以推广，提出实物粒子和光子一样具有波粒二重性，而波粒二重性则是量子力学和量子场论的支柱。

（4）玻尔关于原子结构的量子化轨道理论

电子、X射线以及放射性的发现，使“原子是不可再分的实体”的观念发生了根本动摇，科学家们开始了对原子结构的积极探索。带负电的电子是原子的组成部分，而原子又是电中性的，人们于是推断，原子中必定还有带

正电的成分。1902年，英国物理学家 W.汤姆逊（1824—1907）即开耳芬勋爵提出了关于原子结构的“葡萄干面包模型”，后来又由发现电子的 J.J.汤姆逊加以发展，这种模型认为，原子是一个均匀的正电球，电子对称地嵌在球内。

1909年，英国物理学家卢瑟福让自己的助手盖戈（1871—1937）和学生马斯敦做粒子散射实验，他们用高速飞行的粒子做炮弹去轰击原子时发现，大部分的粒子可以畅通无阻地穿过，有些偏转了一个小角度，还有极小一部分则偏转了一个很大的角度，有的粒子几乎是反弹回来。粒子是放射性物体发射出来的带两个单位正电荷的粒子，质量是电子的7千多倍。

卢瑟福认为，大角度偏转的粒子必定受到了一种强有力的碰撞，这种现象是无法用的“葡萄干面包”模型来解释的。因此，他着手探索新的原子结构模型。他假定，原子内的正点荷不是象汤姆逊模型那样分散在原子半径范围内，而是集中在原子中心的一个半径极小的球体内，这个小球就是所谓的原子核，电子象行星那样围绕着几乎集中了原子全部质量的原子核旋转。这种模型，可以解释上述粒子的散射实验，它后来虽为量子力学所修正，但却是人类在认识原子结构中迈出的重要一步。

卢瑟福于1911年提出上述的原子结构“太阳系模型”与经典理论有着尖锐矛盾：按照经典电磁理论，电子绕原子核高速旋转具有向心加速度，则必然要向外辐射能量，由于能量不断减少，电子绕核的轨道半径也将越来越小，据计算，电子坠入核内所需时间只要 10^{-12} 秒！这意味着，原子系统是极不稳定的，但是，事实上原子却非常稳定；另一方面，由于电子的旋转半径连续可变，它向外辐射的电磁波就应对应着连续光谱，但事实上，原子光谱是分立的线光谱。例如，氢原子的分立线光谱谱线之波长首先由巴尔末（1825—1898）表示为以下的经验公式：

$$= B \frac{n^2}{n^2 - 4} \quad (B = 3645.7 \text{ 埃}, n = 3, 4, 5 \dots)$$

为了解释原子的稳定性及其光谱的不连续性，卢瑟福的学生、丹麦物理学家玻尔（1885—1962）深入细致地研究了大量精确的光谱数据和描述谱线规律的经验公式，在卢瑟福原子模型的基础上引入普朗克的量子概念，将量子概念用于电子轨道和角动量，结合了当时物理学前沿三个方面的最新成果，于1913年提出了原子结构的量子化轨道理论。

按照玻尔的理论，电子只能在一些特定的圆周轨道上绕核运动，在这些轨道上，电子的角动量是 $h/2\pi$ 的整数倍；电子在某一轨道上运动时，不辐射也不吸收能量，即原子处于稳定状态；电子在最内层轨道，即量子数 $n=1$ 时，能量最小，原子最稳定，这种状态称为基态，量子数 n 大于1的各个状态，原子能量均大于基态，称为受激状态，原子由基态跃迁到受激状态时，原子必须吸收一定的能量，如受到辐射的作用或高能粒子的冲击等；处于受激状态的原子能自发地跃迁到能量较低的受激状态或基态，在跃迁过程中，

将发射一个一定频率的光子，其频率大小取决于两态之间的能量差 $|E_n - E_m|$ ，即

$$\nu = \frac{|E_n - E_m|}{h} \quad (h \text{ 为普朗克常数})$$

玻尔的理论成功地解释了氢原子光谱，并预言了当时尚未观测到的氢原子紫外辐射和红外辐射的存在。这一理论突破了经典理论的许多框框，成为量子理论发展的一个重要里程碑。

1915年，德国物理学家索末菲(1868—1951)进一步发展了玻尔的理论，将玻尔模型的电子圆周轨道推广为椭圆轨道，同时考虑了电子质量随速度改变的相对论效应，并认为电子轨道在空间的方位也是量子化的。经索末菲改进后的玻尔理论可以解释氢原子光谱的精细结构。

但是，玻尔的理论从根本上来看，未脱离经典理论的基础。玻尔模型中的微观粒子仍被视为经典力学的质点，仍使用轨道的概念，并用经典理论计算电子的轨道半径和定态的能量。电子轨道虽作了量子化的限定，但未能从理论上解释，为什么电子必须在一些特定轨道上运动，而且在某一定态轨道上运动却不向外辐射能量？另外，这种模型无法说明多电子原子的光谱，也无法计算单电子原子的谱线强度。事实上，这些问题是不能在这个仍基于经典理论的框架内找到满意的解释的。

1918年，玻尔提出联系量子论与经典理论的对应性原理。量子力学诞生之前的旧量子论，是以量子条件和对应性原理作为解原子物理问题的主要武器，对原子物理中的问题，先在经典物理中求解，然后通过量子条件与对应性原理转换到旧量子论中，解决问题的方式有较大灵活性。但这种方法的系统性和严格性难以使人满意，也便有了寻求改进的种种努力。

3. 量子力学的诞生与发展

爱因斯坦的光量子假说和玻尔的半量子化原子模型提出之后，如何协调微观客体的波动性和粒子性以及辐射的连续性和间断性问题尖锐地摆在人们的面前。当时理论上所面临的窘境被形象地描绘成，每逢星期一、三、五人们承认光由粒子组成，而每逢星期二、四、六则把光看成是波，在星期天干脆祈求上帝。一种全新的科学理论的诞生已是迫在眉睫。

(1) 德布罗意的物质波

法国物理学家德布罗意在读中学时，以出众的文学才华而引人注目。1910年，获巴黎大学历史学士学位，后来志趣转向物理学，于1913年又获理学学士学位。当时正处于早期量子论阶段，量子革命仍迷雾重重，每天有新的思想诞生，又同时有新的难题出现。年青的德布罗意踌躇满志，立志在理论物理领域作些工作。然而，第一次世界大战的爆发，中断了德布罗意探索理论物理王国的计划。他应征入伍，在埃菲尔铁塔上的军用无线电报站服役

至大战结束。战后，他到他哥哥——实验物理学家 M. 德布罗意的实验室工作，同时又开始理论物理的研究。他对早期量子论在描述微观粒子时所遇到的种种困难，进行了长时间的苦苦思索。

1923 年夏，他突然想到爱因斯坦于 1905 年提出并在密立根等人的研究中得到证实的光量子理论，爱因斯坦关于光既有波动性又有粒子性的思想，给了他极大的启示。他觉得，爱因斯坦的光量子纠正了 19 世纪对光的研究只重视其波动性而忽略其粒子性的倾向，现在对实物粒子的研究则可能正好需要纠正另一种倾向，即只重视其粒子性而忽视其波动性的倾向。

他认为，应该把爱因斯坦的波粒二重性思想推广到已知的一切物质粒子，特别是电子。他考察了光的微粒说和波动说的历史以及波动光学和几何光学的关系，注意到了哈密顿（1805—1865）对几何光学和经典力学的相似性曾经作过的分析。他想，几何光学不能解释光的干涉、衍射等波动现象，那么经典力学对描述微观粒子的运动规律也一定无能为力，因此，“看来有必要创立具有波动特性的新力学，它与旧力学的关系如同波动光学与几何光学的关系一样。”他大胆地提出了物质波的假设，认为实物粒子也具有波动性，即每一个自由运动的粒子都具有一种物质波。他又把爱因斯坦用以描述光量子的公式 $E = h\nu$ 加以推广，认为粒子的能量 E 和粒子对应物质波的频率 ν 之间也满足以下的关系：

$$E = h\nu$$

上式中， h 为普朗克常量。他认为物质粒子对应的物质波的波长 λ 可以由粒子的动量 P 来决定，即有以下的物质波公式：

$$\lambda = \frac{h}{P} = \frac{h}{m_0 v} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

这一年的 9 月 10 日、24 日和 10 月 8 日，他先后在法国科学院会议周报上发表了三篇论文。在其中的一篇论文中，德布罗意预言了一种验证其理论正确性的实验：“一束电子穿过非常小的孔，可能产生衍射现象，这也许是实验上验证我们想法的方向。”

1924 年，他向巴黎大学提交了一篇题为《关于量子理论的研究》的博士论文，阐述了自己的观点，对物质波作了严密的论证。

德布罗意关于物质波的理论，开始没有引起物理学界的重视。因为，当时认真阅读法国科学院会议周报的人不多，而了解德布罗意工作的人，对物质波的存在又多持怀疑态度。

1924 年 4 月，在第四届索尔维国际物理学会议上，德布罗意的导师、法国物理学家朗之万（1872—1946）将德布罗意的论文推荐给了爱因斯坦。爱因斯坦于 1905 年提出，光具有粒子性，现在德布罗意相对称地提出，物质粒子具有波动性，偏爱对称性的爱因斯坦立即看出论文的重要性，他赞赏德布罗意的工作“揭开了巨大帷幕的一角”。他很理解人们难以接受德布罗意观点的状况，就象他自己提出光的波粒二重性时，很多人不接受一样。在后

来的一篇文章中，爱因斯坦特别指出了德布罗意“非常值得注意的文章”，并介绍了物质波理论的要点。他认为，德布罗意的工作不仅仅是关于光的波粒二重性的类比，而且包含有玻尔与索末菲量子规则的非常卓越的几何解释。爱因斯坦的推荐和赞同大大扩展了物质波的影响。

1927年，美国科学家戴维森（1881—1958）和革末（1896—1971）共同进行镍单晶的电子衍射实验，第一次证实了运动电子的波动性。同年，英国物理学家 G.P.汤姆逊（1892—1975）将一束电子流射向薄晶片，观察到电子的衍射现象，并得到了电子束的衍射图样。他们根据衍射理论计算了电子所对应的物质波——电子波的波长，结果与德布罗意公式相一致。物质波的假说终于得到了实验的证实。1929年，德布罗意获得诺贝尔奖，1937年，戴维森和 G.P.汤姆逊共同获得诺贝尔奖。有趣的是，父亲 J.J.汤姆逊因为确证电子的粒子性于1906年获得诺贝尔奖，31年以后，儿子 G.P.汤姆逊因为证明了电子的波动性赢得了同样的荣誉。

后来的许多实验都表明，不仅电子具有波动性，质子、原子、分子等都具有波动性，波动性是物质粒子的普遍特性。

从普朗克、爱因斯坦、玻尔到德布罗意，人们终于深刻地认识到微观世界的基本特征——波粒二重性。德布罗意的物质波假说把历来对立的波和粒子的概念统一起来，并综合于一切物理现象之中，在人类科学技术史和思想史上都有着深刻的意义，而且为量子力学的诞生奠定了基础。

描述微观粒子运动规律的正确理论——量子力学是沿着两条不同道路同时发展起来的。其中一条是海森堡（1901—1976）创立的矩阵力学，另一条便是源于德布罗意的物质波并由薛定谔完成的波动力学。

（2）海森堡和矩阵力学

德国物理学家海森堡曾是索末菲的学生。1923年，他在慕尼黑大学获得学位后，到哥廷根大学担任玻恩（1882—1970）的助教。1924年，到丹麦的哥本哈根，在玻尔的研究所里工作了三年。他很赞赏玻尔的工作，但不满足于旧量子论，和他的老师索末菲一样，对作为原理提出的“玻尔对应性原理”的严格性，感到不满。

海森堡认为，描述微观粒子运动规律的理论，应当建立在可观测的量以及它们之间的关系上。关于原子，当时人们可观测的量是其发出的光的特定频率和谱线强度等一类物理量。玻尔模型中的电子运动轨道概念是无法用实验证实的。

正如爱因斯坦在创立狭义相对论时，抛弃了无法用实验观测的绝对时间一样，海森堡大胆地抛弃了电子轨道的概念。

他找到了一种特别的数学表达方法，即一种特殊的“乘法规则”来表示微观领域的一些物理量。他认为，一个粒子的运动能够用两组量 p 和 q 来规定， q 组表示粒子的位置， p 组表示粒子的动量，即粒子速度和质量的乘积。按照海森堡的“乘法规则”， p 和 q 相乘的结果 pq 与 q 和 p 相乘的结果 qp

不同。从一些初步的计算中，海森堡发现了成功的预兆。1925年，他撰写了一篇重要论文《对于运动学和动力学关系的量子论解释》，这是矩阵力学的第一篇论文。它首先等到了奥地利物理学家泡利（1900—1958）的肯定。海森堡后来又把文章寄给玻恩，希望听到他的意见。

玻恩用了数天的时间，对海森堡的文章进行了深入的思索，发现他的“乘法规则”就是半个多世纪以前英国数学家凯莱（1821—1895）创造的新奇算法——矩阵算法。数学家们总是以一种神奇的直觉能力，预先创造出未来科学所需要的数学。玻恩看出文章的重要性，希望找到一个合作者，一起从数学的严密性上研究海森堡提出的矩阵问题，但是，当时懂得矩阵的人很少。

一个很偶然的时机，玻恩遇到了哥廷根大学数学系的助教约尔丹（1902—），年轻人毛遂自荐成了玻恩的助手。他们一起深入探讨了海森堡的思想，从更严格的数学理论出发，研究了解决微观力学的问题，并合作完成了论文《关于量子力学（ ）》。他们把坐标量 q 和动量 p 都用矩阵来表示，从量子化条件出发，利用对应原理，得到 p 和 q 的对易关系：

$$Pq - qp = \frac{h}{i} I$$

式中的 I 是单位矩阵。这个等式后来被称为“准确量子条件”。

不久，玻恩、约尔丹与海森堡三人合作，完成了论文《关于量子力学（ ）》，把海森堡的思想发展为系统的矩阵力学，全面地阐述了矩阵力学的原理和方法，并从矩阵力学的观点，讨论了角动量、谱线强度和选择定则等。后来，玻恩在美国数学家维纳的帮助下，把算符引进量子力学，他们的工作已十分接近数月后由薛定谔提出的波动力学。

与此同时，英国物理学家狄拉克（1902—）用一种新见解对海森堡理论中的矩阵相乘的不可交换性进行了深入的独立的探索。他运用对应原理，在经典力学中寻求类比，找到了一种比矩阵更方便、更普遍的数学方法——“泊松括号”。这种数学方法是经典力学最有力的分析工具之一，是法国数学物理学家泊松（1781—1842）于1809年研究行星运动时创造的。狄拉克把经典的泊松括号推广为量子泊松括号，并顺利地把经典力学方程改造为量子力学方程。1925年11月，狄拉克发表了《量子力学的基本方程》，使矩阵力学具有更严密、更精练的理论体系，并大大推进了量子力学的发展。

在海森堡完成矩阵力学第一篇文章之后两个月，泡利（1900—1958）便成功地运用矩阵力学解决了氢原子的结构问题，得到了巴耳末公式，推导出斯塔克效应。所谓斯塔克效应，是指强电场中原子发射的谱线在电场影响下分裂成几条的现象。泡利还求出了旧量子论所不能解决的，处于交叉电场和磁场中的氢原子光谱问题。泡利的工作是对海森堡矩阵力学的极大支持。

（3）薛定谔和波动力学

奥地利物理学家薛定谔，毕业于维也纳大学。他在分子运动论、统计物理和连续介质物理学等方面进行过工作，擅长于解本征值问题。德布罗意把

波同自由运动的粒子联系起来的思想得到爱因斯坦的赞许，引起了当时在瑞士苏黎世大学工作的薛定谔的注意。但是，他不满足也不满意于当时关于物质波的研究所取得的进展。

一次，他在一个讨论会上介绍德布罗意的物质波理论时，著名荷兰物理学家德拜（1884—1966）提出了一个很自然又很有启示性的问题：电子如果是波，那么，应该有相应的波动方程。薛定谔后来便为寻找物质波所满足的方程作出了很大努力。

起初，他由相对论出发，给出了一个相对论性的波动方程，即后来的“克莱因—高登方程”。但是，当把所得的方程用于分析氢原子时，他却发现理论计算值和实验值不一致。这一挫折曾一度使薛定谔认为他采用的方法是错误的。其实，他的探索途径是完全正确的，他得到的方程只能描述那些没有自旋的粒子，而电子自旋的概念于1925年11月刚刚由瑞士籍奥地利物理学家泡利提出，人们对它的意义还不甚了解，薛定谔也不可能在他的方程中考虑这个问题。

后来，当薛定谔重新研究这个问题时发现，如果不考虑相对论效应，用他的方法来重新处理氢原子问题，所得的结果在非相对论的近似上与实验事实相符。1926年1月至6月，他以《作为本征值问题的量子化》为总标题，连续发表了4篇论文，完成了波动力学的创立工作。

薛定谔自己认为，他的理论是德布罗意见解的一个自然扩展，也是哈密顿发展的牛顿经典力学的自然扩展。在第二篇论文中，薛定谔介绍了利用哈密顿的研究成果，通过类比得到波动方程的过程。哈密顿曾发现，几何光学仅仅是波动光学的一种特殊情况，并指明如何由几何光的特征方程过渡到波动光学的微分方程，还指出了质点力学和几何光学之间的类似性。这启发了薛定谔，他想，光既有粒子性，又有波动性，描述它的既有几何光学，又有波动光学；物质粒子也具有波粒二重性，那么描述它则应该既有质点力学，又有波动力学。质点力学与几何光学类似，那么波动力学则可能与波动光学类似，而且正如几何光学是波动光的特例一样，质点力学也可能是波动力学的特例。按照哈密顿的理论，薛定谔得到了描述物质波的方程，即薛定谔方程：

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2\psi + v\psi = i\hbar\frac{\partial\psi}{\partial t}$$

式中：

$$\nabla^2 \equiv \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

v 为粒子在力场中的势能； m 为粒子的质量； ψ 为波函数。

除了物质的磁性和其他相对论效应外，薛定谔方程原则上能解释所有的原子现象。

这样，从两条发展道路得到了两种形式不同的理论——矩阵力学和波动

力学。深入考察表明，海森堡的见解来自哈密顿的质点动力学，薛定谔的见解来自哈密顿的波动动力学；矩阵力学运用的是代数方法，出发点是粒子，而波动力学运用的则是微分方程，出发点是波。

由于数学形式的不同和物理概念上的差异，矩阵力学和波动力学的创始人都不喜欢对方的理论，甚至相互批评和排斥。但是，这两种力学在反映微观粒子运动的规律方面却是同样有效，总是给出相同的结果，而且，它们都是以原子光谱的实验事实为基础并吸收了玻尔分立能级的观点，都是以微观粒子的波粒二重性为前提。因此，薛定谔考虑到，这两种理论可能存在而且应该存在某种内在的联系。他认真地研究了矩阵力学，并在提出波动力学 3 个月 after，便令人信服地证明了，二者只有形式上的差异，实质上是完全等价的。只要经过一个数学变换，便可以从一个理论过渡到另一个理论。与此同时，泡利也独立完成了对两种理论等价性的证明。人们后来就把实质上是同一理论的矩阵力学和波动力学通称为量子力学。

薛定谔的波动力学使用的是数学物理方程的形式，因此，比较熟悉这种数学方法的物理学家们都倾向于使用或讲授这种理论。

(4) 狄拉克与相对论性的量子力学

从德布罗意提出物质波到薛定谔证明了矩阵力学和波动力学的等价性，量子力学已经基本创立并取得了令人满意的进展，但是，这一理论如果不考虑相对论性，终不能算是一个好的理论。在微观世界，引力场的影响尚可忽略，但要正确处理高速运动的粒子的问题，就必须考虑狭义相对论。由前面给出的薛定谔方程可以看出，方程中对空间变量的微商是二次的，对时间变量的微商则是一次的，显然，方程不具有洛伦兹协变性，也就不是相对论性的。

1926 年 4 月和 9 月，克莱因 (1849—1925) 和高登曾先后找到了所谓的“克莱因—高登方程”。前面提到，薛定谔最初研究物质波时，就得到了这一方程，但由于未考虑当时刚发现的自旋而不能与氢原子光谱的实验结果相吻合，因此未发表其研究的工作。

狄拉克在此数月前，曾经利用他的新见解，在独立研究矩阵力学问题时，轻轻扫去了横在海森堡、玻恩和约尔丹三个人面前的巨大障碍。现在，当人们为克莱因—高登方程解决了相对论性问题而感到安慰时，他又在研究后发现，除了不能描述有自旋的粒子（如电子）外，这个方程还存在一些严重的理论问题，如导致负几率等。

于是，这位对相对论和量子力学都怀有极大兴趣的年青物理学家决心推导出描述微观粒子的真正的相对论性方程。他先对薛定谔方程进行了一些改造，使该方程对时间变量仍保持一次微商，而把对空间变量的微商由二次改为一次，从而让方程具有时空对称性。在寻求解决办法的过程中，狄拉克发现了一个描述电子自旋的泡利矩阵和电子动量的关系式，在这个式子的启发下，又经过一翻苦思冥想，他把满足泡利电子自旋理论的两行两列矩阵，变

为四行四列矩阵，并最终攻克了难关，找到了现在人们所熟知的相对论性的狄拉克相对论波动方程。狄拉克当时高兴地说：“从此，有了一个新的波动方程，它与量子力学的基本原理相一致，而且与狭义相对论的对称性要求相符合，同时还证明，这一波动方程，自动给出了电子半量子数自旋，还给出了电子所具有的磁矩。”

然而，狄拉克方程中包含了负能解，也就是说，在某些情况下，能量竟是个负数，而如果存在没有下限的负能级，一个正常的原子就可以无限地向更低能级跃迁，同时产生辐射，这样，原子结构的稳定性又成了问题。解决这种困难的办法，要么修改方程，排除负能级，要么对负能级作出物理解释。狄拉克考虑到，如果修改方程，将破坏相对论性的特征和理论的全部完美性，他坚持采用后一种方法。经过一年多的艰苦探究，他提出了一种崭新的真空图象的解决方案。后来，还预言了人们从未认识过的反物质——正电子的存在。

1932年8月，美国物理学家安德逊（1905—）和他的助手在研究宇宙线的云室照片中发现了这种新粒子。这是人类利用量子力学理论探索未知基本粒子的过程中迈出的新的一步。

狄拉克的工作实现了量子论和相对论的统一，他的方程标志着量子力学的最终建成。1930年，狄拉克出版了《量子力学原理》，对量子力学进行了更为普遍的综合，是量子力学的集大成著作。

（5）几率波、测不准关系和互补原理

量子力学从一个全新的角度为人们提供了对自然界的认识和思维方式。它虽然具备了严密的数学形式，并获得了充分的实验证实，但是，其中的一系列基本概念与数学形式的物理意义却很令人费解。

在经典物理学所描述的宏观世界里，粒子和波是两个完全不同的概念，有着明确的物理意义。作为描述微观世界运动规律的量子力学，其基本特征是微观客体的波粒二象性和微观规律的统计性质。那么，量子力学中的波究竟代表什么？如何获得波和粒子统一的合理解释？物理学家们各持不同看法。包括薛定谔和德布罗意在内的很多人，早期都受到经典物理学的深刻影响，薛定谔认为，波是实在的，粒子不过是波的密集处，即波包所在。德布罗意最初持导航波观点，认为波与粒子的关系是粒子骑在波上随波而跑，后来他认为，波本身就是粒子。他们的看法不久都被否定了，原因在于，这些解释都没有摆脱传统的波和粒子概念。

1926年，受到玻尔和爱因斯坦思想的启发，玻恩提出了关于波函数的统计解释。他认为，波函数在空间某一点的强度（振幅绝对值的平方），与在该点找到粒子的几率成正比，量子力学意义下的物质波既不是机械波，也不是电磁波，而是薛定谔理论的位形空间中的几率波。玻恩的这种解释很好地统一了波粒二重性，并得到了理论和实验的支持以及物理学家们的公认。

1927年，海森堡反复思索了这样一个问题，量子力学理论是如何决定了

我们所能观测到的东西的？思考的结果阐述在《关于量子论的运动学和力学的直觉内容》一文中。在文章中，海森堡提出了著名的测不准关系，指出，在宏观世界中可以用实验手段同时准确地测定物体的位置和动量，而在微观世界中，人们却不可能用实验手段同时准确地测定微观粒子的位置和动量，如果用 Δx 表示测得粒子位置的不准确范围即误差， Δp 表示测得粒子动量的不准确范围即误差，那么，它们之间有如下的关系：

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$$

上式中 h 为普朗克常量。测不准关系表明，对粒子位置的准确测定则妨碍对它的动量的精确了解。能量和时间之间也存在这种关系：

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{4\pi}$$

测不准关系的重要意义之一是，划分了经典力学和量子力学的界限，即给出了经典力学适用的范围。当普朗克常量 h 可以忽略不计时，意味着可同时测准两个有关的量，波动力学则变为经典力学；当普朗克常量 h 不可忽略时，则必须考虑波粒二重性，用量子力学方法处理问题。测不准关系对量子力学的发展又作出了新的贡献。

测不准关系的提出，从根本上动摇了传统的因果论和决定论的概念。在经典物理学的框架中，若已知一个体系在某一时刻的状态和作用于该体系的所有外力，那么，根据经典物理提供的规律，便能推出该体系在以后任一时刻的状态。然而，微观世界中的情形却大不一样了。正如海森堡在《物理学及哲学》中所说的：“观测结果一般不能准确地预料到，能够预料的只是得到某种观察结果的几率，而关于这种几率的陈述能够以重复多次的实验来加以验证。几率函数不描述一个确定事件（即不象牛顿力学中那种正常的处理方法），而是种种可能事件的整个系统，至少在观察的过程是如此。”量子力学把微观世界建立在这种朦胧的不确定的关系上，使人们包括量子理论的创始者都觉得难以接受。

玻尔试图对“测不准关系”以及“波粒二重性”作出更普遍、更透彻的分析，经过反复的思索、探讨后，于 1927 年 9 月在意大利科摩召开的国际物理学会议上，第一次公开提出了“互补性原理”。

玻尔认为，在描写微观领域的现象时，使用一些经典概念时，将会排斥另一些经典概念，而被排斥的这些概念在另一种情况下却又是描述现象所不可缺少的，因此，经典概念之间互斥又互补。微观粒子现象的任何观察，都将涉及一种微观客体同宏观仪器之间的“不可控制的相互作用”，因此，不可能既赋予现象又赋予观察仪器以一种通常物理意义下的独立实在性，这将不可避免地导致互补关系和因果关系的几率形式，决定了量子力学规律的统计性。

当我们要观测作为粒子的电子时，我们必须使用不能检测到波的实验设备；而当我们将为了观测电子的波的一面时，我们使用的仪器就不应该能检测到作为粒子的电子。这两种实验不能同时并存意味着，波和粒子的概念在描

述微观现象方面是“互斥”的，然而，为了完整地描述一个微观粒子，又不得不使用波和粒子这两种相互排斥的经典概念，缺一不可，因此，它们又是互补的。玻尔把波和粒子这两种图象视为同一个实在的两个互补的描述，两个描述中的任何一个都只能是部分正确的。他认为，量子物理应当在哲学基础上抛弃因果论和决定论，而代之以互补原理。

(6) 哥本哈根学派同爱因斯坦的论争

玻尔的互补原理得到了海森堡、玻恩、狄拉克、泡利等人的支持，他们相互交流、协作，对量子力学的一系列问题持有共同的物理见解和哲学见解，形成了当时世界上力量雄厚的物理学派，并被称为量子力学的正统学派，也被与他们持相反观点的科学家称为哥本哈根学派，是因玻尔创建并领导的丹麦哥本哈根理论物理研究所而得名。

围绕着量子力学理论的物理诠释，以玻尔为首的哥本哈根学派和爱因斯坦为的对立面展开了一场激烈的、旷日持久的论争。

1927年10月，在布鲁塞尔第五届索尔维物理会议上，哥本哈根学派对量子力学的解释为多数物理学家所接受，但也受到批评，特别是来自爱因斯坦的强烈批评。爱因斯坦始终反对把量子力学的几率解释作为最终解释的倾向，认为量子力学不可能推翻严格的因果律，“上帝不是在掷骰子！”。爱因斯坦认为，量子力学并不描述单个体系的行为，而描述许多相同的单个粒子所组成的系统的集体行为，因此，量子力学理论是不完备的。哥本哈根学派则认为，量子力学能描写单个体系的状态，是完备的理论。

在会上，爱因斯坦设计了多个理想实验，例如“单缝衍射理想实验”、“多缝衍射理想实验”等，试图证明可以同时准确地测定粒子的位置和动量，以驳倒测不准关系。但是，这次的论争是以玻尔成功地捍卫了测不准关系和互补原理而结束，但爱因斯坦并没有服输。

1930年10月，在布鲁塞尔召开的第六届索尔维会议上，爱因斯坦精心设计了一个被称为“光子箱”的著名理想实验，向测不准关系发出了严峻挑战。如果不能驳倒这个理想实验，测不准关系将被推翻。爱因斯坦在黑板上画了一个“光子箱”的草图：一个由弹簧悬挂起的盒子内有一个电池驱动的光源，盒右壁上有一个由快门控制的孔，快门与盒内时钟保持着一种联系，固定在盒上的指针在盒外竖直标尺上的示数可反映出盒子质量的变化。由快门控制的小孔可以在任意时刻打开放出光子，光子跑出的时间可以由盒内时钟精确地测出来。放出光子的时间间隔为 t ，光子跑出前后箱子的质量差 m 也可从指针示数上读出，再根据相对论的质能关系式 $E = mc^2$ ，可以精确求得任意时刻辐射出去的能量。由此，爱因斯坦得出，光子的能量 E 可由箱子的质量的变化精确地测出，释放光子的时间间隔 t 可由时钟精确给出，因此，他认为能量和时间两个量能同时测准，不存在什么相互作用，测不准关系 $E \cdot t = h$ 不成立了，自然，互补原理也立不住了。

“光子箱理想实验”刚一提出，确实也把玻尔等人给难住了。玻尔和他

的支持者们紧张地思索分析了一个通宵，最后，玻尔终于想到用爱因斯坦广义相对论的引力场时钟延缓效应来驳倒爱因斯坦。他指出，当粒子跑出时，箱子质量减少而发生移动，并影响了时钟的读数，因此，若用此装置来精确测量光子的能量，就不能精确地控制光不跑出的时间，于是，测不准关系又胜利了。爱因斯坦终于不得不承认了测不准关系。但是，爱因斯坦仍然希望用决定论去解释量子力学，并把他的批评重点放在了量子力学的不完备性上。

1932年，著名数学家、后来成为电子计算机缔造者之一的冯·诺依曼将哥本哈根学派的解释用严格的数学形式予以完整化和系统化，形成了量子力学的完备性定理和测量定理。但是，关于量子力学诠释问题的争论并未因此而结束。

1935年5月，爱因斯坦与波多尔斯基和罗森共同发表了一篇题为《能认为量子力学对物理实在的描述是完备的吗？》的文章，提出了取自他们三人姓氏首字母的EPR悖论。这是论争以来最深刻、最有代表性的一个问题。文章认为，波函数所提供的关于实在的描述是不完备的，不认为量子力学可以推翻严格的因果律，也不承认物理学理论在对完全确定的实验结果的明确描述方面存在局限性。围绕EPR悖论的论战，从基本观点来说，并没有解决谁说服谁的问题。玻尔和爱因斯坦的论战因为第二次世界大战曾一度中断，1949年，又重开战局，一直延续到爱因斯坦逝世，而且，论争并未就此终止。

1952年，在EPR悖论和爱因斯坦思想启发下，美国物理学家玻姆提出了隐变量理论。这一最著名的非正统量子力学理论，引起了人们广泛的注意。玻姆认为，世界是客观的、实在的，粒子和波都具有客观实在性，因此，几率波不足以穷尽物质的波动性；薛定谔方程的波函数，不只是用来计算几率的数学符号，它和电磁场、引力场一样，也是一个实在的物理场；物质波就是这种新型的场的振动；场与物体之间有相互作用，场对物体施加一个“量子力”，把物体拖向最大的地方；物体的无规则运动，与次量子力学级中的某种隐变量有关。他认定，如果能找到决定微观粒子的隐变量，就能对单个粒子做出决定性的描述，定域隐变量理论能够说明量子力学的本质特征。为了证明隐变量的存在，玻姆在EPR基础上，提出了更简便的理想实验，推动人们向实验验证的方向努力。对玻姆隐变量理论的详细叙述以及之后的实验验证已超出本书的范围，而且，时至今日，玻尔和爱因斯坦的论争，孰是孰非，尚无定论。

在科学史上，曾经发生过多次重大的学术论战。爱因斯坦和以玻尔为首的哥本哈根学派的论战是最著名也是最深入、最富有成效的。他们的分歧不在于量子力学的物理结果，而在于对量子力学的物理解释。对量子力学的重要价值，爱因斯坦是充分肯定的，他只是深信量子力学的统计性最终可以从决定论的和定域实在论的更基本规律中得到理解。

这场论争引导着量子力学的发展，引导人们来共同探索量子力学的基本

意义，并由对物理学问题的理解发展到对哲学问题的看法，其意义已远远超出了量子力学本身，直接涉及到认识论的一些基本问题。而且，论争中涉及的问题，至今仍使人兴味盎然，仍促使物理学家、哲学家去探索，去思索。

爱因斯坦和玻尔等的论争还为后人树立了科学争鸣的良好范例。他们始终是针对观点，激烈地互陈己见，从未攻击对方，相反，在辩论台下，他们始终保持友好、相互尊重的关系。

量子力学的诞生，推动了 20 世纪物理学许多分支学科的产生和发展，本文其他章节中还将述及。

量子理论的创立还导致其他学科领域出现了一些新的分支学科，如量子化学、量子生物学等。

化学是和物理学关系最为密切的学科之一。1913 年，玻尔提出了原子结构的量子化轨道理论后，德国和美国的化学家于 1916 年便将此新的理论用于共价键和离子键的研究；1926 年，薛定谔刚刚完成波动力学的创立，次年，这两国的化学家又率先利用薛定谔的波动力学方程来研究氢分子，建立起了崭新的价键理论。从此，量子化学逐渐形成，并给 20 世纪的化学带来了巨大的变革。

30 年代末出现了“量子生物学”的名词，提出：变异是一种量子过程。玻尔很关心量子力学与生物学的结合，先后作了《论光和生命》和《再论光与生命》两次讲演；薛定谔于 1944 年写了《生命是什么？》一文，用热力学和量子力学理论来解释生命的本质。50 年代后，量子生物学有了迅速的发展。

总之，量子力学和相对论一起，成为现代物理学和其他现代科学的两大支柱。

三、第一台电子计算机的诞生

1945年，世界上第一台电子计算机 ENIAC，在美国宾夕法尼亚大学莫尔学院的实验室诞生。这是 20 世纪人类的一项最伟大的发明，是人类迈进一个全新时代的标志。电子计算机的诞生对科学和技术的发展所产生的作用，给人类社会，给人类的生活、生产和工作的各个方面带来的巨大、广泛和长远的影响，是当时人们所未曾预见到的，也是任何一项发明所不可比拟的。

ENIAC 是一批杰出的科学家、工程技术人员于 40 年代共同缔造的，然而她也是社会和科学进步的必然，是人类长期以来共同孕育的一朵智慧之花。计算工具的不断革新改进，计算方法的不断进步和电子技术等科学技术领域的发展为她的诞生打下了基础，不断增长的信息处理量和第二次世界大战期间军事技术的需要则促成了她的降生。

1. 计算工具的历史发展

人类很早就开始了对数的认识，并产生了对数进行运算的数学。随着社会的进步和发展，计算变得越来越重要，人类用于计算的工具也因此不断更新发展。

(1) 人工计算工具的发展

人的双手可能是第一个天然的计算工具。中国古代有“掐指一算”，还有现代汉语中保留的成语“屈指可数”，大概都是中国人的祖先们用手指计算的写照。各国的小朋友学习计数，也几乎都是从扳着手指头开始的。也许因为人类有十个手指头，所以世界上的各民族几乎都使用十进制。石块、树枝、绳结等都曾经是人类祖先的天然计算工具。

随着社会和经济的发展，天然的计算工具已不能满足计算的需要了。公元前 3 世纪至前 2 世纪，中国人的祖先已普遍在使用一种人工计算工具——算筹。算筹是利用长六寸（合 13.8 厘米），直径一分（合 0.23 厘米）的小圆棍按不同的方式进行排列，以表示不同大小的数。根据圆形小棍的材料的不同又分木筹、竹筹、骨筹等。在数学发展史上，算筹发挥过巨大的作用，数学家祖冲之（429—500）利用它计算出在当时是最精确的圆周率的值；我国唐朝天文学家李淳风（602—670）利用它准确地预报了日食。后来传到朝鲜、日本变成“算术”。

中国祖先在计算工具方面的另一杰出发明——穿珠算盘，其起源的准确年代尚无定论，但公元 1371 年《魁本对相四言杂字》中已有确凿记载。珠算盘携带方便，计算速度和操作的灵活性都是算筹所无法与之相比的。这种富有生命力的计算工具，至今仍沿用不衰。

古希腊曾发明了也称作“算盘”的算板，是欧洲中世纪重要的计算工具。17 世纪初，有两种计算工具流行于欧洲，一种是伽利略（1564—1642）发明

的比例规；一种是苏格兰数学家、对数创始人纳皮尔（1550—1617）发明的纳皮尔筹。

伽利略比例规是根据三角形对应边成比例的原理和比例规上标好的刻度来进行乘除、开方等运算的。1620年，英国人甘特发明了一种可以把乘除运算化为加减运算的计算尺。1632年，英国人奥特瑞发明了有滑尺的计算尺，同时造出了圆形计算尺。17世纪中叶，出现了带有游标与滑尺的现代型计算尺。18世纪以后，人们制造了适应各种需要的普通计算尺和专用计算尺。各种计算尺均利用了简单的物理量——长度的变化来进行计算，可以看成是早期的模拟计算工具。

（2）帕斯卡和第一台机械计算机

16世纪中叶，哥白尼（1473—1543）创立了日心说，天文学的发展进入了一个新的时期。丹麦天文学家第谷·布拉赫（1546—1601）通过长期的观测，积累了极为丰富的天体运行资料。去世前，他把这些宝贵资料留给了他的助手开普勒（1571—1630）。人们常用“天文数字”来形容数字的庞大，因此可以想见，要对第谷·布拉赫的一大箱资料进行计算、分析，并与自己关于天体运行的设想方案进行比较，并不断地修正自己的方案，再比较，并最终找出行星运动的三大定律，开普勒必须进行多么繁重的计算和处理工作。可以说，没有数学，没有数学计算，就没有天文学。天文学的发展，天文学家们所面对的大量、繁重的计算，在呼唤着新型计算工具的诞生。

当时钟表业的发展，启发人们考虑利用与钟表类似的齿轮传动装置，来设计一种新的计算工具。1623年，正当开普勒在为大量天文数字的计算耗费精力时，收到发明家什卡尔特的来信。信中，什卡尔特详细介绍了他发明的一种由加法器、乘法器和记录中间结果的装置三部分构成的计算机，这种机器不仅能进行数据计算，还能存储数据，当时已经设计完毕，正在制造模型。从技术上看，这台机器是计算工具的一次大突破，但是十分可惜，什卡尔特的样机模型还没有制成，就被一场大火烧毁。他的发明思想也鲜为人知。

第一个用于计算的机械计算机是著名的帕斯卡加法机，是法国数学家、物理学家帕斯卡（1623—1662）制造的。帕斯卡出生于法国的克莱蒙城，父亲是搞税务工作的。小帕斯卡看到父亲每天算帐、查帐非常辛劳，从小就萌发了“要是能有一架机器代替父亲算帐就好了”的愿望。

帕斯卡从小聪慧过人。12岁时，他独自发现了三角形三个内角和定理，16岁时发表了圆锥曲线的著作，提出了著名的帕斯卡定律。1642年，19岁的他发明了第一台能进行加减操作的计算机。帕斯卡的机器上有一系列刻着0到9数字的轮子，低位的轮子每转十圈，临近的高位轮子就转一圈，实现了进位。进行加法时，在机器上先存储被加数，再转动轮子给出加数，就能得到相加的结果。计算器上有一排窗口，可以显示计算的结果。尽管帕斯卡加法机只能做简单的计算，但他的机器还是轰动了法国，很多人特意前往展出这架机器的卢森堡宫，一睹为快。

帕斯卡在物理学、数学、文学和哲学等领域都有杰出贡献。在研究气体的压强中，他提出了封闭液体传递压强的原理；他总结出了二项式的展开式系数的规则；而最重要的是，他创造了世界上第一架真正的计算机——帕斯卡加法机，而且他的加法机实际上包含了后来广泛使用的手摇计算机的基本原理。法国天文学家、数学家华纳赞赏帕斯卡的设计思想说：“帕斯卡的思想，特别是在当时，可以算作是非凡的勇敢，因为他提出了这样的目的，即利用纯粹机械的装置来代替我们的思考和记忆。”

（3）莱布尼兹计算器和二进制的诞生

德国著名的科学家、微积分的创始人莱布尼兹（1646—1716）对帕斯卡加法机产生了极大的兴趣。他特地来到法国，参观了这台机器，并立刻意识到它的重要意义，同时也看出它的不足。莱布尼兹决心要设计出功能更强的计算工具。为了新的计算机，他特地从德国迁往巴黎，并聘请著名的机械专家协助研制。1672年，莱布尼兹计算器的样机试制成功了。这台机器不仅可以进行加减运算，还可以进行乘除运算。机器长1米，宽30厘米，高25厘米，表面有12个读数窗，用以显示计算结果。梯形轴是莱布尼兹计算器的主要部件，保证了机器能执行比较简便的乘除运算。莱布尼兹的这一项设计发明在机械式计算机的发展道路上长期起着决定性的作用。另外，莱布尼兹把机器主要分为不动的计数器和可动的定位机构两部分，也进一步提高了计算工具的性能。1673年，莱布尼兹计算器在巴黎科学院进行了表演。

莱布尼兹不仅造出了计算机，还对计算数学作出了一项重要的贡献，即首次提出了二进位运算制及其运算法则。莱布尼兹在构思新计算机时，收到了在中国康熙皇帝身边工作过的法国传教士鲍维特的来信，信中给他寄来一张中国古代的八卦图。奇妙的八卦图引起了极大的兴趣。八卦，是中国古人对自然界组成的一种认识，最早记载于《周易》，相传为伏羲氏所造。八卦的八种图形象征着天、地、雷、山、火、水、泽、风八种自然现象，分别用乾、坤、震、艮、离、坎、兑、巽表示。每个卦由三个称为爻的特殊符号构成，爻分为阳爻（—）阴爻（--）两种，例如，三个阳爻组成乾；三个阴爻组成坤；两个阴爻一个阳爻组成坎等。八卦中所包含的朴素思想认为，阴阳是组成万物的本原，“太极生两仪，二仪生四象，四象生八卦。”意指：大自然从混沌一片中分化出阴阳，又从阴阳分化出太阳、太阴、少阳、少阴四象，再从四象中分化出八卦。莱布尼兹从八卦中受到了启发，他认为，八卦的一阴一阳可以组成万物，如果，八卦中的阳爻（—）相当于数字1，阴爻（--）相当于数字0，那么，一个1，一个0，也应该可以组成所有的数。他用二进制的方法对八卦的构成进行了表述，并系统地给出了二进制算术运算法则，指出了它们用于某些理论研究时将显示出的优点。莱布尼兹发明的二进制及其运算规则从逻辑运算方面为未来的计算机采用具有二值逻辑特点的电子管奠定了基础。就计算机的发展而言，二进制发明的意义超出了人类所发明的任何一种进位制。

莱布尼兹研制出新的计算机并发明了新的计算方法后，成为巴黎科学院院士和英国皇家学会会员。他对给予他启发的中国古代文明怀着深深的敬意，他说：“我的计算方法是和中国的八卦相吻合的。”他把自己发明的计算机复制品送给了康熙皇帝。很可惜，即便是康熙这样思想比较开明的皇帝，也没能认识到这种先进的发明和创造所蕴涵的价值。莱布尼兹计算机和明末清初传入我国的一些西方新科技成果——伽利略的比例规、甘特的计算尺、帕斯卡的加法机一起，只成为帝王后妃玩赏的贡品而已，没有人使用，更谈不上进行研究推广了。

在相当长的一段历史时期中，故步自封，不重视应用和创造发明，不善于学习外部世界的先进科学技术成果，造成了中国近代以来科技方面的长期落后局面。

（4）巴贝吉的差分机和分析机

帕斯卡、莱布尼兹发明的机械计算机经过后人的不断改进、完善，到19世纪初，终于由发明家的研究室进入了社会。1818年，托马斯设计的实用计算机于1821年建厂投产，首批生产15台。这是计算机发展史上的一件大事，不仅是因为计算机投入实际应用，还因为从此开创了计算机制造业。1874年开始，瑞典人奥涅尔花费了15年的时间，钻研、摸索，设计成一种外观等更接近现代计算机的新型计算机，19世纪末到20世纪20年代，奥涅尔机一直是主要的计算机。

从帕斯卡机到奥涅尔机，虽然在机器结构、性能和实用性方面有了不少改进，但是，这些早期的机械计算机基本上都只能进行简单的四则运算，还没有能称得上“程序控制”的机构，机器的性能离它们的发明者们“使人类获得智力解放”的理想和希冀还相差甚远。机械计算机的真正进展是英国数学家巴贝吉（1792—1871）完成的。

1792年12月26日，巴贝吉出生于英格兰德温郡的托特纳斯。他的父亲是银行家，家境富足。他自幼喜爱数学，受到出色的教育。1810年，进入剑桥大学，不久便进入了近代数学的研究行列。这位数学奇才后来毕生醉心于自动计算机的研究，并提前一百多年为现代计算机描绘出了完整的蓝图。

1812年，巴贝吉和同样年轻的赫歇尔一起为天文学会进行的某些计算作核对工作时，发现了计算中的许多错误。在繁琐、冗长的核算过程中，巴贝吉不禁发出了慨叹：要是这些计算能由一台机器来完成就好了。赫歇尔应答说：这很可能。这次偶然的交谈之后，巴贝吉就一直为这种“妄想”所困扰，为实现“把人从难忍的单调和疲劳中解脱出来”的梦想而艰苦奋斗。

1822年，巴贝吉给皇家学会会长写了一封信，说明研制一架计算航海和天文用表的机器的好处，并且表示，他愿意为政府造一架这样的机器。他的建议得到了政府的支持，并答应于次年为他的事业提供经费。

当时已担任剑桥大学鲁卡斯讲座教授的巴贝吉在实现他的梦想的道路上，先迈出了一大步是，研究并制成了一台用于计算多项式的“差分机”的

样机。他从当时法国度量衡改革过程中，组织完成大量制表工作的实践中得到启示，利用多项式的数值差分规律，得出多项式数值表的简单计算格式，再由他设计的“差分机”按照这种格式和所提供的初始数据完成计算。这台新型的计算机包括三个寄存器，这些寄存器同时又是运算器，运算的精度达到 6 位小数。这台机器是他一生中制造成功的唯一的计算机。

差分机样机刚刚试制成功，巴贝吉又着手设计可用于编制天文和航海表的大型差分机。新机器将包括七个寄存器，还增加了自动印制计算和处理结果的部件，计算精度将达到小数点后 20 位。在研究和制造过程中，巴贝吉不断修改他的设计，充分显示了这位数学家的想象力和创造才能。但是，不断修改原设计，大大增加了经费的困难和设计先进性与工艺可行性之间的矛盾。1832 年，研制计划不得不因此中途停顿。20 年以后，瑞典人申茨在瑞典科学院资助下，对巴贝吉设计进行了改进，并用两年的时间，制造出了一台大型差分机。因此，巴贝吉没有制成大型差分机的主要原因看来不在于技术和制作方面。

大型差分机研制工作被迫停顿以后，巴贝吉却又向着一个更高的目标前进了，他卓越的想象和极为活跃的创造灵感激励他投入了一种新型的计算机——“分析机”的设计。这台机器的设计受到了杰夸德提花机的启示。1799 年，法国的杰夸德（1752—1834）发明了一种新式提花机。这种织机能根据穿孔卡片纸上孔眼的排列，自动控制机器织出某种图案。当巴贝吉在巴黎展览会上看到这架提花机时，马上想到可以模仿杰夸德发明的这种卡片系统，用类似的方法对计算机下达命令，输入信息，实现程序控制，完成有关的计算。巴贝吉构思的分析机，包括运算、存储、控制、输入和输出等几个部分，其逻辑结构与现代电子计算机十分相似。其中，存储部分，巴贝吉称其为“堆栈”，即存储库的意思，内含 100 个寄存器。这部分的构造虽与差分机的相应部分类似，但已不再兼有运算器的功能。运算部分使用了先进的进位机构等，加快了运算速度。巴贝吉认为，他的分析机每分钟可完成 60 次加减法运算，完成两个 50 位数的乘法运算约需一分钟。机器的输入和控制部分则融入了杰夸德提花机的绝妙发明。

设计分析机的过程中，巴贝吉还提出了许多在现代电子计算机的设计者们看来也是非常重要的思想。他还试探了使用十进制以外的其他进位制的可能性，但在具有二值逻辑特点的电子器件还没有诞生的时代，他还没能发现二进制的优越之处。

为了研制新的计算机，他于 1839 年辞去剑桥大学鲁卡斯讲座教授的职位。这是第一流的学者才能得到的具有很高荣誉的职位，著名的物理学家牛顿（1642—1727）曾是这个讲座的第二位任职教授。然而，巴贝吉毫不迟疑地舍弃了这份荣誉和地位，以便集中时间和精力从事他所钟爱的计算机研制事业。在制造差分机时，政府花费了约 17,000 英镑，他个人也耗费了 13,000 英镑。1842 年，政府停止了财政支持，他为了继续分析机的研究，耗尽

了几乎全部的家财。

在巴贝吉探索、研究分析机的道路上，理解他的设计思想，看到他工作的价值并相信、支持他的人，寥寥无几，其中，有意大利军事工程师蒙纳布利、著名诗人拜伦的独生女拉甫雷斯伯爵夫人艾达·奥古斯塔。1840年，巴贝吉到意大利的都灵，在一系列讲座上介绍了他的分析机设计思想。蒙纳布利是为数不多的听众中的一员。他被演讲者深邃的创造思想所深深吸引。他详细记录了演讲的内容，整理成文章，并发表于1842年10月，介绍巴贝吉的计算机设计思想。这篇文章是巴贝吉发明过程的一个珍贵记录。

艾达童年时参观过差分机样机，并对它产生了极大的兴趣。蒙纳布利文章发表后，她决定将它译成英文。翻译过程对译文进行注释时，还增加了她个人的意见，并为分析机编制了具体函数的计算程序。她给分析机以高度的评价，认为“这一台机器不论在可能完成的计算范围、简便程序以及可靠性和精确度方面，或是在计算时完全不用人参与方面，都超过了以前的机器。”1843年8月，艾达发表了以《关于巴贝吉先生发明的分析机简讯》为题的译文和注释。艾达的作品可以说是程序设计的最早期著作。1978年，美国国防部选中的一种通用语言被命名为“Ada语言”，以纪念这位在计算机发展中作出了自己独特贡献的女性。

巴贝吉的儿子H.P.巴贝吉也是他父亲的一个忠诚支持者。他帮助父亲制造了某些机器部件。在父亲死后，又为分析机奋斗了多年。他坚信：“总有一天，类似的机器将会制成，它不仅在纯数学领域，还必将在其他知识领域中成为强有力的工具。”

1871年，巴贝吉在伦敦去世。他研制的大型差分机和分析机都没有取得成功，而分析机未取得成功的主要原因是，他的先进的设计思想超越了机械计算机时代所能提供的技术实现能力。巴贝吉留下的几十个不同的设计方案，一部分造好的部件和画着几万个零件的数百张图纸以及大量的工作笔记，被收藏于博物馆中，很好地保存了下来。70年后，他的出色工作激发了艾肯等年轻发明家的创作灵感，他儿子的预言和他自己的梦想终于成为现实。

（5）物理学家的探索

作为数学家的巴贝吉，所研究的计算机都是以数字的形式进行基本计算的。分析机的尝试失败以后，由于技术上的困难没有突破，大型的数字计算机的研制大约停滞了70年。在这一段时间里，一批物理学家从另一角度对计算工具的发展进行了探索。

物理学家往往是提出一个物理理论或一个物理模型以后，再寻找相应的数学关系，利用优美的数学语言对物理规律进行简捷的描述。有的物理学家则从逆向思考，设想为一个数学方程设计一种对应的物理过程，以便利用物理的方法完成方程所要进行的数学运算。这种模拟某一物理过程进行数学计算的机器被称为模拟计算机。

1855年，麦克斯韦(1831—1879)发明的积分仪就是一种出色的模拟机，而且对后来的模拟机发展有较大的影响。麦克斯韦是英国杰出的物理学家，同时也是个数学家。他运用数学分析的方法，类比流体力学方程，建立了一组偏微分方程，概括了从库仑(1736—1806)、高斯(1777—1855)、奥斯特(1777—1851)、安培(1775—1836)到法拉第(1791—1867)的工作，把电磁运动的一系列基本规律统一在由四个微分方程所描绘的经典电磁理论中，当然，麦克斯韦的电磁理论也可以用一套积分方程来描述。积分是一种复杂的数学运算，麦克斯韦一直在寻求一种可以完成积分计算的机器，即给机器输入需要进行积分运算的函数，输出的是积分的结果。他先将积分变为线性方程求面积的问题，然后巧妙地把面积的计算转变为长度的测量，并通过两个互相垂直的圆盘的旋转与滑动来实现这一模拟过程。麦克斯韦设计的积分仪后被改进为著名的圆盘—圆球—圆轴式积分仪。

傅立叶分析是法国数学家傅立叶(1768—1830)为研究自然界普遍存在的周期现象所提供的一种极为有力的数学工具。1876年，英国物理学家W.汤姆逊之为“潮汐调和分析仪”，用以计算潮汐涨落的基本要素。这台仪器能在一至两个小时内完成熟练的计算人员20个小时才能完成的工作。美国著名的实验物理学家麦克尔逊(1852—1931)由于在光学研究中需要频繁使用傅立叶分析，与工程师斯特雷顿合作，于1898年研制了一台处理80项傅立叶系数的分析仪。科学实践的需要推动科学家们不断探索研究新的计算工具。

美国工程师布什(1890—)在电机工程中经常遇到解复杂的二阶常微分方程的问题。为此，他非常希望能研制出可以解微分方程的机器。1927年起，他和哈森(H. Hazen)合作进行研制并于1930年制成第一台微分分析仪。这种用于解算微分方程的装置是另一类重要的模拟机。布什分析仪利用解常微分方程的逐次迭代法，使用了多个积分仪，其中一个积分仪的输出为另一个积分仪的输入，并利用某些齿轮的旋转角度表示方程的结果，精确程度受到角度测量精度的限制。1935年，布什又领导麻省理工学院的研究小组设计了第二台微分分析机。这台分析机采用了电气元件，精密程度大大提高。

模拟机的成功曾一度使人产生了可以用模拟机解决一般科学计算问题的期望，但研制更高级的模拟机却遇到了极大的困难。虽然从理论上说，任何一种数学计算应该都能寻找到相应的模拟机制，但技术实现过程往往困难重重。早在1876年，开耳芬勋爵即W.汤姆逊，就提出了微分分析仪的基本原理，但因为解决不了一个积分仪的输出转换成另一个积分仪输入的技术问题，而未能研制成这种计算机。直到1927年，工程师纽曼发明了一种力矩放大器，才被布什用来攻克了制造微分分析仪的难关，这种计算机的诞生整整推迟了半个世纪。后来，当人们试图推广微分分析仪，以解算偏微分方程时，更加明显地感到了模拟机的不足。计算机后来的发展历史证明，和模拟计算机相比，数字计算机具有更强大的生命力。

（6）继电器和布尔代数

前面介绍的各种计算机，无论是数字式的还是模拟式的，无一不是依靠齿轮和连杆。由于机械运动速度的限制，计算机的运转速度都不可能很快。要改革计算机，必须应用新的元件，逐步抛开齿轮和连杆。电的利用为新型计算机准备了新颖的元件——继电器，计算机由机械时代进入了机电时代。

1820年，丹麦物理学家奥斯特在上课进行演示时偶然发现，通电导线周围的小磁针会出人意料地发生了偏转。奥斯特第一次揭示出电流周围存在着磁场的物理现象，奥斯特的“电生磁”的发现揭开了电磁学研究和应用的新篇章。

1823年，英国电学家斯特金第一次用裸铜线在一根U型铁棒上绕了18圈，制成了世界上第一个电磁铁。当裸铜线圈通电时，由线圈产生的磁场密集在铁棒中，铁棒变成了强有力的磁铁，吸起了比它自己重20倍的铁块；一旦切断电流，铁棒失去了磁铁的作用，又变成了一根普通的铁棒。

1829年，美国物理学家亨利（1797—1878）制造了更理想的电磁铁。他用绝缘导线代替裸铜线，密密匝匝地绕在铁棒上。这种电磁铁通电后具有很强的磁场。

电能使铁棒具有磁性，断电又能使铁棒失去磁性。利用这种原理，人们研制出了继电器。利用给这种元件通电和断电的办法可以实现整个电路的接通或断开。

继电器问世后，广泛用于电报、电话、无线电，成为一种重要的电器元件。而继电器在现代计算工具中发挥它的重要作用，是在布尔代数建立之后。

布尔（1815—1864）是英国自学成才的数理逻辑学家，着力研究人类思维活动中一些规律性的东西。他创立的布尔代数也称为逻辑代数，为现代计算机提供了重要的理论准备，即奠定了电路设计的理论基础，虽然，这位抽象思维的大师从来没有也不可能考虑到计算机的问题。

1847年，布尔的《逻辑的数学分析：论演绎推理的演算法》出版。他应用通常的代数符号和代数方法研究逻辑问题，奠定了数理逻辑的基础。1854年，布尔的重要著作《思维规律研究》面世。在这部著作中，他成功地将形式逻辑归结为一种代数演算，创立了称为“布尔代数”的现代数理逻辑。

布尔在用数学方法研究逻辑问题的过程中，成功地建立起一种逻辑运算和一套独特的运算规律体系。他用等式表示判断，把推理看作等式的变换。他的逻辑理论，既可以进行公式推演，又可以对命题取作数值，例如，可以把真命题取作1，把假命题取作0，复杂命题，只要依照有关的运算规律，通过计算，最后再还给复杂命题以逻辑解释。

逻辑代数在布尔之后虽有所改进，但基本轮廓未变。这一理论特别适合于对只有断开、接通两种可能状态的电路系统进行分析和综合。它使具有切断和接通两种状态（可分别用真命题1和假命题0来表示这两种状态）的继

电器找到了新的用途，为继电器在计算机中扮演主要角色，提供了理论基础。

发明了莱布尼兹计算器和二进制的莱布尼兹，曾设想制造一种不仅能进行计算，还能检验假设的计算机，他希望建立一种普遍的方法，能“把一切正确的推理归结为一种计算”。显然，在布尔代数建立之前，即人们还不能数学形式来描述逻辑思维的规律之前，这种愿望是很难实现的。

1910年，荷兰学者埃伦菲斯特首先考虑到用逻辑代数作为分析与综合继电器电路的数学方法。30年代后期，人们开始系统研究用布尔代数设计电网问题。当40年代酝酿复杂的继电器线路或电子线路的自动数字计算机时，数学也已经为它们准备好了线路设计的有力手段。

（7）霍勒瑞斯统计分析机——机电计算机的先驱

最早将继电器用于计算机的是统计学家。

19世纪中叶，大批移民来到美国。美国每10年要进行一次人口调查统计，而这种统计十分费工费时，例如，1880年开始的人口调查到1887年还没有给出最终统计结果。统计学家们迫切希望，在1890年进行新的一次人口调查前，能有一种协助进行高速统计的机器产生。人口调查机关向国民征集这种能加快统计的机器。

新的技术总是诞生在最迫切需要这种新技术的地方和最迫切需要这种新技术的年代。有三位统计学家作出了响应。其中两位发明了使用着色卡片进行操作的机器，分类和计算仍使用手工操作。另一位统计学家霍勒瑞斯（1860—1929）则发明了利用穿孔卡片进行操作的机器。这台机器由受压器、继电器、计数器、分类器和电池等组成，电池为机器提供能源。霍勒瑞斯统计分析机将信息用穿孔的办法记录在卡片上，利用弱电流技术识别信息、传递信息、整理信息的计数器仍是机械的。

三件发明送到了美国人口调查局，为了确定哪一架机器更为有效，人们对它们的信息处理能力进行了一场测验。三台机器各自处理了一万个人的各种统计资料。结果，霍勒瑞斯统计分析机运算和统计的速度比另两架机器快一倍。因此，美国1890年人口调查的统计制表工作全部采用霍勒瑞斯机。这次人口调查共收集了6300万人的调查资料，而且增加了“说英语的家庭数目”等有关项目。所有的调查登记表汇总以后仅一个月，统计制表任务就顺利完成了。

霍勒瑞斯机是机电类计算机的先驱，继电器在此大显身手。获得了成功的统计分析机不久传到加拿大、西欧，还传到了俄国。经过不断的改进，这类机器达到了成套自动统计记录的水平，而且不仅用于人口资料统计，还用于会计业务等，应用范围不断扩大。

不过，这种计算机虽然应用了新型的继电器作元件，却是新中有旧。它仍然沿用机械原理进行工作，齿轮和连杆仍然是它的主要结构。因此，这种机器结构庞大，运转迟缓。要使它趋于完善，还需要用继电器彻底地革掉齿

轮和连杆的命。

(8) 继电器计算机

19世纪30年代，巴贝吉提出了分析机的设计思想，但由于技术上的困难，他研制自动计算机的梦想终未能实现。约一百年后，不断进步的科学技术终于可以无愧于巴贝吉的先进思想了。

德国的年轻工程师朱斯（1910—）第一个利用继电器为重要元件，制成了通用程序控制计算机。1934年，朱斯就开始了计算机的制作研究。当时，他正学习土木工程。在没有人力、财力支持的情况下，他克服困难，依靠自己的力量，于1938年制成了第一台计算机Z-号。这是一台纯机械结构的设备，速度慢，可靠性也差。他决心摆脱机械装置的局限性，采用继电器制造新型的计算机。可是，由于不久后便应征入伍，朱斯改进Z-号、研制新机器的的工作不得不因此中断。他的朋友和合作者希莱尔了解朱斯研究工作的重要性，向有关当局递交了一份报告，宣传、说明朱斯研究计算机的意义。这份报告使朱斯的军役获得免除，并使他的研究计划得到了政府的财政支持。朱斯非常珍惜这样的机会，加倍努力，于1941年建成了Z-号计算机。这是第一台新型的通用程序控制计算机，机器全部采用了继电器，还采用了浮点计数法、二进制运算、带数字存储地址的指令形式等。他把前人关于计算机的一些先进设计思想综合起来，并具体体现在了他的机器中。朱斯的Z-号计算机在计算机发展史上，占有重要的一页。

第二次世界大战中，Z-号被炸弹炸毁。朱斯在战时制造的Z-号放在巴戈里亚省一个农舍的地窖里，被保存了下来。战后，朱斯流亡到瑞士，并把兴趣转移到计算机软件方面。他首先提出了“程序演算”的理论，即现在所说的计算机程序设计，对计算机软件的发展有重要影响。

朱斯研制计算机的重要工作是在第二次世界大战期间进行的，在德国以外，很少人了解他的成果。所以，很长一段时间里，人们以为，美国的霍华德·艾肯于1944年研制的MARK-1是第一台通用程序控制计算机。

1937年，艾肯在哈佛大学物理系读研究生。在他撰写的论文中，涉及到解许多非线性常微分方程的问题，用一般的数值近似法来求解，工作量将非常大。为此，艾肯试图制造一台求多项式数值的计算机，并进而制造一台可以解决一般数学问题的通用计算机。他的想法得到了美国国际商业机器公司（IBM公司）的资助。当时颇有远见的公司总经理老沃森还于1939年派出四位有经验的工程师与艾肯合作。1944年8月，机电式程序控制的自动数字计算机MARK-1研制成功，在哈佛大学投入运行。这台机器的运算速度比以往的计算机有所提高，主要用于科学计算，编制了许多数学用表。研制MARK-

期间，艾肯读到了巴贝吉的著作，并建议别人也去了解巴贝吉杰出、深刻的思想。计算机制成后，艾肯在机器说明书上，引用了巴贝吉的一段意味深长的话：“任何人如果不接受我失败的教训，还仍然下决心去研制一台把数学分析的全部工作都包括在内的机器的话，我不怕把自己的名誉交给他去作

出应有的评价，因为，只有他才完全了解我工作的性质及其成果的价值。”

MARK-1 号采用了 3000 个普通电话继电器作为主要元件。这种继电器长约 1 英寸，能在百分之一秒内完成一次开关操作。这台机器处理两个 23 位数相乘，约需要 4.5 秒时间。MARK-1 没有全部采用继电器，其设计实际上不如朱斯的 Z-3，但影响超过了 Z-3 计算机。

1945 年至 1947 年间，艾肯又领导制造成功一台 MARK-2 号计算机。这台机器全部使用继电器，计算速度和其它性能有新的提高。

与朱斯、艾肯在同一时期，美国贝尔电话实验室的科学家斯棣比兹领导的一个小组也在研制继电器计算机。他们建造的第一台机器在 1940 年投入运行。这是一台专用机，主要用于电气网络复数计算，因此被称为“复数计算机”，并简称 Model-1 号。Model-1 号建成后不久，在美国数学学会作了一次成功的表演，但作为一种专用机，其使用范围毕竟有限。从 1944 年起，以斯棣比兹为首的研究小组又用了 3 年的时间制造了 Model-2 号通用机。这台机器的性能又有较大提高。

朱斯、艾肯和斯棣比兹的继电器计算机相继研制成功，是人类在计算工具研究中的又一进步。但是，这类计算机的生命，即它们发挥作用的时间在整个计算机发展史上是相当短暂的。由于 30 年代已经具备了制造电子计算机的技术能力，而且研制电子计算机的努力也几乎同时在进展中，因此，相比之下，继电器计算机在计算速度、构造性能等方面都有许多先天不足之处，已经不能满足高速处理大量信息的要求了。

不过，继电器计算机毕竟在许多方面具有现代计算机的技术特性，它们为早期电子计算机的设计、制造积累了宝贵和重要的经验，同时，也为计算工具的革命性变革准备了技术力量。

2. 电子技术的突破

电子技术作为 20 世纪信息技术、通讯技术和控制技术的基础是在 19 世纪末 20 世纪初产生和发展起来的，而电子元件则是电子技术迅速发展的主要前提，电子元件的每一项重要发明，都引起了电子技术的重大突破。这个时期诞生的电子管，带来了电子技术的第一次重大突破，促进了无线电通讯和广播技术的迅速发展，导致一系列新技术的出现，而更重要的是，为以电子管为主要元件的第一代电子计算机的诞生打下了基础。和其他新生事物一样，电子管的诞生经历了一番曲折的道路。

(1) 爱迪生效应和“弗莱明管”

1883 年，美国大发明家爱迪生（1847—1931）发明了白炽灯。然而，谁也没有想到，电灯的出现竟孕育着一项更加伟大的发明。

为了让“光明的使者”更明亮，寿命更长，爱迪生对白炽灯不断进行着改进和试验。一次试验中，他在灯泡中与灯丝相对的地方封入一个金属片。

他惊奇地发现，当灯丝发热、发亮时，金属片的表面会发出淡蓝色的亮光，如果在灯丝和铜片之间联上一个电流计，然后接通电源，电流计上的指针将发生偏转，这就是说，电路上流动着电流。灯丝与铜片之间是一段电流无法逾越的真空，按常规理解，电路上不可能产生电流。那么，电流是如何飞越真空的呢？爱迪生无法解释这一奇怪的现象，也没有作深入的探究，他只是把这种现象作为一种效应记录了下来，并申请了专利。这个效应就是著名的爱迪生效应。

用实验确证了电子的存在英国物理学家 J.J. 汤姆逊后来对爱迪生效应进行了研究，证明这种效应是一种热电子发射现象，是真空灯泡中的炽热灯丝的负电辐射。

事实上，显示爱迪生效应的那只灯泡就是世界第一只电子管。因此，从这个意义上说，爱迪生发现的这一效应是他对科学进步、世界文明的又一伟大贡献，但这中间又包含着这位发明大王未能发现电子和认识到电子管价值的最大遗憾。

英国科学家弗莱明（1849—1945）熟悉无线电发展的状况，深知检波管的改进是无线电面临的一个突破口。他对爱迪生效应深感兴趣，并试图利用这种效应研制新型的检波器。

弗莱明制造了一个与众不同的真空灯泡。他用圆桶形的金属片把灯丝包围起来，组成一个板极。在板极和灯丝之间加上一个交变电压，同时使灯丝通电加热。他发现，板极带正电时，灯丝和板极之间有电流通过；而当板极带负电时，就没有电流通过。这显然是一种新型的电器元件，它只允许电流向一个方向流动，能把交流电变成直流电。这种新的电器元件，后来被称作二极管，又称“弗莱明管”，它可以用来检波、整流。二极管很快被应用在无线电上，用它来检波，灵敏度大大提高了。

二极管是第一个真正的电子元件，它的出现对电子技术的发展起了很大作用，为三极管的产生奠定了基础。由于二极管不能控制电子流的大小，不能放大信号，人们又开始努力寻求控制二极管中电子流的方法。德国物理学家利本（1817—1913）首先提出了在二极管内两极中间加一个筛状穿孔板以控制二极管中的电子流的设想。三极管在孕育中。

（2）德福雷斯特制成第一个三极管

三极管是由电子工业的鼻祖、无线电之父德福雷斯特（1873—1961）发明的。德福雷斯特出生在美国的伊利诺斯州，从小喜欢机械，大学的专业是机械工程，但他又是个无线电爱好者。

1899 年秋，国际快艇比赛在美国举行。意大利科学家马可尼（1874—1937）接受邀请来到美国，用他的无线电装置报道比赛情况。在此之前，马可尼已经成功地使无线电信号跨越英吉利海峡，从英国传到了欧洲大陆。这一次在美国的无线电通讯表演，自然震动不小。德福雷斯特闻讯也赶到表演现场，当他挤到人群前仔细观察发报机并对其中的金属粉末检波器发问时，

恰被马可尼听见。德福雷斯特自我介绍后，两个人就无线电谈得十分投机。马可尼告诉他，自己正设法提高无线电接收机的灵敏度，而检波器看来是关键。

与无线电发明家马可尼的偶遇和交谈，使德福雷斯特对无线电产生了浓厚的兴趣，他决心从事检波器的研究，并从此开始了一个无线电发明家的艰难生涯。

德福雷斯特用了两年的时间研究改进检波器，成效不大。当时，他还不知道爱迪生效应，实验中的思路虽与弗莱明不谋而合，但不能象弗莱明那样可以站在前人的肩上，加快发明的步伐。当弗莱明抢先一步发明了二极管的消息传来时，德福雷斯特又高兴又沮丧，但并没有就此止步。他决心要在弗莱明工作的基础上发明一种信号放大器。

德福雷斯特制造了一种真空管，外表上与二极管几乎一模一样。不同的是，他在灯丝和板极之间加进一个炉栅形的白金丝，形成第三极（栅极）。他发明，在第三极上加一个不大的信号，就可以改变板极电流的大小，第三极微小的变化就能使板极电流发生较大的变化。这就是世界上第一支三极管，是一种能控制电子流大小，能放大电子信号的新的电子元件。这种元件的诞生才真正实现了爱迪生效应的最大价值。然而，它的面世却不是一帆风顺的。

三极管的进一步研究和改进需要经费，但德福雷斯特这时几乎已身无分文。他只好到几家大公司去游说、宣传三极管的神奇作用，希望争取他们的资助。谁知，几家公司都不相信眼前这个衣着破烂的青年会作出什么重要发明，把他赶了出来，一家公司干脆把他扭送到警察局。1906年春，美国纽约联邦法庭对一桩所谓“没有价值的玻璃管”的离奇案件进行了公开审理。被告德福雷斯特在法庭上慷慨陈辞，他从无线电说到检波器，从二极管说到三极管，威严的法庭成了他宣传科学的课堂。法官们终于理解了他的发明，听众们则在他的探索精神所感动。德福雷斯特被无罪释放。这次公开审理反而大大提高了这位发明家的知名度，也为三极管的研究和推广铺平了道路。1906年6月26日，三极管获得了专利权。

三极管的栅极控制电流开闭的速度，比继电器快了一万倍。三极管可以放大电信号，使无线电通讯的距离和可靠性大大增加；三极管还能产生高频震荡，使电子技术从长波区域向短波、超短波区域发展，大大地扩大了电子技术的应用范围，出现了广播、雷达、电视等新的技术。

1919年，爱克斯和乔丹把一对三极管连接起来制成了第一个电子触发器，这一关键发现引起了电子线路理论和应用的蓬勃发展，为计算工具由机电时代迈入电子时代提供了关键的技术。

后来的电子计算机正是用触发器为基本元件，来体现二进制数的。这种简单的电子装置，具有1和0的两种输出。一系列触发器连接成适当的逻辑模式，就形成了计算机内部的大部分电子部件，完成计算、逻辑运算、数据

存储等功能。

3. 第一台电子计算机的诞生

计算工具的不断革新进步，在程序自动控制、系统结构、数据的输入输出以及存储等方面为现代计算机的产生奠定了技术基础。电子管的问世以及电子线路理论与应用技术的突破，又为电子计算机的产生提供了必要的理论和技术条件。然而，和霍勒瑞斯统计分析机一样，第一台电子计算机 ENIAC 诞生的直接动因也来自社会需要，特别是第二次世界大战中军事技术发展的需要。

(1) 阿塔纳索夫的探索

制造电子计算机的努力其实开始于 30 年代的后期，也就是说，与机电计算机的研制几乎是同时并进的。

继电器的开断响应虽较齿轮的拨动要大大加快了速度，但开断的实现仍没有超越机械动作，这无疑限制了继电器计算机的速度。

电子管技术出现后，一些有远见的学者便想到利用电子器件来代替继电器作为基本元件，提高计算机运行速度的可能性。因为，继电器完成一次闭合需要百分之一秒，而电子管完成一次导通和截止变换只需百万分之一秒，而且，电子管的体积和重量小，也是非常突出的优点。

在研究制造电子计算机的早期探索者中有美国依阿华州立学院的美籍保加利亚学者阿塔纳索夫（1903—）。和艾肯一样，这位数学物理教授也是在求解数学物理方程遇到计算困难，而对计算技术和计算机的设计产生了兴趣。他曾热心于模拟计算机的研制。1937 年，在对美国工程师布什的微分分析机进行了深入的考察后，他认识到了模拟机的局限性，并开始设想将电子器件用于计算工具中。辛勤探索加灵感的启迪，阿塔纳索夫终于解决了引进电子技术到计算工具中的关键电路问题。他激动万分，即刻找到同事倍利，两人决定马上着手制造一台能求解 30 个未知数的线性代数方程组的电子计算机。但是，他们当时只争取到 600 美元的经费。他们制成了计算机的一个部件后，便因资金困难不得不中断研制计划。

1941 年 1 月 15 日，《德孟内斯论坛报》上曾刊登了倍利手持他们制成的计算机部件的照片，证明了阿塔纳索夫和他的助手进行过电子计算机的研制工作。报上预告他们的电子计算机将于这一年年底完成，机器将使用 300 多个电子管。这一预告最终没有实现，因为战事，资助阿塔纳索夫的依阿华州立学院的农业实验站不再提供资助，而且阿塔纳索夫也因战事转入军队服务。阿塔纳索夫对电子计算机的早期探索就此搁浅。但《德孟内斯论坛报》的照片说明，阿塔纳索夫的设计方案是电子计算机的最早方案。第一个取得成功的电子计算机的设计方案是美国科学家莫希莱（1907—）提出的。据阿塔纳索夫称，1941 年，莫希莱拜访他时，曾借阅过包含着他的电子计算机设

计思想的笔记本。这一点，后来给 ENIAC 的发明专利权问题带来了争论。美国的有关法院于 70 年代最后作出判决，撤消了 ENIAC 的专利权。

这一时期，曾最早研制了继电器计算机的朱斯和许莱尔也在计划制造一台有 1500 个电子管、每秒能运算一万次的通用计算机。这台计算机的某些部件于 1942 年完成。但由于政府拒绝支持，整个计划也未能实现。

阿塔纳索夫和朱斯等人对电子计算机的探索说明了，科学上的重大发明都是时代进步的结果。而他们研制计划的天折和后来第一台电子计算机 ENIAC 的成功又说明了现代科学技术发展的鲜明的社会化特征。制造电子计算机不可能再象帕斯卡加法机、莱布尼兹计算机和巴贝吉差分机那样，可以靠某个杰出的科学家个人的努力，它需要雄厚的技术基础，需要大量的资金投入，需要多学科的科学家的、工程技术人员和科技管理人员的密切配合，需要国家政府的全面支持，才有可能成功。

（2）第一台电子计算机——ENIAC 的诞生

第二次世界大战中，后方的一些研究机构象前方战场一样的紧张繁忙。美国宾夕法尼亚大学莫尔学院电工系与阿伯丁弹道研究实验室共同负责制造火力表。他们每天要为陆军提供 6 张火力表，每张火力表都要计算几百条弹道。一个熟练的计算员用台式计算机计算一条飞行时间为 60 秒的弹道，要花 20 个小时的时间，用大型的微分分析机也需要很长的时间。实验室聘用了 200 名计算员，但计算速度还是跟不上需要。计算任务紧迫、繁重，战事信息处理量的需要与计算工具的运算速度之间产生了尖锐的矛盾。

当时负责阿伯丁弹道研究实验室与莫尔学院电工系联系的军方代表是年轻的格德斯坦中尉。他的朋友莫希莱正好这时也在莫尔学院电工系任职，这位物理学家在 30 年代曾制成了一种模拟计算装置（谐波分析机）和一台不大的专用计算机。1942 年 8 月，莫希莱写了一份《高速电子管计算装置的使用》的备忘录。这份备忘录实际上成为第一台电子计算机 ENIAC 的初始方案。23 岁的研究生艾克特看过这份备忘录后，产生了极大的兴趣，并相信一定能研制成电子计算机。后来，艾克特成为第一台电子计算机研制计划的重要工程师。当莫希莱向格德斯坦介绍了他关于研制电子计算机的设想后，思维敏捷、颇有数学头脑的格德斯坦马上意识到这台设想中的机器的巨大价值，而最直接的、重要的意义是，机器研制成功将克服火力表制作的困难。格德斯坦马上向上级作了汇报，很快得到了支持，但要求莫尔学院草拟一份为阿伯丁弹道实验室制造一台电子数字计算机的发展计划。1943 年初，艾克特和莫希莱重新起草了建造新式计算机的报告，艾克特还对机器的制造提出了更加具体的建议。1943 年 4 月 2 日，莫尔学院正式呈报了制造第一台电子数字计算机的发展计划。

这一项重大计划提出后才一周，即 1943 年 4 月 9 日这一天，阿伯丁实验室负责人西蒙上校和他的科学顾问、数学家维伯伦博士听取了格德斯坦及莫尔学院的莫希莱和艾克特等的简单汇报。维伯伦听后，沉思片刻，便果断

地表示了他希望西蒙支持这个计划的意见。这次会议就这样促成了第一台电子计算机 E-NIAC 的降生。

1943 年 6 月 5 日，莫尔学院与军械部正式签定合同，拨款 40 万美元，开始实施 ENIAC 方案。1945 年底，第一台电子计算机的研制工作全部完成。这台机器使用了 18000 多支电子管，7 万多个电阻，1 万多个电容，1500 个继电器，重达 30 吨，占地面积 170 平方米，功率 150 千瓦，耗资 48 万美元。

这一项历时两年多的浩大工程，集中了一批不同学科的青年科技精英。30 刚出头的年轻物理学家莫希莱承担总体设计。年仅 24 岁的艾克特担任总工程师，负责解决制造过程中出现的各种复杂的工程技术问题。格德斯坦中尉具有很强的科研组织能力，而且在数学方面还能提出独到的建议。在朝气蓬勃的青年学者中，还有年轻的逻辑学家勃克斯。他们群策群力，共同培育出了人类历史上一朵最灿烂的智慧之花。

新式计算机在开始建造前就被命名为“电子数值积分机和计算机”（Electronic Numerical Integrator and Computer），用首字母的组合简称为 ENIAC（埃尼阿克）。

ENIAC 的揭幕典礼于 1946 年 2 月 15 日举行，1947 年，被运往阿伯丁的弹道研究所。最初，这台机器专门被用于弹道计算，后来，经多次改进成为能进行各种科学计算的通用计算机。1950 年 4 月，冯·诺依曼等人曾利用 ENIAC 成功地进行了第一次数值天气预报。

以电子管为元件的 ENIAC 的最大特点是采用电子线路来执行算术、逻辑运算和存储信息。它的电子线路有三种：用作电子开关的符合线路；用于汇集各个来源的脉冲的集合线路；用于计算和存储的触发器线路。为了执行加减运算和存储数据，E-NIAC 采用了 20 个加法器，每个加法器由十个组环型计数器组成，可以保存一个字长 10 位的十进制数据。为了执行其他运算，它还采用了乘法器、除法器 and 开方装置。ENIAC 最突出的优点是运算速度的提高，完成一次加法运算约 0.2 毫秒，比已有的计算机约快 3 个数量级。因此，ENIAC 能胜任相当广泛的现代科学计算。它诞生后计算的第一个问题是有关核物理的，用了两个小时。一个不用机器的优秀计算员，计算同样的问题，则要 100 年。

ENIAC 的成功，为提高计算速度开辟了极为广阔的前景，但它的基本逻辑结构与它之前的计算机并无本质的差别。ENIAC 没有真正的存储器，只有 20 个寄存器来存储数字，数据和指令用穿孔卡来输入，解决一道问题，准备工作常常要花去几个小时或几天，而计算只需花几分钟就行了。存储器容量小和程序“外插型”的缺点，使采用了电子技术的 ENIAC 实际上没能最大限度地实现这种技术所蕴藏的极大潜力。

尽管 ENIAC 有不少缺点，但它毕竟是世界上第一台能够实用的数字式电子计算机，是人类计算工具历史性变革的标志，它的诞生奏响了 20 世纪新技术革命的序曲。

1944年8月,艾克特提出的用延迟线回路作电子计算机存储器的设计方案,解决了计算机大量存储信息的问题。而冯·诺依曼(1903—1957)针对ENIAC程序“外插”的缺点提出了“存储程序工作原理”的思想。采用了这种工作原理的EDVAC计算机和ENIAC相比是全新高效的,并对后来几代计算机的健康发展都产生了重大的影响。

4. 冯·诺依曼和EDVAC机

1944年,ENIAC计算机还没有问世,美国陆军就指示它的建造者们着手设计建造更为高级的计算机。而这一任务,历史地落在了冯·诺依曼等人的身上。冯·诺依曼是20世纪最杰出的科学家之一。他的数学才能和各方面的综合才能使他在量子力学、原子弹研制、计算机设计和数理经济等重要的科技领域中都取得了巨大成就。

1903年12月3日,冯·诺依曼出生于匈牙利的布达佩斯。他少年时代就表现出非凡的数学天赋,中学阶段又受到了严格的数学训练。1921年至1925年,他在布达佩斯大学注册当学生,但并不听课,只是每年按时参加考试。此间,他还在苏黎士联邦工业大学学习化学。1925年,冯·诺依曼取得化学工程师资格;1926年,在布达佩斯大学获得数学博士学位。在学习数学期间,他受到著名数学家希尔伯特(1862—1943)等的影响,开始研究数理逻辑。1927年到1929年,冯·诺依曼发表了集合论、代数和量子力学方面的文章,在数学界成为知名人物。1930年,他应聘到普林斯顿大学任客座讲师,同年转为客座教授,1931年,成为该大学的终身教授。1933年,他又被聘为普林斯顿高级研究所的终身教授。这种职位是爱因斯坦这样的大科学家才能荣任的。

冯·诺依曼首先是一位杰出的数学家,他在纯粹数学和应用数学方面都有突出的贡献。1940年以前,其研究工作主要涉及纯粹数学的许多领域,在连续群、测度论和泛函分析方面作出了里程碑式的工作。1932年,他在紧致群的情况下,解决了希尔伯特第五问题;1934年,证明了群上不变测度的唯一性;他在寻求量子力学严格的数学形式中发展了泛函分析,形成了量子力学的完备性定理和测量定理。他在数理逻辑方面提出了简单而明确的序数理论,对集合论进行了新的公理化等。这些深入的工作为他后来进行计算机的逻辑设计奠定了基础。

第二次世界大战开始以后,因为形势的需要,冯·诺依曼更多的精力投入应用科学方面的研究。在运筹学的对策论研究中,他的《对策论和经济行为》成为这一分支科学的经典著作,并为数理经济学奠定了基础。

第二次世界大战期间,冯·诺依曼是美国政府的原子能委员会委员还担任了洲际弹道导弹委员会主席。

一次偶然的的机会,把冯·诺依曼吸引到了研制电子计算机的宏伟事业

中，并在这个领域建立了一生中最大的功绩。1944年，组织ENIAC研制计划的格德斯坦在阿伯丁火车站遇见了冯·诺依曼。格德斯坦十分敬仰这位闻名世界的数学家。交谈之中，格德斯坦介绍了正在研究中的ENIAC。在科学实践中积累起来的对新事物的敏锐洞察力，使冯·诺依曼立刻对ENIAC表示出极大的兴趣，而且，他这时正参加第一颗原子弹的研制计划，在研究原子核裂变反应过程中遇到了大量繁杂的计算问题，这使他对每秒将运行数百次的ENIAC也充满了希望。数日后，他专程到莫尔学院参观尚未建成的ENIAC，询问了许多问题。令艾克特等人十分敬佩的是，冯·诺依曼一下子就提出了计算机制造中最核心的问题——机器的逻辑结构问题。

应用数学方法于科学问题的强烈愿望，对自己能力的自信以及对新型计算机意义的深刻认识，使冯·诺依曼迅速作出决定，踏上了研制计算机的新征程。冯·诺依曼加入计算机研制小组后的1944年8月到1945年6月，是计算机发展史上智力活动最紧张又是最有收获的时期。才思敏捷的青年学者们提出了一个又一个的设计方案，冯·诺依曼则凭借雄厚的数理基础和杰出的综合能力，在集中众人的智慧的基础上提出了一个新型的存储程序通用电子计算机方案——EDVAC方案。EDVAC是“离散变量自动计算机”(Electronic Discrete Variable Auto-matic Computer)的英文首字母组合。

和ENIAC计算机相比，EDVAC方案作了以下的重大改进：一是选择了二进制；二是采用了超声波水银延迟线作为存储器的基本元件，大大增加了存储容量；三也是最突出的一点，即采用了冯·诺依曼提出的程序内储的设想，针对ENIAC程序“外插”的缺点，在机器的存储器中存储运算步骤，程序设计员只需指导机器去请教存储器中的有关指令，自行完成计算，作业的顺序则通过一种称为“条件转移”的指令来自动完成，从而大大加快了运算过程。存储程序不仅解决了速度匹配问题，还提供了在机器内部用同样速度进行程序的逻辑选择的可能性，从而使全部的运算过程成为真正的自动化过程。这个设计思想标志着电子计算机的成熟，并使它能真正为人类的大脑分担更多的工作。

冯·诺依曼的存储程序工作原理后来成为电子计算机设计的基本原则。50年代至今，电子计算机经历了四代发展变化，构成计算机的电子器件从电子管、晶体管、集成电路到大规模集成电路、超大规模集成电路不断更新，计算机的体积、成本、运算速度、存储容量及可靠性均产生了几个数量级的跃变。但是，所有的机器无一不是冯·诺依曼型的程序内储机。正是这个原因，人们称冯·诺依曼为电子计算机之父。EDVAC型计算机也被人们称为冯·诺依曼机。

1946年夏，莫尔学院举办了“电子数字计算机设计的理论和技术”训练班，向来自美国和英国的专家们推广了冯·诺依曼研究小组的成果。之后，冯·诺依曼机的制造出现了空前的繁荣局面。1949年，英国剑桥大学数学实验室研制成功世界上第一台存储程序计算机EDSAC，并投入运行，到1950

年，世界上共有 15 台冯·诺依曼机开工制造或投入运转。

然而，1945 年最早设计完成的 EDVAC 却到 1952 年才迟迟问世，从设计到建成，竟花去了 7 年光阴，在计算机发展史上留下了令人深思的一页。1945 年，ENIAC 基本建成后，这一集体智慧结晶的发明权的归属，却成为了问题。创造，曾使这个小组发出灿烂的智慧之光；而名誉，却使这个小组用争吵代替了争论，以至四分五裂。后来，莫希莱和艾克特离开了莫尔学院，开办了自己的计算机公司；哈斯基去了英国；冯·诺依曼回到了普林斯顿高级研究所，格德斯坦和伯克斯则追随着冯·诺依曼。这种情况势必推迟了 EDVAC 的研制。

5. 图灵和“理想计算机”

在电子计算机的发展历史上，另一个能与冯·诺依曼齐名的人物是英国著名数学家图灵（1912—1954）。

图灵出生在一个富有家庭。1931 年进入剑桥学习数学。1935 年，获得博士学位后去了美国的普林斯顿。1936 年，24 岁的图灵提出了“理想计算机”（后人称为图灵机）的思想，1937 年写了《可计算数学及其在判定问题上的应用》的论文。他的工作并不是为制造一种具体的计算机，而是针对当时数学的一个基础理论问题，即如何判断一类数学问题是否机械可解的问题。他认为，一个模型能算的问题，别的模型在理论上也是可算的。

图灵的“理想计算机”理论不仅解决了数学、数理逻辑的基础理论问题，而且解决了计算机科学的基础理论问题，他在朱斯的第一台自动通用计算机 Z- 制成之前，就在理论上证明了理想的通用计算机是可以制造出来的。

图灵严格描述了理想计算机的逻辑构成，其中最重要的是，图灵机是“存储程序”型的，即把程序和数据都以数码形式存储在纸带上。图灵机由三部分组成：一条带子，一个读写头、一个控制器。带子是存放程序和数据，被分成许多小格，每个小格可存放一位数；读写头可相对带子左右移动，每移动一个小格，读出一个符号。

冯·诺依曼的同事后来回忆道，冯·诺依曼从未说过“存储程序”型计算机的概念是他首先提出的，而是不止一次说过，图灵是现代计算机设计思想的创始人。

实际上，图灵不仅在理论上提出了通用计算机的设计思想，他还进行了这一方面的实践。1939 年，图灵回到英国，受聘于英国外交部通讯处所属的一个绝密机构，从事破译希特勒德国通讯密码的研究工作。这个机构于 1943 年造出了一台有 1500 个电子管的破译密码专用电子计算机。这台机器的设计运用了图灵的可计算理论，在战争中发挥了重要作用。为此，1945 年图灵退役时获得了英国政府的最高奖章。但由于军事保密，对外人对这台破译机的详细情况尚不得而知。

1945 年，图灵提出了 ACE 机的设计报告，其中已具有“仿真系统”的思想，而具有仿真系统功能的计算机到 70 年代才制造出来。图灵后来还在人工智能方面提出了一些很重要的思想。

四、数学的发展

这一时期数学的发展突出表现为现代数学基础理论的创立和以运筹学为代表的数学的发展。

1. 现代数学初创

数学界称“高等微积分”、“高等代数”和“高等几何”为“老三高”，所谓“新三高”则指抽象代数、拓扑学、泛函分析，它们是现代数学基础理论的三根支柱，基本上均溯源于19世纪末，奠基于20世纪初，形成于两次世界大战期间。

(1) 泛函分析的诞生

泛函分析数学分支是在19世纪的经典分析和数学的其他分支，如变分法、微分方程、积分方程、集合论等发展、研究的基础上，于20世纪初产生，在20年代至30年代间形成的。

泛函分析是研究无限维抽象空间及其分析的学科，可看成是无限维空间上的微分学。无限维空间是欧几里得空间的推广。研究具有无限多个自由度的力学系统的连续介质力学，就要用无限维空间的点来表示系统的状态。

泛函分析的思想最早出现在贝努利和欧勒所研究的最速降线问题中。人们认为变分法和积分方程是泛函分析的两个源头。

如果说微积分是研究以数 x 为自变元的函数 $f(x)$ ，那么变分法则是研究以函数 y 为自变元的函数 $J[y]$ 。函数 y 也可被视为“点”。20世纪初，阿达玛在从事变分法研究时，首先将这种函数的函数 $J[y]$ 称为“泛函”，即最先提出了泛函数的概念。他的《变分法教程》为泛函分析奠定了一定基础。

这一时期，在研究阿贝尔积分方程以及沃尔泰拉型积分方程的基础上，瑞典数学家弗雷德霍姆（1866—1927）对积分方程理论又作了更深入的研究。1904年至1906年，德国数学家希尔伯特在积分方程理论的研究方面完成了6篇论文，获得了比弗雷德霍姆更富实质性的结果。他利用正交展开将积分方程求解问题化为无限阶线性方程组的求解问题，并引入无限维欧几里得空间，给出了这种空间的一些重要概念。他们的工作为泛函分析的建立作了重要的准备。

也在这一时期，法国数学家弗瑞歇（1878—1973）利用当时集合论的成果，把函数组成的无限集合作为研究对象，第一次提出了函数空间的概念，奠定了抽象空间理论的基础。1906年，他把欧氏空间的距离概念抽象化，定义了度量空间，并利用柯西收敛准则提出完备化思想。后来，在弗瑞歇工作的基础上便有了“希尔伯特空间”的理论。弗瑞歇的研究指出，泛函可以进行代数运算，也可以进行分析运算，这就产生了泛函分析。

1922年至1923年，波兰数学家巴拿赫（1892—1945）提出了范围更广的一类函数空间——巴拿赫空间的理论。1932年，巴拿赫在《线性算子论》一书中统一了当时泛函分析的众多成果，成为泛函分析的第一本经典著作。

之后，泛函分析被结合到许多数学、物理具体问题的研究中，物理问题如流体力学中的刘维尔—斯托克斯方程，气体动力学方程和玻尔兹曼方程等的研究，还有量子力学方面。量子力学诞生过程中出现了海森堡矩阵力学和薛定谔的波动力学两种形式，前者用平方可积序列空间，后者用平方可积函数空间来描述状态，后来证明，两个空间都是希尔伯特空间，而且彼此等价。冯·诺依曼为了给量子力学提供严格的数学基础，于1929年至1932年，正式引入了抽象希尔伯特空间的概念。鉴于物理学中可观察量以及奇异积分方程、微分方程中出现的重要算子都是无界的，他引入了新的算子概念，给出了无界自共轭算子、酉算子及正常算子的谱分解，发现了对称算子和自共轭算子的区别，证明了量子力学体系的数学描述本质上只有一种。冯·诺依曼系统的、奠基性的工作对量子力学和泛函分析都是重要的。

运用泛函分析的理论和方法于数学、物理问题的研究，又进一步推动了泛函分析的发展。理论物理学对泛函分析的产生和发展所起的作用，正如微积分的产生和发展过程中，经典力学所起的作用一样。物理和数学的这种相互促进的关系，是现代物理学也是现代数学发展的一个特点。

巴拿赫的《线性算子理论》的出版和冯·诺依曼谱理论的出现，标志着泛函分析已成为数学的一门独立的分支学科。

在后来的发展中，通过不断地从其他学科所提供的素材中提取自己的研究对象，并不断充实自己的研究手段，泛函分析又逐渐形成了许多分支，如算子谱理论、巴拿赫代数、拓扑线性空间理论、广义函数论等。同时，它也推动了其他学科的发展。在微分方程、概率论、函数论、连续介质力学、量子物理、计算数学、控制论、最优化理论等学科中，泛函分析都有重要的应用。它的观点和方法还渗入不少工程技术学科中。

(2) 抽象代数的兴起

以群、环、域为中心的抽象代数学是现代数学的一个重要分支，对整个现代数学的发展起着重要的作用。

抽象代数源于群论的发展。19世纪的研究发现，代数所能研究的不仅是象实数、复数等对象构成的集合，还可以研究向量、矩阵、各种形式的超复数、变换、替换或置换等对象的集合。

这些不同类型的对象是按照它们的运算特性互相区别的。群、环、域概念的引进便是为了识别各种集合。

对客观世界中具体的和抽象的对称性的研究产生了群的概念。最早出现的群是变换群，即指一些变换的集合。19世纪人们研究方程根的置换群、函数的变换群等，它们的元素都是具体变换。后来，它们的共同特征被抽象出来，又用符号代替具体变换，便逐渐形成了抽象群论的研究。20世纪初，群的抽象公理系统就已给出。之后，群论的研究沿着各个不同的方向展开，例如，群分解为单群、可解群的问题；找出给定阶的有限群的全体等。

域论的创始人是伽罗华(1811—1832)。他的域是一种数的集合，如有

理数域、实数域、复数域等。后来，在代数数域和代数函数域深入研究的基础上形成了代数数论和代数函数论。1910年，德国数学家施泰尼茨（1871—1928）发表的《域的代数理论》，奠定了域论的基础，成为抽象代数的一个重要里程碑。他提出素域的概念，定义了特征数为 P 的域，证明每个域可由其素域经添加而得。著名数学家希尔伯特曾对代数数域理论作过重要总结，并提出一些猜想。这些猜想后来陆续由创立类域论的日本数学家高木贞治（1875—1960）和奥地利数学家阿廷（1898—1962）所解决。

环论是抽象代数中最深刻的一个部分。而最显著地改变代数学面貌的分支则是交换环论中的理想论。

环和理想的抽象理论是20世纪才出现的。韦德伯恩（1882—1948）在《论超负数》一文中，研究了线性结合代数，这种代数实际上是环。

环和理想的系统理论是由女数学家艾米·诺特（1882—1935）给出的。这位伟大的女数学家，是抽象代数的奠基人，一般理想论的创立者。

诺特出生于德国埃尔兰根的一个犹太人家庭，父亲马克思·诺特也是著名的数学家。1900年，诺特进入仅有2名女生的埃尔兰根大学。1907年，获博士学位，论文题目是《三元双二次型不变量的完全系》。期间，她还到哥廷根大学听课，得到希尔伯特、闵科夫斯基（1864—1909）、克莱因（1845—1918）等数学大师的教导。

1916年，受希尔伯特和克莱因的邀请，诺特到哥廷根工作，帮助他们进行与广义相对论有关的研究。因为她通晓微分不变量理论，因此作了许多出色的工作。但是诺特一直没有在哥廷根大学获得应有的职位，只能在以希尔伯特名义开设的讲座中讲课，希尔伯特几次为她争取讲师的职位，但是，当时大学评议会里对妇女持歧视观点的人们却极力反对。直到第一次世界大战结束，德国成为共和国，诺特才当上讲师。

1919年至1922年，诺特潜心研究环中的理想论。当她开始工作时，环和理想的许多结果已经给出，但是，正是她赋予这些结果以适当的确切的表述，得到环和理想的抽象、系统的理论。诺特把多项式的理想论包括在一般理想论之中，为代数整数的理想论和代数整函数的理想论建立了共同的基础。1926年，她在环和理想方面深入的总结性的工作，基本完成。因此，一般将抽象代数的形成时间定为1926年。

荷兰数学家范德瓦尔登（1905—）于1924年至1925年师从艾米·诺特。1927年，他极其成功地阐述了诺特的理论，对诺特的思想进行了透彻的解释，后来写成《近世代数学》一书，总结了以诺特为代表的哥廷根代数学派以及其他代数学家的成果。此书当时即风靡世界，至今仍被视为是抽象代数最好的入门书之一。

诺特以她在代数和数论方面的卓越成就，在数学界赢得很高的声誉。1933年，作为犹太人的诺特和其他五位教授一起被纳粹当局点名离开哥廷根。她后来不得已而远渡重洋，去了美国，1935年因病逝世。爱因斯坦赞扬

诺特说：“诺特女士是自妇女受到高等教育以来，最重要的，最富于创造性的天才”。

（3）拓扑学的发展

拓扑也是 19 世纪数学的发展结晶出的一个新的数学分支。拓扑的前称是位置分析，是研究几何图形在被弯曲、拉大、缩小或任意形变下仍然保留的那样一些性质（这种性质也称拓扑性质）。而对“任意形变”应加的限制是，在图形变换过程中，原来不在一起的点不能粘在一起，原来在一起的点也不能分开，每点附近的点经变换后仍在该点附近。这种变换和它的逆变换都是连续的一一对应，就称为“同胚”。在拓扑学中，一个图形与稳定同胚的图形成为拓扑等价。拓扑学就是研究不同图形的拓扑性质以及拓扑分类等问题。

照 20 世纪的理解，拓扑分成两个有些分开的部分，即点集拓扑和组合拓扑（或代数拓扑）。前者把几何图形看作点的集合，又把整个集合看作是一个空间；后者把几何图形看作是由较小的构件组成的。在研究那些极广泛的几何结构时，组合拓扑也要用点集拓扑的概念。

法国数学家弗雷歇在 1906 年发表的博士论文中，把函数作为一个“点”来看，并把函数收敛描绘成点的收敛，这就把康托尔（1845—1918）的点集论和分析学的抽象化联系起来。弗雷歇在函数所构成的集合中引入距离的概念，构成距离空间，展开了拓扑距离空间的理论。点集拓扑学是在弗雷歇工作的基础上产生的。希尔伯特空间、巴拿赫空间的引入以及泛函分析的兴起，进一步推动了点集拓扑的形成和发展。

19 世纪末，组合拓扑中发展得较为完善的唯一区域是闭曲面理论。最先系统地一般地探讨几何图形组合理论的是彭加勒（1854—1912），他被公认为是组合拓扑学的奠基人。1895 年至 1904 年间，他发表了一系列有关的论文。彭加勒把点、线段、面等推广为标准构件——单形，把所有图形都分解为单形的组合——复形，并引进了流形、边缘、链、贝蒂数、挠系数、示性数等概念，另在区别复形时，引进了复形的基本群（也称为彭加勒群或第一同伦群）。他的工作对拓扑学的形成和发展起了相当重要的作用。

这位杰出的数学家同时还是一位杰出的物理学家，他数学方面的著作涉及几乎所有的基本领域，物理学方面的工作也涉及到动力学、流体力学、电磁理论、理论物理以及天文学等诸方面。

通过研究函数论问题对拓扑产生兴趣的布鲁温和美国数学家亚历山大（1888—1971）等在拓扑的这一段发展中都作了许多重要工作。20 世纪 20 年代末，人们把群和环等抽象代数结构作为拓扑不变量引入，并引进了同调群、同伦群概念。同调、同伦概念的引进，使拓扑学的内容更加深化。1939 年到达美国的波兰数学家爱伦堡（1915—）与斯廷罗德（1910—1971）合作，于 1944 年将同调论公理化，结束了同调论发展中的混乱局面，推动了拓扑学的进展。

这期间，还严格定义了微分流形的概念，并证明了微分流形的一些有关定理。微分流形是曲线、曲面概念的推广，它们的局部都可以看成是欧几里得空间，通过不同的方式连接起来就可以连成不同的流形。从局部看，它们没有什么不同，但这些元件连接方式的不同，在整体上将差别很大。微分拓扑学就是研究微分流形的拓扑学。40年代后，拓扑学渗透到所有数学领域中，并影响到物理学、化学和生物学。

历史上的“四色问题”，后来才发现它是一个拓扑问题。所谓四色问题可以表述为：给平面或球面上的地图着色，只要四种颜色便足够了，就能使任何两个具有至少一条曲线公共边界的国家都被涂上了不同的颜色。四色问题也称作“地图问题”，是1852年时，伦敦大学的研究生古斯里（1831—1899）提出的。经验使人们觉得这个猜测很有道理，因为还没有一种地图需要四种以上颜色来着色的，但若少于四种颜色，就肯定不够了。但这个貌似平常的常识性问题，在暗示这样一个数学定理：将平面任意地细分为不相重叠的区域，每一个区域，总可以用1, 2, 3, 4这四个数字之一来标记，而不会使相邻的两个区域得到相同的数字。所谓“相邻”区域是指有一整段边界是公共的，两个区域只相遇于一点或有限多个点就不能称其为“相邻”。

古斯里的弟弟将这个猜测告诉了他的老师，当时伦敦大学的教授德·摩尔根（1806—1871），摩尔根未能提出证明。1879年，肯普在《美国数学杂志》上发表了对四色问题的一个“证明”。然而，约十年后，希伍德在伦敦《数学季刊》上指出了肯普推证中的错误，并给出了他的一个证明。但希伍德只能证明：用五种颜色给平面或球面上的地图着色是足够的。许多数学家后来在四色问题上作了工作，虽有一定进展，但均未彻底解决。

直到电子计算机发明之后的1976年，美国伊利诺斯大学的阿佩尔、哈肯等人，在前人工作的基础上，将问题化为1500个构形，然后逐一证明这些构形的可约性。他们借助计算机，分析计算了一千多个小时，才证明了这个世界难题。

1943年至1945年，美籍中国数学家陈省身完成了两项划时代的重要工作，首创应用纤维丛概念于微分几何学的研究，得出了一系列刻划纤维丛的陈省身示性类，对拓扑学和微分几何学的发展有重大影响。

2. 一些颇有影响的数学学派

第一次世界大战结束到第二次世界大战爆发的20余年里，数学取得了较大进展，并出现了不少颇有影响的数学学派。如波兰数学学派、德国哥廷根学派、法国布尔巴基学派、苏联的列宁格勒学派和莫斯科学派等。其中的哥廷根学派和波兰数学学派在第二次世界大战中受到法西斯希特勒的摧残，由鼎盛而衰落，对数学界乃至整个科学界都是很大的损失。

(1) 波兰数学学派

波兰数学学派的最初组织者是华沙大学教授雅尼斯柴夫斯基。1918年，他提出波兰数学家应“为波兰数学赢得特殊地位”，不能“只充当外国数学中心的仆从和顾客”，并提出三条措施：一是集中人力于某一领域，如集合论、拓扑学等；二是创办一个杂志，专门刊登集合论等方面的文章，使之达到国际一流水平；三是创造一种适合数学研究的气氛，即创造一个生产数学的锻炉。波兰后来在华沙和里沃夫形成了专攻集合论、拓扑学和泛函分析的队伍，许多成果是世界一流的。他们先后创办了《数学基础》和《数学研究》杂志，获得极大成功，并赢得国际声誉，吸引了世界一流数学家的来稿，同时把波兰数学界的成果交流到国外。《数学研究》杂志专登泛函分析方面的文章。波兰学派中里沃夫学派的领导人之一是著名数学家巴拿赫，他在泛函分析等方面的工作在数学界以深刻和概括著称。第二次世界大战中，波兰被希特勒法西斯占领。2/3有学位的数学工作者在战争中丧失生命；巴拿赫迫于生计而改行到生物试验中心工作，1945年病逝；劫后余生者后来不少去了美国。

（2）哥廷根数学学派

20世纪初，数学大师高斯、黎曼（1826—1866）等曾执教过的哥廷根大学已成为世界数学的中心。哥廷根学派中有杰出的数学家希尔伯特、闵可夫斯基、克莱因（？—1918）和在抽象代数的创立过程中作出了重要贡献的女数学家埃米·诺特等。

希尔伯特是20世纪最伟大的数学家之一，他对数学的贡献是多方面。他早期的研究领域涉及代数不变式问题、代数数域论等，孕育了女数学家埃米·诺特为代表的抽象代数学派。后来，他在变分法、积分方程、泛函分析、物理学等领域均作出了突出的贡献。在世纪之交的1900年，他发表了著名数学演讲，列出了23个在新的世纪里数学家应当努力解决的问题，为新世纪中的数学发展揭开了充满挑战性的、光辉的一页。这些问题在相当程度上左右和导引了20世纪数学的发展和研究方向。

克莱因于1872年发表的“爱尔兰根纲领”演讲，总结了各种新几何学的发展，指出其结构上的一般原则，并用变换群的观点作为几何学分类的基础，带来了一次深刻的思想变革。

闵可夫斯基曾是爱因斯坦在苏黎士时的老师，后来任哥廷根大学的数学教授。1907年，他首创四维时空理论，在通常的三个空间坐标的基础上，引进了第四个坐标 ict ，用四维坐标描述时空中发生的事件及事件的变化规律，将爱因斯坦狭义相对论表述成非常简洁、优美的数学形式。闵可夫斯基的工作引起了科学界对爱因斯坦所进行的相对论革命的注意，他还十分有预见性地指出，爱因斯坦的思想对近代人们的思维将产生深远的影响。

哥廷根大学数学系的办学传统中有几个“一”：一间开架阅览室，一条陈列数学模型的走廊，每周一次讨论班等。学派的组织者强调纯粹数学和应用数学并重，强调人才培养和国际学术交流等。30年代，希特勒迫害犹太人

的黑色恐怖笼罩了哥廷根，几乎所有的哥廷根学派成员都被迫移居美国，哥廷根学派完全衰落了。抽象代数的奠基人、女数学家诺特于 1933 年去了美国。最后被迫离开哥廷根的，是希尔伯特的接班人、数学家柯朗。他曾是希尔伯特的助教，后来接任了希尔伯特的职务，20 年代写有大量论文，他的《数学物理方程》第一卷，是 20 世纪数学名著之一。柯朗在筹建哥廷根数学研究所中有突出贡献。在希特勒的全国性“排犹活动”中，祖籍犹太人的柯朗也难于幸免。1934 年 8 月，应纽约州立大学的聘请，柯朗抵达美国。第二次世界大战中，柯朗领导的纽约州立大学战时应用数学小组，发挥了很大作用，在水下声学和爆炸理论、喷气机设计、超音速空气动力学等方面均有出色成果。柯朗还把建设哥廷根数学研究所的经验带到美国，用自己的才华又建立了另一所数学研究所——纽约大学数学研究所，使纽约大学成为美国的两大数学中心之一。

(3) 法国布尔巴基学派

法国布尔巴基学派诞生于 1939 年。自那一年起，有一套丛书《数学原本》开始陆续出版，作者署名 N·布尔巴基。这一套丛书从一般的基本定理开始，逐步深入各种各样的数学专门领域，是关于现代数学的综合性丛书，被许多人阅读和引用，在研究“结构”方面颇有影响。

布尔巴基应作为 20 世纪中最有影响的数学人物之一被载入史册。然而，实际上并没有 N·布尔巴基这么个人。后来，人们才了解到，布尔巴基只是一个非正式的数学家集体所使用的笔名。这个笔名的来历与法国的一位将军 C·布尔巴基（1816—1897）有关。南希城有这位将军的塑像，而布尔巴基学派中的许多人住在这个城市。

布尔巴基班是由 1924 年进入巴黎高师数学系的一群年青人发起的。他们的授课老师中，不少人在数学方面卓有成果，如以波莱尔可测函数等著称的波莱尔（1871—1956）、勒贝格（1875—1941）和以解析函数正规族出名的蒙戴尔等。1927 年，受到当时现代数学蓬勃初创的鼓舞和范德瓦尔登整理代数学的著作《近世代数》的启示，他们决心组织起来，把数学重新整理一遍。于是，便有了布尔巴基学派的开端。他们的固定成员有 10 名，平时分散各地，每三个月聚会三天，每天下午有两个演讲共三个小时，其余时间是讨论、交谈。早期的布尔巴基班以讨论时短兵相接，激烈地展开批判反批判而著称，局外人有“疯子集会”的印象，但这也正是他们能保持生命力，取得成功的原因之一。

到 1972 年，《数学原本》丛书已出版 34 卷，而且仍在继续撰写和出版，布尔巴基集体仍保持着活力。集体中的成员到了 50 岁则必须退出，但仍可以参加聚会、讨论和发表意见。老成员退出集体后，发表东西就要用他们自己的名字来署名。该组织的成员曾有不扬名的誓言，但后来他们的名字对于数学界已是不公开的秘密了。布尔巴基学派的较早期成员中有狄多涅（1906—）、韦尔（1906—）、舍瓦莱（1909—）、德萨特，波兰人爱伦伯格

(1913—)是唯一的外籍人。第二次世界大战后,系统地发展了广义函数论的施瓦兹(1915—)等人的参加,为学派更深入的研究作出了很大贡献。这一数学学派在代数拓扑学、代数几何学、代数数论、群论、泛函分析等方面都颇有影响。

(4) 崛起的苏联数学学派

苏联 20 年代后发展起来的列宁格勒函数论学派中,最著名的是康托诺维奇(1912—),他在集合论、半空间泛函分析、泛函近似计算方面有突出贡献,另外,他还于 1939 年撰写了规划论的第一部成形著作《生产组织与计划中的数学方法》,发展了有利于国民经济的规划理论,荣获诺贝尔经济学奖。莫斯科学派于 20 年代之后发展迅速,学派中最著名的人物是柯尔莫哥洛夫(1903—)。他最初致力于三角级数、逼近论、测度论等方面的研究,后来又涉及了拓扑学、力学和逻辑等,而最杰出的工作在概率论方面。

概率论是研究偶然、随机现象的规律性的数学理论。17 世纪中叶产生的古典概率论,其主要工具是排列组合理论。概率论与解析方法相结合后引出了正态分布、大数定理和最小二乘法。概率论的一个重要分支是随机过程。1906 年,俄国数学家马尔科夫(1856—1922)研究随机过程,首先提出了马尔科夫过程,其大意是:一个体系将来的发展只与体系现在的状况有关,而与体系过去的历史无关,液体中粒子的无规则运动——布朗运动就是马尔科夫随机过程的一个典型例子。

柯尔莫哥洛夫于 1939 年将概率论公理化,巧妙地将实变函数论、测度论和集合论用于概率论的研究。在极限定理和随机过程的研究中柯尔莫哥洛夫也取得了重大成果。20 世纪 20 至 30 年代,被称为是概率论的英雄时代,而苏联的概率论学派为现代概率论的发展作了许多工作。第二次世界大战后形成三个概率论研究中心,苏联学派是当时最强的一个,其余两个分别在法国和美国。

这一时期中,苏联的泛函分析学派和代数学派等,都有过出色的工作,苏联的数学家在许多数学领域中作出了突出的贡献,例如,提出索波列夫空间,解决希尔伯特第七个问题,关于解析函数边值理论的工作,提出对偏微分方程的分类等。

第二次世界大战前,美国数学人才的培养要依赖欧洲,每年都有大批留学生到法国巴黎和德国的哥廷根求学。30 年代起,美国出现了一批重大的数学成果和国际上一流的数学家。希特勒上台后,犹太人和进步知识分子受到迫害,欧洲的许多数学人才来到了人才政策宽松的美国,大大推动了这里的数学和其他科学的发展。

3. 应用数学的发展

近、现代数学中,把那些由数学学科本身内在的矛盾而推动发展的数学

分支，即数学基础理论称为纯粹数学，而把解决生产和生活实际需要的数学理论称为应用数学，后者在纯粹数学与其他科学技术之间起桥梁作用。

20 世纪上半叶，应用数学领域的突破性发展，集中表现在运筹学与自动控制方法的创立，以及第一台电子数值积分机和计算机的研制，它们都是应战争的需要而产生的。有关计算机的研制和诞生的过程本书已有专章叙述。

早在 1938 年，英国空军就有了飞机定位和控制系统，并在沿海设立了几个雷达站，以便监视敌机的动向。在后来的一次空防大演习中，他们发现，这些雷达送来的信息，必须加以协调和关联，才能改进作战效能。为了解决这一问题，英国空军成立了运筹学小组，从事警报和控制系统的研究，以便更合理地布局，有效地发挥雷达等先进的设备的作用，实现用少量战斗机压倒多数的德军战机的目的。此后的两年里，这个小组的任务扩大到防卫战斗机的布置，以及对某些战事的结果进行预测等方面。运筹学的英文 Operations Research，原意是指作战研究。英国物理学等方面的不少专家也参加了这一方面的研究。

运筹学工作者在第二次世界大战中研究并解决了战争中出现的许多课题，如有效地训练技术员和战斗员，以最少人力取得最佳效果的问题；武器兵力的配备部署问题，如适当配备护航舰队以减少船只受潜艇攻击的损失；改进深水炸弹的投放，提高对德国潜艇的攻击率等；还有军需物品的运输、装备性能的估价等问题。

美国后来也着手研究运筹学，并在太平洋战争中得到应用，收到了很好的效果。

由于运筹学和自动控制技术在战争中的应用，实现了作战科学化，有力地增强了盟军对法西斯势力的威力。

此外，在第二次世界大战中，以运筹学为基础的检验产品质量的质量管理工作也逐步开展，这一方面的成果在战后的企业生产中发挥了很大作用。

第二次世界大战结束时，英国、美国和加拿大等国的军队中，运筹学工作者有 700 多人。大战结束后，原来在军队中从事运筹学工作的人在英国成立了一个民间组织——运筹学俱乐部，定期讨论如何将运筹学民用化的问题，并取得一定成果。1950 年，第一份运筹学杂志《运筹学季刊》在英国创刊。1952 和 1953 年，美国和英国分别成立了运筹学学会。

运筹学后来在运输、建筑、纺织、钢铁、煤炭、农业等各个经济部门得到了初步的应用。随着这门学科应用和研究的深入与发展以及研究成果的汇集，逐渐形成了运筹学的系统理论。

1959 年，国际上成立了运筹学会联盟。中国于 1980 年成立了运筹学会，并于 1982 年加入世界运筹学会联盟。

随着运筹学研究的日益广泛和深入，虽然出现了各种对运筹学的理解和定义，但一般地认为，运筹学是研究经济活动和军事活动中能用数量来表述的有关营运、筹划与管理等方面问题的一个主要的应用数学分支，为一切执

行部门对他们控制下的业务活动采取对策时，提供数量上根据的科学方法。

利用运筹学解决千差万别的实际问题时，常常从以下的几个方面进行考虑。首先是确定目标，搞清楚所提出的任务要达到的目的，还必须弄清或预测随时间的推移，决策者的认识和管理人员的水平是否发生变化，如何变化。一般来说，任务都是有时间性的，用于特定任务的人力、物力、财力都是有限的。因此，确定目标后，必须制定切实的方案，订出几个大的步骤和完成各步骤的时间。之后，是建立模型，对于一个大型的复杂问题，可考虑将它分成若干小型的能独立进行的活动，收集有关的数据，确定问题所涉及的各种因素，搞清楚哪些是给定的，哪些是可以改变的（即变量），哪些是可以控制的，哪些是不确定的，并设法建立这些因素之间应满足的各种关系，建立某种准则以衡量所作出的决策的效果。在模型初步确定之后，就要考虑所采用的解法以及对随机因素的处理等，解法或模拟或用理论演算方法，也可以利用运筹学发展过程中已形成的算法。

运筹学后来形成许多分支学科，如对策论、规划论、排队论、搜索论、库存论、最优化方法、质量控制等分支。一个大型复杂的运筹学问题往往可以分成若干子问题，每个子问题可能属于不同的分支。这里简略介绍几个分支。

对策论又叫博弈论。它的创始人是美籍匈牙利科学家冯·诺依曼，他的著作《对策论与经济行为》是这门学科形成的标志。对策论是应用数学方法来研究有厉害冲突的双方在竞争性活动中是否存在制胜对方的最优化策略，以及如何找出这些策略等问题。后来发展为，不仅考虑只有两方参加的竞争性活动，还考虑多方参加的竞争性活动，而且，在这些活动中，参加者不一定是完全对立的，允许某种联盟出现。对策论可应用于军事斗争研究以及人类改造自然的活动的研究中。

规划论是研究计划管理工作中有关安排和估值的问题，是因解决物资调运问题的需要而产生的，包括线性规划、非线性规划和动态规划等分支。前苏联的康托诺维奇、美国的丹西格在规划论的创立和发展中作了很多有价值的工作。康托诺维奇于 1939 年撰写的《生产组织与计划中的数学方法》是规划论的第一部成形著作；丹西格则首创了解决线性规划问题的“单纯形法”，使得线性规划成为规划论以及整个现代应用数学中最成熟的分支之一。规划论研究的一个典型问题是所谓的“运输问题”，即把数量和单位运价都已给定的某种物资从一处运到另一处，要求在供销平衡的条件下定出流量和流向，使总运费为最少。通常把必须满足的条件称为“约束条件”，把衡量指标称为“目标函数”。如果目标函数和描述约束条件的方程都是线性的，则称所规划的问题为“线性规划”，否则为“非线性规划”。如果所考虑的问题与时间有关，则是“动态规划问题”。

排队论亦称“公用事业理论中的数学方法”或“随机服务系统理论”，主要研究随机性的拥挤现象。例如，用户或顾客多时就会出现排队问题，等

待时间长短、排队长度等概率性问题就是排队论要研究的。最早的著述是丹麦数学家爱尔朗于 1908 年发表的《排队论在丹麦电话系统中的使用》。排队论也正是起源于有关自动电话的研究。在自动电话系统中，由于通话时间的长短和叫号次数的多寡都是不确定的，因此，如果增加线路，通话成功的机会增大了，但线路闲着的机会也同时增大了，也就是说，服务质量和设备利用率之间有了矛盾。这一类矛盾现象的研究可用于机场、码头、车站等的设计和调度中。例如，城市的公共汽车问题，在车站候车的人时多时少，调度部门应派出多少辆车，如何派法，才能既保证汽车公司的收入，又使乘客比较满意。又如，一个百货商店应安排多少售货员，一个工厂应有多少维修人员等。这些都是存在某种随机性排队现象的问题。

最优化方法是研究工程技术、国防科学以及工商业贸易中如何利用现有的人力、物力，使完成任务的质量最好、时间最节省、费用最少的问题。“优选法”是最有典型意义的方法。这一分支在 40 年代以后有很大发展。

第二次世界大战期间，英国、美国和苏联的数学家应战事的需要，研究雷达与高射炮配合射击敌机的问题。他们把随机过程的预测理论应用到火炮自动控制上。为了准确地射击敌机，需要在极短的时间内计算并预测出它的位置和速度，并及时校正火炮的方位和仰角，这种需求促进了自动控制方法的进步，并促使了电子计算机的诞生。

五、现代化学的进展

1. 物理学革命对现代化学的影响

19世纪末至20世纪初的物理学革命，特别是量子物理领域的革命对化学的发展产生了深刻的影响。而现代化学中具有重大意义的新突破，则是量子化学的建立。它给20世纪的化学带来了巨大的变革。

1913年，丹麦物理学家玻尔深入细致地研究了大量精确的光谱数据和描述谱线规律的经验公式，在卢瑟福原子模型的基础上引入普朗克的量子概念，将量子概念用于电子轨道和角动量，并结合了当时物理学前沿的一些最新研究成果，提出了原子结构的量子化轨道理论。1916年，德国化学家考塞尔（1888—1956）和美国化学家路易斯（1875—1946）将玻尔的这种新理论用于研究离子键和共价键的形成。路易斯提出两个原子可以共有一对或多对电子，而共用电子对的结合方式称为共价键。考塞尔认为，金属元素的外层电子一般比4个少，容易失去电子成为带正电的阳离子；非金属元素的外层电子一般比4个多，容易获得电子成为带负电的阴电子，失去或得到的电子数，是元素的正原子价数或负原子价数。他们的工作奠定了量子化学的基础。

1926年1月至6月，薛定谔以《作为本征值问题的量子化》为总标题，连续发表了四篇论文，完成了波动力学的创立工作。而波动力学和海森堡的矩阵力学统称量子力学。1927年，德国人海特勒（1904—）和美籍德国人伦敦（1900—1954）首先采用薛定谔的波动力学方程来研究氢分子，阐述了共价键的形成和作用，取得了量子化学的第一批成果。他们的价键理论认为，分子中电子的运动是集中在两个原子核之间的，只要它们自旋反平行，就可以两两偶合成类似电子桥似的化学键。这种新概念解释了化学领域中许多过去未能解释的现象，并能较好地与实验结构相符合，初步实现对化学键形成过程的定量研究。但这种价键理论还有一些不能解释的化学现象。

1931年，美国人鲍林（1901—）等从电子具有波的性质，而波可以迭加的观点出发，提出杂化轨道理论，认为碳原子和周围电子成键时，所用的不是原来的纯粹轨道，而是经过迭加混杂而得到的“杂化轨道”，圆满地解释了碳四面体结构的价键状态。

30年代，还提出另一种新的化学键理论——分子轨道理论，认为原子形成分子后，个性消失，因而应着重研究分子中某个电子运动的规律，用电子波函数来描述化学键的本质。分子轨道理论和海特勒等的价键理论相比可以解释更多的化学现象。

50年代，一种新的价键理论即配位场理论，发展了起来，在解释络合物的性能方面，取得极大成功。量子化学逐渐地形成为完善的学科。

与量子化学同时发展起来的还有结构化学。1912年，劳厄（1879—

1960) 通过实验证明了 X 射线是一种波长很短的电磁波, 同时证明晶体的原子点阵结构, 并提出以晶体作为光栅, 进行 X 射线的衍射实验。1913 年, 英国的亨利·布拉格 (1862—1942) 和劳伦斯·布拉格 (1890—1971) 父子通过对 X 射线谱的研究, 提出晶体的衍射理论, 建立了布拉格公式, 奠定了晶体 X 射线结构分析的基础, 并发明 X 射线摄谱仪。这些成果导致 X 射线结晶学和 X 射线光谱学的诞生。化学中晶体结构的测定获得了重要的理论和实验依据。

结构化学和量子化学的产生和发展, 不仅阐明了化学反应中电子运动的情况, 阐明了由原子组成分子的过程, 而且还阐明了这些原子和分子在空间的排列和构型的问题。

50 年代后出现的计算化学, 可以定量地研究较复杂的分子, 探索新的化学反映, 研究合成新的材料。

总之, 在物理学革命的影响下, 现代化学得到了迅速的发展, 化学经历了由描述性“经验科学”向推理性科学, 从宏观向微观, 从定性向定量的重大转变。

2. 高分子化学与合成化学的发展

早在 19 世纪中叶, 合成化学就已问世。如 1845 年, 德国人柯尔柏 (1818—1884) 利用木炭、硫黄、氯气和水, 合成了有机化合物醋酸, 这是第一个从单质出发实现的完全的有机合成。之后, 人们又合成了柠檬酸、苹果酸等一系列有机酸。1854 年, 法国人贝特罗合成油脂。

1861 年, 俄国人布特列罗夫 (1828—1886) 提出有关有机化合物的结构理论, 并根据这个理论合成了某些糖类化合物。另外, 在这一时期还出现了合成染料和合成硝酸等。虽然这些均为合成化合物, 但都比较简单。1869 年, 英国人把樟脑混杂在碳化纤维素之中制成赛璐珞。1871 年, 德国人德莱赛用木材纤维制成化学纸浆, 以后被普遍用于造纸工业。到 19 世纪末的 1892 年, 德国人克鲁斯 (1855—1935) 等人用木纤维制成人造丝。这些都是利用天然长纤维制成的, 还不是合成制品。真正作为人工合成的高分子物质, 首先是在美国获得成功的。1909 年, 美国化学家巴克兰特用甲醛制成塑料, 即酚醛塑料, 亦被命名为“巴克兰特塑料”。这是最早由小分子制成的高分子化合物。

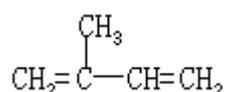
1920 年, 高分子化学与合成化学在发展中进入了一个新的阶段, 可以说, 合成橡胶、合成塑料、合成纤维三大合成材料的迅速发展从此揭开了序幕。

(1) 合成橡胶

橡胶最初取自于植物的汁液, 再经加工而为成品, 以满足各种用途。在南美及亚洲的热带地区遍布着橡胶园。早在 19 世纪, 人们就意识到, 树上

流淌的胶汁可能有一定用处。最初，人们用橡胶作成的圆球进行玩耍，后来又用橡胶做擦子，可抹擦铅笔的笔迹。到 1839 年，美国人古德依尔（1800—1860）偶然发现橡胶与硫黄混合，可使橡胶冷硬热粘的缺点得到克服，因而使橡胶变得柔软而有弹性，于是橡胶制品便大大发展起来。其中一项最重要的发明是英国工程师汤姆逊于 1845 年发明的汽车轮胎。

橡胶的用途越来越广，而天然橡胶的生产由于地域和产量的关系，很难满足日益发展的工业生产和军事装备的需要。于是，不少国家开始着手研究人造橡胶技术，以解决天然橡胶原料供应不足的问题。19 世纪上半叶，法拉第（1791—1867）和李比希（1803—1873）等著名科学家就已投入这项研究工作。在对天然橡胶化学组成的探求中，到 19 世纪末清楚了橡胶低馏物的成分为 C_5H_8 ，即异戊二稀，并由蒂尔登于 1892 年确定了它的化学结构式：



从此便开始了用异戊二稀聚合成橡胶的研究。1909 年，德国化学家霍夫曼和库特尔提出了异戊二稀热聚合专利。1911 年，德国的杜依斯堡完成了橡胶的人工合成，并于次年合成橡胶制品——轮胎，送到纽约展出。

1895 年，汽车用上了充气轮胎，交通运输从此得以飞速发展。橡胶也成为重要的战略物资。在第一次世界大战期间，盛产橡胶的马来西亚亦成为战略要地。当时，协约国的海军封锁海上通道，使德国无法得到天然橡胶的补给。迫于这种情况，威廉二世下令，德国自己研制人工橡胶，以解决汽车轮胎的急需。在生产人工橡胶的过程中，德国采用乙炔路线，由丙酮先合成二甲基丁二烯，再聚合成“甲基橡胶”。在第一次世界大战期间，德国大约生产了 2500 吨甲基橡胶。由于这种橡胶成本高、质量差，战后便停止了生产。

20 年代中期，天然橡胶的价格受英、法等国的控制一再上涨。缺少天然橡胶资源的美国、德国和苏联又重新加紧对合成橡胶的研究。1928 年，美国化学家卡罗泽斯（1896—1937）和美籍比利时化学家纽兰德（1878—1936）用乙炔作原料得到氯丁二烯聚合成“氯丁橡胶”。

1930 年，德国和苏联先后改变了技术路线，采用丁二烯作单体，合成了“丁纳橡胶”。1934 年，德国采用“乳液共聚合”生产出“丁苯橡胶”和“丁腈橡胶”。而丁苯橡胶的性能和天然橡胶很是相似。从此，人们可以用人工合成橡胶的办法来应付天然橡胶的不足了。在第二次世界大战中，德国就是以丁苯橡胶解决了天然橡胶原料不足的问题。

第二次世界大战中，日本占领了马来西亚，切断了美国天然橡胶的供应线。美国不得不加速合成橡胶的研究，除了大量生产丁苯橡胶外，还建立了合成橡胶的技术体系。

第二次世界大战前夕，全世界使用的基本是天然橡胶。而据不完全统计

计，第二次世界大战爆发后的 1941 年，全世界使用的橡胶中，124 万吨为天然橡胶，7.3 万吨为合成橡胶；到 1945 年，天然橡胶使用量为 26.3 万吨，合成橡胶使用量则达到 86.5 万吨。由此可见，合成橡胶在生产、生活和军用方面所发挥的巨大作用。

（2）塑料的人工合成

工业的发展，需要性能更强的更多样的新材料来代替传统的材料。质量好、价格低的适用材料，成为各国研究和追求的目标。早在 19 世纪 60 年代，就有人悬赏征求象牙代用品。1869 年，美国的海亚特（1837—1920）利用二硝酸纤维与樟脑混合得到柔韧并易于加工成型的确化纤维塑料——赛璐珞。这种新材料的物理特性酷似象牙。因此，人们用它来制作大量廉价的“象牙制品”，后来又用来制作台球、玩具、衬衫领子等等。1884 年，美国人伊斯曼用赛璐珞成功地制作了照相底片、电影胶片等。赛璐珞是最早投入大规模生产的塑料，因此，它的发明在塑料加工工业上，有着重大的意义。但它还不是真正意义上的人工合成塑料，而仅是一种天然纤维改性塑料。

合成塑料的研究最早当始于德国的拜耳（1835—1917）。1872 年，拜耳发现苯酚和甲醛在酸存在下，能形成树脂状物质。实际上，这是一种酚醛塑料的雏形。后来，许多人进行了这一方面的研究，旨在得到一种可溶性虫胶代用品。直到 1907 年，美国人贝克兰德（1864—1944）在前人工作的基础上，以煤焦油为原料合成了最早的塑料——酚醛树脂。同时还制成了另一种树脂，这就是既可溶又易熔的虫胶代用品。酚醛树脂可用于制作电气绝缘材料。1910 年，贝克兰德使酚醛树脂投入小规模生产。第一次世界大战结束后，他又在世界各地开设分厂。1925 年，他又改进了工艺方法。到 1939 年，世界酚醛树脂的年产量已达 20 多万吨，生产能力已达到可观规模。到 30 年代，有机化学建立了高分子链结构理论，并开始自由基聚合反应的理论研究，“连锁反应”、“缩聚反应”等机理逐渐得到阐明，高分子聚合方法大为简化，塑料工业由此得到迅速发展。

1928 年以前，投入工业化生产的塑料仅有酚醛树脂。直到 1937 年以前，酚醛树脂占据了世界塑料市场，可谓独领风骚。1912 年，氯乙烯的聚合已经实现，但因加工困难而未能投入生产。1928 年，氯乙烯与醋酸乙烯共聚成功。美、德等国家于 1935 至 1937 年将其投入工业化生产。1932 年，英国卜内门公司又发现了磷酸酯增塑剂，并于 1937 年起大量生产聚氯乙烯。这种热塑性塑料被用于制造化工设备以代替某些钢材，从此，聚氯乙烯很快就成为产量最大的热塑性塑料。1927 年，德国的罗姆—赫斯公司先后在德国、美国生产了聚甲基丙烯酸甲酯即“有机玻璃。”英国帝国化学公司也进行了有机玻璃的研究，希尔博士领导的研究小组，于 1931 年 11 月获得了专利。后来，他们把专利转让给美国的杜邦公司。1936 年秋，杜邦公司开始生产有机玻璃。在第二次世界大战中，这种有机玻璃被用来制作飞机座舱罩，效果很好。

德国在 1930 年、美国在 1934 年又开始生产聚苯乙烯用作优异的高频绝缘材料。1938 年，美国的杜邦公司开始研制聚四氟乙烯，1950 年终于取得了成功，并将这种绝缘性能和耐化学腐蚀性能均属优异的塑料投入工业化生产。

聚乙烯塑料的发明颇费周折。它是由乙烯在高压下聚合而成。英国帝国化学公司在 20 世纪 20 年代派员到荷兰和美国学习压力效应技术。1932 年 1 月，英国帝国化学公司的佩林等决定系统研究高压对化学反应的影响。

1933 年 3 月，吉布森在进行乙烯和一氧化碳的混合物实验时发现丙烯醛固体聚合物，在包含乙烯和苯甲醛的实验中又制成了可能是乙烯聚合物的白色腊状固体，但因慑于高压乙烯爆炸问题而中断了研究工作。后来，解决了安全问题，吉布森和佩林决定再次研究乙烯和一氧化碳的高压反应，但又由于装置不能保持高压而失败。然而在拆卸装置时发现了少量白色粉末，它具有和尼龙一样的优良性质，可制细丝和薄膜，并有化学稳定性和绝缘性。于是他们在英国帝国化学公司登记了专利。这就是最初形成的聚乙烯。

由于聚乙烯需在高压下，并维持中等程度的反应温度才能制成，而能满足这两个条件的设备，当时的技术状况是很难办到的。因此，聚乙烯实现工业化生产的技术条件远未成熟。1935 年，英国卜内门公司的弗塞特经过数年实验后，终于制成高压聚乙烯，并于 1939 年投入工业化生产。由于聚乙烯的特有性能和大规模生产的实现，使这种材料成为制造海底电缆和高频雷达设备的重要原料。后来，德国化学家齐格勒（1898— ）发现了在常温常压下制造聚乙烯的新方法，更是大大促进了聚乙烯生产的发展。

塑料问世之后，发展极为迅速，产量、品种不断增加，用途不断扩大。在工业生产和社会生活领域中，塑料逐渐代替金属、木材和水泥，发挥着越来越大的作用。

（3）合成纤维

几千年来，大自然恩赐的天然纤维是人们衣着穿戴的主要原料，如植物纤维棉、麻，动物纤维羊毛、蚕丝等。随着人们物质文化生活水平的不断提高，天然纤维已不能满足人们的需要。科学技术的发展，不断创造着奇迹，而化学创造的奇迹——化学纤维实现了“人工制丝”的梦想，弥补了天然纤维的不足。

化学纤维在发展中经历了人造纤维和合成纤维两个阶段。用某些天然高分子化合物或其衍生物为原料制成的纤维总称人造纤维。19 世纪末，化学成功地实现了天然纤维素的改性，在制成硝酸纤维的基础上研制出了人造丝。其后粘胶纤维取得成功并很快获得广泛应用，形成巨大的生产规模。在此期间，法国、德国和英国先后建成了生产人造丝的工厂。1940 年以后，粘胶纤维在轮胎工业中占据了重要地位，成为轮胎帘子线的重要原料，20 世纪 40 年代后期，粘胶纤维的生产开始走向鼎盛时期。

人造纤维的第二大品种是醋脂纤维。1914 年，瑞士的德莱弗斯兄弟实

现了醋脂纤维素的工业化生产。起初，这种原料被用来制造飞机表面的涂料，第一次世界大战后，则更多地用于丝绸工业，因为醋脂纤维是一种极好的人造丝原料。

合成纤维是以人工合成的高分子化合物为原料，经纺丝和后加工而制成的化学纤维。应当说，聚氯乙烯纤维是最早的合成纤维，1912年，德国化学家克拉特就取得了该项研究的专利。但因聚氯乙烯纤维存在软化点低等缺点，而未能得到进一步的发展。

1920年，德国化学家斯陶丁格(1881—1965)提出了链型高分子的概念，认为，许多相同的小的单元借化学键重复连接而形成大分子长链。打破了长期以来把高分子看成是小分子的缔合物或大环化合物的观点，为高分子化学的建立奠定了基础。

与此同时，美国的杜邦公司化工部，也看准了合成化学工业。他们专门拨款25万美元作为研究经费，并于1928年聘请了留德回国的32岁化学家卡罗泽斯(1896—1937)专门进行合成纤维的研究。1929年，卡罗泽斯开始进行“缩合反应”的研究。他首先研究氨基和羧基的分子缩合，企图使之成为大环结构分子。在一次试验中，他意外地将它们缩合成长链分子。卡罗泽斯意识到这一意外收获的经济价值。1935年，卡罗泽斯终于在聚酰胺纤维的研究中取得了重要突破，即由二元胺与二元酸通过缩合反应制成了世界上第一种人工合成纤维——聚酰胺—66，定名为“尼龙”，又称“耐纶”。1938年，“聚酰胺—66”实现了工业化生产。卡罗泽斯合成纤维的成功不仅证实了高分子为长链结构的理论，还将纺织工业推进到合成纤维时代。尼龙很快便成为世界商行的紧俏产品，它的制成品从军用降落伞到尼龙丝袜，可谓种类繁多，美观耐用。合成纤维的问世引起了纺织工业的又一次革命。

继尼龙之后，德国于1939年合成了另一种聚酰胺纤维——尼龙—6，亦称贝龙。之后，法国的尼龙—11，苏联的尼龙—7，日本的尼龙—9、尼龙—3、尼龙—4等陆续投入生产。总之，在尼龙—66合成之后，又有很多种人工合成纤维相继问世，仅美国杜邦公司就合成了几百种聚酰胺纤维。但尼龙—66和尼龙—6在第二次世界大战后的一段时期中，一直占据着合成纤维的主导地位。

聚脂纤维亦称涤纶，是继聚酰胺纤维之后又一种重要的人工合成纤维。早在1930年，卡罗泽斯就进行过聚脂拉丝的研究，由于选用的材料不适宜，未获得成功，并因此放弃了这一研究，而转向对聚酰胺纤维的研究。后来，英国人温费尔德和迪克逊一起分析了卡罗泽斯对聚脂纺丝的研究过程以及有关的文献资料，找到了卡罗泽斯失败的原因，作了进一步的探索，1940年，他们以对苯二甲酸和乙二醇为原料，制成了聚对苯二甲酸乙二醇酯，并成功地制得优质纤维。

继聚脂纤维之后，陆续获得成功的合成纤维产品依次是聚丙烯腈纤维(又称腈纶)、聚丙烯纤维(又称丙纶)、聚乙烯醇纤维(又称维纶)。这

三种纤维都是在 20 世纪 50 年代实现工业化生产的。合成纤维的生产工艺主要有两种，一种是溶液纺丝，一种是熔体纺丝。溶液纺丝是把原料聚合物溶解于特定的溶剂中，再行纺丝。聚氯乙烯纤维（氯纶）、聚丙烯腈纤维（腈纶）、聚乙烯醇纤维（维纶）等都是采用这种生产工艺。熔体纺丝则是把原料聚合物加温到熔点以上，使其呈熔融状态时即行抽丝。聚酰胺纤维（尼龙）、聚脂纤维（涤纶）、聚丙烯纤维（丙纶）等都是采用这种生产工艺。

随着人工合成纤维质量的不断提高，品种的日益增多和产量的日趋增大，天然纤维在人们社会生活中所占的应用比例不断减少，在许多领域中的地位被人工合成纤维所替代。而且，人工合成纤维在某些方面具有天然纤维所无法比拟的良好性能，如防水、防蛀、耐磨等，因而备受人们的青睐。

（4）合成药品

有机合成农药。为了保护农作物免受病虫害的侵袭，适时地向农作物喷施农药，已经成为农业生产过程中一个必不可少的环节和保证丰产丰收的有利措施。

农药的使用可谓历史久远，而有机合成农药的使用却是始于 20 世纪 40 年代的事情。最早使用的有机合成农药则是滴滴涕和六六六。滴滴涕是合成化合物二氯二苯三氯乙烷（Dichloro—Diphenyl—Tri—chloroethane）简称 DDT。早在 1874 年，德国化学家齐德勒在撰写博士论文时曾合成了滴滴涕，但尚未发挥实际效用。其后瑞士化学家缪勒在 1939 年合成了滴滴涕并发现了它的杀虫效能。一次，意大利那不勒斯城发生斑疹伤寒，由于喷洒了滴滴涕，使斑疹伤寒得到有效控制。由于滴滴涕杀灭蚊、虱的成效极其显著，对人类的健康起到了保护作用，因而缪勒在 1948 年获得了诺贝尔奖。

六六六是 $C_6H_6Cl_6$ 的简称。六六六是由法国的杜皮尔和英国的斯拉德分别于 1943 年和 1945 年独立研制成功的。由于滴滴涕和六六六适于杀灭多种昆虫，且效果好、成本低，因此从 20 世纪 40 年代起，发展很快，并得到普遍推广和使用。从 1937 年起，有机磷化合物也陆续制成了一大批杀虫剂新农药。

从六六合成到“磺胺类家族”的出现。1909 年，德国医学和生物化学家艾里希（1854—1915）与其助手日本人秦左八郎合成了对引起梅毒的螺旋体非常有效的化合物——六六，亦称“洒尔瓦散”。六六是首次人工合成的抗感染药，随后各类磺胺药陆续研制成功，化学合成药由此获得空前的发展。

艾里希在研究灭菌药的过程中，发现有些染料对细胞组织有选择性染色能力，进而发现有的染料可以使某些寄生细菌着色而不影响人体的细胞组织，于是他大胆推断把这种染料与某种能杀灭细菌的基团结合，就有可能制成新的特效药。在这一理论的指导下，他发现了能杀死锥虫的“锥虫红”，进而又研制出了抑制梅毒螺旋体的“六六”。

此后，德国化学家在 1924 年合成了“扑疟喹”，1930 年合成了阿的平。

这两种新药都可代替奎宁治疗疟疾。1932年，德国化学家杜马克制出了一种红色偶氮染料，定名为百浪多息，他在实验过程中发现，将百浪多息注射到小鼠的血液内，有抵抗链球菌感染的效能。恰在此时，他的女儿因手指破伤而致患败血症，在濒临死亡而无计可施时，他决定在女儿身上试用百浪多息，谁知竟产生神奇的效果，女儿很快痊愈。在进一步研究中发现，百浪多息在试管中并无杀菌作用，只有在机体内才能杀灭链球菌。

1935年，法国巴斯德（1822—1895）研究所的研究人员特雷弗尔及其同事断定百浪多息一定是在活体内发生某种变化，使之成为能杀灭细菌的另一种东西。于是他们进行了实验验证，结果表明在人体中使用百浪多息后，尿中含有氨基磺胺。百浪多息在试管中无抗菌作用，而氨基磺胺在试管中却有很强的抗菌性。因此他们认为百浪多息能在体内降解，释出氨基磺胺，而产生治病效果。以后的实验充分证明了这一结论。

随着人们对磺胺类药物的认识和研究工作的进一步发展，各国科学家发现磺胺是抑菌作用的基本结构，它具有广谱抗菌效能，于是以磺胺为母体合成了许多衍生物新药，如1937年英国制出了“磺胺吡啶”，1939年美国制出了“磺胺噻唑”，1941年又制出了“磺胺嘧啶”等等。于是人们在新的合成药物中发现了磺胺类这个大家族。由于磺胺药物是用化学方法合成的，因而生产工艺简单、成本低廉、使用方便，各国都进行大量生产。1935

年—1944年可以说是磺胺类药物的兴盛时期。特别是美国在第二次世界大战期间磺胺药物的生产达到最高峰，年产量高达4500吨。磺胺类药的合成与广泛应用使当时许多细菌性感染，如肺炎、脑膜炎等都得到了有效的治疗，这无疑是人类医药事业发展史上的一个巨大成就。

从六六六的诞生到磺胺药物的大量生产，是人们在实践中不断探索、不断总结经验的结果，也是不断地把感性认识上升到理性认识的生动体现。

抗生素的合成。抗生素指微生物产生的物质经高度稀释后对其它微生物所产生的对抗作用。抗生素的利用古已有之。在中国古代就有用豆腐上的霉菌治疗疮、痛的记载。在欧美等地亦有用发霉的面包治疗溃疡和脓疮的土方妙法。但真正弄清霉菌治病的机理，并开始人工制取各种抗生素用于医疗事业，则是从弗莱明（1849—1945）开始的。

弗莱明是世界著名的英国医学科学家。他最早发现了青霉素，即配尼西林，从而揭开了世界医药发展史的新篇章。

1928年，弗莱明将在英国圣玛丽医院进行葡萄球菌（化脓菌）的研究。偶然一天，弗莱明发现葡萄球菌培养皿中有一种新奇的现象：在培养皿中出现了一些青色霉菌。凡与青色霉菌接触的地方，葡萄球菌都被杀死了，恰好形成了一个空圈。实验后发现，这种青色霉菌的培养液稀释500倍仍有很强的杀菌能力。在此之前，他曾发现了一种能杀死细菌的物质——“溶菌酶”（实际上也是一种抗生素）。因此弗莱明断定这种物质是普通面包菌（匍匐霉菌）的产物，并将其命名为“青霉素”。弗莱明这一研究成果写成论文，

作了如实的报道。遗憾的是由于研究条件的限制，弗莱明未能将青霉素提取出来，而这一重要成果当时也没有引起社会的重视，暂时受到埋没和冷落。

随着磺胺药物的广泛使用，有的细菌对其逐渐产生了抗药性，因此需要更为有效的抗菌药更新换代。第二次世界大战期间又急需大量的抗感染药投入使用。在这种情势下，人们又想到了弗莱明有重大意义的发现。

1939年，病理学家英籍奥地利人弗洛利（1896—1968）和德国出生的英国化学家钱恩（1906—1968）在弗莱明的支持和许多科学家的配合下开始了分离、提取青霉素的工作。工夫不负有心人，弗洛利和钱恩历经艰辛，终于从大量培养物中分离、提取出一小匙青霉素，为淡黄色粉末状物质。经稀释后实验，对多种细菌都有很好的杀菌效果。为了找到提高产量的方法以实现工业化生产，1941年，弗洛利前往美国，他到处寻找青霉素菌种，终于在垃圾堆一个腐烂的甜瓜上找到了理想的青霉素菌种，此后青霉素的培养和提取技术不断得到改进，青霉素的产量也随之得到大量增加。

青霉素的发现和成功使用，极大地引发了人们对抗生素进一步研究的兴趣，因而在20世纪40年代和50年代，在世界范围内形成了寻找抗生素新药的高潮，同时迎来了合成法制药的新时代。从此许多肆虐人类的细菌都被青霉素所降服，以往令人无可奈何的疾病，诸如肺炎、胸膜炎、白喉、梅毒等，也都得到了有效的治疗。自青霉素之后，链霉素、氯霉素、红霉素等数百种抗生素陆续研制成功。

由于弗莱明、弗洛利、钱恩在青霉素研制工作中作出了卓越的贡献，1945年共同获得了诺贝尔医学和生理学奖。

维生素的合成。磺胺药物的合成与大量生产，使医学进入了化学疗法的新阶段。抗生素的生物合成和大规模制取为抑制细菌感染，延长人的寿命产生了极大的作用。在医学科学发展的过程中，人们发现某些微量物质对人的生命和健康至关重要。这种特殊的营养成分就是维生素（又称维他命）。维生素的种类多达几十种，20世纪以来它们先后被发现和分离出来，但人工合成维生素主要是在30年代实现的。

在生活实践中，人们认识到有些疾病，如夜盲症、坏血病、脚气病、糙皮病、佝偻病等都与微量物质的缺乏有关。各国的生物化学家采用不同的方法分离出这种微量物质，1920年英国生物化学家德鲁蒙德提出了维生素这一概念。随之根据得到的先后及其作用命名了维生素A、维生素B、维生素C、维生素D、维生素E、维生素K等。后来又根据维生素的不同性质，将它们区别为水溶性（如B族、C族）和脂溶性（如A、D、E、K等）两大类。

维生素有的可从植物中提取，有的可从动物的乳液和肝脏中分离得到，但要作为医药使用，就必须实现工业化生产才能满足社会的需要。维生素的人工合成采用了两种方法：一是生物合成方法，二是化学合成方法。第一个人工合成的维生素是维生素C。1933年，以木糖为原料合成维生素C取得成功。同年，维生素A也用合成法制得。1935年，维生素B₂；1938年，维

生素 E；1939 年，维生素 K 陆续实现人工合成，只有维生素 D 实现人工合成较晚（1951 年）。因此 20 世纪 30 年代是维生素人工合成取得辉煌成果的时期。

六、核能的开发和利用

早在 1905 年，爱因斯坦在创立狭义相对论时就提出了著名的质量能量关系式 $E=MC^2$ ，从理论上预言了物质内部蕴涵着极大的能量，预示了核能利用的可能性。然而，直到 1938 年，人们发现了重核裂变现象后，才打开了核能库的大门，开始了核能开发和利用的新时代，而重核裂变现象的研究还得追溯至中子和慢中子效应的发现。

1. 中子和慢中子效应的发现

19 世纪 20 世纪之交，科学家们的研究表明，原子是由带负电的电子和带正电的原子核构成，又发现自然界中的一些重元素如镭、铀等可以自发放出射线而蜕变为其他元素，这些重元素发出的射线有 α 射线、 β 射线和 γ 射线，而 α 粒子是带 2 个单位正电荷的氦核， β 射线和 γ 射线，则分别是带负电的电子流和中性光子流。英国物理学家卢瑟福想，轻元素不能象重元素那样产生自发蜕变，如果施加强强的外力作用，例如用重元素释放出的高能粒子进行轰击，轻元素能否发生被动蜕变呢？

1919 年，卢瑟福和他的助手用镭放射出来的 α 粒子做“炮弹”去轰击氮原子核。检测发现，氮原子核受轰击后，衰变为氧，并释放出带一个单位正电荷的质子。实验可用以下的公式来表示：



卢瑟福的实验第一次实现了人工核反应，利用人为的方法把一种元素转变成了另一种元素。由于这个实验是一个吸收能量的变化过程，人们便没有将其与核能开发的可能性联系在一起。1921 年至 1924 年，卢瑟福用实验证明了，有十几种轻元素在 α 粒子的轰击下都可以象氮元素那样发生人工衰变，放出质子，同时转变为元素周期表中的下一个元素。于是人们认为，质子应该是原子核的组成部分。那么，原子核全部由质子构成吗？进一步的分析推翻了这种可能性。从氢原子看，其中有两个电子，要保持电中性，原子中必有二个质子，如果氢核全部由质子构成，其质量应等于 2 个质子的质量，而实际上，氢核的质量是单个质子的 4 倍。

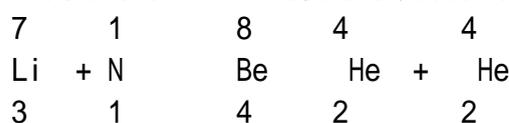
1920 年，卢瑟福预言，原子核内部可能存在质量与质子相同的中性粒子，他认为这种粒子能“很容易地打入到原子核内，或者和原子核结合起来，或者在它的强大场内蜕变”。卢瑟福设计了一些实验，试图验证中子的存在，但没有成功。12 年之后，他的预言得到了证实。

1932 年 1 月，伊伦·约里奥—居里（1892—1956）和她的丈夫约里奥—居里（1900—1958）用钋源放射出的 α 粒子轰击铍时发现，铍蜕变时产生一

种穿透本领很强的不带电粒子流。他们未曾注意到卢瑟福关于“中子”的预言，而认为这种中性粒子流是光子。英国物理学家查德威克（1891—1974）是卢瑟福的学生，自然透彻了解其老师“存在中子”的思想。当他得知约里奥—居里夫妇的实验结果时更猜想，铍蜕变时放出的中性粒子可能就是中子。他立即利用放射源钋发射的 α 粒子来轰击铍金属，对铍放射出的中性粒子进行鉴别后发现，这种中性粒子具有静止质量，而且速度也比光速小。因此，查德威克确定，约里奥—居里夫妇发现的中性粒子流不是光子流，而是卢瑟福所预言的中子流。

1932年2月，查德威克在英国《自然》杂志上发表了关于发现中子的札记。后来的实验证明，正如许多轻元素人工蜕变时均放出质子一样，许多元素受到外来作用都会放出这种中性粒子。人们因此确认了，原子核是由质子和中子组成的。中子的发现不仅对于人们认识核结构有重要意义，而且更重要的是它送来了打开核能库大门的钥匙。不过，当时人们并未认识到中子的发现在这一方面所具有的重大意义。

1932年，英国卡文迪许实验室的两个青年人瓦尔顿和考克罗夫特在卢瑟福的指导下，设计了一架巨型机器，被称为“当代炼金术”，采用几百万伏电压来加速质子，并用高速质子来轰击金属元素锂，结果一个动能为30万电子伏的质子被锂俘获后，形成一个原子量是8的不稳定的原子，它很快又分裂为两个原子量为4的氦原子并各拥有约860万电子伏的动能：



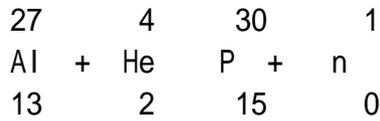
反应后多出的1690万电子伏能量应该是贮存于核中的能量所提供的。卢瑟福在皇家学会上报告了实验结果，这是直接用人工方法加速质子而未利用放射性元素所实现的核反应，不少人乐观地预感到原子能时代即将到来。

但是，由于当时从人工核反应中得到的能量只相当于实验所消耗能量的一个零头，还由于真正实现核能的开发不论在理论上还是在技术上都存在许多难以预料的困难，因此，一些著名的科学家如卢瑟福、玻尔等，对核能利用的估计都是很悲观的。1933年9月，卢瑟福在不列颠协会的演说中说：“一般说来，我们不能指望通过这种途径来取得能量，这种生产能的方法是极端可怜的，效率也是极低的。把原子嬗变看成是一种动力来源，只不过是纸上谈兵而已”。他还断言，人类永远也无法利用原子中的能量。

卢瑟福对核能开发的这种错误估计被认为是“他的一帆风顺的科学生涯中走错了几乎是仅有的一步”。1936年，玻尔也认为：“我们关于核反应的知识越广，离原子能可用于人类需要的时间越远”。这种悲观的估计在核裂变现象发现前是很难免的。

1934年1月，约里奥—居里夫妇利用钋源放射出来的 α 粒子去轰击铝。

他们发现，铝靶受轰击后有质子和少量的中子发射，停止用 α 粒子轰击后，发射还能持续几分钟，放出的是 γ 射线。原来，铝核与 α 粒子结合后，变成一种原子序数为 15 的新原子核，是天然状态下不存在的放射性同位素磷：



这种很不稳定的同位素，继续发射出电子进行 β 衰变，最后变成稳定元素硅。他们还用 α 粒子轰击硼和镁，得到放射性同位素氮和放射性同位素硅。1934 年 1 月，约里奥—居里夫妇公布了用 α 粒子轰击轻元素，产生人工放射性元素的实验结果。放射性元素可由人工产生的发现具有重大意义，约里奥—居里夫妇也因此获得 1935 年化学诺贝尔奖。

人工产生放射性元素的发现开辟了一个新的实验研究领域，人们对寻找更多的人工放射性同位素产生了极大的兴趣。但是，进一步研究发现，用 α 粒子作“炮弹”去轰击原子核，对重元素往往不起作用。于是，科学家们试验用能量更强的 γ 粒子流来进行轰击实验，但对重元素仍无效果。这个问题引起意大利物理学家费米（1901—1954）的兴趣，但他的想法与众不同。他没有在提高“炮弹”粒子的速度、强度上下功夫，而是设想更换另一种“炮弹”。他认为，带正电的 α 粒子与重元素的原子核有较强的库仑作用，而中子不带电荷，它既不会被原子中的电子所吸引，也不会受到原子核的排斥，因此，用中子作“炮弹”也许不仅能使稳定的轻元素转变为放射性元素，也有可能使稳定的重元素转变为放射性元素。

1934 年的上半年，费米和他的助手从原子序数最低的氢元素开始，按照周期表的顺序，用中子逐个轰击，从氢一直到氧都没成功，到第九个元素氟才得到了放射性同位素。他们继续实验，短短的几个月内，对 63 种元素进行了轰击实验，得到了 37 种放射性同位素。1934 年 10 月，费米小组在实验中发现，在中子源和被轰击的银金属之间放置其它物质会影响所产生的放射性同位素的放射性强度。

费米建议在中子源和被轰击的银金属之间放置石蜡来进行实验，结果意外地发现，产生的人工放射性比原先增强了一百倍。费米认为，这是由于中子通过含氢的石蜡时，与氢原子弹性碰撞而减慢了速度，与快速中子相比，减慢了速度的中子被银原子俘获的机会就更大，因而，慢中子具有更强的激起核反应的能力。这就是说，中子通过石蜡后变成了更加优良的“炮弹”。为了进一步验证这种想法，他们在养鱼池中做实验，用水代替石蜡，结果发现，水也具有使中子慢化的作用。费米发现的慢中子及其有关效应，对后来获取核能的研究具有极其重要的意义，被认为是“核时代的实际起点”。费米因成功地用中子轰击原子核，创造了一系列新的放射性同位素以及发现慢中子效应而获得 1938 年诺贝尔物理学奖。

2. 铀核裂变和链式反应的研究

费米小组用中子轰击周期表中许多元素的原子核，象他们所预料的那样，许多元素原子核吸收一个中子后会衰变成为周期表中下一个元素的原子核。他们设想，用中子轰击周期表中最后一个元素铀，会不会产生当时元素周期表中所没有的第 93 号元素，即超铀元素呢？他们用中子去轰击铀，果然发现，中子被俘获，生成物中放出 γ 射线。对生成物的分析虽然也有迷惑不清之处，但他们认为，其中至少有一种放射性元素是所希望的 93 号元素。1934 年 5 月，他们发表了实验报告。实际上，他们当时实现的正是核裂变实验，但由于受已有实验结果的误导，认为发现的是超铀元素，而错过了一次重大发现的机会。

费米小组发现超铀元素的消息引起了科学家们极大的兴趣，但少数科学家指出，费米得到的新物质并不是超铀元素，而是第 91 号元素镤的同位素。当时在柏林威廉研究所工作的德国放射化学家哈恩（1879—1968）和奥地利女物理学家麦特纳（1878—1968），曾全面研究过镤的化学特性。为了验证费米的实验结果，他们也用慢中子轰击铀，但未在新物质中发现镤。他们的实验似乎证实了费米发现超铀元素的说法，但根据对生成物的分析，他们认为，他们的实验中不仅得到 93 号元素，还有 94 号元素或其他的元素。

世界上有不少实验室当时都进行了类似的实验，而且都得出大致相同的结论，而德国的一对年轻的化学家诺达克（Nod-dack）夫妇却提出了完全不同的看法。从 1929 年起，他们就致力于发现天然超铀元素的研究工作。他们批评费米，在所作的化学分析中没有提出令人信服的论据来证实发现超铀元素的结论。他们提出了一些与众不同的大胆的假定。1934 年，诺达克夫人写信给《应用化学》杂志说：“铀原子核在中子的作用下发生了裂变反应，这个反应与到目前为止发现的原子核反应有很大的区别。似乎在用中子轰击原子核时，原子核分裂成同位素，但不是被轰击元素的相邻元素。”然而，费米没有认真对待这个正确的批评，他认为，能量这么小的中子要击破坚固的原子核是完全不可思议的事情。当他了解到放射化学权威哈恩也验证了自己的实验时，更坚信了自己的正确性。他再一次失去做出一项重大发现的机会，使重核裂变的发现推迟了许多年。

1938 年，伊伦·约里奥—居里和沙维奇在用中子轰击铀的实验中发现，生成物中有一种半衰期为 3.5 小时的放射性元素，其化学特性接近于镧，与铀元素以及超铀元素在周期表中相距甚远。后来证明，此元素确是周期表中 57 号元素镧—141。他们发表文章，公布了实验结果。遗憾的是，他们没有继续追踪、分析镧的来历，也错过一次重大发现的机会。

1938 年，作为犹太人的麦特纳，为了免遭法西斯的疯狂迫害，不得不离开了德国。哈恩则与物理化学家斯特拉斯曼继续进行慢中子轰击铀的实验。斯特拉斯曼读了伊伦·约里奥—居里的文章后立刻认识到，伊伦·居里揭示

出一种过去有关实验中所未曾注意到的新问题。他急忙来到哈恩面前叫道：“你一定要读这篇报道”。但哈恩由于同约里奥—居里夫妇就一些实验结果的分析发生过争论，感情上有点偏见，对伊伦·约里奥—居里的文章也不屑一顾。斯特拉斯曼便向哈恩叙述了文章的基本内容。不想，哈恩听后大为震惊，顾不得把雪茄烟吸完，把还燃着的烟丢在办公桌上，就同斯特拉斯曼一起跑到实验室去了。

之后的几个星期，他们用伊伦·约里奥—居里的方法重复中子轰击铀的实验，他们在新物质中发现了一种化学特性与镭相似的物质，他们猜想，这种物质可能就是镭，因为，镭的原子序数 88 与铀的原子序数 92 相近。他们在生成物中加入了与镭的化学特性相似的钡，试图利用钡作为载体，把“镭”从生成的混合物中带出来，再把钡与“镭”分开。他们以前从混合物中分离某种物质时，经常采用这种方法。但是，他们却始终未能分离出所谓的“镭”。实验否定了他们的推想。

经过对实验结果的精密的分析，他们终于认定，所得的生成物并不是与铀相邻的元素，而是几种与铀相距甚远的放射性同位素。尽管他们对实验结果深信不疑，但由于与已有的一些结论相悖，因此，他们在准备正式公布实验结果的文章中使用了以下的谨慎措辞：“作为这些研究的结果，我们必须把我们以前的蜕变图式中所得到的那些物质的名称更改一下，我们以前称为镭、锕和钍的，应改为钡、镧和钷。作为同物理学家关系密切的核化学家，要做出这样一个结论，我们是十分勉强的，因为它同以前的核物理学全部经验都发生矛盾。”他们对自己的结论总觉得犹豫、疑惑，甚至把文章投入信箱后还想从中再拿出来。他们的文章于 1939 年 1 月 6 日发表了。

论文发表之前，哈恩先把实验结果和存在的疑难问题通告给与他共事 30 多年的麦特纳。这位女物理学家收到信后很激动，她深知这位长期合作者工作的准确性和严肃性，她意识到哈恩的实验结果意义重大。

麦特纳经过认真思索后，提出了一个大胆的设计，她认为，铀的稳定性很小，铀核俘获中子后可能分裂成大小相近的两个原子核。当时，她的侄子弗瑞士正好利用圣诞节的休假从哥本哈根玻尔的研究所前来看望她。他们两人一连几天对哈恩的实验结果进行了激烈的讨论。

他们想到了玻尔当时刚刚提出的原子核液滴模型。这是早期的一种原子核模型，它把原子核比作一个液滴，将核子即中子和质子比作液滴中的分子。液滴受扰动就会活动起来，参与扰动的能量足够大，液滴就有可能分裂为更小的水滴。运用玻尔的液滴核模型，他们对哈恩的实验作如下解释：外来的中子闯入原子核时，这个“液滴”即发生剧烈震荡，开始变成椭圆，然后变为哑铃形，最后分裂为两半。

他们把这种类似细胞分裂的过程称为核分裂。麦特纳又对反应前后物质的原子量进行了分析比较，发现铀核分裂后生成物的原子量总和并不等于铀的原子量，而是小于铀的原子量。她称这种现象为“质量亏损”。根据爱因斯

坦的质能关系式，她计算出，每个铀原子核裂变时，因质量亏损而释放出的能量应为 200 兆电子伏。与只能释放几个电子伏的化学反应相比，铀核裂变释放的能量大得惊人。

弗瑞士返回哥本哈根后，把他们姑侄二人对哈恩实验结果的分析告诉了玻尔。玻尔听说自己的原子核液滴模型可以很好地解释哈恩的实验，感到非常兴奋，并责备自己为什么这么久未能发现这一点。他建议弗瑞士对铀核分裂所释放的能量进行测定。弗瑞士很快拿出了实验结果，并完全证实了麦特纳的分析。

1939 年 2 月，麦特纳与弗瑞士一起在《自然》杂志上发表了论文，解释了哈恩的实验结果，并指出，因质量亏损，核分裂必然伴随着巨大的能量释放。

在弗瑞士的实验尚在进行中时，玻尔已前往华盛顿参加第五届理论物理会议。玻尔在途中进行了深入的思考和计算，确信麦特纳对哈恩实验的解释是正确的。会前，他便写好了一篇对重核裂变的机制进行评论的文章，题目是“重核的分裂”。

当玻尔在会上介绍了哈恩的实验和麦特纳姑侄二人的解释后，铀核分裂的消息引起了强烈的反响，一些物理学家赶紧打电话通知自己的实验室安排实验，有的则立即赶回自己的实验室。当晚，卡奈学院、哥伦比亚大学、霍普金斯大学等的实验室都进行了同样的实验。重核裂变的现象和理论解释很快获得了世界的承认，哈恩因发现重核裂变的实验而获得 1944 年诺贝尔奖。

费米的妻子是犹太血统。为了躲避法西斯匪徒的迫害，费米利用 1938 年 11 月到瑞典接受诺贝尔奖的机会，携带全家离开德国。1939 年初到了美国，在哥伦比亚大学任教。他从玻尔那里得知核裂变的消息后，终于明白了他用慢中子轰击铀核时得到的所谓“第 93 号元素”，实际上是核裂变的生成物。他为自己当时错过了一次重大发现的机会，感到十分遗憾，要不然，核裂变的现象可以提前 4 年得到发现。不过，费米没有沉浸于懊悔中，他从验证麦特纳的解释中发现了另一个非常重要的问题，那就是，核裂变过程中能否产生更多的中子。如果铀核分裂时，能放出两个以上的中子，这些中子将作用于其他铀核，使它们再发生分裂，于是，有 4 个中子，又会有 8 个中子……，如此下去，形成“链式反应”，铀核裂变便会自发地进行下去，并在极短的时间释放出极大的能量。

其他科学家如约里奥—居里夫妇以及移居在美国的匈牙利青年物理学家西拉德（1898—1964）也都思考了这个问题，他们和费米都很快地进行了证实。实验表明，铀核分裂约产生 3.5 个中子，“链式反应”的速度极高，两次反应的间隔只有五十万亿分之一秒。1939 年春，费米和约里奥—居里夫妇分别在《自然》和《物理学评论》上发表论文，介绍了他们的实验结果。

3. 曼哈顿工程——第一批原子弹的研制

重核裂变和链式反应的理论和实验为开发和利用核能准备了条件，同时，科学家们也看到了利用这种科学研究成果制造威力无比的战争武器的可能性。

1939年春，第二次世界大战爆发在即，有消息表明，德国在实现重核裂变后正组织力量进行链式反应的研究。西拉德等科学家意识到，如果纳粹德国首先研制成功原子武器，对世界文明的威胁将是多么巨大。他们积极活动，提议美国和欧洲的科学家共同保守有关核裂变和链式反应的秘密，并设法提醒美国政府和军方重视原子能研究的重大意义。

1939年3月17日，费米带着哥伦比亚大学物理系主任乔治·彼格拉姆的介绍信去拜会了美国海军军械部长胡泊上将。同他讨论了制造原子弹的可能性，但没有产生多大影响。后来，西拉德起草了一封要求美国政府赶快研制原子弹的信，出于对全人类命运的担忧，爱因斯坦在这封信上签了名。西拉德设法通过经济学家萨克斯博士来呈递这封信。萨克斯是罗斯福总统的朋友和顾问，1939年10月11日，他亲自将信交给了罗斯福。

罗斯福对政府当时马上就出面干预此事，尚犹豫不决。后来，萨克斯用拿破仑最终失败的历史教训说服了罗斯福。萨克斯向罗斯福讲述了拿破仑和富尔顿（1765—1815）的故事：美国发明家富尔顿于19世纪初研制成以蒸汽为动力的轮船，他曾建议拿破仑建立一只由蒸汽舰艇组成的舰队，认为这样的舰队不论在什么天气下都能在英国登陆。但拿破仑觉得，军舰不用挂帆是不可思议的事情，竟把富尔顿赶了出去，英国历史学家阿克顿爵士后来评论说，这是由于敌人缺乏见识而使英国得以幸免的一个例子，如果当时拿破仑稍稍动一动脑筋，再慎重考虑一下，那么，19世纪的历史进程也许完全是另外一个样子。罗斯福总统终于被萨克斯的一番话打动了，并指示，对西拉德等人信中所提的事要立即采取行动！不久，一个专门的“铀顾问委员会”便成立了。

1941年12月6日，在珍珠港事件的前一天，美国科学研究发展总局局长宣布了全力以赴地制造原子弹的决定。1942年，盟国的原子能计划进入一个崭新的阶段，美国原子能研究的最高控制权也转移到了军政委员会。是年8月13日，研制原子弹的全部计划为保密而取名“曼哈顿工程”。刚刚晋升为准将的职业军人格罗夫斯被任命为工程的行政负责人。格罗夫斯曾接受过工程教育和专门的军事教育，具有组织和领导大规模工程的丰富经验，是组织才能很强的领导者。该计划集中了理论物理、数学、辐射化学、实验技术、冶金、爆炸工程、精密测量等方面的著名科学家和专家，包括费米、康普顿（1892—1962）、冯·诺依曼、劳伦斯（1901—1958）、尤里（1893—1981）、奥本海默（1904—1967）等。

制造原子武器在理论上虽已没有疑问，但从理论知识到工程实践，从科学家的实验室到制出实物还需要进行大量的应用研究、工程研究和生产工艺

等方面的研究，要解决许多极为复杂的技术问题，而且，需要大规模有组织的协作和投入大量的人力、物力和财力，这些在和平时期是很难想象的。战争的形势促成美国研制原子武器，希特勒在欧洲的法西斯暴行迫使当时世界上许多最优秀的科学家云集到美国，这些都构成了美国研制原子弹的优越条件。

当时的有关实验证实，在天然铀中主要有铀 235 和铀 238 两种成分，两者比例为 1 比 140。铀 235 在中子作用下能够发生裂变，慢中子可增加其裂变的机会，而中子不能使铀 238 裂变，相反被铀 238 俘获。要保证链式反应的继续，当时有两种办法：一是把铀 235 从天然铀中分离出来提高其浓度；另一种就是使铀核分裂后新生的快中子迅速减慢速度成为慢中子，使铀 235 裂变的机会大大超过中子被铀 238 俘获的机会。研究表明，石墨是很好的减速剂，在以石墨为减速剂有足够天然铀的反应堆中能够实现链式反应。但是，要在原子武器里实现链式反应，要求则不同了，这种武器要求链式反应的速度越快越好，而体积是越小越好。因此，原子弹中只能用浓度很高的铀 235。

1940 年夏，加利福尼亚州大学的劳伦斯和他的同事们研究时发现，铀 238 俘获一个中子后，就变成铀 239，铀 239 很快衰变为镎 239，镎 239 又很快衰变为钚 239，而钚是一种人工核燃料。如果链式反应在以天然铀为核燃料以石墨为减速剂的反应堆中能够持续下去，那么，反应堆中的铀 238 就会变成人工核燃料钚。当时，还不能肯定生产铀 235 和生产钚 239 的方案中，哪一个方案较好，因此便采取两种方案双管齐下的办法。

1942 年初，哥伦比亚和普林斯顿研究小组都转移到芝加哥大学，成立了所谓的冶金实验室，诺贝尔奖获得者康普顿为实验室主任。1942 年 11 月，芝加哥大学的操场上开始建立第一座核反应堆——“芝加哥一号”。该反应堆以天然铀为核原料以石墨为减速剂，用能够随时插入和抽出其中的镉棒为控制器。镉棒能象海绵吸水那样吸收中子，可以对链式反应进行控制。12 月 1 日下午，这个反应堆达到了临界体积，堆宽 9 米，长近 10 米，高 6.5 米，重 1400 吨，其中有 52 吨铀和氧化铀。12 月 2 日，在费米的主持下，世界上第一座核反应堆投入运行。下午 3 点 20 分，当最后一根镉棒拖出来后，铀核裂变进入自持阶段，人工控制核链式反应取得了首次成功。反应堆的全部输出能量很小，但在核能开发和利用的历史上，具有划时代的意义。

“芝加哥一号”离核能的实际应用还有一定距离。1943 年 1 月，曼哈顿计划的负责人格罗夫斯同杜邦公司签定了在田纳西州的橡树岭建造一座功率为 1800 千瓦的空气冷却堆的合同。这一反应堆于当年 11 月开始运行，是现代慢中子堆的雏形。

曼哈顿计划还建造了三座大型反应堆和三个钚分离工厂，以获得足够量的钚。

为了获得高浓度的铀 235，曼哈顿计划根据三种不同的分离、浓缩铀 235 的方法，建造了三座生产铀 235 的大工厂。这三种分离方法分别为电磁分离

法、气体扩散法和热扩散法。

为实现曼哈顿计划，美国动员了 50 余万人，其中有 15 万科技人员，耗资 22 亿美元，动用了全国 1/3 的电力，在不到 4 年的时间里制造了 3 颗原子弹。

1945 年 7 月 16 日，在美国本土西部荒漠地带成功地进行了第一颗原子弹的爆炸试验，爆炸力相当于 2 万吨 TNT 炸药。同年 8 月 6 日，美国在日本的广岛投下了一颗名为“小男孩”（代号瘦子）的铀弹，内装 10 公斤铀 235；8 月 9 日，一颗名为“大男孩”（代号胖子）的钚弹在日本长崎上空爆炸，两座城市夷为平地。原子弹的威力在客观上加速了日本法西斯的投降，但大量无辜平民的伤亡，令全世界震惊。

与人们原先的担忧相反，直到第二次世界大战结束，德国在研制原子弹方面并没有取得显著进展，其原因是多方面的。希特勒当时需要的是，在短时间内能见成效并用于战争的武器，不是耗资巨大又前景不明的原子武器，当他意识到这种武器的作用时，法西斯已接近穷途末路，不具备研制原子弹的能力了。而且，当时德国的原子核能研究设施在战争中也多次受到了破坏，德国的多数科学家们，也不愿意为法西斯的战争积极研制原子弹。

原子弹研制成功之后，美国极力想保持其核武器的垄断地位，并宣称要绝对保守原子弹制造的秘密。这种具有极大破坏力的武器必然与社会和政治发展联系在一起，形成一种特殊的力量。因此，苏联等国家都把打破美国的核垄断作为一个重要的问题来对待。1949 年，苏联爆炸了他们的第一颗原子弹，1952 年、1960 年，英国、法国的原子弹都先后试验成功。中国也依靠自己的力量，掌握了制造原子弹的技术，于 1964 年 10 月 16 日成功地爆炸了第一颗原子弹。

原子核能在军事上的应用，促进了原子能技术的发展。同时，能源短缺也促使工业国家开始了将核能的开发和利用转向民用的探索。美、英、苏等国在发展军用原子反应堆的基础上，开始了小型反应堆的研究，到 50 年代，这一方面的研究便取得了很大进展。美国于 1952 年 12 月，进行了利用原子能发电的最初尝试。1954 年 6 月，苏联在奥布宁斯克建成了世界上第一座用浓缩铀作燃料的石墨水冷堆核电站，发电功率为 5000 千瓦。英国于 1956 年则建成了一座天然铀石墨气冷堆核电站，发电功率提高到 6 万千瓦。

到 20 世纪 80 年代，国际原子能机构所属的 24 个国家中还 包括有 9 个发展中国家，该机构估计，到 20 世纪末，发展中国家的总发电量中有百分之七是核电，发达国家核电站发出的电将占总发电量的 30%。核能的开发和利用将成为解决世界能源匮乏的有效方法之一。

4. 核聚变能和其他一些能源技术的初步研究

20 世纪 20 年代，人们还认识到另一种能源，即核聚变能。核聚变是轻

元素的原子核在极高的温度下接近并聚合，形成新的原子核，同时释放出比核裂变还大的能量，例如，一克氢在高温下聚变放出的能量大约是一克铀裂变放出能量的 15 倍。这种在高温下实现的反应也称热核反应。能进行裂变的元素在地球上的储量十分稀有，而氢元素却是取之不尽的。

1931 年底，美国的尤里发现并得到氢的同位素氘。氘聚变要求的温度比氢聚变低。自然界中氘的含量虽远低于氢，但仍然是十分丰富的。1934 年，卢瑟福等发现了氢的另一种同位素氚，而且这种元素的聚变温度更低些。美籍德国人贝蒂、美国人克里齐菲尔德、德国人冯·韦茨萨克等人在 1938 年几乎同时指出：太阳和一切恒星的光和热是以氢为燃料的热核反应的结果。

1942 年，人们开始研制原子弹时，也着手研究利用热核聚变理论于威力更大的战争武器——氢弹的可能性。美国、苏联分别于 1952 年和 1953 年研制成氢弹。1967 年，我国也成功地爆炸了第一颗氢弹。

但是要象在反应堆中控制裂变那样控制聚变，是非常困难的。聚变反应除了要控制几千万度的高温外，还要使高温保持足够长的时间，才能“点火”开始反应。实现受控热核反应，解决核聚变能用于和平的问题，仍是目前科学技术研究的前沿课题之一。

这一时期，在研究核能的开发和利用的同时，人们还对其他能源技术进行了研究。作为矿物资源的煤，只有实现气化和液化，才能使其利用率发生质的变化。在 19 世纪煤气完全气化研究的基础上，20 世纪 30 年代有了工业规模的煤气发生炉。1930 年，德国首先创造了加压气化的鲁奇法。第二次世界大战期间，德国、日本研究成功了高压直接加氢液化煤的技术，得到烷烃类的气体燃料和环烷类、芳香烃类的液体燃料。虽然这些技术的生产能力都很低，也存在不少缺点，但对煤的气化和液化技术的发展都有所推动。

20 年代，德国还试验用煤作内燃机的燃料，将煤粉与水或石油混合，加进 1—3% 的稳定剂，开始了胶态燃料的研究。

社会的发展对能源的数量和质量提出了越来越高的要求，人们在探索新能源的道路上也在不懈的努力。

七、其他领域的科学技术成就及发展

1. 物理学其他一些领域的研究进展

世纪之交的物理学革命给物理学中的许多研究领域都带来了深刻的影响。这里，我们只简略列举其中的几个方面。

(1) 物性物理学的形成

基于量子力学、量子统计力学和普通力学的物性物理学，在 20 世纪 30 年代成为物理学中一个独特的涉及范围很广的研究领域。

磁性与低温物理特性。磁性是物质最普遍的属性之一。1928 年，德国人海森堡发现，在铁、钴等强磁性物质中，由于电子相互作用，相邻两个原子的自旋是平行的，他进而从量子力学的理论出发来说明磁性的本质，解开了长期以来关于磁性的许多不解之谜。磁学的研究从此开始受到各方面的重视。

低温物理是研究低温下物质的性质。这一时期，有两个方面的发现特别引人瞩目。其一是关于液态氦的。1927 年，人们发现了低温下试管中的液体氦有不可思议的自逸出现象。1937 年，苏联的卡皮查（1894—1984）验证了液态氦的超流动性。他发现，当温度低于 2.17K 时，流过狭缝的液态氦的流速与压差无关，也就是说，液体内部以及液体与器壁之间无摩擦力。1941 年，他还发现了卡皮查热阻现象，即热流经过固体和超流氦的界面时，温度在界面上有一跃变。1941 年，苏联物理学家朗道（1908—1968）利用量子力学解释低温液态氦的这种奇妙现象，并取得成功。该理论被称为第二种液体氦的量子力学理论，也称作“二流体模型”理论。其二是，1933 年，迈斯纳发现超导体有非常理想的抗磁作用。

金属学与结晶学。1928 年，德国物理学家索末菲应用费米和狄拉克的量子统计力学方法发展了金属的自由电子理论，创立了新的、量子机制的金属电子论，说明了古典统计力学所不能解释的种种现象，成为量子统计最早的应用成果。

同年，美籍瑞士人布洛克（1905— ）发表了固体“能带理论”。他认为，晶体中原子的周期性排列，形成对自由电子运动发生影响的周期性势场。在周期性势场中，电子占据的可能能级形成能带，能带间有一定间隙。这种能带理论可说明导体、半导体和绝缘体产生的原因，可说明为什么金属是导体，而其他一些物质却不能导电。建立在量子力学基础上的物性物理学可解释物质的光学性质、热传导性质以及物质的电、磁等许多性质形成的根源。

20 年代末到 30 年代前期，人们应用量子力学，对完整结晶的本质以及不完整结晶（结晶的缺陷）问题也开展了研究，根据结晶的位错或晶格扭曲程度来确定物质的强度或性质。研究表明，任何具体的现实的物质都不是完

全结晶体。

(2) 粒子物理学的兴起

20 世纪前半叶，诞生了许多物理分支学科，例如原子核物理学、粒子物理学和宇宙射线研究等。

原子核物理学源于原子核反应的研究，开始于 1919 年，卢瑟福利用粒子从氦原子核中打出质子，首次实现了人工原子核反应。这方面研究的深入与发展导致了量子力学的发展和后来放射性物理和放射性化学的发展以及原子能科学的诞生。本书的第二部分和第六部分均有述及。

粒子物理学也称为基本粒子物理学。物理学的这一个分支学科同样源于对原子核反应的研究。1897 年至 1937 年，被认为是粒子物理学发展的第一阶段。1897 年，J. J. 汤姆逊发现了电子；1909 年至 1911 年，英国物理学家卢瑟福和他的助手用高速飞行的 α 粒子做炮弹去轰击原子时，发现了原子核；1932 年，英国物理学家查德威克用放射源钋发射的 α 粒子来轰击铍金属，发现了中子。于是，物质由中子、质子和电子这些基本结构单元构成的统一世界图象形成了，同时也形成了基本粒子的概念。

这一期间，康普顿于 1922 年证实了爱因斯坦预言的光子的存在；泡利从理论上预言了一种无静止质量的粒子——中微子；相对论量子力学又预言了电子、中子、质子等粒子的反粒子的存在。电子的反粒子——正电子，是第一个被发现的反粒子。1932 年，安德森（1905— ）利用放在强磁场中的云室，记录宇宙线粒子时发现了正电子。以后又陆续发现了其他反粒子。

1934 年，日本物理学家汤川秀树（1907—1981）为解释粒子之间的强作用短程力，提出这种力是由质子和（或）中子之间交换一种质量为电子的 200 至 300 倍的基本粒子——介子而引起的。介子、电子和中微子等后来统称为轻子。1936 年至 1937 年，安德森和尼德迈耶（1907— ）发现了后来被称为 μ 子的新粒子，这种不稳定粒子衰变后生成电子、中微子和反中微子。40 年代，证实了具有强相互作用的介子的存在。 μ 子和介子的发现，分别证实了泡利和汤川秀树的预言。刺激了基本粒子的研究，粒子物理学进入了第二个发展阶段，“基本粒子理论”正式成为一门学问而得到迅速发展。

历史上的概念，基本粒子是指构成物质的最基本的组成部分。在这一个世纪中，这一概念经历了几次重大的变化。人们先是认为原子是物质的基本组成部分；之后，中子、质子和电子被视为基本粒子；再后来，新发现的中微子、介子和共振态粒子等也加入了基本粒子的行列。随着基本粒子队伍的日益壮大，人们认识到，它们也不可能是物质的最基本组成部分，后来的“夸克”粒子也证明了这一点。

后来，物理学界将称为基本粒子的物质，统称为粒子或亚原子粒子。粒子物理学的研究使人们认识到，物质结构在不同的能量尺度上有不同的层次，最终的层次可能不存在。

(3) 宇宙射线的研究

在 高能粒子加速器问世之前，研究基本粒子的产生及其相互作用主要是靠对宇宙射线的研究。

宇宙射线是在研究大气电导率时偶然发现的，这和许多新现象的发现有着相同之处。人们在屏蔽良好的静电计中，发现一种未知的辐射源导致了其中空气的电离，而且这种辐射源比当时熟悉的放射性具有更大的穿透本领。

1911 年至 1912 年，奥地利人赫斯（1883—1964）为了证实射线的来源，便利用气球把高压电离室带到 5000 米以上高空。发现在 700 米左右的地方，电离度因某种原因有所下降；但随着气球的继续上升，电离度却持续增加，而且白天和黑夜都如此赫斯断定，这种辐射源来自宇宙空间。

1922 年至 1926 年，R.A.密立根进一步证实，这种未知辐射源不在大气层中。1927 年，“云室”观察到了未知辐射线中带电粒子的径迹。由于这种射线来自宇宙空间，因此便得名“宇宙射线”。之后的 10 年中，人们广泛研究了宇宙射线的性质。

30 年代，人们从宇宙射线中发现了正电子、 μ 子，以后又发现了更多的高能粒子。宇宙射线成为发现新的基本粒子的来源和研究基本粒子的重要手段。40 年代，证实了具有强相互作用的介子的存在；1942 年，日本人坂田昌一（1911—1970）提出二介子论，宇宙射线的研究工作进一步深入。

第二次世界大战中，有关的实验技术和仪器得到迅速发展，更精密的云室，升得更高的气球，新型计算器，新的电子仪器纷纷出现，也进一步推动了宇宙射线的研究。

2. 天文学的新成就

这一时期，天文学的发展一方面是利用爱因斯坦的广义相对论考察宇宙，并提出宇宙模型；另一方面是利用天文观测来验证广义相对论。

天文学在这一时期的发展还体现在射电天文学方面。1931 年至 1932 年，美国青年杨斯基（1905—1950）在研究引起高频无线电干扰因素时，观测到波长为 14.6 米处有来历不明的电波信号。这种信号每天出现的时间有规律地提早 4 分钟。他推断这一信号来自地球以外的天体。杨斯基的这一发现导致了射电天文学这一新兴学科的诞生。在这以前，天文学是用光来观测、研究天体，所以又称为光学天文学；现在，可以用电波来观测、研究天体，即用接受天体无线电辐射的射电望远镜来观测和研究天体，因此，也称为射电天文学。

1937 年，美国人雷勃（1912— ）制成世界上第一架射电望远镜，其抛物面天线的直径为 9.5 米，用它来接受来自空间的无线电信号，研究银河系和宇宙无线电波的强度分布。1944 年，用 1.87 米波长绘成第一张银河射电图，证实了银河系中心有很强的射电辐射。不久，他又发现白虎星座附近有发出无线电波的星体。1942 年，英国学者研究发现，来自太阳的射电比太阳

表面的黑体辐射还要强烈，而且与日面黑子、耀斑等的活动密切相关。

30 年代，天文学方面还有不少重要发现，如冥王星的发现、超新星的发现等。所谓超新星就是恒星爆炸后形成的光度突增 1000 万倍以上的新星。星体核反应也是一重要发现。1940 年，人们开始将星体分成两大类，并在第二次世界大战后发展为“星体和宇宙的进化理论”。

3. 现代地学理论的诞生

(1) 魏格纳与大陆漂移学说

16 世纪末，荷兰的墨卡托（1512—1594）在当时地理大发现的基础上，利用他设计的等角正圆柱投影方法，绘制了第一张世界地图，把地球的表面展现在了一个平面之上。地图上大西洋海岸线的相互吻合启发了早期大陆漂移思想的产生。

18 世纪法国博物学家布丰（1707—1788）等就曾先后推测过，大西洋是因为大陆漂移而形成的。19 世纪末，奥地利的休斯（1831—1914）认为，按地层的相性，南半球各大陆可拼合为一个巨大的冈瓦纳古陆。

19 世纪中期，研究海岸和海底地质、地貌的新学科——海洋地质学开始出现，并随着军事和渔业、海底资源开发等的发展而迅速发展。19 世纪 70 年代，英国皇家舰队的“挑战者”号在环球航行期间开展了对三大洋有组织、有计划地深海调查，行程 7 万海里，收集了海洋物理、化学、生物、地貌、沉积物等方面的珍贵资料。这次环球航行提出了 50 份调查报告。之后，海洋调查掀起了热潮，大批探险队和科学考察队的足迹遍布世界各地，海洋地质学等大批地理地质的丰硕成果使基于陆地地质的传统地质学理论面临严峻的挑战。随着大陆漂移说等新理论的出现，人们关于地球的自然观在 20 世纪中发生了巨大的变革。

大陆漂移说的产生。在魏格纳（1880—1930）提出大陆漂移说之前，关于地壳运动和大地构造已有各种学说，如冷缩说、大陆永存说、陆桥说等。例如冷缩说认为：象一个内部水分蒸发而干缩的苹果一样，地球因冷却而收缩，表面皱褶而形成山脉。

大陆永存说和陆桥说等都属于固定论观点。这种理论以美国地质学家丹纳（1813—1895）为代表。从 19 世纪到 20 世纪上半叶，固定论在地学各分支学科中占有统治地位。固定论的主要观点是，大陆固定，海洋永存，认为在地质历史中，虽然大陆与海洋曾有过变化，但只是原地垂直运动的结果，即陆地可以隆起为高山，也可沉降为深谷，大陆块可以沉降为洋底，洋底也可上升为陆地，但是，大陆块没有发生过大规模的水平运动。固定论为了解释各大陆之间在陆生生物分布方面有极为密切的关系，提出了陆桥假说。

陆桥说认为，在地质历史时期，互相远离的大陆之间曾有过狭长的陆地连接，即通过“陆桥”而连接。一些被海洋相隔的大陆上，生物和古生物之

所以有着亲缘关系，是生物通过陆桥迁移和传播的结果。后来陆桥沉没、断开，两大陆才被海洋分隔。但现代海洋地质的研究事实表明，海洋中不存在大陆桥沉没为海底的痕迹，因为大洋盆底没有发现构成大陆的硅铝盐。

但是随着地学研究的进展和地学研究资料的不断积累，旧有的学说和理论暴露出越来越多的矛盾。固定论已经不能对海陆的起源和分布作出圆满的解释。

美国的泰勒（1860—1938）根据欧亚大陆第三纪山脉多呈弧形并向南弯曲的现象，于1910年提出了地球旋转产生的离极力导致大陆向南挤压和运移的思想。

活动论正是在这个时代开始兴起，其主要观点是，在地质历史中，大陆的位置相对于地极以及其他各大陆都发生过大规模位移。活动论和固定论的争论成为20世纪地质学界的重要事件。

大陆漂移说是活动论中一个比较有代表性的假说。它的创始人是德国气象学家、地球物理学家魏格纳（1880—1930）。他出生于柏林，大学曾专修天文和气象学，学问渊博，视野广阔，兴趣广泛，富有想象力，善于从全局和整体的角度综合考虑问题，具有科学探险的性格和为科学献身的精神。

1910年，魏格纳在观察地图时，就注意到大西洋两岸海岸线的相似性。1911年秋，他从一篇论文中了解到，根据对古生物的研究表明，巴西与非洲间曾经有过陆地的连接。这一事实给了他很大启发，并促使他把地质学和古生物学的有关事实联系起来初步形成了大陆漂移的思想。在这之后，他把研究兴趣由气象学转到地学方面，决心探索大地构造和地壳运动的规律。他知道，这是一个他自己不熟悉的、需要涉及到多学科知识的新领域，但他义无反顾地认准了这一方向。

魏格纳综合了地质学、地球物理学、古生物学、近代生物学、古气象学和大地测量学方面的成就，进行了较为系统和深入的探讨。

他否定了冷缩说，批判地吸收了陆桥说和海陆永存说的合理成分，将地壳均衡论关于陆、海物质成分不同、比重不同的观点加以引伸，提出了大陆漂移的观点。地球重力测量的结果以及地震波波速的测定均证实了海、陆性质的不同。

1912年1月6日，魏格纳在法兰克福地质学会上作了题为《从地球物理学的基础上论地壳的轮廓（大陆和海洋）》的演讲。同年1月10日，他又以《大陆的水平位移》为题在马尔堡科学协进会作了第二次演讲，介绍了他的大陆漂移理论。

第一次世界大战期间，魏格纳应征入伍，一度中断了这一方面的研究。受重伤后，他请长假对自己的大陆漂移说作了深入的探讨和详细的论证。1915年，魏格纳出版了大陆漂移说的研究专著《海陆的起源》。

大陆漂移说的基本观点。魏格纳指出，大陆与海底岩石圈的性质是不同的，大陆块是较轻的花岗岩层即硅铝层，在大陆底下及洋底是一圈较重而

粘性又很大的玄武岩即硅镁层。大陆块就漂浮在硅镁层上。在距今约 3.5 亿年的古生代石炭纪以前，地球上只有一块巨大的名为联合古陆的超级大陆，世界上的海洋也是一个连续的整体。可能由于潮汐力和地球离心力的影响，从距今 2 亿年前的中生代，超级大陆开始分裂。破裂后的大陆块就象漂浮在水面上的冰山一样彼此缓慢分离，发生了相对洋盆的水平移动，即所谓的大陆漂移，逐渐形成为现在的几个大陆和无数岛屿，原来连续一体的大洋，则分割成几个大洋和若干个小海。

魏格纳认为，南美与非洲原先是连在一起的，到中生代才分裂成两部分，逐渐远离，并形成大西洋。北美、欧洲和格陵兰原先也在一个大陆块上，到白垩纪末才开始分离；南极大陆、大洋洲、印度、南非洲和南美洲过去也曾连接在一起，后来才分裂开来逐渐分离并形成印度洋。魏格纳认为，漂移的大陆块前缘遇到洋底的阻力将发生挤压和褶皱，形成山脉。现在这些大陆块仍在继续漂移，例如美洲仍在向西漂移，大西洋面积不断扩大而太平洋却处在收缩中，将来有一天，中国的东部将和美洲直接相连，向北漂移的澳大利亚将同中国的南部连接。

大陆漂移说的证据。大陆两岸边缘的吻合是大陆漂移说的出发点。魏格纳作了一个此喻来说明这种吻合。他说，如果把一张印刷品撕成两半，那么，当撕成的两半合在一起时，不仅边缘是吻合的，而且边缘各对应处的印刷内容也应该是吻合的。

魏格纳从多方面寻找证据，证明大陆两岸这种“印刷内容”的吻合。他对大西洋两岸的地质构造进行仔细的比较，发现大西洋两岸的岩石地层和褶皱构造确实可以对得起来。非洲南端从东到西横着一条开普山脉，而在南美的布宜诺斯艾利斯南部可以找到这条山脉向西延伸部分，非洲陆地巨大的片麻岩高原，也与巴西的片麻岩遥相对应，其地质构成及褶皱延伸方向都非常一致。北欧和北美洲之间也发现了类似的地质一致性。

大陆漂移说还从古生物的分布事实中获取证据。因为古生物化石可以反映过去年代的地理环境条件。例如古珊瑚礁的分布说明，3.5 亿年以前北美中部和欧洲西部曾有过完全相同的环境。而且，两大洲的珊瑚礁中，不但含有完全相同的珊瑚种，还含有种类完全相同的其它海滨生物和江河生物，说明它们的浅海区在过去是直接相连的。

早在 19 世纪末，博物学家们就已经发现大量各大洲具有相同的化石种属的实例，并据此作出结论，认为在南美洲、非洲、印度、大洋洲和南极洲之间，在很长的地质时期中存在过非常广阔的陆地联系。

他们用印度的一个区的名称把这个相互联系的陆块命名为冈瓦纳古陆。北美洲和欧洲也曾经被认为是连在一起而形成的另一个古陆。根据生物化石可知，正当不很茂盛的植物在冈瓦纳古陆生长的时候，劳亚古陆则生长着浓密而茂盛的热带森林；正是这些森林后来形成了北美和欧洲的大煤层。

根据这些事实，绝大多数古生物学家们都肯定各大洲在过去曾经有过陆

地的联系，因而赞成陆桥说。然而，他们中没有一个人敢于想到大陆的直接连接和大陆漂移。实际上只有大陆漂移说才能圆满地解释古生物化石的分布，而陆桥说却不能。例如在相距甚远的陆块的边缘发现相同年代的相同生物化石，而相距很近的陆块上的生物化石却截然不同，这个现象只能用大陆发生过漂移的假说来说明，而陆桥说却无论如何也解释不通。陆桥说对现存生物分布情况就更无能为力了。

生物学关于物种起源的单祖论认为，相同的生物种不可能在相距遥远的地区分别独立地形成，它们必定起源于某一地区，然后直接地或通过第三地区传播到另一地区。目前，在远隔重洋的大西洋彼岸，许多生物之间存在着亲缘关系。例如，有一种圆庭蜗牛叫圆口蜗牛，仅分布在欧洲西部，而在北美洲它只分布在临近大西洋的一些地方。蜗牛爬行的速度很慢，约为人步行的千分之一。

显然，它是不能横渡大西洋的。它既然不能从美国的东部爬到西部，更不能设想它通过陆桥经过数千里爬到北美东部。众人皆知，蚯蚓是根本不能渡海的，然而隔着一个大西洋，同一纬度内蚯蚓却有亲缘关系。从南美洲、非洲和澳大利亚的肺鱼、鸵鸟、三趾鸟、海牛等几种动物的分布情况，可以判断有过陆地的直接连接。

大陆漂移说在古气候学方面的证据也是很多的。过去在古气候的研究中存在一些不解之谜。如大约在3亿年以前，巨大的冰川曾经覆盖过南美东南部、非洲中部和南部、印度、大洋洲和南极洲，持续了大约5千万年。

根据冰川作用的规模来看，这次冰川肯定是极地冰盖。如果从这些陆块目前的地理位置来看，似乎可以得出一个结论，那次大冰川几乎同时从现在的南极一直延伸到赤道以北。也就是说那时大半个地球都处于地极带，这显然是不可能的。魏格纳利用大陆漂移说一下子就把这个谜解开了，只要设想上述那些地区当时是聚合在一起的，受冰川作用的地区就完全集中在一个不大的范围内。古气候学的另一些无法解释的矛盾，大陆漂移说也都能轻而易举地加以说明。

魏格纳运用自己的丰富想象力和严密的逻辑思维，全面地综合了一系列相关学科的研究成果，把自己的学说建立在大量的事实上，并进行了出色的论证。

大陆漂移说的沉寂和复兴。魏格纳的富于革命性的大陆漂移说提出以后，震动了世界地球科学界，引起了学术界的广泛重视、研究。另外，由于这个理论对传统的地球自然观产生了巨大的冲击，也就不可避免地引起了怀疑和论争，有的人则认为大陆漂移说纯属虚构。

在大陆漂移说提出之后的十几年时间里，大陆漂移说和大陆固定说争论不断。大多数人不肯接受这个学说的主要原因有两点，一是能证实大陆漂移说的科学资料还不多，也不全面；二是理论本身还不完善，还存在一些严重的困难，对当时的许多现象还不能作出令人信服的解释，例如，关于大陆漂

移的机制和动力问题。

人们根据自己已有的经验和知识，认为大陆漂移是不可想象的。因为大陆和洋底毕竟是由极其坚硬的岩石组成。因此即使最小的一块大陆（如大洋洲的重量可能有 5×10^{13} 公斤）通过洋底移动到现在的位置所需要的力也是非常巨大的。

魏格纳曾经用地球自转的离心力而产生的离极力来解释大陆向赤道的漂移。但是一些科学家经过计算，认为离极力是非常小的，要使大陆移动必须要有大于离极力 100 万倍以上的力。假如离极力能够移动大陆，但对于形成褶皱山脉来说还显得太小。

魏格纳用潮汐来解释大陆块的向西漂移，但是一位英国地球物理学权威从理论上证明这是不可能的。大陆漂移的机制和动力问题成了严重的障碍，大多数地球物理学家都抛弃了魏格纳的学说。

除了漂移的机制和动力之外，还有地壳和地幔的刚性问题。有人指出，根据魏格纳的观点，地幔是固体，但在重力长期作用下地壳能够部分沉入其中，并可在其中航行，这样说来地壳比地幔硬。但是，魏格纳又说漂移的大陆块体遇到地幔的阻力会褶皱成山脉，这样说来，似乎地幔又比地壳硬。

1928 年，由美国地质协会主持在纽约举行了一次研讨大陆漂移说的重要会议。在会议上发言的 14 位地质学家中，有 5 位积极支持大陆漂移说，2 人有保留地支持，7 人反对。会议主席对讨论作了比较全面的总结，认为解释古生物分布之谜，大陆漂移说比陆桥说好，虽然漂移的机制还未找到，将来也许会找到。

魏格纳对自己的学说则充满信心。为寻找大陆漂移说的直接证据，他后来数次率领探险队去格陵兰进行考察。1930 年 11 月 1 日，就在它 50 岁生日那天，在格陵兰荒凉冰原的考察途中，在零下 54 的严寒里，魏格纳不幸遇难，为科学献出了自己的生命。

少数地质学家也一直坚持大陆漂移说。如南非的杜·托译特（1878—1948 年），从南半球各大陆石炭二叠纪冰川遗迹和冈瓦纳地层相似性和连续性出发，坚持大陆漂移理论。还有瑞士的 E·阿尔冈，美国的 R·A·戴利，中国的李四光也支持大陆漂移说。

1928 年，英国爱登堡大学的霍姆斯（1890—1965）提出地幔对流学说。他认为：大陆漂移的原因可用“固体”地幔对流说来加以解释，但他的解释同魏格纳根本不同。魏格纳认为：大陆块在地幔上航行，因此很难说清楚其作用的过程。霍姆斯则认为：大陆是被流动的地幔这个“传送带”所带动，“传送带”是由地球中的热能和重力供给能源。

他认为，岩石中普遍含有放射性物质，其释放的原子能几乎全部变成热能。地幔中只需含有 1/700 的放射性物质，便能使地幔保持其可塑性并发生对流。这种缓慢的地幔热驱动流能牵引大陆做水平运动。几乎同时，荷兰的万宁·迈尼兹（1887—1966）也提出了类似的地幔对流说。这样，争论的焦

点就转到地幔对流的可能性上来了。可惜谁也拿不出有力证据来证实它。如果地幔中不发生对流，这个解释就成了空中楼阁。

凡是可以作为大陆漂移说证据的，都已经摆了出来。因此，在没有新的证据提出来以前，大陆漂移说沉寂了一段时间。科学家们都忙于自己急待解决的课题，不愿在“非正统的学说”上花费自己的时间和精力。这样，大陆漂移说就逐渐从人们的记忆中消失了，甚至在大学的讲义中也很少提到。

20世纪50年代，地质学家发现在不同地质时期中地磁极是在移动的。根据英国和欧洲岩石标本测定的磁化方向以及北美的岩石标本测定的磁化方向，他们画出了两个地磁极移动的轨迹图。结果发现，两图地磁极移动的轨迹不重合，存在着某种有规律的偏差，如果将现在的北美相对欧洲向东旋转 30° ，则两个移动轨迹就重合了。这意味着，在地质历史的某一时期，大西洋并不存在，欧洲北美是连在一起的。两大洲现在的分离只是后来大陆发生大规模相对水平运动造成的。有了这个有力的论据，大陆漂移说又开始复兴。60年代以来，一系列海底科学的重大发现推动了复兴后的大陆漂移说的发展。

美国海军电子实验室的迪茨（1914— ）和美国普林斯顿大学地质系的赫斯（1906—1969）提出了海底扩张说，并与大陆漂移理论结合起来。之后，在大陆漂移说和海底扩张理论的基础上又建立起板块构造理论，许多地学科学家认为，这一“新全球构造理论”在地学中的地位，相当于天文学中的哥白尼日心说，生物学中的达尔文进化论。尽管如此，板块构造理论也还面对一些需要解决的问题，例如，板块运动的驱动力问题，地幔对流的证据等问题。但是，大陆漂移、海底扩张、板块构造运动已经为大量的、无可辩驳的事实所证实，而且已经成为大多数人所接受的地球自然观。

（2）地质力学的建立与发展

地质力学是由中国卓越的地质学家李四光（1889—1971）在总结前人和他人地学方面研究成果的基础上，立足于中国地质的实际情况，经过长期的探索而倡导、创立的，并形成了有世界影响的独立学派。李四光出生于湖北黄冈，早年曾留学日本、英国。1920年后，任北京大学地质学教授、系主任。他还是中国第四纪冰川的发现者和第四纪冰川研究的奠基人。

地质力学是以力学的原理分析研究地质构造现象的发生、发展和内在联系，探求地壳构造和地壳运动规律的科学。地质力学由20年代初的探索到40年代建立起比较完整的理论体系，大致经过了三个阶段。

第一阶段是为地质力学奠定基础的阶段。20年代初，人们发现，我国北部丰富的煤炭资源大多储存在被统称为“太原系”的石炭二叠纪沉积的地层中。其中虽夹有若干海相地层，但主要是由陆相地层构成。然而，李四光的研究发现，中国南部石炭二叠纪的地层是以海相地层为主。为什么时代相同，而南北的沉积环境却有这么大的差异呢？

李四光对北半球其它地区古生代以来海水进退现象进行了对比研究之

后，提出了自己的见解，认为大陆上海面的运动并不一定是全球一致地升降，有可能是由赤道向两极或由两极转向赤道所造成的，并进而提出了大陆海面变化是由于地球自转速度变化而造成的假说。他由此联想到，大陆的岩石也会因此受到地应力的长期作用导致地壳发生形变。这一期间，魏格纳的大陆漂移学说正处于困难、沉寂中。李四光发表了《地球表面形象变迁之主因》的文章，批判了与大陆漂移理论抗衡的传统固定论，论证了大陆的水平运动，认为构成这种运动的原因是地球自转速度的变化并提出“大陆东阔”自动控制地球自转速度的新理论。这些为后来地质力学理论的建立奠定了基础。

第二阶段通过对区域构造现象的相互关系、形成过程进行较系统的研究，并用区域构造形迹综合追溯地壳构造运动，建立了地质力学的基本框架。李四光研究了当时苏联境内具有强烈褶皱的山脉附近的弧形山脉与中国江苏的宁镇山脉和芳山山脉以及广西、湖北的一些弧形山脉，对山字形及其它某些类型的构造形式有了比较深入的认识。他运用休斯所倡导的现实主义地质归纳法，将个别的特殊的地质构造现象上升、推广到一般，概括出“构造体系”这一反映全球性地壳构造特征的新概念。

地球上的地质现象是异常纷繁复杂，而李四光抓住了“力的作用”这一串联接复杂现象的纽带，对地壳运动以及各种构造形变如褶皱、断裂、隆起、凹陷的生成关系进行研究，总结出三种基本类型，即纬向构造体系、经向构造体系和扭动构造体系。

李四光测定了每一类型构造体系有关地区的构造运动方式和方向，确定了大陆水平运动的存在，推断出大陆和海洋运动的主因，建立起了地质力学的基本内容与框架。

这一时期，李四光的著作有 1928 年的《古生代以后大陆上海水进退的规程》、1929 年的《东亚一些典型构造型式和构造体系》等。后者涉及全球构造及其综合解释的尝试，概括分析了东亚不同的构造形式和构造体系。

30 年代到 40 年代初，是地质力学逐渐发展和完善的时期。在这一期间，以“构造体系”新概念为指导，人们对一些尚未认识的构造类型作了进一步的研究，丰富、修改和完善了构造体系的内容。地质力学的研究范围也不断扩大，在更大的领域里发现许多构造体系的定型性、定位性和定时性以及在同一地区这些性质的相互交错、部分重叠的复合关系。这一阶段的地质力学不再停留在描述构造体系的一般特征上，而是对各种构造类型的起源提出合理的解释。

在较长期的探索研究基础上，40 年代正式提出了地质力学的学科体系及学术观点。这一阶段，李四光著有《中国地质学》（1939 年）和《地质力学之基础与方法》（1945 年）。前者进一步厘定了不同构造体系及其形成机制。1962 年，他的另一著作《地质力学概论》更系统地介绍了地质力学理论。

地质力学是在中国的土地上诞生和成长起来的新的地学理论，它比较客

观地反映了地壳内部的构造特点和运动规律。

地质力学理论强调地质构造发展变化的过程，认为地球上任何一个大型构造体系的存在，决不是一次地壳运动所造成，而是多次地壳运动综合作用的结果。由于地球内部力的作用的存在，老的地质构造不断受到破坏，发展变化，新陈代谢，展现出一幅生动复杂的地质图象。

李四光提出的地球自转速度变化是地壳运动主要原因的见解，是对地学理论发展的一大贡献。他指出，如果地球始终保持恒定的自转速度，那么，在几十亿年的运转过程中，它的外形和表层内部结构应该早已适应了地球引力和离心力的作用而趋于平衡，也就是说不会有什么大规模的地壳运动，但事实并非如此。因此他认为，在研究地壳运动时，应当考虑的不是地球的自转，而是地球自转速度的变化。地球内部的较重物质向自转轴附近集中时，地球自转速度就会加快，离心力就会增加，地壳便受到来自两极向赤道方向的挤压产生纬向构造体系；当地球自转加快时，还会产生自西向东的惯性力，它同样会引起地壳发生运动，产生经向构造体系。

地质力学建立以后，在寻找新矿藏资源和地震预报预测方面发挥了巨大的作用。50年代初，李四光就提出，中国的石油勘探应实行战略转移，即由局限于西北地区转移到松辽、华北等东部地区。从此，中国有了大庆，后来又有了大港、胜利、华北等新油田，为中国石油工业的发展作出了巨大贡献。1966年，河北邢台和吉林怀德相继发生地震，李四光根据地质力学原理，认定邢台和怀德都是属于新华夏系的断裂构造，都位于新华夏系中同一沉降带内，提出要迅速组织力量开展东北地区的地震地质工作，这对1975年成功地预报海域地震起到了重要的作用。

中国其他的地学研究人员，以地质力学原理为基础，提出了地壳“波浪状镶嵌构造”的新见解。这种理论不仅注意到了地壳的水平运动，而且注意到了垂直运动，引起许多地质学家的注意，为地质力学的发展作出了贡献。

八、两次世界大战对某些应用技术发展的影响

1914年第一次世界大战爆发，到1945年第二次世界大战结束，期间历经30余年。两次世界大战，特别是第二次世界大战，对人类文明是一场极大的浩劫。它对20世纪人类社会事务的几乎所有方面都产生了持久的影响。就科学和技术的发展而言，第二次世界大战的影响更为深远、巨大而复杂。战争阻碍了基础科学、民用技术的发展，波兰的数学学派和哥廷根数学学派在30年代中遭受摧残，由鼎盛而衰败，便是一个突出的例子。

然而，战争也从另一角度促进了与军事相关的应用技术和应用学科的发展，而且战争这种特殊的社会需求所带来的促进，往往是激烈而强大的。

第一次世界大战期间，由于战争的需要，轰炸机、坦克、潜水艇、毒气、炸药等军工技术进入成熟阶段并得到有效利用。

第一次世界大战以后，科学技术的发展出现了转折，科学技术研究向规模化的迈进，科学技术研究体制的种种革新，推动了科学技术的进一步发展，构成我们现代文明的中枢技术，如广播和电视使用的超短波技术、雷达技术、自动化技术、计算机技术、喷气飞机技术、火箭技术等，大都是在继承前人科学研究的基础上，在20年代萌芽、成长的。

30年代是20世纪科学技术发展的重要时期，这一时期技术方面的成就比基础科学的成就大得多，上述各项技术在此时都先后进入了成熟阶段。在第二次世界大战中，科学技术的许多方面适应战争的需要，发展更为迅速，科技进入战争的深度和广度也远远超过历史上任何时期。

第二次世界大战对相关应用学科的促进，突出表现在原子物理、核技术和应用数学等方面，战争大大推进了原子能开发和利用的研究以及对新型计算工具的研究。原子弹和电子计算机在此期间相继问世。战争中诞生的运筹学，带动了应用数学的长足发展，这些，本书均有专章叙述。

两次世界大战对以下一些应用技术发展的影响是巨大的，当然，这些应用技术成果的取得，与19世纪末以来科学研究的发展密不可分。

1. 广播技术的发展

1906年，美国物理学家、发明家费森登（1866—1932）利用美国人亚历山德逊（1878— ）发明的高频交流发电机，研制出一台高频无线电发射机，利用对无线电波的振幅进行调制的办法，使调幅波可携带音频信号。这一年圣诞节前夕的一个晚上，费森登用调幅波成功地实现了通过无线电波传送语言和音乐的创举。在几分钟的广播中，播送了读圣经、演奏小提琴的声音，最后祝贺听众圣诞节快乐。而第一次收听到无线电广播的幸运听众是当时的新英格兰少数船员。

1910年，费森登在别人的资助下完成了一套无线电台装置。1913年，美国电工学家阿姆斯特朗（1890—1954）设计出再生式放大电路，1919年，他又设计出了超外差线路。这期间，人们对振荡回路进行了许多改进。

1916年，美国威斯汀豪斯公司的工程师康拉德（1874—1941）建立了一个业余无线电台，每周定期播音两次。1920年11月2日，世界上第一座领有执照的电台，威斯汀豪斯公司的商业电台（KDKA电台）在匹兹堡正式开播。这个电台开了商业广播的先河，还以最快的速度报道了当时总统选举的结果，引起社会公众的重视。人们有收音机就可以收到各地的新闻报道，而电台也可以通过广告大赚其钱，因而，美国的广播事业得到了飞速的发展。

1921年，收音机已大量普及，广播器材与收音机制造业成为美国当时发展最快的工业部门。1924年，美国已拥有600多家商业性无线电台，1926年建立起全美国的无线电广播网。20年代末至30年代初，听广播成为北美最流行的娱乐节目。澳大利亚、丹麦在1921年，苏联、法国、英国在1922年，德国在1923年，意大利在1923年，墨西哥、日本在1925年，都相继建立了无线电台。到30年代，全球性的无线电广播系统已基本形成。

1927年，英国成立英国广播公司。1928年，苏联把无线电广播作为宣传教育工具并用50种语言向国外广播。1943年，美国建立“美国之音”电台，并开始向全世界的广播。

中国的第一座广播电台建于1923年，是外国人办的。中国人民广播事业于1940年12月创建于陕北，延安新华广播电台是中央人民广播电台的前身。

无线电通讯和广播最初使用的均是长波。第一次世界大战中，美国就开始研究军用短波通讯技术。军事通讯的需要推动了广播信息业的发展。1918年，波长70至150米的发射和接受设备研制成功，新一代电子器件也相应出现。之后，陆续发明了可产生波长为几米的超短波的磁控管、适于超高频的五极管、适于超短波放大和振荡的速调管，产生了频率调制技术。美国从1929年开始采用超短波通讯，30年代以后，无线电通讯已进入10米以下的超短波波段。

2. 电视技术的产生

光电管的发明、阴极射线和无线电通讯研究的进展为传播声音和图象的广播技术——电视技术的产生准备了条件。随着电子技术的进步和无线电通讯向超短波、微波方向的发展，电视技术的产生则成为必然的趋势。

电视技术是由静止图象的无线传真发展起来的，而图象的无线传真又是基于19世纪中叶发明的有线传递技术。

1842年，英国人拜恩（1818—1903）发明了一种通过有线电信传递静止图象的机械扫描装置。1856年，意大利的卡斯特里利用这种装置传递了文字

图形。19 世纪末，美国人史密斯——电话发明人贝尔的助手，发明了硒光电池。

1884 年，德国科学家尼普科夫（1860—1940）发明了一种光电机械扫描圆盘，这种圆盘上有排列成螺旋线的洞孔，当圆盘在某一图象前转动时，图象的明暗光线被依次扫描通过圆盘上的洞孔，射到硒光电池上，转变为强弱不同的电信号，利用相应的装置再将这些强弱不同的电信号转变为明暗不等的光信号，按照原有的位置和次序把它们依次显现出来，就形成了一幅与原先的图象相似的画面。这种旋转盘扫描式的传播方式，为电视的发明奠定了基础。

1907 年，俄国人罗金格（1869—1933）发明了一种可同时从上到下、从左到右扫描画面的机械装置，并采用了阴极射线管，还使用屏幕显示图象。

英国人贝尔德（1888—1946）改进了尼普科夫等人的机械扫描系统，用 30 多条水平扫描线填满整个画面，使用电磁铁偏转电子束的阴极射线管，试验通过无线电播映电视图象。1926 年 1 月 27 日，他将信号从自己的实验室通过电话线传到英国广播公司（BBC）的电台，电台用无线电波将这些信号播放出来，贝尔德在实验室中又收到了自己播发出的图象。这是第一次成功的电视传播示范。这一天被人们视为电视正式诞生的日子。后来，贝尔德又进一步提出了加快画面变换速度的设想，例如，在原来变换一次画面的时间里变换画面三次，而且三次用三原色摄象，接收装置也作类似的彩色处理，以传播、接收彩色电视图象。1928 年，英国研制出机械扫描的闭路彩色电视系统。

20 年代，美国也加紧了电视技术的研究，1927 年，贝尔实验室的艾文斯成功地进行了纽约与华盛顿之间的有线传真。罗金格的学生、美籍俄国电子学家兹涅里金（1889— ）从 20 年代起就开始了电子电视系统的研究。1923 年，他取得了电子显象管的专利，1928 年，研究出高灵敏度的实用显象管。1933 年，他又研制成功可供电视摄象用的光电摄象管，实现了电视摄象与显象完全电子化的过程。

1936 年 8 月，英国广播公司在亚历山大宫建立电视台，同年 11 月 2 日正式播出电视节目，被视为世界电视事业的开端。电视节目从此进入了人们的家庭。也就是说。第二次世界大战前，电视已走出实验室，与广大公众见面了。

第二次世界大战中断了电视技术的进展。但这一技术在战后又蓬蓬勃勃地发展了起来。50 年代，黑白电视在各国逐渐推开；1954 年，彩色电视广播在美国诞生。电视逐渐成为使用最广泛的新闻手段，深刻影响着人们的生活方式和思想方式。

3 . 迅速发展的雷达技术

1924年，英国物理学家阿普顿（1892—1965）证实了电离层的存在后，人们便试图利用电磁波测量电离层的高度，即向电离层发出不连续的“电磁波”，通过记录发出波到电离层反射回来的时间，来推算电离层的高度。

一次，英国人在进行这样的实验时，空中偶然有飞机飞过，电磁波受到了干扰，于是，实验人员从中受到启发，发现了雷达的原理。

1931年到1933年，因军事防空的需要，英国科学家开始研制雷达，即探测来自飞机的无线电反射波的装置。1935年，英国国立物理所无线电研究室主任瓦特（1892—1973）研制成第一部使用1.5厘米波的飞机探测雷达装置——CH系统。在临近第二次世界大战爆发的1938年，英国已在其东海岸建立起了防空警戒雷达网。

法国从1934年也开始研制利用米波和厘米波的“障碍物探测器”。1935年，将第一部雷达探测器安装在“诺曼底”号定期航班轮船上，同时也开始了防空警戒雷达的研究。

1940年8月到1941年5月，德军常常出动上千架飞机对英国的重点目标，即皇家部队和航空工业进行轰炸。幸而英国借助雷达的监测，及早引导战斗机在德机到来之前升空迎击，否则，后果不堪设想。德军屡遭挫折之后，改白天轰炸为夜间偷袭。但是，由于雷达昼夜都能发挥作用，而且英国在高炮和探照灯部队中都广泛装备了雷达，德国的轰炸仍不能达到预期目的，而且损失惨重。仅1940年7月到10月，德军就损失飞机1773架，占其最初投入战役飞机总数的五分之四。希特勒不得不暂时罢手。

在第二次世界大战最初的三年多时间里，德国海军潜艇的活动十分猖獗。他们以151艘潜艇的代价击沉了盟军计1800万吨的商船，平均每天在万吨以上。英伦三岛受到了严密的海上封锁。一旦发现为商船护航的盟国舰只，德国潜艇便采取“狼群”战术进行围击。

为了摆脱被动挨打的局面，盟军必须主动出击，先行搜索并消灭出海的德国潜艇。为此，美国专门成立了第十舰队。除军舰外，还装备了大批配有先进的微波雷达、探照灯和声鱼雷的飞机。它们在海上四出搜索德国潜艇，并攻击那些浮出水面给蓄电池充电的德国潜艇。微波雷达的使用，使德国潜艇装备的米波雷达预警器失去了效用。到1943年三四月间，终于制伏了德军潜艇。

德国海军潜艇部队司令邓尼兹后来供认道：盟军反潜战的胜利并非是技术上占优势。的确，盟军在现代化的作战兵器和探测设备方面占了优势。第二次世界大战以前，科学技术上使用的最短的电波波长为1.5米，而雷达使用的波长愈短愈有效。1939年秋，英国人欧力亨特等就开始厘米波的研究，并于1940年7月便试制成功能发出厘米波的磁控管。这一技术的突破，使英国的雷达技术居于世界领先地位。

战争的经验教训，使美国也深深了解到雷达的重要意义。1940年8月起，美国投入大量资金，在物理学家拉比的领导下，有组织地进行雷达的研

究，1942年7月，制成了使用磁控管的雷达装置。不久，美国的科学家又研制出比磁控管雷达更好的克莱斯管雷达。在战争中，美国专门建立了雷达研制中心，投入约1.4亿美元的研究经费，推出150种先进的雷达系统，小至飞机上装备的小型雷达，大至需要成连的人才能开动的巨型雷达。1942年末，装备了雷达等先进技术兵器的英国和美国，发起了对德日的进攻。

英美的雷达技术在第二次世界大战中一直保持优势，在反潜艇、防空以及对敌空袭中大显身手。而德国的雷达技术则相对落后，以至在战争中几乎没有发挥什么作用。雷达成为盟军在对德作战中取胜的重要因素之一。

战后，先进的雷达技术在航天、航空、航海等方面发挥了重要作用。

4. 喷气式飞机的诞生

飞机的发明是20世纪初的事。作为人类飞行史上的第一架飞机是美国的莱特兄弟研制并试飞成功的。飞机在进入实用阶段之前，多是作为体育运动工具使用的。从运动工具变为运输工具和攻击性武器，进而向大型化、多样化、高性能发展，不可否认，两次世界大战起到了极大的催化作用。

在第一次世界大战之前，飞机已经开始作为先进技术纳入军事装备的行列。1909年，美国成为第一个拥有军用飞机的国家。奥佛设计制造了第一架可进行军事侦察的飞机。此后，军事需要对航空技术的促进日益明显。第一次世界大战之前，拥有飞机的国家，飞机的数量一般为几十架。在战争期间，飞机的数量则以惊人的速度增加，法国很快拥有了1400架军用飞机，德国有1000架，苏联有800架，英国有400架，美国、中国、日本、保加利亚、希腊、巴西等都有一定数量的军用飞机。到1918年，第一次世界大战结束时，英国、法国、德国都已拥有几千架飞机，四年中增加了几百倍。美国是最先发明飞机，也是最早有军用飞机的国家，而且拥有得天独厚的研制飞机的机会和条件，但在第一次世界大战参战前仅有23架军用飞机。1917年4月，美军飞机性能远落后于法国的状况，引起了美国政府的重视，故决心改变现状，要在航空技术方面赶上法国。美国政府立即采取强制手段，动员所有汽车工厂制造飞机，还在国会中成立了国家航空顾问委员会，并由国家投资建立了第一个大型风洞。

在实战中人们认识到，飞机性能的优劣和制造技术的高低，直接关系到战争的胜负。先进的飞机应当具有机动性能高、操纵性能好、安全可靠程度大这些要素，而机动性能则包括飞行速度、高度及续航能力等。第一次世界大战后，不少国家为研制更先进的飞机投入了很大的工本。经过20年时间的探索、研究，飞机的动力装置取得了新的突破，飞机的结构、外形、材料有了很大变化，生产工艺也有了相应的提高。

在第二次世界大战中，空战和空中打击的规模已远远超过第一次世界大战。美国的航空技术和生产能力都已占据首位。其生产的飞机超过十万架，

其中有战斗机，如野马“P—51”；有轰炸机，如空中堡垒“B—17”、超级空中堡垒“B—29”；还有运输机“C—47”等。这些飞机都在战争中发挥了巨大作用，显示出良好的性能。英国在第二次世界大战中生产了几万架飞机，其中有“喷火”式飞机、“兰卡斯特”轰炸机等。日本的“零”式战斗机，也是在第二次世界大战中研制的。在战争期间，各交战国共生产军用飞机70多万架，另有用于军事目的的民航运输机近十万架。由此可见战争规模之大。

第一次世界大战后，飞机的动力装置不断得到改进，特别是增压发动机、涡轮增压发动机和变螺距螺旋桨等新技术的采用，飞机的性能有了很大的提高。第二次世界大战中，飞机的时速已达250公里，高度可达7000米，续航能力超过1000公里。要想进一步提高飞机的速度，活塞式发动机已无能为力了。特别是音速，成了活塞式飞机无法突破的音障。飞机向大型化、载重化发展，需要巨大的动力装置，这也是活塞式发动机无法办到的。在这种需求下，涡轮喷气发动机诞生了。不久，喷气式飞机问世。

喷气式飞机研制成功，意义十分重大。它标志着航空工业进入一个新时代。不过，喷气式飞机的大规模生产和大量投入使用是第二次世界大战以后的事。喷气式发动机的设想早在1906年就已提出。1928年，英国皇家空军学院的弗兰克·惠特尔（1907— ）发表了阐述空气推进的论文，随后提出了把燃气涡轮用于喷气推进的方案，并很快设计出了喷气推进发动机。但在当时并未引起有关部门的重视。直到第二次世界大战爆发前夕，喷气式飞机才进入了激烈竞争阶段。在这一轮竞争中，意欲发动侵略战争的纳粹德国抢了头码。1939年8月，德国研制成以涡轮喷气发动机作动力的He—178喷气式飞机。1941年5月，英国研制成时速为600公里的E—28涡轮喷气机。美国引进英国的发动机仿制出1—A离心式喷气发动机，并于1942年研制出XP—59A喷气式飞机。同年，德国又有了Me—262型喷气式飞机，时速高达960公里。改进喷气机的竞争，随着战争的升级而加剧。1943年，喷气式飞机的生产开始进入规模化阶段。1944年，美国B—17和B—29轰炸机和德国Me—262喷气机分别加快了技术改进的步伐。1944年6月，德国用喷气机推进装置制造V—1飞弹，用来袭击英国本土，英国则用喷气式飞机进行拦截。

飞机在战争中发挥了作用；战争又促进了飞机的革新、改进和发展。两次大战之后，军用飞机在转向民用航空方面，都发挥了很大作用。第一次世界大战之后，美国最早使用飞机横跨大陆邮递信件，并将军用飞机改为民用。20年代末至30年代初，许多国家相继建立了民用航空公司。民航的建立和发展，为交通运输业注入了新的活力，也极大地改变了交通运输业的面貌。第二次世界大战以后，军用喷气式飞机得到迅速发展，同时，也开始研制民用喷气式客机。在研制民航客机方面，率先取得成功的是英国。1949年，英国德·哈威兰公司研制出第一架喷气式大型客机“彗星—1号”，可乘坐80人，载客容量成倍提高，飞机时速超过800公里，高度可达1万米。制造

大型喷气客机的序幕从此拉开。

5. 火箭的发明与运用

现代火箭技术是从 19 世纪末开始发展起来的，其重要标志是液体火箭的产生。使用液体燃料的火箭和喷气式飞机几乎是同时出现的。

液体燃料火箭的设想是俄国的齐奥科夫斯基（1857—1935）首先提出的。1903 年，他在《利用喷气工具研究宇宙空间》一文中提出火箭飞行和火箭发动机的原理，阐述将火箭用于星际交通的可能性，并提出液体燃料火箭的思想和原理图。文中还说明了火箭由地面起飞和在星际空间飞行的条件，并指出，必须设置地球卫星式中间站，才有可能飞向其他行星。因此，齐奥科夫斯基被誉为宇宙航行的先驱。

最初制成火箭的是美国人戈达德（1882—1945）。1901 年，他曾撰写了一篇关于太空航行的论文，并从 1908 年开始研究火箭原理，试验各种火箭燃料，从理论上阐述了液氧和液氢是最好的化学燃料。1918 年 11 月，他成功地发射了自己研制的固体燃料火箭。1919 年，他发表的《达到最大高度的方法》中收入了 1916 年所著的《关于火箭的潜在可能性》的论文。1926 年 3 月 16 日，他制成世界上第一枚以液氧和汽油为燃料的液体火箭。之后，他又提出多级火箭理论，并预言能把火箭送上月球。1929 年，戈达德在古根海姆基金会的资助下，在新墨西哥州建立了大型火箭试验场，发射了第一枚载有气压计、温度计、照像机等探测仪器的火箭。1930 年至 1935 年间，他又试验发射了多枚火箭；高度达到 2500 米，时速超过 1000 公里。到 1945 年止，戈达德共取得了包括固体、液体火箭推进器和多级火箭技术在内的 214 项专利，对美国火箭技术的发展作出了巨大贡献。

1923 年，德国的“火箭之父”欧柏斯（1894— ）撰写了《进入宇宙的火箭》一书。1927 年，在他的努力下，德国建立了世界上第一个宇宙航行协会。冯·布劳恩（1912—1977）在欧柏斯影响下，从 1929 年开始进行火箭试验，并取得明显进展。他在燃料问题、发动机冷却等方面都有重要贡献。1931 年，宇宙航行协会会长温克勒制造的液体火箭发射成功。此后，德国的火箭技术迅速发展起来。

从 1930 年起，战争的阴影开始笼罩德国，为了发动新的战争，德国决定秘密发展火箭技术，并成立了陆军武器发展小组，建立了陆军火箭试验站。为了保证火箭研制工作的顺利进行，军方提供了最先进的设备和充足的资金。1933 年，希特勒掌权后，大肆推行法西斯独裁和军国主义。他把所有研究火箭的专家全部划归德国陆军管辖，并命令他们把研究宇宙航行马上转换为研究火箭武器。1936 年，680 公斤的火箭就是在当时那样的政治背景下研制成的。德国火箭研究所的所长冯·布劳恩，在研制过程中起了重要作用，当时他只有 24 岁。1942 年 10 月 3 日，在冯·布劳恩的主持下，大型 V—2

火箭发射成功。其重量为 13 吨，最大飞行高度 80 公里，最大时速 7.5 公里/秒，最大射程 300 公里。

1944 年，德国开始大规模生产 V—1 飞弹（喷气机推进装置）。德国利用飞弹轰炸英国本土，但在英国雷达的检测和英国喷气机的迎击下而告失败。同年 9 月，德国又大量生产 V—2 型远程火箭，推力为 30 吨，可以每秒 1.7 公里的速度续航 240 公里。V—2 火箭袭击了英国本土，使英国受到很大损失。

当时德军 V—2 火箭是从荷兰的瓦萨纳森林向伦敦发射的，速度超过音速，因此防备 V—1 飞弹的办法对 V—2 火箭无效，德国一共向英国发射了 1120 枚火箭，有 1050 枚命中伦敦，很多建筑物遭到破坏，大量市民伤亡。

由于希特勒并不信任火箭技术，所以 V—2 火箭其实在战争中并未充分发挥作用。1939 年 9 月，希特勒说：“V—2 火箭在这次大战中用不上”，于是，火箭的研究经费被大量削减，V—2 火箭的实用也因此推迟了。可以想象，如果德国 V—2 火箭的研调和制造一直进展顺利，并能在 1943 年以前用于战争，那么，第二次世界大战中双方的较量可能又是另一番情景。在战争与科技的关系方面，希特勒的许多愚见，加速了他的灭亡。

6. 早期遥感技术

早期遥感技术是通过空中摄影和仪器扫描获取地面信息的方法。

要进行空中摄影和仪器扫描，必须有一个空中装置作载体，用以安置照相设备或扫描仪器。这种空中装置被称为遥感平台。风筝、气球、飞艇、飞机都可以用作遥感平台。

早在 1858 年，图纳里恩利用升空几百米的气球，成功地拍摄下了巴黎“鸟瞰”照片。1909 年，意大利的威尔伯·赖特在飞机上拍摄了第一张航空照片。这些空中摄影可视为遥感技术的开端。

航空摄影技术服务于军事目的，是在第一次世界大战之后的事情。30 年代，军备竞争和战争需求使飞机的数量成倍增长，飞机的性能、工艺水平等都得到迅速提高。这些都为当时的遥感技术提供了先进的遥控平台。这一时期还出现了适于高空摄影的照相设备，如缝隙相机和多波段（多光谱）相机。后来，又逐渐发展到红外扫描相机。

在第二次世界大战中，遥感技术逐渐引起交战各国的重视。德国最先认识到遥感技术的军事价值，最先将遥感技术用于战争之中。1939 年 9 月到 1940 年 5 月，德国在整个西部战线频繁拍摄对方的机场、港口、桥梁、运河、铁路等设施以及对方面队的运动情况，并根据航空遥感所获取的情报，成功地袭击了对方的机场、港口、运输线和部队，闪电般侵入别国领土，迅速向西部推进战场。

1940 年，英军从敦刻尔克撤退后，地面情报来源被切断，只能靠航空摄

影来了解德军运移的态势和欧洲大陆战场的情况。这一需求刺激英国的航空遥感技术迅速发展，并很快超过德国。1940年，英国从法国、荷兰和比利时海岸附近的通路上发现了德军准备入侵英国的急迫情况，立即作好反击准备。两天之后，英国对进攻英格兰的德军进行了较准确的空袭，迫使希特勒放弃了马上入侵英国的计划。

第二次世界大战初期，美国未大规模投入战斗，对遥感技术的重要性尚认识不足，航空摄影技术和照片判读技术相对较为落后。塔拉瓦登陆战前，美军利用空中侦察对该岛周围珊瑚礁处的海水深度进行了探测，但这一地区实际的海水深度比探测、分析所得的深度要浅得多。结果，在塔拉瓦登陆战中，美军的许多水陆两栖登陆艇被搁浅在远离海岸的地方，造成重大伤亡。美国从这一惨痛教训中认识到提高遥感技术的迫切性，美海军照片判读中心对水深测定问题进行了大规模研究，在航空摄影基础上，发明了水深测量的遥感技术。这一技术成果后来用于美军攻击冲绳岛的准备工作中，判读技术人员根据遥感照片，计算出该岛周围珊瑚礁上的水深，与实际水深仅相差30厘米，达到当时的最先进水平。

战争期间，许多国家还分别对红外扫描相机进行了研制。这种新式遥感仪器是利用红外探测元件，以电信号形式接受来自目标的红外辐射，然后把电信号再转换成可见光，并成像在感光胶片上。这一类非摄影式遥感仪器是不受气候影响的全天候遥感仪器，标志着遥感技术的重大突破。

遥感技术的发展，给交战国双方都造成很大威胁。这一点又促使各国开展对伪装技术的研究，想方设法给对方的遥感仪器造成信息错判。而伪装技术的研究，反过来又促进了遥感技术的提高和发展，促进了新的反伪装的遥感仪器的研制。遥感红外相机的出现就是一例。

第二次世界大战后，遥感技术在军事、经济、资源探测等方面继续得到广泛应用。火箭、人造卫星等现代遥感平台和相应的现代遥感仪器的出现，使遥感技术在人类生活中发挥越来越大的作用。

