

学校的理想装备

电子图书·学校专集

校园网上的最佳资源

当代物理学进展



序 言

21 世纪的曙光，交织着人类对未来的希望，已经透射出东方的地平线。在向新世纪迈进的时候，回顾 20 世纪、特别是近几十年来物理学的发展轨迹，展望 21 世纪、特别是未来二三十年物理学的发展趋向，是十分有意义的。

20 世纪以来，以相对论与量子力学的创立为标志的现代物理学研究工作，从理论和实践两个方面，对人类认识和社会发展起到了难以估量的作用。物理学理论的发展，在三个层次上把人类对自然界的认识推进到了前所未有的深度和广度。在微观领域内，已经深入到基本粒子的亚核世界（ 10^{-15} 厘米），并建立起统一描述电磁、弱、强相互作用的标准模型，还引起了人们测量观、因果观的深刻变革。特别是量子力学的建立，为描述自然现象提供了一个全新的理论框架，并成为现代物理学乃至化学、生物学等学科的基础。在宇观领域内，研究的探针已达到 10^{28} 厘米的空间标度和 10^{17} 秒的宇宙纪元；广义相对论的理论预言，在巨大的时空尺度上得到了证实，引起了人们时空观、宇宙观的深刻变革。在宏观领域内，关于物质存在状态和运动形式的多样性、复杂性的探索，也取得了突破性的进展。凝聚态物理层出不穷、令人眼花缭乱的成果和混沌现象奇特规律的惊人发现，给人类原有的知识体系以巨大的冲击，在动力学系统长期行为的确定性与随机性，决定性描述与概率性描述等方面，引起了认识上的深刻变革。

在实践方面，现代物理学的发展导致了原子能的释放和应用，导致了半导体、光通讯等新兴工业的崛起，为激光技术、新材料研制、新能源开发开辟了新的技术途径，并推动了计算机革命的进展。现代物理学在推动能源科学、空间科学、材料科学、信息科学、环境科学、海洋科学的发展中起到了关键性的作用，成为 20 世纪下半叶以来蓬勃发展的现代科学技术革命的重要科学基础。现代物理学以新兴高技术群为中介向生产力的转化，极大地改变了人类的生产方式和生活方式，成为推动现代社会发展的重要杠杆。

50 年代以来的当代物理学已经发展成为一个相当庞大的学科群，包括了高能物理（粒子物理）、原子核物理、等离子体物理、凝聚态物理、原子分子物理、光物理、声学、计算物理和理论物理等主体学科以及难以数计的分支学科。物理学内部各个分支学科的渗透和交叉，物理学和化学、生物学、材料科学、天文学等其他学科的渗透和交叉，又产生了许多新的、富有生命力的边缘学科，形成了众多极有发展前途的科学前沿。当代物理学还呈现出高速发展的趋势，现代物理学中 90% 的知识是 1950 年以后取得的。其发展之快，分支之多，变化之大，已使人们很难及时作出全面的概括。当代物理学研究的综合性、深入性、复杂性、创新性和可应用性，都呈现出鲜明的时代特点。物理学在 21 世纪发展的全景，人们无法作出全面的预测。只能根据我们目前的认识水平，根据当代物理学发展的状况和特点，对 21 世纪最初几十年的发展趋势作“豹斑之窥”。大体说来，在科学技术整体发展的推动下，物理学仍将加速地发展和分化，同时又会出现更多的渠道，增强各个分支之间的交叉和非线性作用，导致更为广泛和深刻的综合，朝着各个分支学科不断深入而整体领域综合交叉的整体化方向进

展。物理学作为精密科学的典范，并以其探索视野的广阔性、研究层次的广谱性、理论适用的广泛性，在今后很长时期内仍将发挥其中心科学和基础科学的作用。它也仍将不断地推出新思想、新原理和新方法，孕育出功能奇特、威力巨大的新技术，成为新技术和新兴产业部门的源泉和生长点。物理学与未来高新技术将更加紧密地发生融合，互相促进，协同发展，成为科学技术革命深入发展的主旋律；物理科学技术领域愈来愈频繁出现的突破性进展，将会更加吸引社会公众对物理学事业发展的热切关注。

物理学的研究领域，将继续朝着时空尺度的极端方向和复杂系统方向发展；向着更小尺度、更快时间、更强的相互作用、结构更为复杂的体系过渡。

粒子物理学中的“标准模型”理论，经受了相当成功的实验检验，被认为是迄今为止最有效的一个唯象理论，但是这个理论仍然存在着许多基本的疑难问题有待解决。诸如希格斯粒子的存在和本质，粒子质量的来源，夸克和轻子更深层次的特征标度，标准模型更深层次上的基本规律等，都是今后主要的研究领域。寻找超出标准模型的新理论，将成为高能物理近期探索的一个重要任务。

自1932年发现中子以来，原子核物理学取得了举世瞩目的长足进展。近几十年来，随着核探针能量和种类的增加，核物理学在新的自由度和新的层次上不断取得新成果。对非核子（特别是夸克）自由度、更高能量自由度、质子-中子比自由度、角动量自由度的研究，将是今后的一个重要方向。特别是80年代末出现的放射性核束，使核反应探针在核素图上从稳定核素发展到不稳定核素。远离稳定线的新核素，特别是滴线核以及超重核、奇特核的合成和研究，将会对原子核物理学的发展起到积极的推动作用。

以研究复杂多体系统为主的凝聚态物理学，是当代物理学中内容最丰富、应用最广泛的一门分支学科；也是当前物理学研究中最活跃、最能激发人的创造智力的研究领域。这一领域的一系列发现，已经并正在对其他学科（包括化学、生物学、数学等）产生了重大影响；并通过它所诱发的高新技术进展，对人类生活产生了巨大影响。凝聚态物理前沿研究此起彼伏，发展迅速，使人目不暇接。它的发展大趋势将是现有分支领域强化研究，又不断开拓出新的领域，制备出更多更高性能的新材料，发现令人意想不到的新现象。超导电性物理、晶体学、磁学、表面物理、固态发光物理、液态物理、生命现象中的物理问题、极端条件下的物理等研究内容，成为当前凝聚态物理学广阔的前沿领域。其中低维凝聚态物理与以发现新的有序相、有序相的对称破缺、以及这些新相的物理性能为主要目标的研究工作，更是这一学科中最具活力的重要发展前沿。在今后十多年，可以期望凝聚态物理的研究取得新的重大发现和进展。等离子体物理是物理学中一个年轻的分支学科。等离子体物理的研究已经成为人类认识宇宙、控制地球环境变化、以及最终解决能源问题的基础和保证，同时它还开辟了很多新技术与新应用的发展途径。热核聚变等离子体、空间等离子体、天体等离子体和技术与高技术等离子体的研究，愈来愈受到重视。原子分子物理是微观世界的第一个层次，它的基础性强，应用面广，其发展直接或间接地推动了电子学和电子产业、光电子学和激光产业的诞生和发展，还形成了量子化学、分子反应动力学、分子生物学和分子天文学等一批交叉学科。原子分子激发态结构和动力学理论的研究，是当前原子分子物理学

中最活跃的领域。这一学科的发展，在推动科学技术发展、社会进步和提高国防能力方面，将发挥重要作用。

光物理学是当代物理学发展中最活跃的领域之一。特别是在激光问世以来的三十多年里，光学的面貌发生了深刻的变化。激光物理、非线性光学、高分辨率光谱学、强光光学、量子光学等学科正日趋成熟，并孕育着光子学、超快光谱学和原子光学等新的分支学科。可以预见，光物理的研究在 21 世纪将会有若干突破性的进展，并对生命科学、生物学、激光化学等领域的突破，以及光学、光电子、光通讯等高技术产业的发展，起到关键性的先导与推动作用。

在引力物理的研究领域，广义相对论仍然是对引力的最成功的描述。广义相对论所给出的关于时空结构的相对性的描述，不仅把物理几何与非欧几何相联系，而且把时空结构与物质运动彻底结合起来；不仅揭示了时间与空间的实在性，而且形成了时空与物质的完整性理论。总地看来，广义相对论的实验检验还远远落后于理论成果；只是在近二十多年来，由于射电和雷达天文学的技术进步和精确跟踪太阳系飞船能力的提高，检验引力理论的技术才有了出人意料的提高。关于引力波的存在，60 年代已得到理论上的肯定；对脉冲双星 PSR1913+16 运动的长期观测，已为人们提供了印象深刻的引力波存在的证据。人们期望，在最近十年二十年内，引力波可能被探测到。以广义相对论为基础的大爆炸宇宙模型，已经得到越来越多的观测上的支持，但仍然存在一些基本的困难。近年提出的暴胀宇宙学方案，不仅能在奇点问题、平直性问题、视界问题与唯一性等问题上克服大爆炸理论的困难，而且还由于它涉及到普朗克尺度的极早期宇宙图景，一个全新的量子引力理论不仅将由此诞生，而且人们所期望的四种基本相互作用的大统一，也将有可能在这一阶段相关的能量标度上变得明显。因而对极早期暴胀宇宙的量子引力理论的研究，越来越受到世人瞩目。

最后，在非线性动力学、非平衡统计和热力学、不稳定性（如湍流）、混沌等研究领域内，过去二三十年的探索已经提出了许多问题。在未来的几十年里，为寻求这些问题的答案所作的努力，一定会伴随着更多奇特的新现象的发现。

物理科学的诞生和发展，几乎与人类认识自然和利用自然的历史共久远；未来物理学的发展，仍将与人类文明的进步共生同行，它永远是人类文化系统中最重要子系统之一。在现代物理学的各个研究领域，历来都有人作出发现已近尾声的预言，但这些预言无一不遭到历史的揶揄，每一个研究领域都不断涌现出激动人心的新发现。在过去的几十年里，每几个年头都有一些物理现象和方法的发现，它们是人们当初所未曾预料到的。可以断言，在今后的年代里，也一定会更加频繁地出现这些难以预料的新发现。以研究物质结构和运动在各个层次上的基本规律，提出新概念、建立新理论为目标的物理学理论研究，将始终处于整个自然科学发展的前沿；物理学中那些和应用技术密切结合的分支学科，将会有更多发展与突破的机会。中国是世界上文明发达最早的国家之一，对人类文明和科学的发展作出过巨大的贡献。在物理学领域内，中国也曾以丰富的成果领先于世界一千多年。但是近代自然科学却没有出现在这个历史悠久的国度，中国现代自然科学仍然处在落后的地位。这一迟滞现象自有其深刻的社会根源、历史根源和认识根源。20 世纪下半叶以来，中国的自然科学本应有高

速发展的条件，但又因种种原因而失去良机。甚至在一段时期内，出现了一场反科学运动，使包括物理学在内的科学研究和科学教育横遭摧残。只是在最近十多年里，中国的现代物理学研究工作才努力向国际水平靠拢，取得了一系列可喜的成绩，缩小了与国际水平的差距。在本书中，我们特设专章对中国近现代物理学的发展作一个全面的概述，以便使我们更准确地了解我们的成就，估价我们的进步，认清我们的差距，确定我们的奋斗目标。中华民族是一个充满智慧的民族，中国科学的发展充满振兴的希望。只要我们及时抓住机遇，确立正确的科学发展战略思想，制定和认真执行推动科学发展的科技政策，正确处理好科学、技术与经济发展的关系，大力地、自觉地发展在未来最有意义的主要门类的基础学科和在社会与经济发展中有重大意义的实用科学，勇于提出和解决重大科学问题和难题，大力发展科学教育事业，提高全民族的科学文化素质，我们就一定能够后来居上，成为世界科学技术和经济发展的中心之一。

一、当代核物理学的进展

人类认识原子核最早始于对天然放射性的研究。1896年，贝克勒尔（Becquerel, Antoine-Henri 1852~1908）在研究X射线时，发现了物质的一种奇特辐射现象。1898年，居里夫人将它命名为放射性。1899年贝克勒尔发现了射线的磁偏转，遂于1900年他正式指出，这种带负电的射线由高速电子组成，这些粒子的性质与J.J汤姆逊发现的阴极射线电子相同。贝克勒尔所观察到的放射性使人类第一次看到了核变化。这一发现不但导致此后40多年，人们对放射性衰变规律与射线性质的研究，也更促成了原子核物理学的建立与发展。通常把这一重大发现看作核物理学的开端，为此，贝克勒尔与居里夫妇共同获得1903年诺贝尔物理学奖。

1911年，卢瑟福（Rutherford, Ernest 1871~1937）等人用放射性元素发出的射线轰击各种原子，观察到了射线的大角度偏折，从而确立了原子的核式结构，由此不仅提出了原子的行星模型，而且首次提出了原子核这个概念。1919年，卢瑟福又发现，用射线轰击氮核有质子放出，这不仅是人类首次实现的核蜕变，而且也开创了用射线轰击核实现核反应以研究原子核的方法。1932年查德威克（Chadwick, James Sir 1891~1974）发现中子，1934年人工放射性核素合成成功，这是初期核反应研究的两项重要研究成果。它们使人们意识到，原子核由中子和质子组成，从此摆脱了困扰人们长达10年之久的质子-电子核模型，人们更进一步认识到，中子核反应是研究核的更佳手段。由于对核结构、核性质深入认识的渴望，以及对“新能源”的追求，进入到30年代，世界各地大多数著名的研究室及实验室都陆续转向了核物理研究，形成了这一领域研究的世界性高潮。在这一时期，各种静电、直线和回旋加速器先后研制成功，人们获得了束流更强、能量更高、种类更多的各种射线，从而大大扩展了核反应的研究工作。此时，加速器已成为研究原子核、与核物理应用技术的重要设备。1936~1937年间，德裔美国物理学家贝特（Bethe, Hans Albrecht 1906~）与其它两位合作者在美国《近代物理评论》上发表了关于原子核力、核结构以及核反应的长篇论文，这一论文的发表标志着理论核物理学的开端。

(一) 核结构与核动力理论进展

1. 从独立粒子核壳层模型到原子核集体模型

核物理研究一开始,就面临着一个重要的问题,这就是核子间相互作用的性质。人们注意到,大多数原子核是稳定的,而通过对不稳定原子核的衰变、衰变和衰变的研究发现,原子核的核子之间必然存在着比电磁作用强得多的短程、且具有饱和性的吸引力。此外,大量实验还证明,质子-质子、质子-中子、中子-中子之间的相互作用,除了电磁力不同外,其它完全相同,这就是核力的电荷无关性。1935年,汤川秀树(YukawaHideki 1907~1981)提出,核子间相互作用是通过交换一种没有质量的介子实现的。1947年,介子被发现,其性质恰好符合汤川的理论预言。

介子交换理论认为,单个介子交换产生核子间的长程吸引作用($3 \times 10^{-13}\text{cm}$),双介子交换产生饱和和中程吸引作用($1 \sim 3 \times 10^{-13}\text{cm}$),而 ρ 介子交换产生短程排斥作用($< 1 \times 10^{-13}\text{cm}$), π 介子的自旋为零,称为标量介子, ρ 介子的自旋为1,称为矢量介子,它们的静止质量不为零,这确保了核力的短程性,而矢量介子的非标量性又保证了核力的自旋相关性。核力性质及核组成成分的研究,为进一步揭示原子核的结构创造了条件。

在早期的原子核模型中,较有影响的有玻尔的液滴模型、费密气体模型、巴特勒特和埃尔萨斯的独立粒子模型以及迈耶和詹森的独立粒子核壳层模型。其中最成功的是独立粒子核壳层模型。

在1948~1949年间,迈耶(Mayer, MariaGoeppert1906~1972)通过分析各种实验数据,重新确定了一组幻数,即2、8、20、28、50和82。确定这些幻数的根据是:原子核是这些幻数的化学元素相对丰度较大;幻核的快中子和热中子的截面特别小;幻核的电四极矩特别小;裂变产物主要是幻核附近的原子核;原子的结合能在幻核附近发生突变;幻核相对衰变特别稳定;衰变所释放的能量在幻核附近发生突变。在费密的启发下,迈耶在平均场中引入强的自旋-轨道耦合力,利用该力引起的能级分裂成功地解释了全部幻数的存在。接着,詹森(Jensen, JohannesHansDaniel1907~1973)也独立地得到了相同的结果。在迈耶与詹森合著的《原子核壳层基本原理》一书中,他们利用核壳层模型成功地解释了原子核的幻数、自旋、宇称、磁矩、衰变和同质异能素岛等实验事实。由于原子核壳层结构模型所获得的成功,及其在核物理研究中的重要作用,迈耶和詹森共同获得1963年诺贝尔物理学奖。

核壳层模型是在大量的关于核性质、核谱以及核反应实验数据综合分析的基础上提出的,它对原子核内部核子的运动给出了较清晰的物理图象。这一模型的核心是平均场思想。它认为,就像电子在原子中的平均场中运动一样,在原子核内,每个核子也近似地在其它核子的平均场中做独立的运动,因此原子核也应具有壳层结构,通常把这一模型称为独立粒子核壳层模型。

平均场的思想使核壳层模型取得了多方面的成功,但是它也具有不可避免的局限性,因为核子之间的相互作用不可能完全由平均场作用代替。除了平均场以外,核子之间还有剩余相互作用。随着核物理研究的发展,

在 50 年代以后，陆续发现一些新的实验事实，如大的电四极矩、磁矩、电磁跃迁几率、核激发能谱的振动谱、转动谱以及重偶偶核能谱中的能隙等，它们都不能用独立粒子的核壳层模型解释。

1953 年，丹麦物理学家、著名物理学家 N. 玻尔之子阿·玻尔 (Bohr, Aage Niels 1922 ~) 与他的助手莫特森 (Mottelson, Ben Roy 1926 ~) 及雷恩沃特 (Rainwater, Leo James 1917 ~) 共同提出了关于原子核的集体模型。这一模型认为，除平均场外，核子间还有剩余的相互作用，剩余作用引起核子之间关联，这种关联是对独立粒子运动的一种补充，其中短程关联引起核子配对。描述这种关联的核子对模型已经得到大量的实验支持。核子间的长程关联将使核变形，并产生集体运动，原子核转动和振动能谱就是这种集体运动的结果，而重核的裂变以及重离子的熔合反应又是原子核大变形引起的集体运动的结果。原子核的集体模型认为，每个核子在核内除了相对其它核子运动外，原子核的整体还发生振动与转动，处于不同运动状态的核，不仅有自己特定的形状，还具有不同的能量和角动量，这些能量与角动量都是分立的，因而形成能级。正因如此，与只适用于球形核的独立粒子壳层模型相比，原子核的集体模型有了很大的发展。用它可以计算核液滴的各种形状对应的能量和角动量。此外，当核由高能级向低能级跃迁时，能量通常还能以 γ 射线的形式释放出来，这一特征正与大量处于稳定线附近的核行为相符。此外，根据这一模型，当核形状固定时，转动惯量不变，随着角动量加大，核形状变化，转动惯量相应改变，导致转动能级变化，因此，这一模型对变形核转动能级的跃迁规律的研究，已成为研究奇异核的基础。原子核集体模型解决了独立粒子核壳层模型的困难，成功地解决了球形核的振动、变形核的转动和大四极矩等实验事实，为原子核理论的发展作出重要的贡献，为此，阿·玻尔、莫特森与雷恩沃特共同获得了 1975 年诺贝尔物理学奖。

2. 核结构与核动力学的新进展——IBM 理论

发展核模型的目的，在于更准确地描述原子核的各种运动形态，以期建立一个更为完整的核结构理论。由于人们对于核子间的相互作用性质、规律及机制并不完全清楚，不可能像经典物理那样，通过核子间的相互作用先建立一个核结构与核动力学理论，只能依靠所建立的模型，对有实验数据的核素或能区进行理论计算，再与实验的结果相比较，根据比较结果，调整模型，再通过模型理论，估算没有实验数据的空缺能区，发展实验技术，补充空缺数据，再与理论估算相比较，如此循环往复，推动核结构理论的进展，这是一个艰苦而又漫长的探索过程。截止到 70 年代初，核结构理论的进展大多在传统的范围内发展着。传统核结构理论的特点是：没有考虑核子的自身结构；处理核力多为二体作用，把核内核子间的作用，等同于自由核子间的相互作用；认为核物质是无限的；应用的是非相对论的量子力学；研究对象是通常条件（基态或低激发态、低温、低压、常密度等）下的自然核素。

从 70 年代中到 90 年代，核物理的研究跳出了传统范围，有了巨大的进展。首先是实验手段的发展，各种中、高能加速器、重离子加速器相继投入运行；与此相应，探测技术的发展不仅扩大了可观测核现象的范围，也提高了观测的精度与分析能力；核数据处理技术由手工向计算机化的转变，更加速了核理论研究的进程。受到粒子物理学和天体物理学发展的影

响，核物理理论也开始从传统的非相对论量子核动力学(QND)向着相对论量子强子动力学(QHD)和量子色动力学(QCD)转变。一个以相对论量子场论、弱电统一理论与量子色动力学为基础的现代核结构理论正在兴起。虽然由于粒子物理已成为一门独立学科，核物理已不再是研究物质结构的最前沿，但是核物理的研究却更进入了一个向纵深发展的崭新阶段。

原子核的集体模型除了平均场外，还计入了剩余相互作用，因而加大了它的预言能力。然而，核多体问题在数学处理上的难度很大，这给实际研究造成很大的困难。近十几年来，有人提出了各种更为简化的核结构模型，其中主要的有液点模型，它的特点是反映了原子核的整体行为和集体运动，能较好地说明原子核的整体性，如结合能公式、裂变、集体振动和转动等。除了液点模型外，还有相互作用的玻色子模型(IBM)，这一模型也是企图用简化方法研究核结构。目前，由于人们除了对核子间的核力作用认识不清以外，又由于原子核是由多个核子统成的多体系统，考虑到每个核子的3维坐标自由度、自旋与同位族自由度，运动方程已无法求解，加上多体间相互作用就更难上加难。过去的独立核壳层模型强调了独立粒子的运动特性，而原子核集体模型又强调了核的整体运动，这两方面的理论没能做到很好的结合。尽管核子的多体行为复杂，无法从理论计算入手，实验观察却发现，原子核这样一个复杂的多费密子系统，却表现出清晰的规律性与简单性。这一点启发人们，能否先“冻结”一些自由度，研究核的运动与动力学规律，从简单性入手研究核，这就是相互作用玻色子模型的出发点。

1968年，费什巴赫(Feshbach)与他的学生拉什罗(F. Iachello)在研究双满壳轻核时，把粒子-空穴看成为一个玻色子，提出了相互作用玻色子概念。1974年，拉什罗把这一概念用于研究中、重偶偶核，他与阿里默(A. Arima)合作，提出了相互作用玻色子模型。这一模型认为，偶偶核包括双满壳的核实部分与双满壳外的偶数个价核子部分。若先把核实的自由度“冻结”，把价核子配成角动量为0或2的核子对，即可把费密子对处理为玻色子，用玻色子间的相互作用描述偶偶核，可以使问题大大简化。他们的这一模型在解释中、重原子核的低能激发态上取得了很大的成功。相互作用玻色子模型更为成功之处是，它预言了原子核在超空间中的对称性。它指出核转动、核振动等集体运动行为是核动力学对称性的反映。由于对核动力学对称性的揭示，这一模型虽然比较抽象，却更为深刻也更为本质。在过去，提到对称性，往往被认为是粒子物理学的研究课题。其实，核物理也是对称性极为丰富的研究领域。最早注意到核对称性的是匈牙利裔美国物理学家、狄喇克的妻兄维格纳(Wigner, Eugene Paul 1902~)。维格纳毕业于柏林大学化学系，1925年获得博士学位，1930年与诺伊曼(Neumann, John von 1903~1957)一起被邀请到美国，担任普林斯顿大学数学物理教授。1936年，两人共同创立中子吸收理论，为核能事业做出重大贡献。1937年，维格纳基于核的自旋、同位旋，引入超多重结构，建立了宇称守恒定律。由于对原子核基本粒子理论的贡献，特别是对对称性基本原理的贡献，维格纳获得了1963年诺贝尔物理学奖。继维格纳，对原子核动力学对称性进行更深入研究的是埃里奥特。1958年，埃里奥特研究了谐振子场的对称性，建立了玻色子相互作用的SU(3)动力学对称性理论，这一理论与质量数A在16~24的核理论有很好的符合，但对于A较大的

核，由于自旋-轨道耦合，使这种对称性遭到破坏，而偏离很大。在 1974 年拉什罗和阿里默提出的相互作用玻色子模型中，将角动量为 0 的玻色子称为 s 玻色子，角动量为 2 的玻色子称为 d 玻色子，s、d 玻色子展开一个 6 维超空间，系统状态的任何一种变化，都可以通过 6 维空间的么正变换实现，这种么正变换构成 $U(6)$ 群。原子核的角动量守恒即与空间转动不变性相联系，即 s、d 系统具有 $U(6)$ 的对称性。他们还发现，s、d 玻色子系统存在三个群链， $U(6) \supset U(5) \supset SO(5) \supset SU(3)$ ，简称 $U(5)$ 极限。 $U(6) \supset SU(3) \supset SO(3)$ ，简称 $SU(3)$ 极限。 $U(6) \supset SO(6) \supset SO(5) \supset SO(3)$ ，简称 $SO(6)$ 极限。在三个群链情况下，与 s、d 玻色子相互作用相关的哈密顿量均有解析解，原子核具有相应群的对称性。在三种极限情况，能量本征值对角动量都有确定的依赖关系，动力学对称性也依能级次序的表现而不相同。总之，这一研究成果揭示了原子核结构与动力学的对称性，并与实验结果取得了很大程度上的一致，IBM 理论取得了很大的成功。

(二) 核内非核子自由度的研究

1. 介子自由度

在建立相互作用玻色子模型的同时，核结构理论又从核内非核子自由度的研究中得到了新的进展。以核集体模型为代表的广义核壳层模型尽管取得了一定的成功，但毕竟还有一定的局限性。首先，这些模型都只是从部分实验事实或观测现象出发，从某个侧面用类比方法反映核子系统的机制。此外，在核反应理论中，所引入的可调参数又太多。可调参数越多，说明这个理论离成熟性与完整性越远。再加上现有的各种核模型间缺乏统一的内在联系，它们不是一个包容另一个，而是彼此独立，相互间关联甚少。追究起来，存在这些问题的原因是对核多体系统的认识有关。按传统认识，核内的核子只是一个无结构的点，核仅由这些被当作为点的核子组成，即原子核只存在有核子自由度，核子之间的作用单纯为两点间的作用。事实上，早在 30 年代，有人就预言了核内存在有非核子的自由度。

1932 年，查德威克发现了原子核内除了质子外，还有中子以后，很快地，海森伯就提出原子核是由质子和中子组成的。然而是什么力把它们紧紧地约束在核中呢？1935 年，汤川秀树发表了核力的介子场理论，他认为介子是核力的媒介，并参与 β 衰变，同时提出了核力场方程及核力的势。根据这一理论，质子和中子通过交换 π 介子互相转化。1947 年， π 介子在宇宙射线中被发现。由于在核力理论中预言 π 介子的存在，汤川秀树获得了 1949 年诺贝尔物理学奖。

随着粒子物理学的发展，人们逐渐发现，在原子核内，除了传统的质子、中子自由度以外，还有更多的自由度，它们包括： π 介子自由度、 ρ 介子自由度以及各种核子的共振态、 Δ 粒子自由度、核内夸克自由度和核内色激发自由度等，情况远比人们对核的传统认识复杂。对这些自由度的研究极大地丰富了原子核物理学的基本内容。

多年来，人们一直在寻求着核内存在 π 介子的直接或间接的实验证明。一个主要的困难是得知核内存在 π 介子，需要波长极短的入射粒子束。为避免强相互作用带来更多的不确定性，人们选用了入射光子的方法。近年来，有两个有名的实验给出了核内存在 π 介子自由度的证明。其一是氘核的光分裂实验，人们用两种方法计算了氘核光分裂 $\gamma + d \rightarrow n + p$ 过程的反应截面。结果发现，在入射光子能量 $E_\gamma = 50\text{MeV}$ 情况下，认为核只具有纯核子自由度的计算结果与实验符合，偏差只有 10% 左右；然而当 $E_\gamma > 50\text{MeV}$ 时，纯核子自由度的计算与实验结果的偏离明显地加大，只有考虑了 π 介子自由度以后，才与实验结果一致。这一实验不仅证明了核内 π 介子的存在，而且还说明了在通常的低能核物理中， π 介子的自由度不能表现出来。另一个证明 π 介子自由度的是利用电子散射对 ^3He 形状因子的研究实验。实验结果表明，在电子与核的动量转移过程中，越接近核中心区域，动量交换值越大，核中心区域是高动量转移区，核的边缘为低动量转移区，而只有在低动量转移区，纯核子自由度理论才与实验结果符合，在高动量转移的中心区，必须计入 π 介子及 Δ 自由度的影响，才能与实验符合。这个实验不仅证明了核内 π 介子自由度的存在，而且进一步指出，在原子核的中心区域，非核子自由度问题的重要性更为突出。

2. 夸克自由度

从 40 年代末到 50 年代初，随着世界上各大型加速器的投入运行，粒子物理逐渐从核物理中分化了出来。本世纪 60 年代以后，粒子物理取得了一系列令人瞩目的进展。例如，在 70 年代初，格拉肖、萨拉姆和温伯格将弱、电相互作用统一在 $SU(2) \times U(1)$ 对称群的规范理论之中，并从多方面得到了实验上的直接和间接的证实。粒子物理的另一个著名成就是夸克模型和量子色动力学的建立。根据微观世界中的对称性，不仅可以对强子进行分类，而且还对强子内部结构的认识提供了有效的途径。低能强子按 $SU(3)$ 对称群分类，这些强子的基本构件，也是 $SU(3)$ 对称群的基础就是夸克，包括 u 夸克、d 夸克和 s 夸克。为使强子满足自然界普遍遵守的自旋与统计性关系，每种夸克还有 3 种不同的色，色相互作用是强相互作用的起源，而传递色相互作用的 8 个媒介子就称为胶子。实质上，强相互作用理论即为 $SU(3)$ 色对称群的规范理论，称为量子色动力学 (QCD)。根据夸克模型，原子核的核子应由 3 个价夸克以及称为海夸克的虚夸克-反夸克对胶子组成，而传递核子相互作用的介子应由价夸克、价反夸克和海夸克、胶子组成。这种物质结构的新观点启发人们思索，核内的核子处于核的“环境”之中，它们到底与自由核子有什么区别？核“环境”对核子有什么影响？核内的夸克和胶子的分布如何？它们都参与什么作用？……这一系列问题都将与核内夸克自由度等的非核子自由度有关，这些问题已成为当今核物理发展的关键。

目前还不能严格地用量子色动力学描述原子核这样的多夸克系统，考虑到可能存在夸克自由度，有人提出了一个更为大胆的简化核模型。这一模型从夸克和它们之间的相互作用力出发，采用类似传统的独立粒子壳层模型的方法来解释原子核的各种性质。在考虑夸克间相互作用时，这一模型假定存在有“对力”，而不考虑夸克的禁闭性质。根据这一模型，夸克的色自由度使每个壳层上容许的夸克数恰好与传统壳层模型每个壳层上的核子数相同，这使人们想到，在原子核内的夸克存在有自由度，它们可能不像在自由核子中那样禁闭，那么原子核内的夸克究竟有多大的几率跑出核内的核子之外？原子核内的夸克自由度能否表现出来？在对这些关键问题的研究中，核物理与粒子物理两大学科又重新走到一起，而趋于汇合之中。

3. 高能轻子非弹性散射实验——EMC 效应

传统的原子核的质子-中子模型在描述低能核现象时都十分成功，这表明，要发现核内的夸克效应或其它非核子自由度应该到高能核现象中去寻找。此外，根据标准模型预言，原子核是由若干核子、介子组合的集合系统，而核子、介子又都是通过胶子相互作用的夸克系统，核子在核内不停地运动，又会由于核子间的重叠形成夸克集团，这样一来，核内核子的性质，如大小、质量等，一定与自由核子不同，例如会稍微膨胀而变“胖”和有效质量变小等。此外，禁闭在核内核子中的夸克密度分布也会与自由核子的不同。这些都是由于夸克自由度带来的影响，称之为夸克效应。

寻求核内夸克效应的最直接和有效的方法就是用“探针”探测。这种“探针”就是能量极高的入射粒子。入射粒子的能量越高，它的德布罗意波长越短，分辨核内微小尺度的能力越强。此外，最好采用电子和 μ 子等非强子作探针，以避免强相互作用干扰，因为至今对强相互作用的了解不如电磁相互作用那样清楚。对于实验的结果，有人预计，当用能量高达几

个京电子伏的高能轻子打入核内时，它们与核内夸克相互作用而散射，通过对散射粒子的能量、动量和散射角分布的测量，探知核内夸克的动量分布，即核子的结构函数。而另一些人则认为，原子核只是一个质子-中子构成的弱束缚体系，对于高达几个京电子伏的高能过程，这种弱的束缚不会起什么作用，核的“环境”影响不能显示出来，在自由核子靶上以及在原子核内核子靶上，测量这种结构常数不会显示什么差异。然而实验的结果，却大大出乎后一些人的预料。

1982年，在欧洲粒子物理研究中心，由来自17个国家和地区的89位高能物理学家，组成了欧洲 μ 子实验合作组（EMC组），进行了带电轻子深度非弹性散射实验。他们使用的高能轻子为电子、 μ 子和中微子，轻子与核子间传递的能量高达几个到几十个GeV，这一实验结果发表在《物理通讯》杂志上。实验得到了铁原子核结构函数与氘核结构函数的比值，发现这一比值是夸克动量与核子平均动量比值 x 的函数，当 x 在一定的范围（布约肯区）内时，这个比值为0.05~0.8，且呈一定规律随 x 变化。这个结果很重要，因为如果认为核内的核子仍保持自由核子的性质，这个比值应为1，比值偏离1的实验结果表明，原子核内的核子包含了较多的低能夸克。尽管核子在核内的束缚很弱，周围核物质的存在依然明显地影响到束缚在核内夸克的动量分布。面对这一实验事实，人们不得不改变原来的看法，这一结果由此得名为“EMC效应”。随后，EMC效应陆续被美国斯坦福直线加速器、德国的电子同步加速器及世界上其它几个大加速器的实验证实。

EMC效应的发现引起了世界性的轰动，这不是偶然的。它像科学史上许多其它重要发现一样，不是“先验的理论”，而是实验事实强迫人们去接受一种新的观念，这就是原子核内核子的亚结构与一般自由核子的亚结构有明显的不同。这里值得提起一个反面的例子，如果人们不是被一些“先验的理论”所束缚，本该更提早十几年发现EMC效应。在70年代初，在斯坦福直线加速器实验室（SLAC）就有一个用高能电子测量核子结构函数的研究组。他们以液氢与液氘为靶，得到了核中质子和中子的结构函数。因为用来盛液氢、液氘的容器是钢和铝的，为消除本底的影响，他们又进行了容器的空靶测量，这样就掌握了钢和铝靶的结构函数，却不曾想到与自由核子的结果相比较。EMC效应的结果发表以后，他们把十几年前依然保存完好的数据重新计算分析，他们自己戏称这是“做了一次‘考古学’的研究”。其结果确实充满戏剧性，两次研究一前一后时隔十几年，对不同的探测粒子、不同能区做了测量，竟然得出完全一致的结果。这一事实不仅再一次令人信服地证实了EMC效应的存在，还使人们冷静地看到，SLAC小组先于十几年得到实验的全部数据，却未能成为EMC效应的发现人，这不能不说明，对于那些已被广泛接受却未经实验事实证实的“先验理论”，确有必要重新检验。1988年，EMC组又在极小的布约肯区（ $0.003 < x < 0.2$ ）对不同的核（ ^{12}C 、 ^{46}Ca 、 ^{73}Cu 、 ^{56}Fe 、 ^{119}Sn ）进行了测量。结果发现，在 $0 < x < 0.1$ 时，结构函数比值小于1，有明显的遮蔽现象；而在 $0.1 < x < 0.2$ 时，结构函数比值大于或等于1，有较弱的反遮蔽现象，而且遮蔽现象随不同的核而不同。伯格（E.L.Berger）等人对这一现象做出了解释。他们先从传统的核子-介子模型出发，同时考虑了核子的费密运动修正，认为遮蔽现象来源于核子造成的“影子”，即入射粒子“看不到”处于“影子”

中的核子。根据这一解释，遮蔽现象本应该随着入射高能轻子转移给靶核动量的增大而迅速地减小，以至消失，然而实验现象却与这种估计相反。这表明，EMC 效应使传统的核子-介子模型出现了困难，原子核并非简单的核子的集合，即使引入了核子运动的费密修正，核内的夸克分布也与自由核子不同，这就迫使人们不得不考虑夸克自由度的问题。

根据量子色动力学，夸克的相互作用性质与核力、电磁力及引力性质完全相反。在强子内，夸克间距离很小时，它们几乎相互没有作用，行为像无相互作用的自由粒子，然而随着夸克间距离的加大，禁闭势垒急剧增高，夸克像是被禁闭在强子的内部。EMC 效应的发现使人们想到，禁闭在核“环境”中核子内的夸克自由度可能比自由核子内的夸克自由度大，在核“环境”中，核子内的夸克将有可能以某种几率跑到核子之外，甚至从一个束缚核子中“渗透”出来，再进入另一个束缚核子之中，两个相互靠得较近的核子会以一定的几率彼此“融合”，使核子自身膨胀起来，核子会因这种膨胀而变“胖”，随之有效质量减小。核内核物质密度越大，核子重叠机会越多，夸克禁闭长度增加就越大，这一效应就越明显。对 EMC 效应的这一解释先后由卡尔森(E.E. Carlson) 及克洛斯(F.E. Close) 等人给出，他们的解释与 1988 年 EMC 协作组的实验结果取得了大部分的一致。

事实证明，夸克自由度的研究还是很初步的，与问题的最后的圆满解决仍有相当大的距离。随着研究的深入，问题也不断地接踵而来。1990 年下半年，斯坦福直线加速器研究中心又公布了有关 EMC 效应的新实验结果，他们用 800GeV 的高能质子轰击不同的靶核所产生的双 μ 子实验，测定了靶核内海夸克密度分布变化。结果表明，在布约肯变量范围 $0.1 < x < 0.3$ 时，海夸克密度大致没有变化，这与 EMC 效应的各种模型理论的预言都不一致。即使如此，EMC 效应的意义仍是不言而喻的，它一方面使人们认识到，必须从夸克层次对核的组分与结构进行重新认识；另一方面，从核的夸克禁闭性质变化讨论禁闭的根源又为粒子物理的研究展开了一个新的天地。它使人们确信，高能核物理以及高能重离子核物理 的实验与理论研究一定能为核中夸克效应的研究提供更为丰富的内容，夸克、胶子自由度的核效应以及夸克、胶子自由度与核子、介子自由度的关联终将会被揭示出来。

(三) 核物质新形态的探索

迄今为止，已发现的稳定原子核 265 种，60 种天然放射性核，人工合成有 2400 种核，然而在核素图上，由中子滴落线、质子滴落线及自裂变半衰期大于 $1\mu\text{s}$ 的限制边界内所包围的核素应有 8000 余种，这表明有一大半核尚未被人们认识。根据目前的情况，考虑到可能的生成与鉴别方法，估计还可能被生成或鉴别 600 种左右的新核素，它们是世界各地有关实验室不惜耗费重金搜索的目标。

然而，随着远离 稳定线，未知新核素的生成截面也越来越小，寿命越来越短，使分离、生成和鉴别的难度越来越大。远离稳定线原子核研究在核物理学中占有特殊重要的地位。首先，这些核素具有一系列独特的性质，例如它们的中子、质子数之比异常，有的核结合能极大，有新的衰变方式，如高能 衰变、 延迟粒子发射、 延迟衰变、表面结团结构、形状共存以及中子滴落线附近核的反常大半径等。对这些独特现象的研究，有助于检验和发展现有的原子核理论。此外，现有的核结构模型，大部分是在 稳定线附近几百种核研究基础上建立起来的，如液滴模型、独立粒子核壳层模型、核集体模型等，它们都有待在远 稳定线的原子核研究中得到检验、深化与发展。随着新核素的生成与鉴别，以及随着对它们的衰变性质及核结构的研究，会不断地有新的现象被揭示，人们对核内部的结构以及运动规律的认识也将不断地深化。此外通过对远离 稳定线原子核的研究，还可能找到某些新的同位素和核燃料，为核能与核技术的应用提供新的能源。总之，核物质新形态的研究是一个十分广阔而又值得探索的新领域，这一领域中的任何新的进展都将能推动与它有关的原子物理、天体物理、核化学以及放射化学的进展。

在核物质新形态探索中，带有重要影响的有重离子核物理、极端条件下原子核以及夸克-胶子等离子体的研究。

1. 重离子核物理

这是近 30 年来，在核物理学研究中一个十分活跃又是极具有生命力的前沿领域。在本世纪 50 年代以前，人们在研究原子核的结构与变化时，只是利用质量小的轻离子，如氦核、氖核、质子、中子、电子和 射线等轰击原子核，这一研究已取得了多方面的成果。从 50 年代到 60 年代中期，随着加速粒子能力的提高，人们开始使用高能碳、氮、氧核去轰击原子核，主要进行的是弹性散射与少数核子转移反应。从 60 到 80 年代，重离子核反应开始逐步成为获得人工超铀元素的主要手段。近 20 年来，大约以每年发现 30~40 种新核素的速度发展着。1982 年 5 月 11 日，美国劳伦斯-伯克利实验室(LBL)第一次成功地获得了地球上天然存在的最重元素铀的裸原子核，并将其加速到每个核子 147.7MeV 的能量，整个铀 238 离子的总能量达到 35GeV 。在这个能量上，离子速度达到了光速的二分之一。LBL 的这一创举，不仅开创了相对论重离子物理学，而且使核物理的研究跨入一个以前无法触及的新领域，在这个新领域中，一些激动人心的奇特现象引起了物理界的高度重视。LBL 得到的高能铀离子是由一台称为贝瓦莱克(Bevalac)的加速装置获得的。这台加速装置由两部分组成。一部分是高能质子同步加速器，它只能把质子加速到 10 亿电子伏，是 40 多年前建成，如今早已废弃不用的老加速器，把它配了离子源和注入器，作为第一级加

速器使用；另一部分是重离子加速器。通常，重原子的内层电子由于强库仑作用，被紧紧地束缚在原子核外的内层，Bevalac 先使铀原子部分电离，形成带少量正电荷的铀离子。然后，令其加速，当铀离子的速度超过核外电子的轨道速度时，使铀离子穿过某种金属膜，就会有相当多的电子被“剥离”，而形成带较多正电荷的铀离子，例如 U^{68+} 。再使 U^{68+} 继续加速，再使其通过聚酯树脂薄膜，得到 U^{80+} 和 U^{81+} 的离子混合物，最后再经过一层厚的钽膜，全部电子均被“剥”净，从而得到了绝大多数的裸铀核。

应用高能重离子可以研究核裂变的异常行为。在一般的原子核中，库仑力与核力起着相互制约的作用。若核力较强，原子核比较稳定；若库仑力较强，核就容易裂变。由于中子只参与核力作用，似乎增加中子数可保持核的稳定，然而，核力的力程极短，随着距离增加，核力急剧下降，使原子有一个极限尺寸，超过这个极限，原子核将不能束缚更多的中子。可裂变的铀核正处于核力与库仑力相抗衡的状态，它们稍微受到接触就会裂解，之后，库仑力占优势，使核裂片互相分离。在 Bevalac 中产生的相对论性高速铀核就可以用来研究高能下核裂变行为。果然，把高能裸核注入乳胶探测器中，通过对径迹分析发现，铀核与探测器物质原子核相撞，出现了一系列奇特现象。例如，在 152 个碰撞事例中，有半数事例的铀核分裂成大小相差不多的两块，另外半数事件却分裂成数块，甚至在 18% 的事例中，铀核被撞击粉碎，而且入射能量越高，这种粉碎的事例越多，这类事件是高能核裂变的一种反常行为。

用类氢铀原子还可以对量子电动力学(QED)进行检验。根据量子电动力学，原子体系的跃迁能量可以用一个数学式表述，这是一系列幂指数渐增的连续项求和式，其中每一项都含有原子序数和精细结构常数。过去，在把这个表述式用于氢和氦等简单原子时，由于较高阶项带来的修正在实验中不易被察觉，常被略去不计，可是对于类氢铀原子，这些高价项却起着重要作用，在这种情况下，将对 QED 的理论进行高阶次的检验。在重离子实验中，还发现了一种具有奇特性质的“畸形子”，这是一种比通常的核更容易与物质发生作用的原子核或核碎片。当它们穿透物质时，在没有到达正常深度前，就已经与物质发生了作用，所以它们在靶中的运动深度比正常核碎片浅得多。近年来的一些高能重离子实验表明，大约有 3%~5% 的核碎片属于畸形子。有一种说法认为，它们可能就是一种“夸克-胶子”等离子体。在这类等离子体中，中子、质子已被破坏得失去原来的特性，只剩下一团夸克和体现夸克间相互作用力的胶子。

包括 LBL，目前世界上共有 4 台高能加速器作为重离子核反应的研究基地。到 1982 年为止，LBL 已经能加速直到铀元素的全部重离子；美国布鲁克海汶国家实验室(BNL)可以把 ^{16}O 、 ^{32}S 、 ^{192}Au 加速到 15GeV/N(eV/N 为每核子电子伏)；欧洲原子核研究中心(CERN)可以把 ^{16}O 、 ^{32}S 加速到 60GeV/N；美国布鲁克海汶国家实验室拟在 1996 年建成的相对论重离子对撞机(RHIC)，投资 4 亿美元。它建在原本为建造质子-质子对撞机所开掘的隧道里，隧道周长 3.8km。它包括两个巨大的超导磁环，最大磁场 3.8T，可以使质量数小于或等于 200 的离子能量达到 100GeV/N。它的一个重要目的就是研究在高温、高密条件下，实现普通核到夸克-胶子等离子体的相变。在今后的 20 年内，相对论重离子物理可望获得重要进展。

2. 相对论重离子物理研究

(1)探索夸克-胶子等离子体(QGP)

相对论重离子物理学是近年来发展较快的核物理前沿领域，也是今后若干年内核物理的重要研究方向之一。它主要是研究在极高温（达到 10^{12}K ，即太阳中心温度的60000倍）以及极高密度（10倍于正常核物质密度）下，核由强子态向夸克物质态，即夸克-胶子等离子体的相变。这项研究具有极其重要的意义。首先，夸克-胶子等离子体是人们长期以来渴望求到却又难以得到的一种物质形态。夸克-胶子等离子体与一般的电的等离子体不同，在夸克-胶子等离子体中，夸克在强子外是自由的，而整体上又是色中性的。如果说，上一世纪给本世纪留下了两个谜，一个是无绝对的惯性系，一个是波-粒二象性，这两个谜已随着爱因斯坦的相对论及量子力学的建成得以解决，那么，本世纪粒子物理学的发展又使另外两个更深层次的谜，一是对称性破缺，一是夸克禁闭呈现了出来。当前，描述自然界四种基本作用的理论是，描述强相互作用的量子色动力学(QCD)，描述电-弱相互作用的 $SU(2) \times U(1)$ 的模型理论，描述引力作用的广义相对论，这些理论的最终统一将使这两个谜获得最终解决，而相对论重离子物理研究又直接与这两个谜相关，正因如此，有人称这项研究具有“世纪性的地位”。当两束高能重离子相撞时，虽然在极短的时间内，离子之间无重子分布，是一种物理真空区域，但是它却比一般的真空能量密度高得多，因而是研究真空激发态的理想区域。这时物质的有效质量为零，手征对称性得以恢复。此外，又根据核的相变理论，在正常温度和正常密度 ρ_N 条件下，一般核物质处于正常核态；但当密度达到 $2\rho_N$ 时，可能出现凝聚，这是核物质具有较高秩序的状态，类似晶体点阵排列的原子；当密度达到 $5\rho_N$ 左右，单个核子产生许多新的激发能级，核变为激发态的强子物质；若再进一步压缩核物质，使密度达到 $10\rho_N$ 左右，核由强子激发态继续发生相变，此时出现解除夸克禁闭，夸克跑出核子外，在比核子大得多的范围内自由运动。此时，夸克与夸克间相互作用粒子组成夸克-胶子等离子体(QGP)。虽然这种理论分析尚有许多不确定因素，却引起了许多人的兴趣。人们一致认为，高能重离子反应是实现这一相变的最有希望的途径。有人估计，要实现普通核的非禁闭相变，核碰撞质心能量要达到 $100\text{GeV}/N$ 。预计在1996年建成的美国布鲁克海汶国家实验室的相对论重离子对撞机(RHIC)将能满足这一要求。

(2)格点规范场理论对相变条件的预言

为探索夸克-胶子等离子体，首先应从理论上估计核物质由强子态向夸克-等离子体相变发生的条件。先从核物质密度与强子密度之差估算相变所需要的能量。其结果是，当核密度提高到正常态的4倍时，相变即可实施。然而这种方法仅只是一种估算，精确的方法应采用格点规范理论。在强子尺度的小范围内，研究夸克的物质运动规律时，量子色动力学采用了微扰展开的方法，这种微扰法取得了很大的成功。但是在大于强子的尺度上，夸克-胶子的等效相互作用强度并不小，由于交换动量的结果，使夸克-胶子体系产生了各种非微扰量，原来的微扰法不再适用。在强相互作用中，这种非微扰效应表现在多方面。从粒子的质量看，质子的质量恰好是 938MeV ， π 粒子的质量是 135MeV ， ρ^0 介子质量是 770MeV ，为什么它们恰好是上述值，这实际上就是一种由非微扰效应产生的结果。此外，粒子的

寿命、衰变现象、零点波函数、磁矩、结构函数甚至真空结构等，也都是夸克-胶子在大距离上的作用效应，也属于非微扰效应产生的结果。这些现象与非微扰效应的关系，是粒子物理学中十分重要而又未被完全开发的领域。1974年，美国康奈尔大学的威尔逊(K.G.Wilson)提出了格点规范场理论，用以解释非微扰现象。其作法是，先设法在4维时空中取一系列等间隔的格点，连续的时空被一系列离散的格点所代替。他规定，胶子规范场只在格点间的键上起作用，而夸克费米场则定义在格点上。由上述场量组成的格点作用量具有规范不变性。当格点间的距离趋于零时，格点作用量趋于原有的量子色动力学作用量，格点规范理论趋于连续时空的规范理论，与连续时空的渐近自由相对应。下一步做法是，先在格点体系中计算各个物理量，然后再把格点间距趋于零，就可望得到真正的物理量，特别是那些非微扰量了。

事实上，微观世界中的微扰量与非微扰量本是人为地划分出来的。当认识水平未达到一定的层次时，先讨论微扰量只是一种对复杂事物的简单处理方法。格点规范场理论的建立表明，人的认识水平又向更高层次迈进了一步。此外，由于粒子物理与统计物理的研究对象都是有无穷多自由度的体系，格点微扰理论把它们之间的相似性突出地表现了出来。然而，格点规范理论的计算是很复杂的，因为每个格点有四个正方向共四个键，在SU(3)规范不变条件下，每个键有8个独立变量，每个格点又有正反夸克场，每个夸克场有4个Dirac分量，有三种色，至少有四种味，这样一来，对于每边有16个格点的四维立方体，就有200万个独立变量。由于系统复杂，目前尚不能使用解析方法求解。但是由于理论的规范不变性，使讨论对象具有群积分的性质，可以用数值计算方法计算。1981年，帕瑞西等人利用布鲁克海汶国家实验室的大型计算机，使用抽样计数方法，即蒙特卡罗数值算法，计算了这些群积分，不仅首次得到了介子、质子、 Λ 粒子等强子的质量，而且还得到了介子衰变常数以及标志手征对称性自发破缺不为零的数值。以后，又有人用同样方法计算出更有意义的结果，例如证实了两个重夸克之间的位势随距离的增加，呈现由库仑位势向线性位势的变化。这一结果证明了夸克之间距离加大时，存在有越来越大的作用力，结果使它们“禁闭”起来（渐近自由）。计算结果还显示，温度增加到一定程度，即高能粒子互撞时，夸克的自由能突然加大。这表明，在高能散射中，它们有可能从“禁闭”中被“解放”出来，相变的临界温度为200MeV、密度为正常核密度的5倍以上，达到这一条件相变即有可能发生，这一结果确实给人极大的鼓舞。

3. 实验尝试

1986年，欧洲原子核研究中心(CERN)在SPS加速器上首次进行了(60GeV~200GeV)/N的氧束流冲击重靶的实验，这是一次较为成功的相对论重离子实验。在这以前所做的有关实验，如CERN的p-p， \bar{p} -p实验；费密实验室的p-p实验，虽然能量很高，但由于碰撞粒子的质量太轻，高能密度聚集的范围太小，而LBL的Bevalac上做的Kr束打靶实验，虽然粒子足够重，但每个核子的能量只有1.8GeV，这个值又太低，使碰撞区的温度不够高。还有的虽然能量足够高，但实验的统计性又太差，事例数太少，都未能获得成功。

在CERN的这次成功实验中，发现了人们所期待的“J/ψ抑制效应”，

它是 QGP 存在的迹象之一。根据理论分析, J/ψ 粒子有三种衰变方式, 它可能衰变成两个电子, e^+ 和 e^- ; 还可能衰变成两个 μ 子, μ^+ 和 μ^- ; 或者衰变成强子。在高能碰撞中, 强子也可能产生 J/ψ 粒子。 J/ψ 粒子可以看作由 c 和 \bar{c} 粒子组成, 自由的 $c\bar{c}$ 对存在有束缚态。当有 QGP 产生时, 由于德拜屏蔽效应的存在, 会抑制 $c\bar{c}$ 束缚态的出现, 因而不能组成 J/ψ 粒子, 或者说 J/ψ 中产生的几率下降, 于是 J/ψ 中粒子产额抑制现象常被当作为 QGP 出现的信号。

CERN 使用的是 200GeV/N 的 ^{32}S 打击 ^{238}U , 所形成的体系可能是发射介子和 K 介子, 也可能发射 J/ψ 粒子, J/ψ 粒子又可能再衰变, 通过衰变粒子, 如 μ^+ 和 μ^- , 来判断 J/ψ 粒子的产额。在碰撞区形成一团火球, 边缘地区的 J/ψ 粒子产额竟然是火球中心的 1.6 倍, 由此判定, 碰撞中心出现了 J/ψ 抑制, 即有产生 QGP 的迹象。

另一个显示出现 QGP 迹象的实验是在美国布鲁克海汶国家实验室进行的, 这是测定 K^+/π^+ 比例的实验。他们使用了 14.5GeV/N 的 ^{28}Si 束打击 Au 靶, 观测 K^+ 与 π^+ 产额之比, 并与质子对撞情况相比较。他们认为, 如果有 QGP 产生, π^+ 、 K^- 和 π^- 产额将减少, 至多是不变, 而 K^+ 的产额却要增加, 这样一来, 有 QGP 时, K^+/π^+ 产额比值应加大。他们的实验结果是: ^{28}Si 打击 Au 后, K^+/π^+ 产额比值由质子对撞时的 0.07 上升为 0.20, 而 K^-/π^- 的比值则与质子对撞时一样。

重离子对撞实验是很复杂的。根据理论计算, 在现有的条件下, 对撞区的温度可达到 200MeV 左右, 这个温度在相变临界温度附近, 所形成的火球的横向半径大约有 4.3~8.1fm, 径向半径约有 2.6~5.6fm。一个碰撞事例往往可以产生 500 个以上的次级粒子, 处理这样复杂的事例以及处理如此大量的特征信号是件极为困难的事, 因此, 通过上述特征估计 QGP 的形成仍只是一种试探。即使如此, 由于理论物理学家已给出相变存在的可能性, 也由于实验物理学家又较成功地处理了如此复杂的反应事例, 还由于相对论重离子碰撞实验已达到了理论预言的能区, 更由于这项研究目标所具有的深远的意义, 这一切都使得夸克-胶子等离子体的研究成为核物理学前沿的热点课题之一。

4. 奇异核

近年来所发现的另一种核物质的新形态是包含其它强子的核多体系统, 又称奇异核, 例如 Λ 超核、 Σ 超核以及反质子核等。目前只有 Λ 超核为实验所肯定, 已开展了一些 Λ 超核谱学及生成 Λ 超核机制的研究。 Λ 超核最初是在宇宙射线研究中发现的。1952 年, 波兰物理学家 M. 丹尼什和 J. 普涅夫斯基从暴露在宇宙射线核乳胶中, 发现一个特殊的事例。这是一个高能质子击碎了核乳胶中的银原子, 产生的一个碎片, 再通过发射带电介子和一个质子衰变, 碎片衰变的特征与理论上预料的 Λ 超子完全相同, 因而认定这个碎片就是包含 Λ 超子的 Λ 超核。 Λ 超子是最轻的奇异重子, 根据强相互作用要求, 它的奇异数与重子数守恒, 因而 Λ 超子在核物质中相对强相互作用是稳定的, 只能产生弱相互作用衰变。 Λ 超核与 Λ 超子有几乎相同的寿命, 因而在实验中可以比较容易地观察到 Λ 超核。到目前为止, 已经在实验中观察到几十种 Λ 超核以及包含两个 Λ 超子的双超核, 甚至包含若干个 Λ 超子的 Λ 超核。超核的发现, 不仅打破了过去原子

核只是由中子、质子组成的传统看法，而且通过超核的研究，还进一步获得了有关核结构与强相互作用的认识。超核物理已成为中、高能原子核物理研究的一个重要分支领域。奇异核伴有奇异的现象。首先，与普通核相比，奇异核有着特殊的衰变方式。普通核的衰变类型有： α 衰变、 β 衰变（包括电子俘获过程）、 γ 衰变（包括内变换过程）和自发裂变等，奇异核则除了上述方式外，还有一些奇异的衰变方式。例如，奇异核 β 衰变可释放很高的能量，经 β 衰变后的末态核仍处于较高的激发态，若这一激发态的能量高于其中的核子或核子集团的结合能时，这个末态核仍有可能把多余的能量释放出来，退激发而变为一种新的核，称为子核。这种奇异衰变分为两个阶段，同时有三代核素参与，然而由于第一阶段的 β 衰变比第二阶段缓慢得多，在实验观测时，仅观察到第一阶段的半衰期，故常把这种放射性称为延迟粒子发射，或缓发粒子发射。其实，早在1916年卢瑟福(Rutherford, Ernest 1871 ~ 1937)和伍德(Wood, Robert Williams 1868 ~ 1955)在研究 ^{212}Bi 引起的荧光现象时，就曾发现在大量具有一定能量的 β 粒子中，混有少量具有较高能量的长射程 β 粒子，这实际上就是 β 衰变缓发 β 粒子。虽然他们观察到这个现象，却不明白其成因。直到1930年，伽莫夫(Gamow, George 1904 ~ 1968)也观测到了这个奇特的现象，才对它做出了解释。伽莫夫认为 ^{212}Bi 先经过 β 衰变到 ^{212}Po ，如果 ^{212}Po 处于激发态，它再放出带有该激发态能量的 β 粒子，这部分激发态能量转化为 β 粒子的动能，因而具有较高的能量。如果处于激发态的 ^{212}Po 先经过 γ 发射回到基态，就会发射低能量的 β 粒子。 ^{212}Bi 就是缓发 β 粒子的先驱核，而末态核发射 β 粒子后变为 ^{218}Po ，就是缓发 β 粒子的子核。卢瑟福、伽莫夫等人所观测到的缓发衰变仅只是一种天然放射现象。

1937年，列维斯第一次人工地产生了延迟 β 发射的先驱核 ^8Li 。1939年，罗伯茨又在中子轰击铀的实验中，首次探测到了延迟的中子发射。50年代末，卡尔诺克霍夫首次观测并鉴别出延迟的质子发射先驱核。此后，被发现的前驱核数量增加很快。近20多年来，大规模寻找缓发粒子的先驱核，并利用这种奇特的衰变方式研究奇异核的性质已成为核物理研究中的一个重要课题。

近十多年来，由于实验技术的发展，又陆续发现了延迟衰变后两个或三个核子发射的奇异衰变方式。1979年9月欧洲原子核研究中心的一个研究组观测到了延迟的二中子发射，以后又观测到三中子发射。1984年，劳伦斯-伯克利实验室的一个研究组在88英寸的回旋加速器上，观测到了土 ^{22}Al 的延迟二质子发射现象。接着欧洲原子核研究中心又在线同位素分离器上发现了 ^{11}Li 延迟 ^3He 和 ^3H 的衰变。在奇异衰变研究中，值得注意的是重离子的奇异放射研究方面的进展。1984年，牛津大学的一个研究小组发现了一个奇特的现象。 ^{223}Ra 的 α 衰变半衰期通常为11.4天，然而在这种衰变中，他们却发现了能量在30MeV的 ^{14}C 离子。这一现象出现的几率很小，大约在 10^9 衰变中才有一次，由于他们没有放过这个很容易被疏忽的现象，以后又陆续发现了 ^{222}Ra 、 ^{224}Ra 和 ^{226}Ra 的 ^{14}C 衰变， ^{230}Th 、 ^{231}Pa 、 ^{232}U 、 ^{233}U 和 ^{234}U 的 ^{24}Ne 衰变以及 ^{234}U 的 ^{28}Mg 衰变。这一放射性所发射的实际上是核子集团，从而反映了核内核子的组合方式。对这一奇异现象的解释，以及寻找新的重离子发射核实验已经成为核物理中活跃的研究

究领域。除了奇异的衰变方式以外，奇异核还表现出奇异的形变特性。过去，通常把核认作为球形，如早期的核液滴模型以及独立粒子壳层模型等。1952年阿·玻尔和莫特逊提出了原子核集体模型，利用这一模型计算核在各种情况下的能量时发现，有些核在特定的变形下能量最低，稍微偏离这种变形，能量上升很快，这种核被称为硬的变形核；有的核在一定的变形范围内，能量的变化不大，被称为软的变形核。按照这一模型，除了核子可以在核内运动外，原子核还可以作为整体振动或转动。处于不同状态的核，具有不同的能量和角动量，并对应一定的形状，这些能量又不是连续的。通过大量的稳定线附近的核研究，人们已经找到了核的能级分布与形状间的关系。当核转动时，如果形状发生变化，转动惯量相应改变，就会导致核转动能级分布情况变化。这一规律的研究已成为研究奇异核的基础。在70年代，实验上已经发现，某些核可以有不同的形状，它们对应着不同的能级，有一组建立在球形基态上，能级的间隔较宽；另一组开始的间距较小，后来越来越大，它们对应着硬变形核的转动和振动。这种不同形状的状态在核中同时存在的现象，称为形状共存现象。对这一现象的研究，使过去曾被认为截然不同的异形核与变形核之间找到了某种联系。核的变形程度通常用一个参数 β 描述。近似等于核长短轴之差与两轴平均长度之比。典型变形核的 β 值在 0.2 ~ 0.25 范围。在 0.35 ~ 0.4 范围时，称为超变形核。超变形核的第一激发态能级往往很低。 β 值及极低的第一激发态成为超变形核的两个判据。早在 1981 年，摩勒和尼科斯就曾根据对奇异核研究的结果从理论上预言，中子数和质子数在 38 附近的核，属于自然界中最强变形的核。果然，人们在远离稳定线区域检验球壳层模型中发现，质子数和中子数都接近幻数 40 的核，如 ^{74}Kr 、 ^{76}Kr 核具有非常大的变形。目前，奇异核研究已与重离子核物理相结合，人们广泛采用中、高能重离子束，通过弹核破裂的反应机制合成新的奇异核素，并通过核素分离产生的次级奇异核束流研究奇异核反应及其性质。

二、当代光学进展

(一) 几何光学当代理论的建立与发展

1. 最小作用量原理与初期的几何光学

本世纪后半叶发展起来的几何光学当代理论，经历了经典光线力学与量子光线力学两大阶段。经典光线力学是从初期的旧几何光学与牛顿力学相似性研究中脱颖出来的。论及旧几何光学与牛顿力学这两个看起来彼此独立学科的相关性，不得不从最小作用量原理的研究说起。

最小作用量原理从提出到发展渊源流长。它不仅在物理学的诸领域，甚至在整个自然科学乃至更大的学科范围内，都具有深刻的作用与宝贵的价值。仅就最小作用量原理在物理学中的地位而论，没有哪一个定律或定理能在如此漫长的历史长河中，如此贯彻始终地伴随着物理学全部进程而发展，也没有哪一个规律能有如此的魅力，始终吸引着众多的哲学家和科学家们；也没有哪一个规律能像它一样，把经典物理与近代物理，甚至把物理学与数学如此紧密地结合起来。最小作用量原理不仅反映了自然界的真与美，也反应了人们对自然规律的普遍性与简单性的追求。

最小作用量原理的原始思想是从对光现象的观察中起始的。早在公元前3世纪，希腊数学家欧几里德(Euclid, 约325B.C~270B.C)在他的《反射光学》一书中阐明了光的反射定律，他把光视为直线传播，使光线服从几何学规律。公元40年，希腊工程师希罗(Hero50~)在对光的直线传播与反射定律的解释中，强调了自然现象的“经济本性”，并提出了光的最短路程原理。他认为光在空间两点间传播沿长度最短的路径，这是最小作用量原理的最早期表述。公元6世纪，希腊新柏拉图主义哲学家奥林匹奥德鲁斯(Olympiodorus)在他所著的《反射光学》一书中，重申了自然界的“经济本性”，他认为“自然界不做任何多余的事，或者不做任何不必要的工作”。到了中世纪，最小作用量原理思想为更多的人所接受。意大利画家、建筑家与科学家达·芬奇(LeonardodaVinci1452~1519)也认为自然界是经济的，自然界的经济性是定量的。英国神学家、牛津大学的校长、培根的老师格罗斯泰斯特(GrossetesteRobert1175~1253)则认为，自然界总是以数学上最小和最优的方式运动和变化。英国哲学家奥卡姆(OckhamWilliam1285~1349)更为明确地指出：“对实际存在的事物，决不能不必要地添枝加叶”，这条准则如今已被解释为，在两种皆符合客观实际的理论中，只有那个假设比较简单的理论才是更接近实际的。这条准则被称为“奥卡姆剃刀”，它在哲学科学中具有重大的意义，尤其对培根哲学有重要的影响。

使最小作用量原理发生质的飞跃的是法国数学家费马(Fermat, Pierre1601~1665)。费马原修法律学，却后来在数学领域作出了重大的贡献。他与笛卡尔(Descartes, Rene1596~1650)分别独立地建立了解析几何学，然而笛卡尔的二维形式解析几何却先于费马的三维解析几何取得了优先权。费马最早提出微积分的概念，并发现了微积分的一些重要特性，牛顿从中得到启发而取得了发明微积分的权利。费马也曾与帕斯卡(Pascal, Blaise1623~1662)合作，研究了大量偶然事件的规律，奠定了概率论的基础，并研究了整数的性质，第一个把希腊数学家丢番图(Diophantus

210 ~ 290) 所得到的结果向前推进, 成为数论研究的奠基者。在对光的折射研究中, 费马发现最短路程原理并不成立。然而他相信自然界的行总是采取某种最简捷的方式。1657 年, 费马用“最短时间原理”, 即后人所称的费马原理, 修改了最短路程原理。这一原理表明: 光在媒质中从一点向另一点传播时, 总是沿花费时间最少的路径。即 $\int_{P_1}^{P_2} dt = \int_{P_1}^{P_2} \frac{dl}{\mu}$ 为最小值。

费马原理又可以表示为 $\int_{P_1}^{P_2} n dl = 0$, 费马原理已成为几何光学领域中的高度概括性原理, 它使以前似乎彼此独立无关的光的直线传播定律、反射定律、折射定律以及光路可逆性原理有了一个统一而又简捷、优美的表述。

最小作用量原理在光学领域中的成功, 暗示人们似乎有更为普遍的原理存在的可能性。1682 年以后, 德国哲学家与数学家莱布尼兹 (Leibniz, Gottfried Wilhelm 1646 ~ 1716) 开始试图建立一个能支配所有力学过程和光学过程的“作用量”概念。他相信, 自然界所发生的一切过程都应与此作用量的极值有关。虽然莱布尼兹没有成功, 他的这一想法对法国数学家莫培丢 (Maupertuis, Pierre Louis Moreau de 1698 ~ 1759) 产生了重要的影响。莫培丢信奉自然界的经济本性, 他认为问题在于挖掘出自然过程中所花费的最小量该是什么。他认为这个最小量既不完全是运动物体的路径, 又不完全是所消耗的时间, 既应满足光学中的费马原理, 又应满足牛顿力学。1744 年 4 月, 在莫培丢提交法国科学院题为《论各种自然定律的一致性》论文中, 他先提出了一个满足光传播的最小作用量原理, 即光在空间两点间传播时, 总选择作用量极小的路径, 这个作用量是 $\int v ds$, 其中 v 是光速, ds 为路径元。由此原理出发, 他导出了光的反射与折射定律。1746 年, 莫培丢又在题为《从形而上学原理推导运动和静止定律》的论文中, 把最小作用量原理用于物体的运动。他把物体的质量、速度与路径长度之积, 即 $mv l$ 确定为作用量, 建立了相关物体运动的最小作用原理, 并由此导出弹性体与非弹性体的碰撞定律和杠杆原理。

与莫培丢同一时期, 瑞士数学家欧拉 (Euler, Leonhard 1707 ~ 1783) 也独立地得到了最小作用量原理, 并首次用变分的方式 $\int v dl = 0$ 加以表述。欧拉出身于世代宗教家庭, 其父为牧师, 欧拉年青时也曾任教职, 虽然他是古往今来多产的数学家, 几乎在数学的每一个分支上都有着贡献, 他笃信上帝, 他以最小作用量原理证明上帝的存在, 认为上帝以此原理创造了宇宙并主宰它的运转。

莫培丢与欧拉的最小作用量原理强调了自然界规律的统一性与和谐性, 它打破了统治当时物理界的形而上学思想体系, 代之以可变的和最小化的思想。然而, 这一原理的神学色彩, 以及概念上的一些模糊不清, 也曾使许多人感到疑惑。此外, 更为重要的是, 似乎它与普遍存在的守恒原理有相矛盾之处。直到本世纪, 守恒原理与最小作用量原理的统一性才被德国女数学家诺特 (Noether Emmy 1882 ~ 1935) 从理论上证实, 这就是对于作用量的每一种对称性 (变换不变性) 都有一个守恒定律与之对应。此外, 在莫培丢的光学最小作用量原理中, 积分项与速度成正比, 而在费马原理中, 积分项却与速度成反比, 这似乎存在有矛盾, 这一关系在德布罗意物质波理论建立之后, 才得到了深入的解释。

使最小作用量原理开始得以真正发展的，应当归功于法国数学家达兰贝尔（D'Alembert, Jean LeRond 1717 ~ 1783）与其后的法国数学家兼天文学家拉格朗日（Lagrange, Joseph Louis Comte de 1736 ~ 1813）。他们在力学中应用变分法，把最小作用量原理发展为动力学的普遍原理——达兰贝尔-拉格朗日原理，并把它推广到多粒子系统。在多粒子系统中，这一原理被表述为：当完整保守系统从一个位形转变到另一个位形时，对于一切具有相同总能的可能运动来说，只有真实的运动所对应的作用量最小，

$$\text{即 } \Delta s = \Delta \int_0^t ds = \Delta \int_0^t \sum_{i=1}^{3n} m_i v_i^2 dt, = \Delta \int_0^t 2T dt = 0$$

其中 s 为系统的作用量， n 为系统的粒子数， t 为运动经历的时间， T 为系统的总动能。对粒子数 $n=1$ 的单粒子而言，上一原理即退化为莫培丢最小作用量原理。

继达兰贝尔与拉格朗日之后，爱尔兰数学家、物理学家哈密顿（Hamilton, Sir William Rowan 1805 ~ 1865）把最小作用量原理又发展到了它的颠峰。哈密顿是律师之子，在少年及青年时代，没进过正规学校，靠自学不仅起码精通 14 国语言，而且自修了数学。他 12 岁即对牛顿的《自然科学与哲学原理》产生了浓厚的兴趣，17 岁时，向爱尔兰皇家天文学会指出了拉普拉斯《天体力学》中的数学错误。22 岁时，即被正式任命为都柏林的三一学院天文学教授，这一工作使他有较多的时间从事数学与物理学研究。1835 年，哈密顿被封为爵士，两年后，被选为爱尔兰皇家科学院院长。1835 年，哈密顿发表了具有深远影响的论文《变分作用原理》与《波动力学的一般方法》。在这两篇论文中，哈密顿首先从费马原理出发，发展了几何光学的定律，进而证明，光线轨迹可以利用对单一数学量——特征函数的计算得出来。他发现，这一特征函数与对应单粒子动力学作用量函数的特征非常相似，而几何光学中光线轨迹又与牛顿力学单粒子的轨迹十分相似，这使哈密顿受到启发，他猜想，一定可以找到一种与几何光学类似的形式表述力学规律，只要从力学的最小作用量原理出发，把它变换为与费马原理相似的形式，就一定可以找到力学与光的统一表示。哈密顿用具有动力学意义的正则变量（广义动量 p 和广义坐标 q ）代替只有运动学意义的广义速度 q 和广义坐标 q ，把拉格朗日函数和拉格朗日方程变换到哈密顿函数和哈密顿正则方程，对比费马原理提出了等时最小作用量原理，即哈密顿原理，由它可以导出全部力学的基本定理和运动方程，不仅适用于完整保守系，而且还可以推广到非保守系和非完整系。

经典力学哈密顿理论的建立，具有双重深远的意义，其一是它成为经典力学向量子力学过渡的桥梁。在正则方程的基础上发展起来的哈密顿-雅柯比方程已成为量子力学建立以前研究量子力学的主要方法；其二是这一原理中的对偶性思想，对偶性即力学与几何光学运动方程中的相似性。早在 1834 年，哈密顿就以他犀利的洞察力，指出在这两大领域中存在有相似的数学结构。这种相似性表现为：确定光线轨迹特征函数的特性与对应单粒子动力学作用量函数的特性有惊人的相似，在几何光学中的光线轨迹与牛顿力学中单粒子的轨迹间也有相似性，在力学规律与几何光学规律的统一表示上更有着相似性。这些相似性表明，一个粒子的行为可以由波动性描述；而光的波动性又可以与粒子的行为相关，这就是哈密顿原理中所蕴含的对偶性思想。根据这一思想，本来不难进一步找到具有波动性质的

力学方程。然而在哈密顿所处的时代，经典力学被认为是绝对正确的，粒子具有波动性被认为是不可思议的事，直到量子力学兴起以前，哈密顿方程中对偶性的深刻意义在长达近一个世纪的时间里，一直被人们所忽略。薛定谔曾在诺贝尔奖演讲中说：“哈密顿原理和费马原理之间的密切相似性几乎被忘记了。如果还记得的话，也只是记住了数学理论的奇妙性。”

直到 20 世纪，在德布罗意和薛定谔创建量子力学之后，两原理间的相似性及深刻的物理内涵才被充分地阐明了出来。

2. 经典光线光学的建立

19 世纪末到 20 世纪初，牛顿力学与麦克斯韦的电磁理论都发展到日臻完善，以麦克斯韦电磁理论为基础的波动力学逐渐趋于成熟，经典物理学已形成一套完整的理论体系，当时的绝大部分物理学家深信，物理学中的各种基本问题在原则上已都得到圆满的解决，此时，确实如薛定谔在诺贝尔奖演讲中所说，发展得最早的费马原理、莫培丢最小作用原理以及其后的哈密顿原理与费马原理之间的相似性，在相当长的时间里被人们所遗忘。70 年代以来，随着纤维光学的发展，处理介质中光的传输与发射问题时，光的波粒二象性，尤其是光的量子特性突出地表现出来，只计入光的波动性已使问题陷入了局限性。此外，在用波动方程解决具体问题时，由于情况的复杂，已经不可能找到适当的解析解，这也使人们陷入困境。因此，迫使人们在几何光学理论的发展中，另辟蹊径，从几何光学与经典力学的相似性出发，建立光的量子理论，并逐步建成经典光线力学的理论体系。经典光线力学又称为哈密顿光学，它是由 D. 马库斯 (D. Marcuse) 等人从几何光学与经典力学的相似性出发，根据费马原理建立起来的。

他们在直角坐标系中，假定光沿 z 轴方向传播，首先引入了描述光传输的线元 ds。为建立光线力学的哈密顿方程，在光线拉格朗日函数 L 的基础上，引入光线的广义动量

$$P_x = \partial L / \partial x \quad \text{和} \quad P_y = \partial L / \partial y \quad ,$$

$$\text{其中} \quad x = \partial x / \partial z, \quad y = \partial y / \partial z,$$

于是，由广义动量与广义坐标定义哈密顿函数 $H(x, y, p_x, p_y)$ 。然后，由光线的哈密顿正则方程，找到哈密顿函数的表述形式 $H = \sqrt{n^2 - p_x^2 - p_y^2}$ ，其中 n 为传输介质的折射率。这个函数恰与静止质量为 m_0 的单粒子的相对能量式

$$E = c \sqrt{m_0^2 c^2 + p_x^2 + p_y^2 + p_z^2}$$

相似。若采用光线传播的近轴条件，即 $x \ll 1, y \ll 1$ ，把变化的折射率 n 表述为常量 n_0 与小变量 Δn 两部分，即 $n = n_0 + \Delta n$ ，再利用级数展开，所得到的哈密顿函数

$$H = \frac{p_x^2 + p_y^2}{2n_0} - n$$

又恰好与非相对论近似条件下的单粒子力学的哈密顿函数

$$H = \frac{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2}{2m} + V$$

有着惊人的相似。这些结果表明，质点力学的非相对论近似理论正对

应着几何光学中的近轴理论，只是光线力学比质点力学低一维，单粒子的势能正好对应传光媒质的折射率。

接着，需要把直角坐标变换到广义坐标。虽然变换式显含时间 T ，但是所对应的动能表示式并不显含时间。因此，欲建立光线力学的程函方程，只需写出光线力学的哈密顿-雅柯比方程即可。这一工作并不困难，因为考虑到与质点力学的相似性，只需在质点力学哈密顿-雅柯比方程的基础上做类似的替换。在替换中，空间变量 z 对应于时间变量 t ，并降低一维，最后得到了光线的程函方程为 $(s)^2 = n^2$ ，它不仅与质点力学单粒子运动的规律相似，由它还能得到几何光学的全部规律。

3. 量子光线力学

80年代以来，随着纤维光学的进展，在对光的传输与发射研究中，光的量子特性迫使人们不得不对光线力学以及波动光学加以改造，改造的目标就是建立一门新型的量子光线力学。理论的进展仍然是从哈密顿原理所隐含的对偶性出发的。对偶性启示人们，不仅应对光线力学中的“光线”概念加以改造，使其具有波粒二象性，还应赋予波动力学中的“纯波动”以粒子性特征。

在新理论建立的伊始，很自然地会涉及到普朗克常量，因为它表征着自然过程的量子属性。一个物理过程的普朗克常量是否可以被忽略，已成为该过程是否适用经典理论还是适用量子理论的重要也是唯一的标志，只有当普朗克常量 $\eta \rightarrow 0$ 时，量子力学才过渡为经典力学。因此，首先应建立一个常数 k ，以 k 代表量子光线力学中的普朗克常量。当 $k \rightarrow 0$ 时，量子光线力学也应过渡到由波动方程所推导出来的程函方程。根据这一相似类比，量子光线力学中的普朗克常量 k 显然应该与光在真空中的波长 λ_0 有

关，由此定义 $k = \frac{\lambda_0}{2\pi}$ ，当 $k \rightarrow 0$ 时， $\lambda_0 \rightarrow 0$ ，由约化波动方程，即波动方程在 $\lambda_0 \rightarrow 0$ 时的极限，导出的程函方程精确成立。这表明，在这一基础上

建立的光线力学的量子理论可以由光线力学反推出波动方程。然而在过去，虽然费马原理可以导出光线力学的所有方程，却不能导出光的波动方程。建立了量子光线力学的“普朗克常量” k 以后，应继续使相关的物理量算符化。像质点量子力学一样，量子光线力学的问题应归结为对算符本征方程求解。被算符化的物理量有广义坐标、广义动量、哈密顿量等。首先，将相对论哈密顿量算符作用在波函数 ψ 上，可以得到量子光线力学的

克莱因-戈登方程，即 $\nabla^2 \psi + \frac{n^2}{\lambda_0^2} \psi = 0$ ，这个方程恰与 $\lambda_0 \rightarrow 0$ 时的约化波动

方程 $\nabla^2 \psi + (\frac{2\pi n}{\lambda_0})^2 \psi = 0$ 具有相同的形式，而量子光线力学中的普朗克常量

k 又恰好可以在两个方程的比较中得出来。此时，量子力学的算符对易关系、厄米性以及期望值等都可以扩展到光线力学的量子理论之中，例如量子光线力学的本征值为光线力学物理量的可测量值，而本征函数模量的平方又是该本征值的取值几率。这样一来，量子光线力学产生了质的飞跃，它的取值将不再具有确定性，它只能取一系列可能值，每一个值都只能以一定的几率出现。此外，根据量子光线力学算符的对易关系，又能得出量子光线力学的测不准关系，

$$x \cdot \Delta p_x = \frac{1}{2} \hbar k = \lambda_0 / 4 ,$$

这一关系又恰与德国物理学家海森伯的量子力学测不准关系 $x \cdot \Delta p_x = \hbar/2$ 相对应。量子光线力学的测不准关系表明，若光线的状态为动量算符的本征态，即平面波时，对光线斜率的每一个测量结果，必将给出一个确定的动量 p 值，但当 p 值确定之后，却不能断定光线的位置。其实，这一不确定关系早已明显地表现出来，因为当平面波无限扩展到全空间时，光线的位置就变得不确定了；反之，当光线的位置受到约束而确定时，如通过狭缝或小孔，出射光线的动量或斜率将变得不确定；光线越是受到较强的约束而确定时，如狭缝成小孔的线度减小，出射光线的动量或斜率就变得越不确定，这就是波动光学中人们所熟知的衍射现象。像量子力学中测不准关系一样，在量子光线力学中，当两个相关物理量的算符相互不能对易时，都会出现类似的测不准关系，这些测不准关系也将与光的传播特征与光粒子行为的对偶性息息相关。

量子光线力学建立之后，已经直接应用到对光学仪器分辨率的讨论之中。根据经典的光线力学，每一条光线的位置都可以精确地给出，从理论上说，光学仪器可以具有无限好的分辨本领。然而根据量子光线力学的测不准关系，光线的位置与“动量”不能同时以任意精度确定。当光线位置的垂轴精度被精确地确定之后，光线的“动量”就会扩展；反之当光线的“动量”精度被精确地确定之后，光线位置的垂轴精度就不能任意，它们的关系是

$$x = \frac{\lambda_0}{4\pi\Delta p_x} , \text{ 在最精确的条件下, 也只能是 } x = \frac{\lambda_0}{4\pi\Delta p_x} .$$

根据量子光线力学正则方程及哈密顿函数，可以进一步得出光线“动量”不确定值所对应的光线倾斜角度范围值，再根据前式找出光学系统的分辨极限，

$$\text{其结果是 } x = \frac{\lambda_0}{4\pi n \sin\alpha} , \text{ 在近轴条件下, } x = \frac{\lambda_0}{4\pi n\alpha} .$$

这一结果与波动光学中两相邻物点分辨率极限的瑞利判据式

$$x = \frac{\lambda}{2\alpha} \text{ 极为相似,}$$

其中系数不同，只是判据上的差异所引起。上述讨论再次表明，光线光学的量子理论可以囊括波动光学的规律，它可以不经过对光的波动性的讨论，直接得到相应的波动规律，这是经典光线光学所不能做到的。量子光线学规律的普遍性与简洁性也是经典光线力学所不能比拟的。这一学科的建立不仅促进了纤维光学与集成光学的相关理论研究，而且对进一步揭示物理学中的新概念更具有深刻的意义。

(二) 激光及相关光学学科的发展

1. 微波激射器与量子电子学的诞生

1917年，爱因斯坦在研究黑体辐射对气体平衡计算时，发现了辐射具有两种形式，自发辐射和受激辐射，从而提出了受激辐射的理论。爱因斯坦的这一设想，得到了曾任加州理工学院研究生院院长的美国物理学家托尔曼 (Tolman Richard Chace 1881~1948) 最早的呼应。托尔曼曾发表数篇论文讨论了粒子数反转放大特性。1928年，德国的兰登伯 (Landenberg, R.W. 1885~1952) 在研究氦气色散现象时，发现激励电流超过一定值时，高能级氦分子布居数随电流增大而加多，结果使反常色散效应增强。这个实验实际上间接证实了受激辐射的存在，也直接给出了受激辐射的发生条件是粒子数反转。粒子数反转这一思想至关重要，然而在当时人们的心目中，认为这是不可思议的。因为在热平衡条件下，低能级粒子数总比高能级粒子数多，实现粒子数反转就等于要破坏热平衡，这一点与人们的想法相违，粒子数反转思想未能引起更多人的注意。

本世纪40年代，美国哥伦比亚大学以 J. 特里奇卡 (J. Trischka) 为首的研究组曾一度致力于研究无线电波的受激辐射。然而，对于他们的研究结果，关心的人并不多。一方面由于战争，许多与军事无关的科研项目被搁置，另一方面，在兼跨物理学与工程学两个领域的量子电子学中，物理研究与工程技术严重脱节。量子电子学的理论工作者侧重于光的波动性与量子性研究，对电子工程技术的相关内容知之甚少；而电子工程技术人员又偏重工程技术问题，对量子电子学的重要概念及研究方法既不关心，也不感兴趣。因此，量子电子学在当时不仅没有形成整体性研究的态势，更没有一个较完整而系统的理论。加上当时的科学技术水平，还没有形成对光的相干性与单色性的迫切要求，致使一些曾提前注意到受激辐射和提出粒子反转放大思想的人，未能在它们的实用性研究上继续向前迈进。由于战争的促动，二战后微波技术日臻完善，它已广泛地应用于军事和各个科学领域，其中微波波谱学的发展尤其令人瞩目。当时，微波用于原子、分子和原子核的精细和超精细结构方面，已经取得了一系列的成果。1951年，美国物理学家珀塞尔 (Purcell, Edward Mills 1912~) 用微波波谱学的方法，测定了核磁矩。为增强微波信号，他应用了突然倒转场的方法。当外磁场极性改变比核自旋的响应快时，在氟化锂晶体中实现了核自旋体的反转分布，此时，他意外地观察到了频率为 50kHz 的受激辐射。应用玻尔兹曼分布规律，珀塞尔对该现象做出了解释。根据玻尔兹曼分布率，高与低能级的粒子布居数分别为 N_2 和 N_1 时， $E_2 > E_1$ ，其粒子分布率为

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-\frac{E_2 - E_1}{kT}}, \text{ 这表明，要实现粒子数 } N_2 > N_1, \text{ 只能 } T < 0.$$

根据这一结果，珀塞尔首先提出“负温度”概念，并把粒子数反转称为“负温度”状态。粒子数反转状态的实现不仅表明“负温度”并非不可逾越，而且使人们对于玻尔兹曼分布有了更全面也更深刻的认识。

与此同时，朝向同一目标的另一番工作也在另外一个领域中进行着。由于雷达技术发展的需要，人们正在研制一种高强度的微波器件。二战期

间，美国物理学家汤斯（Townes, Charles Hard 1915~）曾在贝尔实验室从事雷达导航系统研究。战后，他在哥伦比亚大学物理系执教期间，应军方邀请，开始致力于缩短雷达使用波长的研究。但是这一课题进行极不顺利，他屡遭失败，几度陷入困境。1951年春，他到华盛顿参加一个工作会议。与会期间的一天早晨，正当他坐在华盛顿市一个公园的长凳上等待饭店开门时，脑子里突然闪现出来一个想法，这就是利用分子受激发射的方式代替电子线路放大，实现微波放大的设想。汤斯头脑中所闪现的这个“小火花”，使他激动不已，很短的时间内，一个实验的方案被设想了出来。他打算用电流加热的方式，把能量泵入氨分子中，使它们处于受激状态。当受激分子恰好处于与氨分子固有频率相同的微波波束之中时，微波波束与氨分子通过反复作用，使泵入氨分子中的能量传递到微波波束之中，原来入射的弱波束就有可能在短时间内，以雪崩方式促发为强微波波束，汤斯把这一设想的要点就记在了一个信封的背面上。

从1951年年底，在美国海军和陆军的资助下，汤斯和他的两个学生戈登、蔡格尔一起，经过了两年的研究，终于在1954年研制成功波长为1.25cm的氨分子振荡器，他们把它称为受激辐射微波放大器，按其字母缩写为MASER，简称为脉泽。脉泽具有稳定的振动频率，可以用它制成用于计时的“原子钟”。1960年，利用脉泽微波的相干性，又以 10^{-12} 的相对误差，精确地证实了70多年前迈克耳孙-莫雷实验的结果。受到美国物理学家肖克莱（Shockley, William Bradford 1910~）所研制成功的固体整流与放大器件的启发，在50年代后期，汤斯与其它科学家一起，又研制成功固体脉泽。1960年，这种固体脉泽首次被用到了回声号卫星，它成功地放大了从卫星发向金星，又从金星反射回卫星的几乎消失殆尽的微弱信号。脉泽的研制成功，在理论研究上的意义也相当重要。在脉泽问世前，电气工程师们只是关心如何放大，而物理学家们又只是关注了相干性，正是汤斯把这两方面结合在一起，这一结合不仅促成了脉泽的问世，也把量子力学的概念与方法成功地引入到电子技术领域，为量子电子学的建立与发展奠定了基础。

1955年，前苏联物理学家巴索夫（Basov, Nikolai Gennadievich 1922~）和普罗霍洛夫（Prokhorov, Alexander Mikhailovich 1916~）提出了用三级能的方法实现粒子数反转。就这样，在1958年，以量子电子学的研究为基础，汤斯、肖洛和巴索夫、普罗霍洛夫等人已经分别提出了把量子放大技术用于毫米波、亚毫米波及可见光波段的可能性，这一研究为激光的诞生铺平了道路。由于在脉泽、激光及量子电子学基础理论方面的工作，巴索夫、普罗霍洛夫与汤斯共同分享了1964年诺贝尔物理学奖。

2. 向更短波长进发——激光器的问世

氨分子振荡器与固体微波激射器的研制成功及广泛的应用引起了巨大的反响，特别引起了军事部门的兴趣。当许多人醉心于微波激射器的研究时，汤斯已经朝向更短波长的目标进发了。长期从事军事研究的汤斯敏锐地看到，缩短波长意味着测量目标精度的提高、分辨率的增强以及信息传输量的增大，汤斯早已注意到这一研究的价值。1958年，在发表关于红外和可见光激光论文的同时，汤斯就思考着激光在军事应用上的潜在可能性。他在贝尔实验室曾以顾问的身份，向当时国防分析研究所及高级计划

局某项计划负责人惠勒 (Wheeler) 提出一份书面报告。在报告中他预言, 激光将对国防作出重要的贡献, 肯定会受到高级研究计划局的特别关注。果然, 报告提出的第二年, 高级研究计划局以 100 万美元资助了技术研究集团的激光研制计划。高级研究计划局所关注的不仅是把激光用于雷达和通讯, 还想用于防御前苏联导弹的威胁。第一台激光器也正是在美国工业界的一个国防机构——休斯飞机制造公司的支持下研制成功的。

在向更短波长进发的过程中, 汤斯的第一个目标是由毫米波进入亚毫米波段。然而, 在一开始他就遇到了麻烦。首先, 要使振荡腔的长度与波长相当, 制造 1 厘米以下的振荡腔非常困难; 其次, 由于振荡腔的缩小, 内含物质少又严重地限制了放大性能。在克服这一困难的过程中, 汤斯发现, 若把波长缩短到红外或可见光区域, 腔体尺寸带来的杂散振荡反倒有可能随之减小, 这使他倍受鼓舞。此时, 汤斯的姻弟——肖洛 (Schawlow, Arthur L. 1921 ~) 从光学中的 F-P* 仪得到启发, 提出一个设想, 即用一对反射镜代替封闭的谐振腔, 以控制不必要的振荡模式。1958 年, 肖洛与汤斯联名在《物理评论》上发表了重要论文《红外与光激射器》。这篇论文不仅给出了受激辐射光产生的必要条件, 而且还详细地论述了光激射器的若干理论问题, 论证了 F-P* 仪代替谐振腔减少过剩波型及自激辐射的机制, 还提出了以钾蒸气为工作物质、钾灯为泵浦源的红外激射器的设计方案。肖洛与汤斯的这一设想, 使许多人纷纷加入激射器的研制中。人们意识到, 谐振腔的难题解决之后, 重要的问题是如何实现反转分布, 此外, 选择工作物质与泵浦源也成为重要的问题。汤斯认为钾蒸气实现的可能性最大。早在提出设计方案前, 他就已经着手试验了。肖洛则转向红宝石研究。前苏联列别捷夫物理研究所的巴索夫则提出以半导体材料为工作物质的方案。除了光泵法以外, 贝尔实验室的贾万 (Javan, A. 1926 ~) 提出放电法连续运转的氦氖激光器方案。1959 年 9 月在纽约举行的首届量子电子学会议上, 仅提交的激光器设计方案就有数十份, 设计者们都在加快步伐, 一场激烈的竞争在激烈地展开着。首先摘取激光器发明桂冠的是休斯飞机公司所属研究室的美国物理学家梅曼 (Maiman, Theodore Harold 1927 ~)。梅曼的成功不是偶然的, 他是电气工程师之子, 靠修理电器半工半读读完大学。1949 年从科罗拉多大学毕业后, 考入斯坦福大学攻读研究生, 1955 年获得博士学位。他的导师兰姆 (Lamb, Willis Eugen Jr. 1913 ~) 曾因发现著名的氢原子谱线兰姆位移而获得 1955 年诺贝尔物理奖。在梅曼随导师一起研究兰姆位移过程中, 梅曼曾提出利用反转分布使氢原子的不同能态间产生受激辐射的设想, 并以这一设想展开了他的博士论文《利用波和光的双共振研究氢原子的激发态》。1956 年, 梅曼应邀到休斯飞机公司的一个研究所工作, 致力于红宝石微波放大器的研究, 1959 年 8 月转而研制激光器。由于他对红宝石的经验, 经过一番选择后, 他选用了掺钕红宝石晶体作为工作物质, 以脉冲氙灯作为光泵, 终于在 1960 年 5 月获得了成功。梅曼等人研制成功的第一台激光器的工作物质是长 2cm、直径 1cm 的掺钕红宝石棒, 它的两端被磨平后镀银, 其中一个镀银面中心有一个直径 1mm 的透光孔, 泵浦光源为螺旋形氙灯。1961 年夏, 中国科学院长春光学精密机械研究所也研制成功了红宝石激光器, 从掺杂晶体的生长、冷光学加工、金属镀膜, 到光学质量的检验, 无一不是研究人员亲自动手进行的, 泵浦氙灯也是我国自己制造并将螺旋管改为直管型,

成为至今流行的结构。

在梅曼获得成功以后，一系列不同基质晶体的掺稀土元素的固体激光器相继运转，尤其是波长 $1.06\ \mu\text{m}$ 的掺钕钇铝石榴石激光器和掺钕硅酸盐玻璃激光器得到了广泛的应用。气体激光器已能在紫外到红外的广阔波段内工作，从原子、分子、离子气体激光器到金属蒸气和其它惰性气体激光器已达数十种之多，其中二氧化碳激光器具有强功率输出，已成功地用于金属加工、激光化学、医疗等领域。以染料激光器为主的液体激光器已在数百种有机染料中获得激光输出，由于输出波长能在近紫外到近红外的广阔波段内调谐，在光谱学、激光化学领域中有广泛的应用。半导体激光器有体积小、重量轻等特点，在光纤通讯中作为光源有广阔的应用前景。激光技术的最新领域是自由电子激光与 X 射线激光器的研制，它们已成为与高能物理息息相关的交叉技术领域。

3. 肖洛及激光光谱学的大发展

激光用于光谱学研究，使传统的光谱学经历了一场深刻的变革，一门新的学科——激光光谱学随之应运而生。为认识这场变革的深刻性，对光谱学的建立与发展作一番回顾是极有必要的。

(1) 传统光谱学的建立与发展

传统光谱学的研究已有近百年的历史，对光谱现象首先进行观察的就是牛顿。由于阅读了玻意耳的色彩学著作，激起了牛顿对光学的兴趣。在 1666 年，牛顿首次应用玻璃棱镜把太阳光分解为各色光谱，随后，又把各色光谱线汇合成白光，从而证明白色光为各色光的复合光。1801 年，德国物理学家里特尔 (Ritter, Johann Wilhelm 1776 ~ 1810) 在对光谱研究中发现，光谱中蓝色一端更容易引起氯化银的分解反应，并进一步利用这种光化学效应发现了紫外线的存在。1802 年，英国物理学家沃拉斯顿 (Wollaston, William Hyde 1766 ~ 1828) 首先观察到太阳光谱暗线，由于得不到解释，只把它们当作各色光的自然区分线，而失去了重大发现的机会。曾当过光学技师学徒的德国物理学家夫琅和费 (Fraunhofer, Joseph von 1787 ~ 1826) 一直对各种玻璃的折射率感兴趣，他亲自设计制造多种消色差棱镜。1814 年，在测试棱镜折射率时，他发现了太阳光谱的暗线。从 1814 ~ 1815 年两年中，共确定太阳光谱暗线近 600 条，并用字母标识它们的位置，这种标识法一直沿用至今。他还测出暗线对应的波长，并在对光谱现象的研究中，首先使用光栅作为分光元件。

光谱学作为一门实用性学科，是由物理学家和化学家共同开创起来的。1859 年，德国物理学家基尔霍夫 (Kirchhoff, Gustav Robert 1824 ~ 1887) 与德国化学家本生 (Bunsen, Robert Wilhelm E-berhard 1811 ~ 1899) 共同研制成功了分光镜。利用这一装置，他们发现了每种元素不仅发射、同时也吸收自己特征谱线的光，由此建立了吸收光谱的基尔霍夫定律。1861 年，他们又利用分光镜装置，先后发现了铯与铷，从此开创了实用光谱学的研究。光谱学不仅开始作为定性化学分析方法，同时也用来进行天体成分的研究。基尔霍夫首先利用光谱确定了太阳中的六种元素。1853 年，瑞典物理学家埃斯特朗 (1814 ~ 1874) 首先观测了氢原子光谱中的最强一条谱线，并首先采用 10^{-8}cm 作为波长的单位，后人把这一单位命名为埃 (Å)。埃斯特朗还绘制出近百种元素的光谱图，并于 1867 年首先研究了极光光谱。在这以后的 20 余年中，光谱学在天文学研究中得到了迅速的

应用。意大利天文学家多纳第 (Donati, Giovanni Battista 1826 ~ 1873) 首先把光谱学用于彗星研究, 英国天文学家哈根斯 (Huggins, Sir William 1824 ~ 1910) 则成为把光谱学用于天文学研究的先驱者之一。他研究了星云光谱、恒星光谱、太阳光谱、行星光谱与彗星光谱。1863年, 根据上述一系列的研究成果, 哈根斯断言, 地球上的一切元素在天体上也同样存在, 于是延续了两千多年之久的亚里士多德观念——认为天体是由地球上找不到的特殊物质组成的学说宣告结束。1864年, 哈根斯又首先研究了一颗新星光谱, 证明它被氢所包围, 从而进一步说明宇宙中的主要组成物质是氢。在多纳第研究彗星的基础上, 哈根斯进一步证明, 彗星上的发光物是碳化物。哈根斯还首先发明了摄谱术, 由于用这种方法可以观察到肉眼难以直接观察到的谱线, 因而大大扩展了光谱学的观测范围。在哈根斯的光谱学研究成果中, 更为引人瞩目的是他发现了谱线的多普勒红移现象, 并首次利用这一效应测量了天狼星的氢谱线多普勒红移量, 由此推断出天狼星远离地球的运行速度。这一方法的确立, 对近代天体物理学和宇宙学的研究有着重要的影响。鉴于哈根斯对光谱学及天文学的重要贡献, 1897年, 他被授予爵位, 1900 ~ 1905年, 被选为英国皇家天文学会主席。

1885年, 瑞士数学家和物理学家巴耳末 (Balmer, Johann Jakob 1825 ~ 1898) 从已观测到的氢谱线中发现某种规律, 他提出了表示氢谱线的经验公式, 后人称这一组谱线为巴耳末系。继巴耳末的工作, 1889年, 瑞典物理学家里德伯 (Rydberg, Johannes Robert 1854 ~ 1919) 在研究白炽状态下物体发光谱线时, 不仅发现了多种元素的线状光谱线, 而且还找到了碱金属原子光谱线位置的经验公式, 巴耳末公式仅为里德伯公式的一个特例。巴耳末公式与里德伯公式都属于经验公式, 它们虽然都显示出谱线的规律性, 却不能反映产生这些规律性的机制。里德伯曾设想元素间一定存在着某种简单的规律, 这一规律一定可以用比原子量更为简洁的量表述出来。里德伯所设想的这个简洁的量, 就是英国物理学家莫塞莱 (Moseley, Henry Gwyn-Jeffreys 1887 ~ 1915) 在用 X 射线技术确定元素谱线波长时所发现的原子序数。莫塞莱的这一发现, 不仅使门捷列夫周期表有了重大的改进, 而且确立了 X 射线分析技术, 并由此填补了元素周期表中的若干空缺。很可惜莫塞莱在第一次世界大战中被应征入伍, 中断了他成功在即的 X 射线光谱学的研究工作。尽管卢瑟福以科研工作需要为由, 多方奔走为其挽留, 但终没有成功。最后莫塞莱阵亡在土耳其前线。莫塞莱去世后, 瑞典物理学家西格班 (1886 ~ 1978) 继续了莫塞莱的 X 射线光谱学研究, 并获得了诺贝尔物理学奖。

在巴耳末发现氢原子光谱线的规律性之后, 又经过了 8 年, 这种规律性的机制才被揭开。1913年, 丹麦物理学家玻尔 (Bohr, Niels Henrik David 1885 ~ 1962) 利用电子分立轨道的跃迁机制解释了光的发射, 不仅从理论上导出了巴耳末式, 而且也计算出了里德伯常数的数值。虽然玻尔的理论获得了较大的成功, 但是在进一步解释氢原子谱线分裂以及解释更复杂原子的光谱规律时, 却遇到了明显的困难。

早在 1892 年, 德裔美国物理学家迈克耳孙 (Michelson, Albert Abraham 1852 ~ 1931) 就发现了巴耳末线系中最强谱线实际上是由间隔 0.14 埃的两条谱线组成。这一现象直到 20 世纪量子力学建成后, 才利用

电子的轨道的角动量与自旋角动量的结合获得解释。1925年，在解释碱金属光谱的测量结果时，荷兰裔美国物理学家乌伦贝克(Uhlenbeck, George Eugene 1900~)与他的同事正式引入电子自旋的概念，并论证了泡利的第4个量子数就是电子的自旋。

光谱学研究中的另一个重要成果是塞曼效应的发现。1896年，在其导师洛仑兹的指导下，荷兰物理学家塞曼(Zeeman, Pieter 1865~1943)观察到了谱线在强磁场中被分裂的现象，这一现象被后人称为塞曼效应。由于这一发现，塞曼与洛仑兹共同获得了1902年度的诺贝尔物理学奖。1893年，普雷斯顿(Preston T.)又观察到了锌线与镉线在磁场中被分裂为4重线的反常塞曼效应。反常塞曼效应不能应用洛仑兹的谐振子磁偏转理论得到解释，只有应用量子理论，才能全面地解释正常与反常塞曼效应。由于用塞曼效应的实验数据可以判断有关能级分裂的情况，由此可以获取有关原子态的重要资料，还可以对复杂的光谱进行分类研究，塞曼效应已成为研究原子结构的重要途径之一。

在光谱学的发展中，除了对吸收与发射光谱的研究外，还相应地发展了对散射光谱的研究。在这一方面，首先作出重要贡献的是印度物理学家喇曼(Raman, Sir Chandrasekhara Venkata 1888~1970)。1920年，喇曼发现，在光发生散射时，除了原有频率外，散射光中还有一些其它频率的光出现，这一现象被称为喇曼散射。喇曼散射光强虽然很弱，其频率、强度及偏振情况却与散射物质的性质有密切的关系。因此，通过喇曼散射可以研究物质的结构及组成。由于这一重要发现，喇曼获得了1930年诺贝尔物理学奖。在喇曼宣布他们的这一重大发现的几个月之后，前苏联物理学家兰茨别尔格(1890~1957)也独立地发现了晶体的喇曼散射现象。尽管喇曼散射在光谱学研究中具有重要的价值，但是由于光强太弱，大约仅有瑞利散射光强度的千分之一，在没有足够强的单色光源之前，它的发展受到了很大的限制。激光问世后，由于激光不仅强度很高，又有较好的单色性与方向性，使激光成为喇曼散射的理想光源。激光的引入，使喇曼散射光谱学的研究有了长足的进展，目前它已成为研究物质结构与组成的重要手段之一。

(2) 肖洛与激光光谱学

尽管传统的光谱学在物质研究中获得了多方面的应用，但是在激光问世之前，传统光谱学的进一步发展已经面临着不可逾越的困难。首先，传统光谱学使用的是普通光源，要提高探测的分辨率，就需要增强光源的单色性，然而增强普通光源的单色性，又不得不以降低光源的强度为代价。光源强度降低势必影响到探测的灵敏度。更为严重的是，在弱光辐射情况下，光谱中的许多非线性效应表现不出来，因此包含物质结构深层次的信息被阻断。此外，传统光谱学必须利用棱镜或光栅作为分光器件，而这些器件的分辨率又受到一定的限制，因而谱线的许多细节不能被观察到。

传统光谱学的上述缺陷是带有根本性的，随着物理学的发展，人们对来自微观世界信息的需求量越来越大，对信息种类要求的层次也越来越深、越来越广，显然传统光谱学不再适应这一发展。在1958年，即在微波激射器刚问世后不久，美国物理学家肖洛与汤斯就曾在一篇著名论文中，卓有见地地指出“从原理上看，微波激射放大器和振荡器的工作频率可以超越目前的射频范围，向红外区、可见光甚至更高频率扩展。这种技

术表明了它在高频区实现相干放大，产生强单色性辐射上具有诱人的前景。……这种强单色性和高强度的辐射所给出的高分辨率将远远超出目前光谱技术的极限。”可见，在激光问世以前，作为微波激射器的发明者汤斯以及激光器奠基人之一肖洛已经清楚地预见到，激光的单色性、方向性与高亮度将会给日益显得陈旧的光谱学带来新的生机。

正如肖洛与汤斯所预料，在微波激射器的基础上，激光器很快地问世了。激光器问世后，汤斯转到其它研究领域，肖洛进入斯坦福大学物理系执教并开始从事激光光谱学的研究。由于激光器所注入的活力，从 60 到 70 年代末期，激光光谱学的进展异常神速。肖洛所在的斯坦福大学研究组始终站在激光光谱研究领域的最前列。这个研究组除了肖洛外，还有一位年青教授汉施 (Hansch, T.W)。汉施 1968 年从德国海德堡大学获得博士学位后不久，便来到斯坦福大学任教。他们领导着来自世界各地的几位访问学者和近十名博士研究生。在整个 70 年代中，这个友好且富于创造性的研究集体在高分辨率激光光谱学的研究中，做出了多方面的重要贡献，所创造的激光光谱学方法居世界领先地位。它们是：饱和吸收光谱(1971)、内调制荧光光谱(1972)、双光子光谱(1974)、激光识别光谱(1976)、偏振光谱(1976)、两步偏振标识光谱(1979)、光电流光谱(1979)、偏振内调制激励光谱(1981)等。

饱和吸收光谱 是非线性、高分辨率激光光谱中最早出现，也是较普遍应用的一种。在传统的光谱学中，发自分子或原子的热运动引起的谱线增宽是一个非常令人头痛的问题，它们常把许多非线性的测量细节掩蔽了起来。如何才能在不能消除分子、原子热运动的情况下，把它们对谱线的多普勒频移消除掉呢？这的确是一个难题。肖洛等人研制成功的饱和吸收光谱技术解决了这一难题。他们高超的设计思想以及精湛的实验技术令世人称奇。他们先把激光分为两束，一束是较强的泵浦光束，一束为较弱的探测光束。使泵浦光束经过一个称为斩波器的装置调制后，再令两束光以几乎完全相反的方向通过样品。由于泵浦光束足够强，它们与样品的原子作用后，吸收了光量子的原子被泵激至激发态。当其吸收能力达到饱和以后，就暂时不能再吸收相同的辐射光量子。在这种情况下，较弱的探测光束就可以不被吸收地通过样品，到达接收器。要实现上述设计思想，必须使两束光与同一群原子发生作用，即只有那些沿轴向速度为零的原子，才能对两束相向而行的原子不贡献多普勒频移。由于泵浦光束预先经过了调制，在调制激光波长时，通过锁定放大器预先接收到相应的光谱，这样就事先把饱和吸收光谱中那些对多普勒频移无贡献的原子挑选了出来，使泵浦光束仅对这些原子发生作用。1976 年，在饱和吸收光谱的基础上，肖洛研究组又引入了偏振效应，研制成功偏振光谱法，使信噪比提高了 10^3 倍。偏振光谱法使用的泵浦光为圆偏振光，探测光束是线偏振光。在没有泵浦光束时，由于检偏器的阻挡，偏振光谱的本底很低，接收器接收不到信号。加入泵浦光束以后，泵浦光作用于样品的原子，使气体样品中，只有具有某一角动量分量的原子被激发，介质呈现各向异性，探测光经过气体样品后，变为圆偏振光，其中某一分量被接收器吸收。由此可以看出，接收器所检测到的并非光强变化，而是偏振状态的改变。

饱和吸收光谱技术消除了原子热运动的多普勒频移影响，因此能从谱线的精细结构与超精细结构中，揭示出许多传统光谱技术难以探测到的信

息。肖洛等人测到的钠 D_1 线的一个分量最窄线宽仅为 40 ± 4 MHz。而在这以前，它们被宽度数百个 MHz 的多普勒频宽所淹没，即使使用分辨率最高的摄谱仪也不能发现它们。除了克服了多普勒频移的困难以外，激光饱和吸收光谱技术的灵敏度也高得惊人。1975 年，肖洛研究组用这种方法对浓度低到每立方厘米仅有 100 个原子的钠蒸气进行测量。在这种浓度下，平均每次只有 1~2 个原子处于探测光束之中，这是传统光谱技术根本无法察觉到的。肖洛等人借助可调谐激光器和其它一些辅助手段，使测量的灵敏度提高到上百万倍，可观测目标达到了构成物质的单个原子或分子的水平。1974 年，肖洛小组应用饱和吸收光谱法精确测量了里德伯常数。里德伯常数是瑞典物理学家里德伯 (Rydberg, Johannes Robert 1854~1919) 1890 年给出里德伯光谱公式中的一个普适常数。随着光谱学与原子物理学的发展，这一常数的重要性也被逐渐揭示出来。根据玻尔的氢原子模型，里德伯常数是氢原子中，电子被质子束缚所需能量的一种尺度。后来发现，几乎涉及一切有关原子、分子结合的理论中，这一常数总会出现。它与其它一些基本物理常数，如电子的质量与电荷、普朗克常数、光速等都有直接的关系。因此，它不仅是计算能级的基础，在光谱学、原子物理学中占有重要地位，而且在全部物理学的基本理论中都有重要的影响。通过对它的精确测量，不仅可以改善其它基本常数的精确程度，还可以检验基本理论间的自洽性。在 1974 年，肖洛等人首先测量了氢原子的 H_α 线中最强的精细结构分量 $^3P_{3/2} \sim ^3P_{2/5}$ 的跃迁波长，所得到的里德伯常数为 $R = 109737.3143(10) \text{ cm}^{-1}$ ，其精确度比以前提高了 10 倍。1978 年，他们又用偏振光谱法测量了 H_α 中的另一分量 $^3S_{1/2} \sim ^3P_{1/2}$ 的波长，得到的里德伯常数为 $R = 109737.31476(32) \text{ cm}^{-1}$ ，使精度又提高了 3 倍。近年来，随着激光光谱学的飞速发展，里德伯常数的测量纪录不断地被刷新。1986 年的测量结果是 $R = 109737.31534(13) \text{ cm}^{-1}$ 。此后，又陆续出现更精确的测量值。到了 90 年代初，里德伯常数的测量结果已达到 $R = 109737.315709(18) \text{ cm}^{-1}$ ，从而使它成为迄今为止，与光速 c 、电子与质子的磁矩比 μ_e / μ_p 、普朗克常数 h 等并驾齐驱的最精确的物理常数之一。

肖洛等人于 1974 年还成功地研究了双光子光谱技术，通过这项技术，人们首次观察到了双光子跃迁现象。过去在理论上曾有预言，物质的原子有可能同时吸收两个光子而跃迁到较高能级，这是一种非线性过程。由于一般光源都较弱，发生这一过程的几率很小，在传统光谱技术中，很难被观测到。激光光谱学要实现这一观测目标，首先要消除分子、原子热运动引起的多普勒频移影响。在获得无多普勒增宽的谱线之后，为得到过程的最大几率，还需借助可调谐激光器，得到半频的单色强激光束。通过粒子双光子吸收后发射的荧光，即可实现对双光子吸收的探测。肖洛小组在这项探测中，使可测频宽达到了 1 Hz、分辨率达到 10^{-15} 、谱线位置测量的精确度达到了 10^{-17} 的高水平。利用双光子光谱技术，他们精确地比较了氢原子 1s 和 2s 间，2s 和 4s 间能级间距之比。由此，他们发现了玻尔理论的结果与实验结果有差异，这个差异非常重要，因为它正是基态 1s 兰姆位移的一个量度，因而也是对量子电动力学的一个检验，这在传统光谱学中是很难做到的。

在非线性激光光谱研究中，另一类十分引人瞩目的课题是高时间分辨率的瞬态激光光谱学。这一领域之所以受到普遍重视在于它具有十分深厚的应用潜力。同时，短脉冲激光技术的发展，又为这项研究打开了发展的前景。在 70 年代以前，人们对于寿命在百万分之一秒的瞬态粒子不能追踪观察，而瞬态激光光谱学却奇迹般地实现了这一范围的观测。利用激光脉冲还实现了耗时仅有 10^{-12} 秒的化学过程观测。自皮秒激光器出现以来，在瞬态激光光谱研究中，已有一系列激动人心的成果，人们观测了大量的快速瞬态现象和超快的弛豫过程，如能级寿命测量、反应动力学中的碰撞过程研究、生物过程等。用这项技术，还精确地测量了诸如光子回波、光学章动、自由感应衰变、量子拍频等多种相干瞬态效应。这些效应都是物质对快速激发或激发的猝然终止中产生的，它们难以在稳态光谱学研究中，更不可能在传统光谱学中获得，因而在物理学研究，尤其在分子、原子物理学、凝聚态物理学研究中占有重要地位。总之，在所发展的激光光谱学中，激光光源的优越性被发挥得淋漓尽致。激光的单色性消除了谱线的多普勒频移，这种方法还避免了分光器件线度对分辨率的影响；激光的高强度又使强光与物质粒子的相互作用中，产生各种可观测的非线性光谱效应，强光激励还大幅度地提高了待测信号的强度，因而提高了探测的灵敏度。此外，激光的高度方向性，又可以使人们进行微区或定点的光谱分析。以激光光谱学为代表的现代光谱学不仅给光谱学的发展带来深刻的变革，在多种领域中取得的成果也展示着它广阔的应用前景。由于肖洛在激光光谱学建立与发展中做出了重要贡献，肖洛与发展脉泽技术做出贡献的美国物理学家布洛姆根 (Bloembergen, Nicolaes 1920 ~) 共同获得 1981 年诺贝尔物理学奖。

(三) 量子光学研究

1. 从混沌光场到相干态光场

早在大约一个世纪以前，人类就开始认识到光的量子性质。量子概念是从黑体辐射研究中引出的，黑体辐射是持续了 50 多年的跨世纪研究。最初，普朗克大胆地引入了辐射与吸收谐振子概念。接着发现了它们的深刻意义，由此导致了能量子概念的提出。普朗克的能量子理论不仅冲击了经典物理学长期信奉的“自然界无跳跃”的信念，也彻底变革了经典物理学中的因果律以物理量连续变化方式为基础的思想方法。普朗克的能量子成为近代量子物理学的生长点。紧接其后的是爱因斯坦的光量子假设被提了出来。在光电效应以前有关现象的研究中，爱因斯坦不仅把量子概念扩展到了光的传播，还用到了物体内部的热振动和光化学现象。在 1916 年爱因斯坦所发表的《关于辐射的量子理论》中，他提出了关于辐射的吸收与发射过程的统计理论。在该理论中，他利用了玻尔的量子跃迁思想，导出了普朗克的辐射公式。更值得注意的是，论文还提出了受激辐射概念，为 60 年代激光的问世提供了理论基础。尽管爱因斯坦的光量子假设遭到了当时几乎所有老一辈物理学家的反对，但是 1920 年康普顿效应的发现，却给电磁辐射场的不连续性提供了进一步的证明。它不仅表明电磁场能量的量子化分布，为此成为光量子理论的重要实验依据，同时，还首次证实了微观粒子的运动遵守动量守恒与能量守恒定律。

尽管人类认识到光的量子性已经近一百年，但是应用量子理论研究光辐射与光场的相干性及统计性还只是近年来的事。从光量子论的诞生，到随后量子力学的建立，对物理学乃至整个自然科学产生了极其深刻的影响。然而，近半个世纪之久，经典电磁理论在光学领域中，却始终占据着主导地位，光学的研究也始终停留在经典理论的框架之中，缓缓地向前发展着。这种发展极端不平衡的现象，不能不引起人们的深思。在究其原因时，人们看到了经典电磁理论在光学领域中几乎取得了全面的成功，而光的量子性却只能通过寥寥无几的特定光现象才能被观察到。即使承认了光的波粒二象性，也只是被认为在传播中，光显现波动性，而仅在与物质作用的少数几个事例中，光才显现粒子性，把波粒二象性仍当作为两种分立的属性，很难设想它们是如何融为一体的。

60 年代初，激光的诞生给光学带来了不可估量的影响，尤其是在对激光机理的理论与实验研究中，人们发现了激光与普通光的本质差别。在激光问世以前，人们所接触与使用的光，包括热辐射、固体发光、气体放电等，都是发自大量彼此独立的原子（或分子）的光的集合。各个原子发出的光在相位上彼此毫无关联，这种光场称为混沌光场。传统光学以混沌光场为研究对象，判断相干光也只是以这种光场能否发生干涉为依据。因此，相干性的实质被认定为：不同时空点处光场的相位关联程度。这种带有极大局限性的相干性概念，一直持续了数百年。第一次揭示这种相干性具有局限性是在 1956 年，由汉堡、布朗及退斯所完成的光学关联实验。这一实验又常以三人姓氏第一字母打头，被称为 HBT 实验。他们把发自放电管的辐射，经滤波后，由半透半反分光器分为两束，其中一束经时间延迟器。两只光电倍增管分别接收两束光后，再把其输出信号馈送到一个相关器

中。这样，相关器测量到的将是两个不同时空点光场强度起伏的关联，不再是过去的相干实验中所测的光场强度自身的相位关联。通过这一实验，他们首次证实了光场存在有高阶相关效应，这是过去任何经典干涉与衍射实验所没能观察到的。就相干光的频率而言，光场的强度起伏关联是一个缓慢变化的量，它的测量值受到外界的扰动要比测量相位关联微弱得多。本来 HBT 实验的初衷是打算用这套装置代替迈克耳逊测星仪，以提高测量双星角间距的精度，不料，实验的结果却远远地超出了原来的预想。

HBT 实验给相干性带来了全新的概念。根据经典理论，传统光场的随机性只用一个一阶相关函数描述就够了，这就是一阶相干度为 1 时，即对应完全相干性情况。然而，HBT 实验测出的光场起伏却表明，上述相干性的描述并不完备，还必须补充二阶或更高阶的相关函数。只有当一阶、二阶或更高阶的相干度均为 1 时，才能称为完全相干光。在普通光源情况下，不可能获得这种真正的完全相干光。然而，一台理想的激光器所产生的光场就处于相干态，只有激光诞生后，人们才有可能获得真正的相干光源。

HBT 实验还表明，量子电磁场意义下的相干态光场，并不是无噪声的光场，它们包含了真空起伏的量子涨落，因而具有经典体系所不具有的统计性质。这种光场的量子性又导致人们对压缩态的研究。

2. 压缩态研究

根据量子场论，处于真空中，各量子场的每一个振动模式仍会不停地振动，这种振动称为真空零点振荡。与此同时，真空中各量子场间还会相互作用，不断有各种虚粒子产生、消失或转化，这就是真空的量子涨落。从这种意义上看，真空本身就是一种极其复杂的媒质。因此，当用量子场论的观点、方法研究光的传播时，一束具有确定频率、确定偏振态和传播方向的单模光波，其振动的模量与相位角均为互不对易的算符，根据测不准原理，完全相干光条件下的量子相干态，在振幅平面上不再对应于一个点，而是一个圆斑。圆斑的大小等于电场的真空起伏涨落，称为零点振动。这意味着，即使在“完全黑暗”之中，电磁场仍存在微小的起伏。普通光波是经典光波与这种真空起伏的叠加，它们相干的结果构成噪音场，这将使测量的精度从根本上受到限制。如何使这种无规则的起伏压缩至最小，是人们十分关注的问题。

近年来，研究人员发现，在某些情况下，光束中的这种量子噪音可以被压缩到很小，而且，当光波的一部分噪音被压缩至很小时，另一部分光波噪音却被放大，而对被压缩噪音的光波进行测量时，其精确度有可能超出测不准原理给出的限制。为了得到压缩光，最初设想使用一种周期性泵浦的方法。令谐振腔一端的反射镜往返运动，当腔长变化的频率达到光频的两倍时，到达反射镜上的光波能量会周期性地被放大和缩小。这意味着，腔体靠长度的变化，不断地向光波放出或从光波抽取能量。若反射镜振动相对光波具有一定的相位时，光波则被放大，电磁振荡趋于增强；反之，光波被衰减，电磁振荡趋于减弱。真空噪音是由许多无规则的波构成的，它们具有相同的频率，但振幅与相位却呈现无规则变化。当一定相位的波被放大时，另外一些波则被衰减。能量重新分配的结果，腔内的真空噪音将由一部分高振幅波与一部分低振幅波组成，这两部分波的强弱又交替变化着，这种光波即称为压缩态。

上述设想虽然很巧妙，但是事实上，不可能使反射镜以光频数量级振动。1985年，美国贝尔实验室的斯鲁施尔（Slusher）研究小组以上述原理为基础，提出了一种代替反射镜振动的实验方案。他们在谐振腔中放入一个充满钠原子蒸气的容器。由于在钠原子气中光速比真空中低，光经过钠蒸气室的光程加大。当用激光激发钠原子，由于激光的激发，钠原子蒸气室的光程迅速变化，这种变化的频率又恰好与光频相当，因而代替了反射镜的往返振动。他们的这一实验获得了成功，首次利用所形成的驻波场的激光，周期地激发钠原子而获得了压缩光，使压缩后的真空噪音下降了7%。这一实验的成功带来了积极的反响。美国IBM的艾尔马丹（Almaden）研究中心的谢尔比（Shelby）、麻省理工学院的夏皮洛（Shapiro, I.）等人利用不同的方法也得到了光场的压缩态。目前世界上最高压缩量的单模压缩态是由得克萨斯大学的基布尔（Kimble, J.）与中国科学院物理研究所的吴令安、山西大学的彭堃堃共同获得的，他们得到的压缩光噪音水平较真空噪音下降了近70%。

压缩光是非经典光，它的量子特性对于揭示场的物理本质有着重要的价值。压缩态光场又是通过非线性过程由相干光场产生的，对它的研究又使量子光学与非线性光学得到了交叉。

同时，由于压缩光具有比一般标准量子噪音低的起伏，可以大幅度地提高信噪比，可望能在对像引力波这样的微弱信号检测、光通信及原子、分子物理学等方面得到特殊的应用，因此，光压缩态研究已成为目前光学领域中重要的基础研究的前沿课题之一。

3. 腔量子电动力学

量子光学的目标是在量子电动力学的理论框架内，重新研究各种非线性相互作用过程，目的在于揭示各种非经典效应，研究产生这些效应的实验方法，并开辟它们的应用途径。近年来，腔技术的发展，已使超导微波腔的Q值达到了 10^{11} 数量级，光子在腔体内的存留时间可以长达几分之一秒，这为腔量子电动力学的研究奠定了实验基础，也使这一课题成为近年来光学研究的热门领域之一。

处于激发态的原子，可以通过自发辐射过程跃迁到基态。

实际上，引起自发辐射的物理机制是真空的量子起伏。由量子电动力学可以精确地计算出这种自发辐射的速率。然而，若把激发态的原子置于一个腔体中，由于腔只允许某些分立的本征模存在，腔的存在将使真空场的谱结构发生变化，然而场在自由空间的任何模式都有真空的起伏，这就使得腔体中原子与真空的相互作用与在自由空间中不同。人们很关心这种情况下，原子的自发辐射是否会受到影响，如果有影响又是何种影响。此外，当腔内不是真空，而存在有相干光场时，原子自发辐射的振荡频率又将如何变化，由于腔的存在，自发辐射光的最小谱线宽度又发生什么变化。人们预料，这些问题的研究对于腔量子电动力学的发展有重要作用。

目前，理论与实验的研究均已证实，腔的存在对原子与电磁场相互作用有明显的影。1987年，实验发现了称为拉比(Rabi)振荡的效应。在实验中，向不完全真空、且有一定热辐射(2.5K)的腔体内，注入高激发态的里德伯原子，由于所发出的光子在腔体内停留的时间长，高激发态原子在跃迁时，偶极矩又较大，使原子在腔内的自发辐射有可能是可逆的，即

反复地释放和吸收光子，这就使原子在上下两能级间来回振荡。当原子跃迁频率恰与某一腔频共振时，即可观察到拉比振荡现象。由于能证实量子相干理论，拉比振荡现象已经成为腔量子电动力学的重要实验之一。

1980年，人们曾利用量子电动力学从理论上预言，拉比振荡还会有衰减—复苏—衰减的效应。这一效应只可能由量子电动力学得到解释，因为如果用经典理论描述光场，拉比振荡应保持恒定，若是应用量子电动力学，拉比振荡频率与光子数 n 的平方根 \sqrt{n} 成正比，而量子相干态不是光子数的本征态，它应是 n 在一个值附近的许多光子数本征态的叠加，因此，原子在两个能级上的几率之差应该与不同的拉比振荡频率相关。当各种振荡相位分散时，振荡将衰减；相位一致时，振荡将加强。这一预言很快地被实验所证实。

4. 超辐射研究

早在激光出现以前，以创立标量-张量理论研究引力、并对宇宙原始大爆炸的微波背景辐射做出预言而闻名于世的美国物理学家迪克 (Dicke, Robert Henry 1916 ~) 就在他的一篇著名论文中预言，“在多个原子的受激辐射过程中，原子间的‘合作’效应能在发射动力学中起重要作用”。近十几年来，迪克的这一预言引起了一些人的注意。迪克所预言的，即是一种超辐射现象。

超辐射是多个原子在一起时，所产生的一种相干自发辐射。此时，多个原子与共同的辐射场相互作用，构成一个合作的整体。彼此合作的 N 个原子的辐射相位相同时，由于相干叠加，自发辐射的光强将与 N^2 成正比。在非相干自发辐射时，由于 N 个原子辐射的相位彼此毫无联系，自发辐射的光强将只与受激态的原子数 N 成正比。所以，光强与 N^2 成正比，是超辐射与一般辐射相区别的主要特征。

超辐射现象属于原子或分子在辐射过程的弛豫时间内，所发生的一系列非线性光学效应。这种情况只有在入射光极强、相干性极好的条件下才能发生。除此以外，这种现象还要求有足够的弛豫时间范围。在初始时，所有原子都处于激发态，各个原子跃迁电偶极矩在相位上彼此没有关联，所以在第一个光子发射时，与普通的辐射没有任何区别，它的发射时间具有较大的不确定度。然而，在第一个原子发射第一个光子之后，各个原子与辐射场相互作用的结果，它们的跃迁电偶极矩的相位产生了关联，这不仅增加了第二个光子的辐射率，减小了发射时间的不确定度，而且在发射方向上也以第一个光子的发射方向做为从优选择。随着发射光子数的增加，相位关联越来越强，辐射率继续增大，发射时间的不确定度随之减小，直到发射高峰出现。此时，总的发射时间不确定度等于各次发射不确定度平方和的根，而其中第一次所占的比例为 $3/4$ 最大，以后逐次减小。由于在高峰时，原子跃迁电偶极矩相位达到了最大关联，辐射强度与 N^2 成正比，这一切表明，超辐射光不是一般的混沌光，而是一种相干光。这种相干光产生的机制与激光的受激辐射不同，它是多个原子自发辐射时，与共同的辐射场相互作用而出现的干涉效应。

1973年，美国麻省理工学院的费尔德 (Feld) 研究小组最早在可见光波段上观察到了超辐射现象。以后又有一些涉及不同原子系统、不同泵浦方式和不同光谱发射区的超辐射实验获得了成功。近年来，人们对超辐射

进行了大量的研究，包括超辐射产生条件、原子合作的建立过程与机制、合作长度、孕育期、峰值特点及物理性质和不同抽运方式、不同样品、不同原子密度对超辐射的影响等。1982年，人们从实验上观测到了超辐射过程。同一年，劳伦斯-利弗莫尔实验室和普林斯顿大学研制成功X射线激光器。X射线激光的问世，不仅对生物科学、微电子学、固体物理和材料科学研究产生了重要的影响，它还使人们看到，利用超辐射实现的X射线的相干辐射研究具有广阔的应用前景。超辐射除了强度大、谱线锐度高等优点外，在短波区更具有较大的辐射几率。它无需谐振腔，因而避免了谐振腔材料的困难。而且，在超辐射时，上能级寿命短，会增加辐射率。因此，在X射线激光发生困难之处，正是X射线超辐射的优越性所在。

超辐射的另一个特点也引起了人们的注意，这就是它的非线性效应。由于它显现出较强的非线性效应，可以用于高分辨率光谱学研究。喇曼超辐射及双色超辐射又可用于超辐射调谐输出。利用超辐射的反聚束效应与压缩效应还可望提供光子简并度高、量子噪音低的超辐射源。上述这些技术的实现，又能进一步推动超辐射理论研究的进展。

(四) 信息光学的大发展

1. 从电子学到光子学

1883年,爱迪生(Edison,ThomasAlva1847~1931)在一次改进电灯的实验中,将一根金属线密封在发热灯丝附近,通电后意外地发现,电流居然穿过了灯丝与金属线之间的空隙。1884年,他取得了该发明的专利权。这是人类第一次控制了电子的运动,这一现象的发现,为20世纪蓬勃发展的电子学提供了生长点。这一生长点上的第一只蓓芽就是弗莱明(Fleming,Sir John Ambrose 1849~1945)发明的整流器。弗莱明曾与电报的发明者、意大利的电机工程师马可尼(Marconi, Marchese Coglielmo1874~1937)一起工作,他把爱迪生及马可尼两位大师的发明成果结合起来,着手研究真空电流的效应。1904年,他发明了真空二级管整流器。紧接着,1906年,美国发明家德福累斯特(DeForest, Lee 1875~1961)在弗莱明的二极管中又加入一块栅极,制成了第一个不仅可以用于整流,还可以用于放大的真空三极管。三极管的研制成功不愧为把电子器件用于实用的点睛之作。1910年,德福累斯特首次把它用于声音的传送系统。1916年,在他的主持下,建立了第一个广播电台,开始了新闻广播。到本世纪的20年代,真空电子器件已经成为广播事业与电子工业的心脏,它推动着无线电、雷达、电视、电信、电子控制设备、电子信息处理等整个电子技术群的迅速发展。德福累斯特在电子技术方面拥有300多项发明专利权,仅由于其中三极管的发明,他被誉为无线电之父也是当之无愧的。

电子学与信息技术的第一次重大变革发生在本世纪50年代。1948年,贝尔电话实验室的肖克莱(Shockley,WilliamBradford1910~)、布拉顿(Brattain,walterHouser1902~)和巴丁(Bardeen,John1908~)共同发明了晶体三极管。自此,以晶体管为基础的固体电子学得到了突飞猛进的发展。1958年,半导体集成电路问世,不仅使高速计算机得以实现,还促使电子工业与近代信息处理技术发生天翻地覆的变化。

其实,从电子学的建立伊始,到它的发展壮大,光子学始终在其中蕴育生长着。维系着它们的,就是二者之间的共同点——信息。从信息论的观点看,无论电、光还是声,都是荷载与传递信息的载体。当电子通信容量达到最大限度而不能继续扩大时,人们很自然地把目光转向波长更短的光波。到了本世纪60年代,光通信已成为很重要的研究领域,光子学的诞生迫在眉睫。

历史似乎是在重演。本世纪第一个10年,真空管问世,促使电子学的诞生;而60年代,红宝石激光器的问世,又促使了光子学的诞生。从20年代到60年代,电子器件从真空管过渡到固体三极管,随之实现了集成化,在促进电子学大发展的同时,光电子学、量子电子学也随之建立和发展起来,它们形成了现代电子学的学科群体;从60年代到90年代,激光器从谐振腔体型向着固体半导体激光器过渡,随之实现了光子器件的集成化,不仅促使了光子学的大发展,非线性光学、纤维光学、集成光学、激光光谱学、量子光学与全息光学也形成了现代光子学的学科群体,目前它们正在蓬勃发展之中。电子学领域中几乎所有的概念、方法无一不在光子学领域中重新出现。电子学和光子学分别用于电、光过程的控制及信息处

理，它们都在扩展与延伸着人类的体能与智能，在信息学与信息工程学中，它们都居于核心与统治地位。

然而，仔细翻阅历史却发现，历史却并没有简单地重演。电子电路不能在同一点重叠相交，这种空间的不相容性限制了密集度的提高；集成电路的平面结构只适用于串列处理，要在信息存贮和数据处理上有突破性进展，要使信息贮存密集度再提高 4 个数量级，实现非定址的联想记忆 (associative memory)，以发展人工智能，必须发展三维并列处理机构。与电子学的这些局限性相比，光子学的信息荷载量要大得多，光的焦点尺寸与波长成反比，光波波长比无线电波、微波短得多，经二次谐波产生倍频，激光可使光盘存贮信息量大幅度增加。电子开关的响应最短为 $10^{-7} \sim 10^{-9}$ 秒，而光子开关的响应时间可以达到飞秒数量级。光子属于玻色子，不带电荷，不易发生相互作用，因而光束可以交叉。光子过程一般也不受电磁干扰。光场之间的相互作用极弱，不会引起传递过程中信号的相互干扰。这些优点为光子学器件的三维互连、神经网络等应用开拓了光明前景。早在 30 年代，就有人提出了“光子学”的设想。由于找不到光学非线性效应特别强、响应速度又特别快的材料，这一设想竟然几十年未能实现。近年来，人们在无机半导体和有机高分子材料中发现了要寻找的目标，已制成诸如混频、调频、开关、逻辑、存贮和限制器等一系列光子器件。光计算机是在探索与发展光信息与处理技术中的重要研究课题。多种光信息处理系统和光学模拟运算，不仅已经实现，并在综合孔径雷达和光学图象去模糊等领域得到了成功的应用。

1990 年 1 月，贝尔实验室研制成功第一台数字化光处理器，其光开关的速度已达到每秒 10 亿次，它是实现光计算机目标的征途上迈出的重要一步。下一目标是实现具有识别、推理与联想等人工智能特点的光计算机。近年来，光学人工智能的研究已经起步。1982 年霍普菲尔德 (Hopfield) 研制成功第一个神经网络的物理模型，并在光学模拟系统中得以实现。在光信息存贮方面，光盘的数据存贮密度高、可靠性强、误码率低、存贮信息类型广、适应性好，便于计算机处理与查询，既可进网实现资源共享，又可便于个人使用，还有价格低、复制方便等特点。光盘的研制成功为解决当今信息膨胀危机起了至关重要的作用，它被誉为本世纪，继汽车、电视和微机之后的又一重要发明。无论光纤通讯系统、光计算机还是其它光信息处理系统，都面临小型化与集成化的发展方向。光集成和光电集成器件将成为今后各种光通信系统的重要核心部件。虽然光计算机目前还处在多条途径上的探索之中，但是，一旦所采用的功能元件、算法及体系结构确立之后，必然会像电子计算机那样，采用不同集成度的集成光路和集成光电回路，目前它们已成为发达国家优先发展的领域。

现在，许多高科技技术与高科技产品中，大多是光、电、机、算结合的产物。光子学与电子学无论在理论研究，还是在工业技术的发展中，它们都在相互依存与补充、相互渗透与促进着。光子学与电子学的结合有着相当广阔的前景。

2. 光孤子与光孤子通信

(1) 孤立子概念的建立

近代非线性波理论的研究表明，有些类型解不可能用线性微扰的方法

获得，孤立子解就是其中的一个。其实，与光孤子相应波的运动形态，很早以前就被人观察到了。1834年8月，年仅26岁的英国造船工程师罗素(Russell Scott 1808~1882)在勘察爱丁堡与格拉斯哥之间的运河河道时，发现一只行船前的水面上，有一个高约1.5英尺、长约30英尺的大水包。船停止后，这个水包仍以每小时大约8到9英里的速度前进，它的能量衰减得很慢，直到行走2英里后，才在蜿蜒的河道上消失。罗素称这个水包为孤立波，并把这一发现发表在皇家学会会刊上。罗素一开始就意识到，这个水包不是普通的水波。这一发现后，他开始了孤立波的研究。他模拟实际水道，建造了一个狭长的水槽，再按当时的条件给水以推动，果然再现了孤立波。罗素力图从理论上给孤立波一个解释，但是没有成功。尽管如此，一个世纪之后，为纪念罗素的这一不寻常发现，在他逝世100周年(1982年)之际，人们在首次发现孤立波的运河边，竖起一尊罗素的石像。人们这样纪念他不是没有道理的。孤立波的非线性波动特征逐渐引起了世人的关注与兴趣。孤立波理论已经成为近代物理学基本理论的重要组成部分，它在空间物理、受控热核聚变技术、等离子体物理以及非线性光学等领域，特别是光纤通信技术中，占有举足轻重的地位。

罗素发现的50年之后，两位荷兰学者柯特维格与德弗里士在研究水波时发现，完整的流体动力学方程应该是非线性的，由它可以得到非线性波动方程解，通常的线性方程仅只是在波幅远小于波长情况下的一种近似情况。在波幅与波长的比值不可忽略时，即出现非线性波或大振幅波，孤立波即为其中的一种。他们根据水波的非线性与色散特征，得出了著名的kdv方程，由该方程获得的孤立波表面形状以及传播速度，恰与罗素的观察结果一致。至此，孤立波的存在得到了世人的公认。从kdv方程可以得到两个孤立波的解，一个波形尖锐，波速较大；另一个波形平缓，波速较慢；罗素看到的是后者。理论研究表明，孤立波不仅有能量和动量，彼此间还有相互作用。当时的人们曾一度预言，当两列非线性波相遇时，孤立波会被撞得四分五裂，于是认为，即使孤立波存在，也是不稳定的，在物理学中，它们不会有什么研究价值。

本世纪60年代，空间物理学以及受控热核聚变技术的发展，促进了人们对等离子体中存在的形形色色非线性波、波与粒子相互间非线性相互作用的研究。与此同时，求解非线性方程孤立波解的各种数学方法相继问世。大中型电子计算机也投入运行，它们在复杂的计算中，发挥了神奇的功能。丕林和克斯姆等人利用电子计算机在数值模拟计算中，研究两个孤立波的相撞，结果发现，孤立波具有类似粒子的性质，它们互相碰撞后，不仅能保持能量与动量集中的状态，动量的分配居然与弹性粒子的情况非常相似。60年代末，扎巴斯基(N.J.Zabusky)与柯鲁斯克尔(M.D.Kruskal)等人对孤立波粒子特性的理论研究结果表明，丕林和克斯姆等人的模拟具有一定的真实性。自此，人们又把孤立波称为孤立子或孤子(Soliton)。

(2) 光孤子理论

孤立波是非线性波动方程，在无限远处波动趋于零或趋于常量条件下的一种行波解。它应广泛地出现于各种非线性波动情况之中，光波亦不例外。1973年，美国贝尔实验室的海斯格瓦(A.Hasegawa)与泰波特(F.Tappert)等人首先从理论上指出，在光纤的反常色散区中，有可能形成光孤子，这是因为光脉冲在光纤中传输时，同时受到了两种特殊的物理

效应，即群速度色散效应与自相位调制效应的影响。由于这种影响，使光脉冲波形随着传输而发生畸变。这表明，组成脉冲的各频谱分量的群速度彼此不同。进一步研究还发现，光纤在正常与反常色散区，光脉冲传输的特性不同。在正常色散区，光脉冲的高频分量较低频分量的传输速度慢；而在反常色散区，情况正相反。无论哪种情况，其结果都会使脉冲展宽。自相位调制效应是指在不考虑光纤的色散效应时，光纤的非线性克尔效应对脉冲传输的影响。此时，光纤折射率 $n=n_0+n_2|E|^2$ ，其中 n_0 是线性折射率， n_2 是非线性折射率。 $n_2|E|^2$ 为非线性场感应项，它的脉冲在传输中产生正比于 n 的相位变化。这种相位调制的结果，表现为频率的变化，引起脉冲前沿谱红移，后沿谱蓝移，因而前沿速度减慢，后沿速度加快。如果光纤工作在反常色散区，这种效应的影响恰与群速度的色散效应相反。当两种效应的影响恰好彼此抵消，脉冲就保持不变地传输，因而形成光孤子。脉冲的幅值越高，这种非线性就越突出，导致自相位调制加强，使脉冲压缩超过了展宽。当脉冲被压缩到一定程度，非线性削弱又导致自相位调制减弱，脉冲展宽又超过压缩。这种在传输中不断压缩与展宽的变化脉冲就构成了更高阶的光孤子情况。

事实上，光脉冲在光纤传播中的上述两种特殊的物理效应，均反映在非线性波动方程之中。根据介质的非线性光学特性，光纤芯折射率 $n=n_0 + i\gamma|E|^2 + n_2|E|^2$ ，它包含有非线性项，该项在光场强度超过一定值时不可忽略。根据光纤的色散效应，再根据麦克斯韦方程，即可得到非线性波动方程

$$i(\partial\phi/\partial z + k'\partial\phi/\partial t) + (k''/2)\partial^2\phi/\partial t^2 - \omega n_2/cn_0|\phi|^2\phi = 0$$

其中 ϕ 为复振幅 $\phi(z,t)$, $k' = \partial k/\partial \omega$ 为信号群速度的倒数，

$k'' = \partial^2 k/\partial \omega^2$ 为表征色散量，

γ 为与光场径向特征函数相关的因子。非线性波动方程中的前两项是对波以群速传播的描述，后两项描述的则是群速度的色散效应，其中最后一项为非线性效应，这就是自相位调制效应。

1974年，赛兹默(J. Satsuma)等人，经一系列变换利用逆散射方法，找到了非线性波动方程的解。在 $N=1$ 时的解称为基本孤子，或一阶孤子。从解中可以看出，它们具有稳定的波形。 $N=2$ 时的解称为高阶孤子，它们的波形呈现周期性变化。而且在 $k'' > 0$ 的正常色散区得到所谓“暗孤子”解，而 $k'' < 0$ 的非色散区，则存在有所谓的“壳孤子”解。

利用这散射方法还可以找到孤子所需要的激光脉冲功率，以及与孤子周期相对应的光纤长度。这一理论结果不仅为光孤子通信研究指明了方向，同时也大大地缩短了研究的进程。与此同时，70年代以前在光学技术领域已经取得了两项重要的进展：非正常色散区低损耗光纤研制成功；

非正常色散区频率可调的锁模激光器研制成功。这两项成果为光孤子脉冲实验准备了物质条件。1980年，美国贝尔实验室的莫勒诺尔等人，终于在实验上首次观察到了光孤子脉冲，所得到的结果与理论预言完全吻合，光孤子通信技术的诞生已迫在眉睫。

(3) 光孤子通信

在常规的线性光纤通信中，高码率数字在长距离的传输受到了极大的限制。原因是光纤的能量损耗，使脉冲幅度衰减，而光纤的色散又使脉宽

加宽、脉冲信号畸变。虽然在常规线性光纤通信系统的进展中，逐渐采用了低损耗的单模光纤系统，在波长 $1.55\ \mu\text{m}$ 处，已使损耗降到最低限度，信号无中继传输距离达到了 100km 以上，但是色散问题却始终是影响光纤通信性能的主要障碍。

在为传输数码率再提高一个或更多个数量级的奋斗之中，人们从光孤子的理论与实验研究成果中看到了希望。由于基本孤子脉冲在传输中，色散效应恰与非线性效应相抵，脉宽保持不变，使人们想到用基本孤子为信息载体，将有可能克服原来线性脉冲遇到的困难。在 1980 年贝尔实验室的莫勒诺尔(Mol-Ienauer, L.F.) 等人实验成功后，海斯格瓦(A.Hasegawa) 等人开始着手研究基本孤子用于通信技术的可能性，并于 1981 年首次明确地提出了光纤孤子通信的设想。

海斯格瓦等人所提出的光纤孤子通信方案，除了提高光纤功率使其工作非线性区，并采用激光光孤子脉冲作为信息载体以外，与线性光纤通信系统并无本质区别。在这一方案中，他们忽略了基本孤子的最重要特征，即在小损耗下，孤子的表面积保持不变。人们称这一特性为“绝热性”。理论研究表明，基本孤子脉冲能量和脉宽的乘积与孤子的表面积成正比。因此，为孤子周期地补充能量，不仅能提高通信距离，使其能量复原，提高传输数码率，还能使其脉宽保持不变。若补充的能量恰能补偿光纤的损耗，孤立子脉冲将稳定无畸变地传输至很远。许多人为实现上述设想而奋斗着。问题的关键是究竟应该用什么方式为光孤子补充能量。不少理论方案相继推出，其中人们认为最有希望的是由前苏联学者伊萨耶夫(Isaev, S.K) 在 1982 年提出来的喇曼受激放大方案。早在 1923 年，A.G.S. 斯梅卡尔就从理论上预言，与频率不变的瑞利散射不同，还存在有另一种频率变化的散射现象。1928 年，印度物理学家喇曼首先在液体中观察到了这个现象，这就是喇曼散射。同一年，前苏联物理学家兰茨贝尔格等人，也以石英晶体为散射介质得到了类似的实验结果。60 年代激光问世以后，由于激光具有高亮度、高单色性、强方向性与偏振态确定的特点，应用激光器作为激发光源，有力地推动了对喇曼散射的研究。由于在从纯定性到高度定量的化学分析与测定分子结构上的价值，喇曼散射光谱学已经广泛地用于化学、生物学、物理学、医学等多种领域。在寻找为光纤基本孤子补充能量的研究中，有人一眼就看中了受激喇曼散射，这是喇曼散射的特殊形式之一。当入射激光足够强时，光的自发散射会自动地转变为定向的相干散射。此时，大量的分子被相干地从基态抽运到高能态，此时，若有一束功率足够强而频率不同的光在介质中传输，由于介质存在自发喇曼谱，高频光波会将其部分能量转移给低频光波。基于这一原理，可以使低频信号从高频泵浦光中获得能量。当两光频率满足一定关系时，还可以使信号光获得最大增益。

根据受激喇曼散射原理，海斯格瓦设想，把与孤子峰值数量级相同的连续波泵浦功率，周期地耦合到孤子脉冲的光纤中，通过光纤自身的喇曼模式，孤子一定与泵浦源发生喇曼作用而得到补充能量。就在海斯格瓦的设想发表不久，前苏联依萨耶夫等人也公布了他们的方案。紧接着，于 1985 年，莫勒诺尔等人即实现单级喇曼放大实验。他们以足够的喇曼增益补充了光纤损耗，在 10 千米长的光纤末端观察到了无畸变的孤子脉冲。后来，他们又实现了多级喇曼放大实验，又使孤子无畸变地传输到 6000

千米以上的距离。

1991年，贝尔实验室在圣迭戈举行光纤通信会议(OFC91)，报导了他们研究的新成果。新泽西州霍姆德尔(Holmdel)贝尔实验室的莫勒诺尔小组实现了脉宽60ps的孤子脉冲，以2.4Gb/s的数据传输速率，反复通过光纤循环圈传输了12000千米；西泽西州莫雷山(Murray Hill)贝尔实验室的奥尔森(N.A.O. Issen)小组利用多重孤子两路传输9000千米，甚至霍姆德尔的伯根诺(N.S. Bergano)等人实现了2万千米传输。这表明光纤孤子通信不仅可以跨洋，甚至可以在全球任意两地间进行。

由于光纤孤子通信具有容量高、误码率低、抗干扰能力强、传输距离长、中继放大设施简单等一系列特殊的优点，发达国家已将其列入重点科研项目。我国光孤子通信研究已经展开，由于国家自然科学基金的支持，部分理论研究工作已居于国际领先水平，实验研究正在起步之中。

3. 全息光学的兴起

(1) 从瑞利判据到全息术的发现

尽管近代全息术总与激光联系在一起，全息术的思想却在激光出现前的大约30年就萌生出来了。实际上，全息术思想与显微技术有着不解之缘。首先提出全息术思想的是英国物理学家伽柏(Gabor, Dennis 1900 ~ 1979)。他是在研究显微镜的分辨本领时产生这一思想的。

根据波动光学理论，任何光学成像系统能分辨目标的最小间隔都有一定的限度。英国物理学家瑞利(Rayleigh, John William Strutt 1842 ~ 1919)曾给出光学系统分辨细节能力的判别标准，它称为瑞利判据。瑞利判据已成为估算和比较光学系统分辨本领的统一标准，它是光学仪器性能的重要指标之一。按照瑞利判据，显微镜的最小分辨角为 $\theta = 0.61 \lambda / A$ ， λ 为入射光波长， A 为显微镜的孔径数值。1934年，伽柏正在一家英国公司实验室工作，他的任务是提高电子显微镜的分辨本领。尽管电子显微镜的分辨本领已经比最好的光学显微镜提高了近百倍，但仍不足以分辨晶格。主要障碍来自两个方面，这就是球差 $\delta_s = C_s \alpha^3$ 和衍射差 $\delta_d = 0.61 \lambda / \alpha$ ， α 为孔径角， C_s 为球差系数，两者相互制约。如果兼顾，不得不把电子显微镜的孔径角限制在 5×10^{-3} 弧度，此时，所能分辨的最小间隔为0.4nm，而分辨晶格至少需要可分辨的间隔为0.2nm，这一长时间难以克服的困难，使伽柏认识到，不能再沿原路思考这一问题。由电子衍射，使他想到了X射线衍射术。

进入到20世纪的波动光学已经发展到相当完善的地步。应用惠更斯-菲涅耳原理不仅能圆满地解释光的干涉现象，以该原理为基础，光的衍射理论也发展到相当完善的地步。本世纪初，从对X射线本性的讨论开始，许多著名物理学家卷入到对X射线的研究。1912年，德国物理学家劳厄(Laue, Max Von 1879 ~ 1960)在索末菲的研究生弗里德里奇及伦琴的研究生克尼平的协助下，在一块硫化锌晶片上，获得了X射线的衍射图样。这一著名实验得到了多重的成果，它不仅证实了X射线的波动性，也揭露了晶体的周期性规则结构。它提供了根据结构已知的晶体衍射，测定波长的方法；也提供了根据波长已知的X射线，进行晶体空间结构研究的途径。

劳厄的这项成果，使他获得了 1914 年度的诺贝尔物理学奖。继劳厄之后，英国布喇格父子开展了应用 X 射线衍射，研究晶体结构的系统实验研究。他们在劳厄获奖的次年，也由此获得了诺贝尔物理学奖。小布喇格获奖的当时，年仅 25 岁，成为最年轻的获奖者。使伽柏受到启发的，不仅是布喇格的 X 射线显微镜，更重要的是他们的二次成像重现技术。与一般透镜成像不同，应用 X 射线照射晶体，直接得到的仅是有规则的斑点群，即衍射图样。只有用相干光对衍射图样进行第二次衍射，才可能复现晶格的像。伽柏还同时注意到了布喇格这一方法的不足之处，他们没能记录傅立叶变换的全部信息。由于相位在拍摄过程中被丢失，布喇格的方法只适用于入射线与衍射线间相位改变量已知的特殊物体。为了记录相位，伽柏想到了荷兰物理学家泽尼克(Zemick, Fritz 1888 ~ 1966)在 1934 年发明的相衬显微镜。相衬显微镜原是适应生物学及医学的需要研制成功的。这种显微镜可以把衍射光的相位与直接光相比较，使被观察的不同细胞带上不同的颜色，这样既清晰可见，又无需染色，因而不致把细胞破坏。伽柏从中抓住了最宝贵的一点，这就是利用背景记录相位的方法。如果说伽柏的全息术是在 1947 年复活节观看一场网球赛时突然想到的，那么这种思想从潜在到萌发却经过了长时间蕴酿而成的。泽尼克所采用的“相干背景”使伽柏想到，若用直接而来的相干背景波作为参考波，与来自观察物的衍射波相互干涉，在照相底片上所记录的干涉图样，将不仅包含了信息的振幅(强度)，也将会把相位记录在内。伽柏把这种干涉图样称作“全息图”。在全息图上，两束光的同相位处，光强极大；相反处，光强极小。当拍摄的全息图是正片时，再用参考光照射，透光强处相位将与物波相同；弱处则相反；于是物波的波前即可重现。就这样，伽柏利用了重建波前的方法，为他所研究的电子显微镜提出了二次成像的方案。这个方案的第一步是用电子束照射观察物，使被物衍射的电子束与相干背景，即入射光束中未被衍射部分的电子束发生干涉，在底片上记录相干结果。第二步则是用光学系统再现，并校正电子光学的像差，然后再在底片上得到再现的像。伽柏与他的助手一起，于 1918 年首次获得了全息图及其再现像。这个图象就是 Huyges (惠更斯) Young (杨) 和 Fresnel (菲涅耳) 三位波动光学大师的名字。尽管所拍摄的物受到同轴的限制，存在不可避免的孪生像的干扰，但是这一实验首次实现了全息记录和重建波前，自此开创了全息术。为此，伽柏获得了 1971 年的诺贝尔物理学奖。

受到全息术神奇效果与应用前景的魅力所吸引，许多人蜂拥而至，纷纷投入全息术的研究中。50 年代初，G.L. 罗杰斯等人扩充了波阵面再现的理论，并提出用无线电波全息术检测电离层的设想。1952 年，美国的贝兹 (Baez) 又提出了 X 射线全息术设想。与此同时，艾尔萨姆(H.M.A. El-Sum) 和吉尔巴奇克(P. Kirkpatrick) 又进一步阐明了 X 射线全息术的若干理论问题，他们的论文已成为当时研究伽柏全息术的重要文献。

(2) 从低谷中崛起的全息光学

在 50 年代，伽柏的第一张全息照片及再现图象所掀起的高潮，很快地低落了下去。人们发现，由于不能找到理想的相干光源，研究工作受到同轴全息孪生像的干扰。为了减小这种影响，记录面必须放在样品的远场区；高压汞灯的强度、单色性及相干性又受到了极大的限制。因此全息术的研究工作，在相当长的一段时间内，成效甚微。

60年代，激光的出现使全息术的研究走出了低谷。1961~1962年，正在美国密执安大学任教的利思(Leith)与尤帕尼克斯(Upatnicks)对伽柏的同轴全息术作了改进。他们引入了倾斜参考光束，解决了孪生像问题，并用氦氖激光器成功地拍摄到第一张实用的激光全息图。利思等人的成果发表后，引起了巨大的轰动。他们取得成功并非偶然。伽柏曾经说过“他们的成功不仅是由于有了激光，还要归功于利思从1955年开始的长期的理论准备。”的确，在全息术处于困境时，许多人从低谷中离去，就连发明全息术的伽柏也转向了雷达技术的研究，利思等人却坚持了波前重建理论的研究，并把全息理论与通信理论相结合，用于侧视雷达的研究。这实际上就是电磁理论的二维全息术。他把这项研究中创立的倾斜参考波法成功地移植到了激光全息，使全息术获得重大的进展。为此，利思在1979年获得美国国家科学奖章。

与利思同期坚持全息术研究的，还有前苏联物理学家丹尼休克(Danisjuk)。在全息术陷入低潮时期，他也坚持了波前重现理论的研究。在困境中，法国物理学家李普曼(Lippmann, Gabriel Jonas 1845~1921)的彩色照相术给他启发。李普曼曾在水银面上覆一层乳胶液，从水银面反射的光与原入射光相干，在乳胶层中形成驻波，不仅能把发自拍摄物的光强记录在乳胶中，还能显现拍摄物的颜色。这一发明曾轰动一时，李普曼也因此项发明而获得1908年诺贝尔物理学奖。但因曝光时间太长，所得到的照片又无法翻拍，这种彩色照相术逐渐被人遗忘。虽然李普曼的发明没有什么实用价值，与现代的彩色摄影也没有什么直接联系，丹尼休克却从中挖掘到他所需要的东西，这就是“体积反射再现波前原理”，后人称为丹尼休克原理。这一原理被用到了伽柏的全息术。使物波与参考波从乳胶的两面反射而产生驻波，形成李普曼层。当用白光照射时，这些层即能反射原来的颜色，物体的像也在原来的位置复现出来。丹尼休克的这一成果为激光出现后的白光反射再现全息术打下了基础，为此，他获得了1970年列宁奖金。

从60年代中期开始，激光全息术进入理论与实用两个方向发展的时期。在这一时期，全息术不仅成为近代科学研究、工业生产及经济建设中一种有效的测试手段，它还促进了一门新的光学学科——全息光学的兴起。这一时期，各式各样的全息图，从同轴型到离轴型，从振幅型到相位型，从菲涅耳型到夫琅和费型，从图象型到计算型，从激光再现到白光再现型纷纷研制成功，它们不仅深化了各个方向上的实用进展，而且又扩展了全息干涉测量术、全息光学元件与全息信息存贮三个方面的应用前景。现今，激光全息技术又在全息立体显示、全息变换与全息特征识别等方面有了较大的发展。

(3) X激光全息术的兴起

全息术与显微技术始终休戚相关，X激光全息术的兴起与发展，再一次证明了这一点。

早在全息术问世不久，艾尔萨姆与吉尔巴奇克就曾预言X射线全息术的可能性。这种想法很诱人，因为在现代生物学中，人们需要分析比光学显微镜分辨极限还小得多的大分子结构，如染色质-酶复制复合物、核膜孔结构以及蛋白质复合物结构等。特别是随着遗传学的研究进展，要提供遗传物质DNA(脱氧核糖核酸)和RNA(核糖核酸)的结构与功能的信息，

光学显微镜已力不胜任。电子显微镜虽然具有更高的分辨本领，但是在其成像过程中，切片、脱水、染色与固定等步骤都会使生物制品的结构及环境改变，致使与真实的状态不同。有人曾设想，利用强脉冲激光束先把生物制品的信息，在瞬间“冻结”起来，再对瞬变物体做三维动态分析。可是实现这一设想，起码不仅需要有足够强的短脉冲、高亮度和高相干本领的软 X 射线作为光源，还得具备匹配适当的 X 射线光学部件。到了 70 年代末和 80 年代初，半导体电子工业微刻技术的发展，使人们有可能制造如透镜、反射镜和分光镜这样的 X 射线光学部件。1984 年，X 射线激光实验获得了成功。之后，终于在 1986 年，美国布鲁克海汶国家实验室的哈维尔等人利用 X 射线源得到了老鼠胰腺酶颗粒的伽柏全息图。1987 年，美国利弗莫尔实验室又用软 X 射线激光作为光源，完成了首例直径为 0.008mm 的碳纤维伽柏全息图。X 射线激光全息术所使用的光学部件与普通光学部件有很大的不同。X 射线多层镜起着反射镜与分光镜的作用，它是由高吸收介质与低吸收介质交替地镀到一块光学平面基质上制成的，每个镀层仅有原子尺度，即纳米厚度。当满足共振布拉格条件，即 $2d\mu\sin\theta = k\lambda$ 时，即出现相干极大，其中 d 为层厚， λ 为波长， μ 为折射修正项， k 为正整数。层厚 d 及层对数 N 都需要根据材料精细地选择。实际上，X 射线多层镜是由计算机数值理论模拟设计出来的。X 射线透镜更与普通的透镜不同，它是一种特殊的衍射屏，即菲涅耳波带片。明暗交替圆环的半径为 $r_n^2 = n\lambda f + (n\lambda/2)^2$ ， n 为圆环序数， f 为焦距。根据菲涅耳衍射原理，在波带片的焦点处，光波相干加强。一块空间分辨率尺度达到几十纳米的菲涅耳波带片，即可用于活的生物制品的 X 射线显微术、固态和表面物理研究以及集成电路块的 X 光刻。目前，最小波带宽度为 500Å 的波带片已用于实验性 X 射线显微镜，波带宽度接近 100Å 的菲涅耳波带片正在研制之中。

(五) 光本性的研究

1. 光辐射的量子假设

爱因斯坦在早期曾致力于热辐射的研究。从 1901 年开始，他在德国物理学杂志上发表了数篇关于热力学与统计物理的论文。从这些研究成果中，不仅看出他在统计物理方法运用上的熟练与精湛，更能看出他洞察潜藏在具体事件背后的基本性与普遍性问题上的惊人能力。在 1905 年他发表的重要论文《关于光的产生与转化的一个启发性观点》中，他指出了麦克斯韦电磁理论的主要缺陷在于，这是一个关于“连续空间函数”的理论，它仅对时间平均值的光学观测有效。当把这一“用连续空间函数进行运算的理论用到光的产生与转化现象上时，这个理论会导致与经验相矛盾。”在批评麦克斯韦电磁学理论不足的同时，他还尖锐地揭示了普朗克量子论的不彻底性。他认为，该理论在考虑了黑体空腔器壁上的谐振子量子化的同时，却把腔内辐射场当作连续分布的麦克斯韦电磁场。他指出，即使普朗克量子论在黑体辐射上取得了成功，却不能对光电效应做出解释。从这两种理论的缺陷中，爱因斯坦找到了出路，这就是摒弃麦克斯韦的连续场，大胆地提出光量子的假设，“在我看来，如果假定光的能量不是连续分布在空间，那么，我们就可以更好地解释黑体辐射、光致发射、紫外线的产生、阴极射线及其它涉及光的发射与转换现象的各种观测结果。”他更进一步指出，能量“是由一个数目有限的局限于空间的能量子组成，它们在运动中并不瓦解，并只能整个地吸收或发射”，这就是爱因斯坦的光量子。1926 年，美国化学家路易斯(Lewis, Gilbert Newton 1875 ~ 1946)又将光量子定名为光子。爱因斯坦在他的同一篇论文中，又采用了维恩的辐射定律，从计算得出黑体辐射熵差公式与理想气体熵差两公式的相似性，由此得出光是由大小为 $R \nu/N$ 的能量子组成的结论。接着，他利用光量子的假设，对斯托克斯光致发射定则、光电效应和紫外线对气体电离作用结果，做出了圆满的解释，所导出的著名的光电效应方程又为实验验证提供了准确的途径。爱因斯坦的这篇著名论文，成为了辐射量子研究的开端。爱因斯坦的光量子假设在物理界得到了热烈的反响。光能量量子化的思想特别得到了发现电荷量子化的美国物理学家密立根(Millikan, Robert Andrews 1868 ~ 1953)的共鸣。密立根首先对爱因斯坦光电效应方程给出了实验验证。1914 ~ 1916 年，在所发表的三篇论文中，密立根叙述了他多年来进行的精心实验结果。它们不仅证实了爱因斯坦光量子的预言，还测出了普朗克常量，所得结果与普朗克本人用其它方法得到的数值极为相近。1915 年，杜安(W. Duane)与他的同事，又从另一角度给出了爱因斯坦光电效应方程的证明。他们利用能量已知的电子轰击金属靶，得到了 X 射线辐射，其频率可由公式 $1/2mv^2 = h\nu$ 精确地给出。这是爱因斯坦方程的一种逆形式。后来，韦伯斯特(D. L. Webster)实验确定了上述频率的 X 射线标识谱的激发电位，给出了吸收限频率的 ν 值。正是由于对爱因斯坦方程逆形式的研究，使玻尔发现，电子的碰撞并不是把任意大小的能量传递给原子，而只能传递原子两态间的能量之差。这项研究导致了谱线吸收与发射的理论研究进展。1921 年，德布罗意与艾利斯(C. D. Ellis)分别精确地测定了从不同能级上发射的电子的速度，在高频范围内，出色地给出了

爱因斯坦方程更为直接的证明。1916年，爱因斯坦又在题为《关于辐射的量子理论》一文中，提出了光子的动量概念。他认为“几乎所有的热辐射理论都有赖于辐射与分子间相互作用的考察”，在这种相互作用中，“尽管辐射给予的冲量很小”，“可是对于理论研究来说，却应该把那个小的作用和辐射所引起的明显的能量转移完全等同地看待。”他还指出“因为能量与冲量总是紧密联系在一起，因此，只有证明了根据这个理论所得到的辐射传递给物体的冲量所引起的运动，正好是热学理论所要求的那样，这个理论才可以认为是完备的。”

尽管爱因斯坦的光量子假设在对光的发射与吸收、光电效应、固体的比热与温度的关系、紫外线对气体的电离作用等一系列光参与的动量与能量交换与传递的现象给出了圆满的解释，但是，光量子概念直到1923年，康普顿效应被发现后，才被物理界普遍接受与运用。

1912年劳厄在弗里德里奇及尼克平的协助下所完成的X射线晶体衍射实验，证实了X射线是一种波长很短的电磁波。根据麦克斯韦电磁理论，应能较好地解释这种波与带电粒子相互作用的情况，然而事实上却产生了困难。首先，根据电磁波理论，波的交变电场应能引起散射体电子做受迫振荡，振荡频率应当与入射线的频率相同，所以散射的频率也应与入射线的频率一致；其次，散射强度的分布应当相对电子的运动直线对称，且与辐射方向与电子运动方向夹角的正弦成正比。实验中却发现了不同的情况，从1912~1920年间，人们陆续地发现，对于波长很短的X射线或 γ 射线，沿入射方向向前的辐射强度大于向后的辐射强度，而且散射光的频率与入射线的频率不同，波长的改变量与入射线波长无关，只由散射角决定。1922年，康普顿把来自钨靶的单色化的X射线投射到石墨上，借助布喇格晶体光谱仪精确地测量了不同方向上的散射X射线的强度与波长。发现，散射光中既包含有原入射线波长的成分，又包含有比原入射线波长大的成分，这一现象称为康普顿效应。

康普顿效应无法用经典电磁理论解释。1923年，康普顿利用光量子假设对实验做出了成功的分析。他认为所谓X射线散射，实际上是光子与静止电子的弹性碰撞，散射效应中出现波长增大的波，是由于散射波的能量比入射辐射的能量小，所损失的能量是在碰撞中光子把一部分能量传递给电子所致。康普顿根据粒子碰撞的动量与能量守恒关系，导出了波长改变量与散射角的关系，这一结果恰好与实验观察一致。

康普顿效应证实了X射线的量子性，为爱因斯坦的光子假设的正确性提供了一个确凿的证据，它证明了光子不仅具有能量还具有动量，光子也与电子和其它微观粒子一样，遵守着能量与动量的守恒。除此以外，康普顿在得到散射公式时，还大胆地采用了当时并未被普遍接受的相对论理论。他认为，由于相撞粒子的速度很大，对它们的能量与冲量需用相对论公式。这一解释的成功，也是狭义相对论的最早也最出色的应用。因此，康普顿效应在近代物理学的发展中占有重要作用。康普顿为此获得1927年诺贝尔物理奖，当时他年仅35岁。

2. 波粒二象性与德布罗意的位相和谐定律

1909年，爱因斯坦在《论辐射问题的现状》一文中，利用普朗克辐

射公式讨论了热平衡系统的能量涨落。所得到的公式是

$$\langle \Delta E^2 \rangle = [h\nu\rho(\nu) + \frac{c^3}{8\pi\nu^2}\rho^2(\nu)]Vd\nu$$

式中 E^2 为频率为 ν 的辐射能量， $\rho(\nu)$ 为频谱函数。爱因斯坦发现，当采用维恩观点，即把辐射当作由微粒组成的理想气体时，代入维恩的频谱函数，由公式得出的能量涨落将只有上式中的第一项；而当采用相反的观点，即认为辐射场能量在各个经典自由度上均分，而使用瑞利-金斯公式时，则只得到上式中的后一项。这表明，公式中的两项分别反映了各自独立的两种涨落机制。爱因斯坦意识到，用单一的观点或理论，不能完整地说明光的行为。在对两种理论的权衡对比中，爱因斯坦萌发了二象性这一重要思想。爱因斯坦认为，光的波粒二象性，不仅对于辐射理论，对整个物理学的研究也具有重要意义，它的作用是带有普遍性与根本性的。在 1909 年 9 月德国自然科学大会第 81 次会议上，爱因斯坦以《论我们关于辐射的本质与组成的观点》为题作了演讲。他指出“理论物理发展的下一阶段将给我们带来一种可以认为是波动论和发射论相结合的理论……我们对光的本性和结构的观点的深刻改革已是不可避免的。”

正如爱因斯坦所预见，波粒二象性概念给物理学带来的影响是极其深远的。1924 年 7 月，印度物理学家玻色(Bose, Satyendranath 1894 ~ 1974) 将题为《普朗克准则和光量子假设》的一篇论文寄给爱因斯坦征求意见。爱因斯坦将它译成德文，并加注给予了高度的评价，将其推荐发表在德文物理学期刊上。玻色的这篇论文采用了计入光子系统所有可能的各种微观状态和统计方法，导出了黑体辐射公式，证明了普朗克公式可以由爱因斯坦的量子气模型导出。同一年，爱因斯坦把玻色的统计方法加以推广到静止质量不为零、粒子数不变的系统上，提出了一种用于亚原子粒子的量子统计方法，这就是量子统计中著名的玻色-爱因斯坦统计。以后，狄喇克又把服从玻色-爱因斯坦统计的粒子，称为玻色子。爱因斯坦与玻色的这一出色工作，对后来的费密统计的建立起了很大的推动作用。在对光量子二象性的研究同时，类似的研究也在同期地进行着，这就是对实物粒子的二象性研究。1913 年，玻尔提出了原子结构的量子理论，该理论给出了电子沿定态轨道的运动能量及辐射的频率公式。对于这一成功，法国物理学家布里渊(Brillouin, Marcel Louis 1854 ~ 1948) 却有着另一番解释。从 1919 ~ 1922 年间，布里渊发表了一系列论文，对玻尔量子化条件提出了理论解释。他认为，电子沿不连续的定态轨道运动，以及原子体系以不连续方式辐射能量，都反映了一种周期性。这种周期性应当可以从经典力学出发，用相干驻波的途径加以解释。他假定，形成波的介质是以太，在原子核的四周有一个以太层，电子在其中运动，使以太受到扰动而形成以太波，这些波相互干涉。若电子的运动稳定，相干结果，以环状驻波形式固定下来。玻尔用来标记定态的整数，正是这种排列在圆轨道上的波的数目。就这样，布里渊给神秘莫测的玻尔正整数定态标记一种物理图象。然而，当把这一图象进一步推广时，却遇到了难以克服的困难，因而在这一思想的基础上，并没有建立起一个完整的理论来。尽管如此，布里渊的思想却起到了不可忽视的作用。布里渊曾把自己关于原子的核模型的工作结果寄给了法国物理学家德布罗意(De Broglie, Louis Victor Pierre Raymond, Prince 1892 ~ 1960)。与布里渊一样，德布罗意也对玻尔模型中一系列整数标记的引入产

生了兴趣。比布里渊更进一步，他更透彻地想到了其中必有更普遍与更本质的东西。他认为，“为了标志定态而诉诸整数的作法，似乎指明了研究的方向，整数，似乎只有在必须诉诸波动的那些物理学分支，如弹性学、声学 and 光学中出现。”最初，德布罗意认真地研究了布里渊的工作，布里渊假定电子在以太层中运动引起了以太层的波动，这实质上是一种介质波。德布罗意认为，出现困难的症结即在于引进了介质波。以后的进展表明，德布罗意不仅摒弃了以太概念，还把本属于电子的周期运动还给了电子自身，并始终如一地坚持了他的波动性与粒子性相结合的思想。

德布罗意的波动性与粒子性相结合的信念，从一开始，就在他 1924 年的博士论文之中表现了出来。这篇论文以《量子论研究》为题，提出了位相和谐定律与缔合波的思想，这是论文的核心与出发点。位相和谐定律表明，“对任意的伽利略观察者，粒子的固有时钟位相等于它的缔合波位相”。从这一原理出发，德布罗意得到了两个著名的公式， $E=h\nu$ ， $p=h\frac{v}{\lambda}$ ， λ 与 ν 分别表示波长与频率， E 与 p 分别表示能量与动量。这一结果揭示，一切具有动量与能量的物质客体，如电子等，也同时具有波动性。在光的波粒二象性尚未被完全地普遍接受时，在一部分著名物理学家仍为其感到困扰时，年轻的德布罗意却由此得到启发，大胆地把它推广到物质客体上，这不能不称为是一个伟大的思想。1972 年，法国科学院庆祝了德布罗意 80 岁诞辰。在这一庆祝会上，德布罗意在致答词中，引用了著名哲学家柏格森(Bergson, Henri 1859 ~ 1941) 1927 年获诺贝尔奖演讲中的一句话：“一个人在其一生中只能有一个伟大思想”，他说，“如果我确实有过这么一个思想的话，它无疑就是我在 1924 年写的博士论文第一章所表述出来的位相和谐定律。”据德布罗意的学生罗切克(Georges Lochak) 回忆，德布罗意并不认为波粒二象性是他的最大贡献，相反，他对玻尔常提到的波粒二象性还颇为反感。玻尔的波粒二象性与德布罗意的位相和谐思想不同，玻尔相信存在两面性的实在，然而这两面性是分别独立出现的，即在某种情况下表现出粒子性，在另一种情况下表现出波动性。而德布罗意却坚信，始终是一种东西，同时既是波又是粒子，这就是波与粒子的缔合，这种缔合反映在波频与粒子内部周期运动频率的合谐，描述波的线性方程的位相必须与描述粒子的非线性方程的位相相协调，粒子局域于物质波之中。

德布罗意的这一伟大思想对物理学的发展产生了深远的影响。1926 年，薛定谔(1887 ~ 1961)在发表他的波动力学论文时，曾明确表示：“这些考虑的灵感，主要归因于德布罗意先生独创性的论文。”电子的波动性很快地被证实，1927 年，美国的戴维孙(Davisson, Clinton Joseph 1881 ~ 1958)、革末(Germer, Lester Helbert 1896 ~ 1971)及英国物理学家汤姆孙(Thomson, Sir George Paget 1892 ~ 1975)分别实验证实了电子的波动性。德布罗意的理论被普遍接受，从而使他获得了 1929 年诺贝尔物理学奖。

3. 对光本性的再认识——从泰勒实验到独立光束实验

1909 年，G. I 泰勒曾做了一个很奇特的实验。他先在强光下拍摄了一根细针的衍射像，然后，设法把光束衰减，相应地延长曝光的时间，最长的一次达 3 个月之久。当他把光束弱到至多一次使一个光子进入仪器

时，结果发现，所得到的衍射像与强光短时间条件下得到的完全相同。泰勒实验向人们显示，所谓干涉与衍射并不是像人们通常想的那样，是多个光子同时存在并相互作用下产生的，单个光子也会发生干涉。

泰勒实现的“单光子干涉”现象，使人们大惑不解。设想光束打在双缝上实现双光干涉时，一个光子怎么能“部分地”在一缝，同时又“部分地”在另一缝，然后自己与自己发生干涉呢？对这种一个入射光子同时穿过两缝的问题，狄喇克做出了正面回答。他根据量子理论断言：“每一个光子都部分地进入两束中的每一束，这样，每一个光子只同它自己发生干涉，决不是发生在不同的两个光子之间的干涉……只有光子部分地在一束，部分地在另一束时，才能两束光叠加起来发生干涉。”1970年，狄喇克在“科学普及知识”节目和“粒子物理的过去十年”讨论会联合举办的报告会上，还谈起过这一现象。他认为，对于单个光子的干涉现象，完全可以用几率幅的概念做出回答。

几率幅是从量子力学的自身统计特征发展起来的一个概念。在海森伯的量子理论中，表述的基本量是矩阵元，它们通常为复数，不能被观察到。但是矩阵元模数的平方则对应一个实数，这个实数决定着微观粒子发射或吸收过程的几率；同样，在薛定谔的波动方程中，波函数也是一个相关变量的复数，它也不能被观察到。然而其模数的平方对应电子在某一位置或具有某一动量的几率。由此，人们看到，在量子理论中，几率总是作为一种量模数的平方出现的，人们称这种量为几率幅。狄喇克曾认为：“这个几率幅概念，或许是量子论中最基本的概念。”“海森伯和薛定谔的真正天才是发现了几率幅的存在，它很好地隐藏在自然界之中。正是由于它隐藏之深，以前的人们才不能更早地发现量子力学。”几率幅是复数，只有取其模的平方，才能对应微观世界某一事件的几率。狄喇克认为，这同样适用于光现象，他同样在上文中说道：“设想当一束粒子流向两孔屏射去，当只允许穿过孔的粒子落向另外一块屏上时，每一个粒子穿过每个孔都有一个几率幅，把所有几率幅加起来，就得到一个粒子打在第二块屏某个位置的总几率幅，图面上的干涉图样正是这些几率幅累加起来的结果。”泰勒实验和狄喇克的解释，再一次向人们提出了一个老问题，这就是如何认识光和电子等微观客体的本性。当用量子理论描述这些客体时，什么是最根本的概念，是波粒二象性，还是几率幅？这确实是长久以来，一直纠缠不清的问题。

60年代，激光出现后，使这种认识发生意想不到的变化。这一变化始于曼德尔(L.Mandel)等人所做的独立光束干涉实验。他们用两支脉冲式红宝石激光器作为二独立光源。为保证条纹的可见度，他们采用了光电符合技术，以消除由于环境等影响出现的频率漂移造成的干扰信号，最后获得了条纹可见度为15%的干涉图象。几年之后，经过改进，他们又得到了高度减弱的两支独立激光之间的干涉。在后一个实验中，经过高度减弱的两束激光，每一束中一次仅有一个光子通过。当一束光中仅存在一个光子时，另一束光中光子存在的几率只有万分之一。这次实验首次实现了独立光源的“单光子干涉”。1971年，拉德罗夫特(W.Radloff)又用另外的方法完成了类似的实验。在这个实验中，他们以设计极为精巧的自动控制快门的曝光技术，得到了“单光子干涉”的清晰图象。

独立光束的“单个光子干涉”发生的是双光干涉，这一实验使人们惊

异地看到，当一只激光器发出的光束中，仅有一个光子奔向控制器时，另一只激光器还未发出光子，就已经发生了干涉。然而，当把另一只激光器关掉时，这种干涉就消失了。似乎光子能“预见”与它干涉的光子即将到来，就先发生了作用，或者似乎光子能与“虚无”发生作用。这种现象确实使人不解。两束激光的独立干涉实验所带来的影响是深远的。激光打开了人们的眼界，从中看到了用普通光所看不到的现象。独立光束干涉实验突破了从杨氏干涉实验以来，干涉光必须来自同一光源的限制。这一实验的成功还说明，狄喇克所说的“决不会发生两个光子之间的干涉”不仅是错的，还使人们进一步看到，在处理光的干涉问题时，光子概念似乎是不必要的，甚至是多余的。因为这必然招致光子与“虚无”干涉的荒谬结果。面对这种情况，使人们想到，当把光的微观客体视为光子时，并不意味着它类似于某种微粒，是否几率幅更为恰当？因为，如果放弃了光子是某种微粒而采用几率幅对干涉进行描述时，不仅避免了诸如光子在穿过一个缝的同时，又在穿过另一缝的局面，也能免去光子能与另一个光子的虚无空位发生干涉的问题，并能使干涉的图象更为清晰。

4. 光子成串和反成串效应

一般认为，发自普通光源不同原子的光子，彼此间在位相上无确定的关系，普通光是量子力学的混沌态。因此，在激光出现以前，人们不可能见到独立光束间的干涉现象。如果说，曼德尔的实验使人们放弃了光是由光子组成的微粒流，放弃了光子干涉描述的话，那么，1956年，在激光问世前，布朗（Brown, R. Han-bury）与退斯（Twiss, R. Q.）所完成的光子成串实验却已经为人们重新认识光子开创了新局面。他们把发自汞灯放电管的光，用半透、半反分光器分为两束，两束相干光分别被两个光电探测器所接收，然后送到一个延时符合电路上计数，测量出一定的时间间隔内，不同延时下所积累的符合计数。本来，无论透射光还是反射光都来自光源中的各个不同的原子，加以延迟后，光子的符合计数本不应再反映两束光的正关联。然而实验结果却出人意料地表现出明显的正关联效应。有人曾对这个实验结果表示怀疑，认为它是违反量子力学原理的。但是玻塞尔（E. M. Pur-cell）却指出，光子计数的正关联效应，正是热光源光子满足玻色统计的结果。由于这种统计性质，光子不仅不呈现独立事件的随机分布，相反地，它们倒倾向于相互连续地成串出现。他把它称为“光子成串效应”（Photon bunching）。光子成串效应的结果，使它们到达的时间得以接续。后来，还有人证明，利用经典电磁场的涨落机制，也可以引起相干光束强度的正关联。布朗-退斯实验中的光子计数率，正是这种强度涨落平均效应的体现。

光子成串效应实验还为人们开辟了一种新的检测手段，这就是利用强度关联光子计数的检测，研究光的高阶相干性质。研究发现，对于一般热光源，光子服从玻色统计。布朗-退斯的实验结果，恰满足量子电动力学的分析结果。运行于高于阈值的激光，处在平均光子数很高的相干态，即一种相位完全确定而粒子数完全不确定的状态，激光的二阶相干度对应零关联；而对粒子数完全确定的状态，则表现为一种负关联，这恰与经典理论的结果相反。它表明，激光强度涨落是一种零关联，光子计数完全是随机

排列；而热光相干强度是一种正关联，光子到达的序列比随机情况接续得更为密切；对于具有确定光子数的状态，强度涨落的负关联则意味着光子到达序列比随机情况隔开得更远一些。这些区别，只有根据量子电动力学的理论分析才能得到解释。这一理论认为，激光与热光中光子在统计性质上的差异，可以通过强度关联的光子计数检测出来。然而若按经典理论，无论发自激光，还是发自热光源的光束，只要经过完全相同的聚焦、衰减、过滤、起偏等操作，所得到的光束在强度、频率、偏振等方面，可以做到毫无差异，然而光子成串效应恰恰否定了这一点。光子成串效应所表现出来的高阶相干性质为人类进一步深入认识光的本性，为开辟量子光学的新领域开辟了一条有效的途径。

1977年，曼德尔等人在共振荧光实验中，又观测到了光子反成串效应。他们使用钠原子束，在横向，用可调谐染料激光激发，然后在与原子束和激光束都垂直的方向上，收集钠原子发出的共振荧光。利用布朗-退斯的测量装置，记录不同延迟时间的光子符合计数率。他们把钠原子束流减弱到使原子逐个地通过视场，而每个原子跃迁时，只能辐射一个光子，从而满足了单光子条件。实验的结果表明，在延迟时间极小时，光子符合计数率明显地高于 $\neq 0$ 的情况。这一结果被认定为光子反成串效应的初步证据。

激光问世以来，以独立光束实验，光子的成串与反成串实验为代表的一系列研究结果表明，对光的量子化描述极为必要。而在量子理论中，几率幅这一概念又具有头等重要的意义，人们正试图应用它来解释这些新的实验成果，并通过量子电动力学理论，扩展并深化对光过程及光本性的研究。保尔(H. Paul)曾明确指出，“像干涉这一概念，应从传统光学中的干涉条纹或拍频信号的狭小范围中扩展出来，正如通过布朗-退斯实验所看到的，应当把它推广到任何由于不同的几率幅叠加而产生的效应，在这一推广中，人们势必能更深入地认识光的本性。”

三、极其活跃的物理学前沿领域——凝聚态物理学

凝聚态物理学是当今物理学最大也是最重要的分支学科之一。据 70 年代中期的调查统计，凝聚态物理学年发表论文数居首位，占物理学论文总数的三分之一；从事凝聚态物理研究的人数也居首位，占总人数的四分之一；而从 60 年代末到 80 年代末，获诺贝尔物理奖的人数中，从事凝聚态研究的人数，超过了研究粒子物理的人数，接近总人数的一半，也居首位。凝聚态物理学得以迅猛发展，首先表现在其研究对象的开拓上。在由原来传统的三维周期性结构，向着低维甚至非周期结构的发展中，所涉及到的理论也逐渐地趋于深化与成熟，从 30 年代的晶体结构分析的唯一理论与固体的比热理论、金属自由电子论和铁磁性理论，发展到 30 年代后的能态理论、电子衍射和 X 射线衍射的动力学理论，以及点阵动力理论。60 年代以后，在凝聚态物理学中，对称性破缺理论又占据了中心地位。以它为基础，建立了能态、元激发、缺陷及临界区域四个层次。与之相应，各种有序态的序参量、广义刚度、标度不变性、自相似结构等一系列新的概念随之诞生。此外，大量非线性课题相继出现，使凝聚态物理不仅在深度及广度上冲破了传统固体物理学，而且向着更深层次与更大的范围蓬勃发展。

90 年代所兴起的纳米物理学，又成为凝聚态物理的一个新的世界性研究热点。纳米粒子与一般尺度物体相比，在力、热、电磁和光等方面具有显著不同的特性，它们不仅成为未来新材料研究的基础，而且也为人类在认识客观世界上展开了一个新的层次，与此相应兴起了介观物理学的研究。

当今凝聚态物理学已成为物理学最活跃的前沿领域，它不仅突破了传统固体物理学，使研究对象日益多样化和复杂化，又由于许多有价值的发现出现在相互交叉的学科领域，它又对促进交叉学科的发展，显现出强大的活力。它的实验手段、理论概念与技术不断地向着化学物理、生物、地球物理、天文、地质等领域渗透，从 DNA 晶体结构到地球板块驱动力的研究，从量子电子器件的机理到新材料的研制，无一不与凝聚态物理学有关。凝聚态物理在物理学乃至整个自然科学中，正在显示出日益强大的影响力。

(一) 高临界温度超导研究

1. 高温氧化超导材料的发现与超导机制的研究

迄今为止，已有 5 位物理学家由于超导电性的研究而获得诺贝尔奖。他们是：1957 年提出 BCS 超导微观理论的美国物理学家巴丁(J.Bardeen)、库珀(L.N.Cooper)、施里弗(J.R.Schri-f-fer)，于 1972 年获奖，从理论的提出到获奖时隔 15 年；1960 年发现单电子超导隧穿效应的美国物理学家贾埃佛(J.Giaever)；1962 年预言约瑟夫森效应的英国物理学家约瑟夫森(B.D.Josephsen)，他们时隔 11 年后，于 1973 年获奖；1986 年，在国际商用机器公司(IBM)苏黎士研究室工作的瑞士物理学家缪勒(K.A.Muller)和他的学生、德国物理学家柏诺兹(J.G.Bednorz)发现 Ba-La-Cu-O 系统物质的高温超导性，于 1987 年获奖。他们的这一工作，如此快速地得到了诺贝尔评奖者的承认，这在诺贝尔颁奖历史中是极为罕见的，由此看出柏诺兹和缪勒工作的重要意义。

伴随着超导临界温度提高到液氮温区以上，超导技术的应用发生了一场新的技术革命。超导技术的影响，很快地波及到了电力工程、电能输送、电动机与发电机的制造、磁流体发电、超导磁悬浮列车、超导计算机、超导电子器件、地球物理勘探、地质学、生物磁学、高能加速器与高能物理研究等多种领域与学科。尽管高温超导体在实用上仅只处于开端，但它的远大前景已经展现出来了。1986 年以来，瑞士、美国、日本、中国等国的科学家们，相继发现了多种高温氧化物超导材料。这些发现，在国际上引起了巨大的反响。目前，超导体的零电阻转变温度已经达到上百 K。但是，这主要是实验物理学家的探索成果，在理论研究方面，仍还没有给出一种圆满的解释。超导理论与超导实验研究的飞速发展极不相适应。从这一角度看，高温氧化物超导材料的发现，无疑也是对超导理论研究的巨大冲击。BCS 理论是第一个成功的微观超导理论。它很好地解释了大多数元素的超导性质。这一理论的出发点是电声子的相互作用。两个电子由于交换虚声子而产生引力，当这一引力超过库仑斥力时，电子双双地结成库珀对。库珀对的行为就像一个松散结合的大分子，它们在空间延伸的范围远大于晶格常数。成千上万个库珀对相互交叠，使电子系统获得某种“整体刚性”，它们能克服个别散射事件造成的阻力，而产生零电阻现象。同时，它们还能抗拒外来磁场的进入，而导致迈斯纳效应。然而，新发现的氧化物超导体都有一个共同的特点，即具有一个铜-氧层，并表现为空穴导电。BCS 理论在 Cu-O 在高温超导体中，效应并不明显，人们不得不对 BCS 理论的适应性提出了怀疑。1987 年，安德森(P.W.Anderson)提出了共价键理论。该理论认为，氧化物超导体的母晶体，可以认为是莫脱(Mott)型绝缘体，其中的电子由于强相互关联作用被定域在各个格点附近。相邻格点的电子自旋相反而构成单重态共价键。通过掺杂后，局域化的共价键系统受到驱动，通过超交换作用，使其退局域化而流动起来。若在流动中还能保持原有的配对关系，则可视为大量定域共价键发生共振而转变的一种超流的库珀对集合，绝缘晶体则转化为超导体。这种由实空间定域配对转变为能量空间的非局域配对机制，称为“共振价键理论”。这一理论是一

种全电子理论，它与晶格振动没有直接联系，它能说明新的超导体的弱同位素效应。但是，由于用它说明具体问题，还需引入一些辅助性假设，目前还未得到公认。

还有一种称为双极子机制的理论。该理论认为，氧化物超导体中含有正负离子交换复式晶格。由于极化电场的存在，导致强电声子相互作用。当电子在晶格间运动时，造成附近晶格畸变。电子与“畸变”一起运动，可以构成复合粒子，称为极化子。当两个极化子相互靠近时，联合畸变将形成双极化子。无数个双极化子在空间的流动，即形成超导态。双极化子理论并未超出 BCS 理论的框架，与库珀对比较，双极化子理论则更接近实际情况。

考虑到新超导材料的空穴导电机理，另一种激子理论认为，氧化物超导体可视为在氧化铜层两侧各有一金属层，而形成夹层结构。当金属层中的电子靠近氧化铜层时，电子的波函数部分有可能隧穿入氧化层，使其中的负电荷被排斥而显示一个带正电的空穴。电子与空穴的库仑吸引，形成电子-空穴束缚对，称为激子。同时带正电的空穴还能把另一侧金属层中的一个电子拉过来，于是两金属层中的电子，通过氧化层的空穴两两配对，构成库珀对而实现超导态。激子机制理论可以阐明氧化物超导体的空穴导电、各向异性输运等特点。问题在于是否能把这种结构视为金属层与氧化物层的交叠，该理论还有待进一步完善。

2. 重费密子体系及其超导电性研究

电子比热系数 $> 400 \text{ mJ/mol} \cdot \text{K}^2$ 的物质，常被称为重费密子系统。它比一般材料的值高出 1~2 个数量级。因为值与费密能级的态密度成正比，而后者又与电子的有效质量成正比，值越大意味着电子的有效质量越高，故称为重费密子系统。1975 年，安德鲁斯 (K. Andres) 等人发现，化合物 CeAl_3 低温下的电子比热反常现象，电子比热系统值达到 $1620 \text{ mJ/mol} \cdot \text{K}^2$ 。1979 年，德国达姆斯塔特的斯泰格利士 (F. Steglich) 研究小组发现了重费密子系统 CeCu_2Si_2 的超导电性，其值为 $1100 \text{ mJ/mol} \cdot \text{K}^2$ ，电子有效质量约为 $100m_e$ 。1983 年，第二个重费密子超导体 UBe_{13} 被发现， $T_c \sim 0.9 \text{ K}$ ，化合物中铀原子间距 5.13 \AA 。1984 年，美国洛斯阿拉莫斯的特瓦特 (Tewart, C.R.) 小组又发现了第三个重费密子超导体 Upt_3 ， $T_c \sim 0.5 \text{ K}$ 。以后又陆续发现了重费密子超导体 NpBe_{13} 、 U_2Zn_{17} 、 Ucd_{11} 以及 CeCu_6 等。这一连串的发现表明，高温氧化超导体发现之前，重费密子超导电性曾一度成为热门课题。然而在 1986 年以后，重费密子超导电性的研究一度被高温新超导材料的浪潮所淹没。近年来，这一领域又陆续出现了一些十分引人注目的新现象。

近年来的实验研究发现，在低温条件下，重费密子材料与通常的导电金属有着截然不同的性质。首先，在室温以下，一般金属的电阻率随温度下降得很快；重费密子系统的电阻率却随温度下降而迅速上升，到 50K 处，有一极大值后，才随温度下降。其次，重费密子材料的比热性质也与一般金属不同。在通常金属中，比热可以用 $C_p = T + T^2$ 描述。在低于 10K 的低温区，由于只考虑电子的热贡献，只计 T 即可。此时 C_p/T 与 T 的关系

曲线具有正斜率，即 C_p 随温度下降而降低；然而重费密子系统却相反，在低于 10K 的低温区内， C_p/T 随温度 T 的下降而明显上升，也不再为常数，它强烈地依赖于温度，这种 C_p/T 随温度下降而上升的性质称为比热反常。比热反常表明，在趋于绝对零度时，重费密子体系的 ρ 值很大。这说明，此时的电子密度在费密面附近很大，也即处于这些状态的电子具有非常大的有效质量；更有趣的是，这些材料在低温条件下的磁化率 χ_m 也像 ρ 值一样高于正常的金属。因此有理由相信，这两个值的增值效应可能同出于一个源。

重费密子系统磁化率 χ_m 很大，这一点使人们想到，它们可能是由强重正化准粒子组成的费密液体。1956 年，前苏联物理学家朗道 (Landau, Lev Davidovich 1908 ~ 1968) 曾提出了有关费密液体的理论。近年来，对于重费密子系统电子质量异常增大、它们的电子比热与 BCS 理论不符以及它们有无新的超导机制等疑问引起了物理工作者广泛的兴趣。尽管重费密子体系的 T_c 不高，大约只有 1K，在当前高温超导研究中，并无实用价值，但是人们发现，它们的 T_c 对杂质十分敏感，它们的超导性与磁性也有密切的关系，这些方面，均与传统的超导材料有明显的差异。研究它们的机制，将使人们对超导电性的认识更深化一步。目前，各种模型与理论陆续提出，有人认为，重费密子的超导电性根源来自 3p 态原子的配对；有人则认为由于自旋相关造成强烈各向异性的 1s 态配对，总之各种探索性的理论仍在发展中。

(二) 微结构物理的兴起

1. 纳米物理学的诞生

纳米结构指尺度为纳米数量级的超细微粒，它们属于原子与一般物质的中间领域的物质。由于它们的尺度与电子的德布罗意波长数量级相差不多，因而具有许多异常的特性。对纳米微粒及纳米固体的研究，开辟了人类认识世界的新层次。早在 1959 年，美国著名物理学家费因曼 (Feynman, Richard Phillips 1918 ~) 在加州理工学院对美国物理学会的一次演讲时，曾卓有见地地预言：“如果有一天能按人的意志安排一个个原子和分子，将会有有什么奇迹？……我毫不怀疑，当在很小的尺度上控制物体的结构时，我们就能使物体具有极端丰富多彩的性质。”

研究远古陨石结构发现，它们是由原子构成的纳米团簇 (cluster) 在引力下凝集而成。有人估计，这种纳米结构材料始于宇宙大爆炸。从海贝壳到人体等生物系统中，也能找到许多天然的纳米结构，但是，人类有控制地制造纳米结构却非易事。60 年代，东京大学的久保亮五 (R. Kubo) 曾发表一篇关于量子约束理论的论文。这篇论文中谈到了超细微粒粒子的独特性质，但在当时并未引起人们的注意。在 70 年代，麻省理工学院的德雷克斯勒提出一个用模拟细胞生物分子的分子装置，制造超细微粒的设想，并把它命名为纳米技术。此后，他与斯坦福大学联合成立了纳米技术 (NST) 研究组。

真正对纳米物理展开系统研究始于 90 年代初。1982 年，本尼格 (G. Binnig) 和罗若尔 (H. Rohrer) 发明了扫描隧道显微镜 (STM)，它以高分辨率向人们展现了一个可见的原子、分子世界。到了 80 年代末，扫描隧道显微镜已经由一个助视仪器发展为费因曼所设想的排布原子的工具。90 年代初，纳米物理学已经作为独立的学科研究领域正式诞生。1990 年 7 月，在美国巴尔的摩召开了第一届国际 NST 会议。此时，两种专业国际刊物《Nonotechnology》与《Nonobiology》已经或即将出版；日本与英国等少数科技先进国家制定了发展纳米技术的国家科学规划；美国自然科学基金会将纳米技术作为优先发展项目；冠以纳米 (Nano) 的新名词和新概念，如纳米电子学、纳米材料、纳米加工和纳米生物学等，正式在各种科技书籍与文献中出现。这一切都表明，纳米物理学已经作为一门正式的独立学科领域，步入了物理学的殿堂，它的诞生与发展，不仅对物理学，同样对整个自然科学与技术产生着重大的影响。

2. AB 与 AC 效应研究

1959 年，阿哈勒诺夫 (Y. Aharonov) 和玻姆 (D. Bohm) 发表一篇论文，该论文认为，在电子运动的空间中，无论是否存在电磁场，电子波函数的位相都会受到空间中电磁势的影响。由此他们得出结论，在量子理论中，电磁势要比经典电磁理论中的电场与磁场强度更有意义。他们同时建议了几种能证实上述理论的实验途径，图 1 所示就是其中的一种。入射电子束在 A 点被分为两束，磁场 B 处于与图面垂直的螺线管中。两支电子束在观察屏 S 处相遇形成干涉。在电子经过的路径上，磁感应强度为零，但是磁矢势 A 却不为零。正是由于磁矢势的存在，使两束电子产生了附加

位相差，该值恰好为电子路径包围磁通量的 e/h 倍。他们认为，改变 B 值，影响磁通量，将使位相差改变，电子的干涉图样就会受到影响。同样，如果在两束电子的路径上各加一只金属筒，当电子进入筒时，在两筒上加不同的电势，电子出筒后，即将电势撤消，电子束也会因电势的不同产生附加位相差，导致干涉图样变化。发表这一理论的时候，阿哈勒诺夫正在美国南卡罗莱纳大学物理与天文学系及以色列特拉维夫大学物理系任教。阿哈勒诺夫很善于研究那些通常被人们忽视的物理现象。他所预言的一些效应先后被实验证实，由于具有重要意义，都在物理界引起不小的波澜。AB 效应就是其中一个，是他与任教于伦敦大学的玻姆共同提出的。1960 年，AB 效应被钱伯斯 (Chambers) 实验证实。随后，美国、联邦德国、意大利等几个实验小组也陆续进行了类似的实验，都支持了这一预言。尽管如此，由于电子的波长很短，限制磁场的区域很小，螺线管半径不但必须很小，长度还要无限长，这些条件很难得到实验保证，因而有人对实验结果的可靠性表示怀疑。直到 80 年代中期，日本物理学家用超导材料将磁场屏蔽以后，所证实的 AB 效应才被物理界普遍接受。AB 效应的证实对物理学的影响是深远的。本世纪初，相对论与量子论的问世，给人类对物理世界的认识带来了崭新的图象与观念，使物理学发生了天翻地覆的变化。然而，麦克斯韦电磁理论却仍然保持原有风貌，似乎不受其影响。这一点却也不难理解，因为麦克斯韦方程自身的协变性，使其天然地与相对论的要求和谐一致。此外，这一方程又能满足电磁波量子性的要求。然而，深究起来，在经典电磁理论与量子理论之间，也有一点不一致，这就是所谓的 AB 之争。

从表面看来，AB 之争所涉及的似乎只是两个物理量的问题。在经典电磁理论中，描述场的两个基本量是电场强度 \vec{E} 和磁感应强度 \vec{B} ，电标势 ϕ 是在电场 \vec{E} 基础上，利用环路积分引入的，它具有物理意义，虽然数值不唯一，却是可以实验测量的。磁矢势 \vec{A} 却不同，虽然它也是在磁场 \vec{B} 的基础上引入的，却不具有明确的物理意义，数值不唯一，也不能实验观测。因此，在经典电磁理论中，常把 \vec{B} 作为描述磁场的基本量， \vec{A} 纯属于为计算方便而引入的过渡量或辅助量。

在量子电动力学中， \vec{A} 和 \vec{B} 的地位则皆然相反。出现在方程中的电磁量是 \vec{A} 和 \vec{B} ，而不再是 \vec{E} 与 \vec{B} 。与 \vec{B} 相比， \vec{A} 成为第一位的物理量。 \vec{A} 与 \vec{B} 哪一个更为本质的问题，在本世纪 20 年代量子理论创建时即被提出，直到 1959 年才被阿哈勒诺夫及玻姆所解决。

AB 效应表明，描述磁场的矢量 \vec{A} 与磁场 \vec{B} 相比， \vec{A} 是更为本质的。这一点仅能通过量子效应才能显现出来。对固体材料 AB 效应的观察是近年来的事。最初观察的是线度很小的金环。金环的直径 $0.8\ \mu\text{m}$ ，宽 $0.4\ \mu\text{m}$ ，附在硅片上。沿直径接入电极后，通过电流测量金环的电压。整个实验在 0.06K 的超低温下进行。垂直环面加入磁场，电子沿金环的各一半，分两路流出。在汇合处，两路电子波产生干涉，由合振幅的模即可确定磁阻。实验结果发现，金环磁阻随磁场周期性地变化。振荡周期与样品面积的乘积，恰好与 AB 效应所要求的 h/e 值相等，从而证实了固体材料中，电子波的量子干涉 AB 效应。AB 效应的观测，很自然地涉及到纳米物理学的进展。观测到该效应的前提条件是电子波能现出可观测到的相干性。在真空条件

下，电子束的干涉比较容易观察到，然而在固体材料中，电离杂质与晶格的振动都能破坏材料的理想周期性，因而造成电子散射。由于电离杂质的质量比电子大得多，对电子静电作用的结果，离子受影响较小，电子却偏离了原来方向的运动而发生散射。这种散射属于弹性散射，它虽然能使电子波的位相发生变化，却不改变电子波的相干性；然而，晶格振动造成的散射，涉及声子的发射与吸收，属于非弹性散射，将严重地影响电子波的相干性。可见，若能在固体材料中观察到 AB 效应，对材料的纯度要求并不高，但对材料的线度有一定的要求。因为电子必须在受到非弹性散射之前，也即在连续两次非弹性散射发生之间，穿过样品。根据电子的平均自由程时间，可以计算出电子波相干长度 L_c 。一般金属在温度 1K 下，相干长度可达 μm 数量级。在现代科技条件下，制造长度在 μm 以内、线宽在几十个 nm 以内的环状样品已不困难，因而这一领域的研究得以迅速发展。当材料的线度 $L > L_c$ 时，材料内将可能包含 $10^8 \sim 10^{11}$ 个原子，因此，无论观测的对象、观测的手段以及观测的量值（如电流或电压等）都仍属于宏观范畴。然而实验的结果却能反映电子的波动性和体系微观物理的规律，这再一次表明，纳米结构物理学研究的特殊意义。它开辟了用宏观领域的研究方法与概念探讨微观物理规律的新途径。

AB 效应的研究仍在继续发展中。由于电磁场是一种最简单的 U(1) 规范场，人们很自然地会联想到，是否能把 AB 效应推广到其它规范场中。华裔美籍物理学家杨振宁和吴大峻曾在一篇论文中讨论过杨—米尔斯 SU(2) 规范场的 AB 效应问题。而阿哈勒诺夫和卡谢又于 1984 年根据电与磁的对偶性，提出了 AC 效应的预言。

AC 效应的提出与证实，是纳米物理学的又一重要进展。它由阿哈勒诺夫与在特拉维夫大学的同事卡谢 (A. Casher) 共同提出来的，用他们两人姓氏的第一个字母，简称为 AC 效应。阿哈勒诺夫与卡谢认为，如果存在有磁场作用的 AB 效应，根据电与磁的对偶性，一定会存在着一种 AB 效应的对偶效应。在电磁场的张量相对论理论中，电磁场张量 $F_{\mu\nu}$ 应有 16 个分量。由于这一张量的反对称性，四个对角元素为零外，两侧对称量等量反号，所余的独立分量即只有 6 个，这就是 3 个电场分量与 3 个磁场分量。根据张量理论，电场与磁场互为对偶场，当电与磁量按一定规则互换时，对应的物理规律相互对偶。这样，在相应的 AB 效应示意图中，把螺线管替换成一条垂直图面的无限长带正电线，把电子束替换成中子束。中子不带电，却由于其自旋而具有磁矩，令中子束中，每个中子的磁矩与带电线平行。AB 效应中，电子不受磁场力；AC 效应中，中子不受电场力。AB 效应中，由于磁矢势 \vec{A} 的存在，引起电子相移；AC 效应中，将由于电势 ϕ 的存在，引起中子相移发生。阿哈勒诺夫与卡谢还预言，中子相移的大小，与荷电线的带电密度成正比，对于一般的荷电线密度，他们估算结果，相移约为 1.5mrd。1989 年，他们的这一预言被墨尔本大学、密苏里大学和纽约州立大学组成的联合研究组所实验证实。实验中使用的带电导线为 45kV 的细丝高压正电极，而中子束来源于反应堆。由于很难获得磁偶极矩顺向排列的极化中子束，他们把非极化的中子束加了补偿措施，以消除非极化的影响。先使中子束通过一个狭缝，经过单晶硅片分为两束通过带电线的两侧附近，再经第二片单晶硅片折射，改变方向后相交。分别用两台 ^3He 正比计

数器测量。为使中子数累计到理论所要求的 10^7 个，整个实验持续了几个月。最后测得相移为 $2.19 \pm 0.52 \text{mrd}$ ，这个结果证实了 AC 效应的存在。

3. 超微结构的量子效应研究

在大块金属样品中，电子的能级分布是连续的，然而当物质颗粒尺寸极小时，例如电子数目减少到 $10^3 \sim 10^4$ 个时，电子能级则表现为不连续的离散分布。日本物理学家久保亮五于 1962 年提出了能级离散分布的条件式，这是费密能级间距 ΔE_N 与颗粒中所含原子数 N 的关系式，

$$\Delta E_N = \frac{4 E_F}{3 N}, \text{ 其中 } E_F \text{ 为费密能级。}$$

对于大颗粒或一般物体， $\Delta E_N \rightarrow 0$ ；但对于纳米颗粒， ΔE_N 虽然大却有限， ΔE_N 为一个定值，因而能级是分离的。当能级间距大于热能、磁能、静电能、光子能量或者超导态的凝聚能时，相关的物理现象就会表现出量子效应。因此，纳米颗粒的热、电、光、磁以及超导等宏观特性将与大颗粒或一般尺寸的物体，有着显著的不同，这种差异即称为量子尺寸效应。

量子尺寸效应对超微粒的物理性质有重要影响。然而，超微粒子的尺寸大小各异，粒子的集合体可能呈离散态、链状、网络状或聚合状；承载粒子的载体也有千百种；载体与粒子的界面也变化多端，上述各种因素的影响，使粒子的物理性能也多种多样。由于量子尺寸效应，粒子的熔点均比同样块状材料低得多，其热导也具有奇异特性。多孔状超微粒子集合体，在低温或超低温下的热阻几乎为零。此外，大块样品的电子比热与温度呈线性关系，而超微粒子电子比热与温度的关系却是 $C_p \propto T^{n+1}$ ($n=0, 1, 2, \dots$)。由于量子尺寸效应，超微粒子还具有奇偶特性。例如，颗粒的磁化率、比热及催化性质就与所含电子数的奇偶有关。

1988 年，英国与荷兰的两个研究小组又分别发现了另一种独特的超微粒量子效应，称为量子导线电导量子化现象。英国小组应用分裂门技术，在二维电子气上制作了一条量子导线。它的长为 $0.5 \mu\text{m}$ ，比电子的平均自由程小。电子从一端运动到另一端不受任何散射。实验发现，随着门电压的加大，它的电导呈量子化地加大，电导的基本量子为 $2e^2/h$ 。令人惊异的是，这个值恰与整数量子霍尔效应的基本量子相同。所不同的是，量子导线电导量子化发生在一维，而且没有外磁场。超微粒结构的量子化效应还表现在隧道效应上。早在 50 年代末，日本物理学家江崎玲于奈 (Leo Esaki 1925 ~) 和美国物理学家加埃沃 (Giaever, Ivar 1929 ~) 等人就发现，微观粒子具有贯穿势垒的本领，这一效应反映了微观粒子具有波动性的基本属性，并由此，江崎玲于奈发明了隧道二极管，这一发明开创了研究固体中隧道效应的新阶段，并推动了半导体电子学的大发展。到了 80 年代末，人们在研究超微粒物理特性时，对于隧道效应又有了令人惊奇的发现，描述颗粒的一些宏观量，如磁化强度、磁通量等，也显现有隧道效应的特点。例如里德 (M.A.Reed) 在研究 Fe-Ni 薄膜中畴壁的运动速度时发现，在低于临界温度时，畴壁速度大小基本上与温度无关。有人认为，这是由于量子力学零点振动引起的热起伏，使低温情况下，超微粒磁化矢量的重取向保持有限的弛豫时间，因而在零度附近，仍然存在非零的磁化反转率。利用这一观点，还可以解释高磁各向异性单晶体在低温下，具

有阶梯式反转磁化模式，以及一些量子干涉器件中的有关现象。

超微颗粒的新特点还表现在表面活化特性上。纳米微粒的尺寸虽小，在表面及表面附近的原子数与内部原子数的比值却比大块物体大得多。例如，颗粒尺寸从 10nm 降到 1nm 时，线度降低后，表面原子数所占比例将上升为原来的 5 倍。表面原子数比例的加大，极大地增加了颗粒的活性。金属纳米粒子会在空气中燃烧，无机材料的纳米粒子会吸附气体并进行反应。表面活性的增加，不仅使纳米粒子表面原子输运和构型发生变化，也会使表面电子的自旋构型及电子能谱发生变化。此外，这种表面效应还会使纳米微粒具有极强的光吸收能力。总之，超微颗粒及由超微颗粒组成的纳米固体在光学性质、导电性、机械特性、热学特性、磁学性质、超导电性等方面，都具有与一般大块物体不同的特点。这些奇异性质表明，人们所熟知的基础物理学规律，将有可能在宏观与微观的中介地带有突破性的进展。这一进展不仅将成为微电子学领域的理论基础，为电子技术的发展开辟新的纪元，而且还有人估计可能在这一突破之中，出现下一位诺贝尔奖的得主。纳米结构的研究将是一个十分激动人心的领域。

4 . 纳米科学技术进展

纳米的基础物理研究，是介观物量、量子力学与混沌物理的交叉结合。它与现代计算机、微电子学与扫描隧道显微技术相结合，形成了纳米科学技术群。自本世纪 90 年代起，这门全新的科学技术群，广泛地在全世界范围内兴起，它不仅包括了纳生物学、纳电子学、纳机械学、纳地质学、纳天文学……，而且正以惊人的速度，向着一切科学技术领域渗透着。纳米学科的研究，不仅在研究对象的空间尺度上具有特殊性，而且还在对传统概念的革新中，表现出全新的观点与思维方式。纳米电子学的发展就说明了这一点。目前的半导体理论，即 P-N 结原理把电子视为微粒，它的有效范围只到亚微米尺度。作为微电子技术核心——集成电路——朝向超大规模发展的同时，微电子器件的尺寸在日益缩小。迟早会进入到一个新的阶段，到那时，经典电磁理论将不再适用，电子将不能再被视为微粒，在纳米尺度上，电子的表现即以波动性为主，纳电子学必须计入量子力学效应，这些效应表现为量子隧道效应、量子尺寸效应、特殊的伏安特性、特殊的磁性质等。纳电子学的任务就是研究纳米量子微粒的这些全新性质，在此基础上，设计、制作全新的量子电子器件与集成电路。人们预计，新型量子电子器件及全新集成电路的实现，将为第六代或第七代计算机设计、制造成功奠定基础。与此同时，超小尺寸量子电子器件也为物理基础理论的研究提供了微型实验室，使人们能对量子线、量子点、量子环以及量子点接触等超微结构的各种量子效应，如量子尺寸效应、量子隧道效应、量子相干性、量子波动性、电子反常输运及库仑阻塞等现象进行富有成效的研究。

(三) 液晶物理学进展

1. 液晶的早期发现与研究

液晶的发现通常追溯到 1888 年，奥地利植物学家赖尼泽尔 (Reinitzer, F.) 的实验工作。他把胆甾醇苯酸酯加热到 145.5 时，发现晶体融成一片混浊的液体，继续加热到 178.5 时，混浊的液体又变得清澈透明。把液体冷却，液体又从紫、橙到绿各色变化。开始时，他认为这种物质具有两个熔点，并怀疑是由某种不纯因素造成的。在同年，他把这一现象告诉德国卡斯鲁尔大学物理学家勒曼 (Lehmann, O.)。勒曼是晶体光学研究的创始人，并首次把偏光显微镜用于晶体研究。在偏光显微镜下，勒曼发现，这种奇异的液体具有与晶体类似的双折射性质。他首次把这种状态的液体命名为液晶。

液晶的发现本应成为诺贝尔获奖的项目，未能实现的原因之一是确定首先发明人比较困难。勒曼曾被数次提名参加诺贝尔奖候选，由于赖尼泽尔与之争夺液晶发明权而未能成功。事实上，谁先发明液晶确实难以确定。在 1887 年，第一个诺贝尔化学奖的得主，荷兰化学家范托夫 (Van t Hoff, Jacobus Henricus 1852 ~ 1911) 就发现了螺旋状液晶的光活性。他曾把这一发现写信告诉勒曼。这封信已被印在一些有关液晶的书籍上。液晶发现未获诺贝尔奖的第二个原因是，当时的一些知名学者对是否存在液晶表示怀疑。曾因建立热力学第二定律获得 1920 年诺贝尔化学奖的能斯特 (Nernst, Hermann Walter 1864 ~ 1941) 就坚持认为，液晶只不过是液体与晶体的胶体体系。尽管在早期，也就是本世纪 20 年代以前，已经用各种方法合成出 300 多种以上的液晶，不少人为液晶的生存权向权威人士努力抗争，例如弗里德尔 (G. Friedel) 曾在 20 年代以 200 页左右的论文详细地论证了液晶与液体、晶体的区别，并把液晶分为层状相、丝状相和螺旋相三大类，然而在当时，许多物理学与化学工作者的兴奋点转向了繁荣兴起的量子力学，液晶研究已被量子力学成功的浪潮所淹没。

1933 年，法拉第学会召开的研讨会上，液晶首次得到正式承认。在这次会议上，弗里德里克兹 (Fredericksz) 报告了磁场对液晶分子排列的转变效应。从 30 到 60 年代的 30 多年间，关于液晶形成了两大理论体系。一是宏观的连续体理论，该理论利用质心速度和分子平均单位取向矢量——指向矢——描述液晶长棒状分子的运动。1961 年和 1968 年，J. 埃里克森和 F. M. 莱斯利分别建立了向列相和胆甾相的流体动力学非线性方程。该理论表明，向列相和胆甾相具有五个粘滞系数，质心运动与分子转动互有影响。胆甾相的运动与温度有关，它的流体动力学方程已被实验所证实。另一个理论为液晶的微观理论，它的建立经历了一段很长的曲折过程。液晶发现后，曾吸引玻恩、德布罗意、玻色等一些著名物理学家投身到这一领域研究。早期液晶的微观理论，称为分子群落学说，它是由玻色所倡导，后经洛仑兹的学生奥恩斯丁 (Ornstein) 与卡斯特 (Kast) 正式上升为理论。该学说认为，液晶是分子群落的混成体。根据丝状液晶的散射本领比普通液体强得多这一实验事实，该理论认为，普通液体的散射来自单个分子的布朗运动；而液晶的散射则来自分子群落的起伏涨落。他们根据液晶对光的散射强度，推算出散射截面的直径为 $0.1 \mu\text{m}$ ，因而每个分子群落约含有 10^5 个分子。群落间的相互作用很弱，排列杂乱无章，由于折射率不

均匀而造成混浊，然而在外场作用下，极化扭转致使分子群落趋向排列整齐，而使液晶透明。这一理论在物质的分子、原子层次之上，又增添了一个“群落”的新层次。无论证实还是否定它，都将是对物理学的基础性贡献。

2. 德燃纳对液晶基础性研究的贡献

德燃纳 (de Gennes, Pierre Gilles 1932~) 年仅 26 岁时，便被任命为巴黎大学固体物理学教授，在该校讲授金属与合金的超导理论。在这一时期，正处于液晶显示技术发明所掀起的世界性液晶研究高潮之中，此时，德燃纳受命在巴黎大学组建液晶研究小组。很快地，这一研究组在液晶光电效应的研究方面做出了卓越的贡献。与世界同行，特别是与美国同行相比，德燃纳研究组更侧重于液晶的基础性研究，使他很快地成为该学科中有影响的人物。

德燃纳首先抓住了液晶光的反常散射这一基础性课题。他放弃了分子群落学说，而以连续体理论中的指向矢作为基本概念，把指向矢的热起伏涨落作为液晶反常光散射的理论出发点。他认为，由指向矢空间运动的傅立叶变换，可以把涨落转化为波矢空间谐振子的振动。然后，根据经典统计力学的能量均分定理，就可以得出液晶与普通液体光散射截面之比，该比值为 $10^5 \sim 10^6$ ，恰好为光波长与分子尺度比值的平方。这一理论结果很快被实验所证实。德燃纳的这一成果，不仅说明了早期分子群落所说明的现象，而且还更具有说服力地证明了液晶散射光所表现出来的退极化，这正是 1951 年被卡特林 (Chatelain) 实验观测到，却不能由分子群落理论说明的一个关键的现象。德燃纳的这一理论发现，使统治液晶研究几十年的分子群落理论走向衰亡。在此同期，在随着液晶显示技术带来的液晶研究高潮中，不少物理与化学家被卷入到液晶研究。其中有因 Ising 模型二维严格解，同时建立从普通铀 238 中分离铀 235 的气体扩散法基础理论而闻名于世，并获得 1968 年诺贝尔化学奖的美国化学家翁萨格 (Onsager, Lars 1903~1976)，他建立了“硬柱”模型丝状液晶相变理论。建立类似液晶理论的还有因研究高分子聚合物，并研制成功尼龙、氯丁橡胶而闻名于世，并获得 1974 年诺贝尔化学奖的美国化学家弗洛里 (Flory, Paul John 1901~)。除此以外，有人还从平均场出发，提出了一些其它液晶分子的统计理论。与这些人相比，德燃纳更为成功，他卓有见地地抓住了朗道在 1937 年建立的二级相变理论。这一理论把系统的自由能密度在相变点附近，展开成序参数及空间微分的幂级数。与平均场理论相比，它不仅数学上更简洁，还能得到平均场未能发现的新维数，而且更容易推广应用到一级相变，即丝状相——各向同性相变。

德燃纳首先构造出用于阐明丝状相与层状相的相变理论，这一研究使他注意到了液晶与超导体间的相似性。在层状相分子层排列的周期性中，他增加了一个复数有序参量，用来描述分子的密度函数。他发现，这一函数与描述电荷超流体的朗道-金兹堡自由能密度完全相似。他首先指出，应该能在层状相液晶中找到超导体中对应的效应。由于丝状相与层状相相变理论的研究成果，德燃纳获得了 1991 年诺贝尔物理奖。德燃纳 1973 年出版的首部关于液晶理论的专著《液晶物理》已成为这一领域的权威性著作。

70 年代末，液晶基础理论研究获得的成果，促进了一些相关技术领域

的飞速发展。液晶显示广泛地应用到各种电器仪表，液晶平板彩色电视已从试制走向商品化大规模生产。德燃纳被任命为巴黎物理化学学院院长。此时，他的研究课题转向化学与物理的一门交叉学科——高分子聚合物物理。由 70 年代发展起来的，如中子衍射、激光非弹性散射等新实验手段为高分子长链在大尺度范围的构型研究准备了条件。而在 70 年代发展起来的密度泛函、费因曼图与重正化等理论工具，又使人们从高分子链排列的统计力学与相变理论联系间找到许多新的标度规律。德燃纳运用他处理液晶相变时简捷的数学技巧，再一次在新的方向上做出了不少创造性的工作。1979 年他所出版的专著《高分子聚合物物理的标度概念》成为他又一部传世之作。1958 年以来，这位液晶基础性研究的巨匠又开始了生物膜的研究。根据与铁电液晶的类比，他敏锐地判断出，利用由日本两个实验室同时发现的人工合成手征生物膜的螺旋构形，可以解释生物膜的机理。1988 年他又出版了一部关于生物膜的专著。

3. 液晶生物膜研究 早在 1854 年，对细胞学的创立做出决定性贡献的德国病理学家魏尔啸 (Virchow, Rudolph Carl 1821 ~ 1902) 就发现，神经细胞髓聚脂溶液具有偏光性，这本是液晶的重要特征之一。1933 年，法拉第液晶讨论会上，生物结构的液晶性质被正式提出来讨论。1965 年，在肯特 (Kent) 召开的第一届国际液晶会议上，生物液晶已被列为正式议题。1974 年，在斯德哥尔摩召开的第五届国际液晶会议上，人们把生物膜与溶致液晶正式联系在一起进行讨论。

生物液晶研究的起点是关于红血球的形状问题。其实，固体与液面的形状自始至终都是凝聚态物理的难题。晶体表面形状、各种液面的形状曾一次次地困扰着人们。1901 年，伍尔夫 (Wulff) 曾利用表面能极化变分确定晶体表面形状。60 年代又得到了伍尔夫定理对二维晶体的严格证明，但对三维晶体的证明至今未能解决。虽然液面形状方程早在 1806 年就由拉普拉斯给出，但是关于肥皂泡的球面解唯一性的严格证明，直到本世纪 50 年代才由前苏联几何学家亚历山大洛夫完成。为了这一工作，他开拓了曲面整体微分几何的多种研究方法。同样，红血球细胞的形状也是一个奇异而古老的难题。

自显微镜发明之后，人们很快就发现了一个令人感到奇异的现象，人体红血球呈奇异的双凹碟形。从 60 年代到 70 年代初，这个问题曾吸引许多生物与物理学家，他们尝试从不同角度提出各种模型进行解释。1968 年，冯元桢与汤 (Tong) 曾从薄壳力学角度，给出了红血球的计算模型。这个模型类似两个弹性薄壳包住各向同性液体的“三明治”，为使薄壳呈向内凹状，必须假定薄壳厚度是不均匀的，然而这个假设与显微镜的观察并不一致。同一年，罗佩兹 (Lopez) 等人从电学角度做了解释，认为向内双凹的原因是中间膜部分带电与四周不同的结果。这一假设又被实验所否定。1969 年，史里瓦斯塔夫 (Shrivastav) 和布顿 (Button) 又假定红血球膜的相向部分，存在有某种长程力，中间的双内陷正是这种引力的结果。这个说法又被电镜的检验否定。还有人把双凹成因归结为膜中胆固醇分布不均匀，中心部分含量少造成边缘有较大的内应力向外弯去；中间部分含量多内应力小而由内凹变为平坦。然而实验发现，胆固醇在膜上的分布是均匀的。1970 年，加拿大一位生物力学家卡恩汉 (Can-han) 从弹性势能最小状态提出了一个数学模型。他令 H 为膜面平均曲率，膜面弹性势能 $E=$

$(2H)^2dA$ 应呈最小值，由此经过计算机模拟，恰好得到双凹碟形状。然而，在 1976 年，有人否定了这一结果，因为可以证明，杠铃状也能满足表面膜弹性势能最小值的要求，可是这种形状的红血球却从未见到过。由此，红血球的形状成为一个长期悬而未解之谜。70 年代液晶的基础理论逐渐趋于成熟，把对生物膜的研究与液晶联系起来，红血球的形状问题才得到了初步解决，与此同时，生物液晶的研究也由此正式开始。

应用液晶基础理论，首先对红血球形状做出较成功解释的是德国的海尔弗里奇 (W.Helfrich)。1968 年，美国无线电公司 (RCA) 的海尔梅尔 (G.Heilmeier) 发现液晶显示技术，掀起了研究液晶的高潮，海尔弗里奇正在美国无线电公司工作。70 年代初，他回到欧洲进入瑞士罗切公司工作，仍从事液晶显示技术研究。1971 年，他与该公司的夏德特 (Schadt) 一起，发明了扭曲丝状液晶场效应，这一发明导致了液晶显示技术实现工业化，使液晶技术在全世界迅速发展。红血球形状问题同样吸引了海尔弗里奇，他认为只有从液晶的角度出发，才能得到正确的解答。海尔弗里奇从瑞典的欧辛 (C.Oseen) 与英国的弗兰克 (F.C.Frank) 建立的液晶弹性理论出发，将指向矢概念引入到该理论的弹性能公式，导出了弯曲膜的弹性自由能公式， $F = (k/2) \int (2H+C_0)^2 dA + k \int K dA + p \int dV + \int dA$ ，其中 H 与 K 分别为膜面的平均曲率与高斯曲率， p 及 $\int dA$ 则是膜内外渗透压差及膜表面张力， k 及 \bar{k} 是液晶的弹性系数及其与膜厚度的乘积。理论推得 k 与 \bar{k} 的数量级为 10^{-11} 尔格，已被实验证实。1987 年，中国物理工作者欧阳仲灿与海尔弗里奇利用对弯曲膜弹性自由能 F 进行变分，得到了人工生物膜形状的曲面方程。1993 年，欧阳仲灿又与另两位中国物理工作者胡建国、刘寄星等人证明，红血球的双凹碟形恰为该曲面方程的解。由于这一难题的破译是在液晶模型框架下完成的，细胞膜非液晶莫属。80 年代末，海尔弗里奇的膜自由能已被进一步引作二维系统的哈密顿量。在此基础上，物理学界中开展了随机表面与量子膜的研究，这一研究意义深远。德燃纳在诺贝尔物理奖获奖讲演中，曾把它与超弦理论联系在一起，认为“肥皂泡的描述概念与高智商的超弦理论思想，在某种程度上如出一辙。”海尔弗里奇的液晶生物膜理论问世以后，这种复杂的数学描述并未被膜研究的生物工作者所立即接受。1990 年，欧阳仲灿由海尔弗里奇方程得到了一种称为环形泡的环形曲面解。这个解存在有一个苛刻的条件，即旋转生成的大小圆半径之比为 $\sqrt{2}$ 。仅在次年，这个条件即被巴黎高师实验室所证实。他们在人工生物膜中看到了大小不等的 24 个环形泡。它们的大小圆半径呈 $\sqrt{2}$ 比例关系，均奇迹般地理论与预言相一致。1992 年，该实验室又从实验中发现了非对称的环形泡，1993 年，欧阳仲灿再次证明，这种称为杜邦环面的非对称环形泡是海尔弗里奇方程的又一个精确解。这是一个理论指导实验发现，实验推动理论研究的极其生动的事例。它不仅密切了物理与生物两大学科的沟通与合作，而且进一步把液晶生物膜的研究推向高潮。在液晶生物膜研究中，理论凝聚态物理与生物学相互渗透与交叉的另一个生动的事例是手征生物膜的研究。手征生物膜属螺旋相液晶。人们很早就发现，在众多的生物形态中，像海螺、蜗牛、螺旋细菌、各种盘缘植物等的螺旋状形态非常普遍。就是在组成生物的各个层次中，也普遍存在着手征不对称，如地球上发现的氨基酸多为左旋，蛋白质和 DNA 基本上

是右旋。曾有许多人对这一现象感兴趣，因为这种不同层次的生物结构对某种旋向的倾向，一定与生命起源与进化这一更深层次的奥秘有关。

80年代初，中国物理学者林克椿曾对天然生物膜的螺旋结构进行研究。1984年，日本有两个实验室同时发现了同一类手征分子组成的人工生物膜的螺旋结构。在较高的温度下，这类膜呈闭合泡状，温度降到某一临界温度下，泡解体，膜分子重新凝聚为一扭曲的螺带。随着温度的再降低，螺带不仅沿轴生长，而且还能像细藤一样，沿轴缠绕，螺角接近 45° ，螺矩 $0.1 \sim 10 \mu\text{m}$ 。这种细藤带不仅能沿轴伸长，还能沿横向加宽，最后使螺矩间闭合而形成一条中空的细管。立刻有人从这种奇妙的特性中看到了它的价值。1990年，美国海军实验室发明了在这种细管上镀金或镀铜的技术。镀金或铜后，这种管子可用于光电技术、微形手术和制作药物导弹等。这种把生物工程用于微结构加工与医疗技术的大胆尝试，不仅表明生物膜研究在生命科学实用性方面的巨大潜力，也进一步促使理论界跻入破译生物膜自动卷曲与螺旋结构奥秘的竞争行列。

1987年，德燃纳曾把生物膜的卷曲力归结为分子铁电性与边缘极化电荷的相互作用。1986年海尔弗里奇则把螺旋卷曲归结为膜边缘处的挠曲弹性，并把线弹性密度写为 $F_r = k_r \sin^2 \theta \cos^2 \theta$ ，其中 θ 为螺角。1988年，海尔弗里奇与普洛斯特 (Prost) 把挠曲弹性的解释推广到膜表面，不仅解释了缠绕的藤带形态，还说明泡解体后所形成的扭曲螺带形态。90年代，欧阳仲灿与刘寄星从液晶本质出发，从头计算了螺旋膜结构。他们认为，手征生物膜在温度降低时，分子发生倾斜。由于分子具有手征性，倾斜取向不平行，而形成螺旋状排列。他们把 Oseen-Frank 液晶自由能项对体积积分，得到手征膜自由弹性能的表述式。其中一项就是与线场测地挠率相关的能量项，它恰与分子的倾斜与手征性相关。他们由膜与线场能量的变分得到了曲面与线场的平衡方程，从方程的解恰好得到了膜从泡形到扭曲带，再从扭曲带变化到柱形螺带的变化过程，不仅与实验的观察相符合，而且得到了螺管的半径与螺矩同为一个数量级，即 $0.1 \sim 10 \mu\text{m}$ 。他们的工作不仅使观察到的现象与观测到的数据有了完全清晰的理论根据，而且极大地推动了手征生物膜的理论研究。液晶生物膜理论是70年代才发展起来的一门新兴边缘学科。在短短的20多年的时间里，中国的理论物理工作者就取得了一系列令人瞩目的成果。其中形状方程的导出、红血球精确解的得出，环形膜泡的发现和手征生物膜理论的建立等均出自中国学者之手。在这一前沿领域中，中国物理工作者不仅占有一席之地，而且已经有着重要的影响。

(四) 有机分子 C_{60} 研究

1. 从星际物质研究到 C_{60} 的发现

长期以来，人们一直认为石墨和金刚石是仅有的两种碳的同素异构体，1985年9月 C_{60} 的发现不仅冲破了这一观念，而且随着对 C_{60} 的研究导致一系列新实验方法与技术的开发，更进一步丰富了人们对物质结构的认识。

C_{60} 的发现始于对星际物质的研究。早在 60 年代末，人们研究星际物质时发现，在其消光光谱的紫外区域，有一突起的宽峰，它的中心波长为 220nm。当时人们认为，它们对应石墨粒子，然而对石墨消光鉴定和计算却发现，上述判断并不正确。

人工条件下的 C_{60} 则始于对原子簇的研究。原子簇是由若干原子形成的微小集团 (cluster)。首篇关于原子簇的论文发表于 1956 年，该论文还介绍了用超声喷注冷凝过程产生微团的方法，以后又实现成功惰性气体离子束轰击并溅射二次离子产生微团的方法。激光出现后，人们采用新技术，已经可以制造从金属元素惰性气体、化合物及多种合金的原子团簇，这不仅使原子簇的研究有了长足的进展，还使原子簇的研究超越了以前探讨催化、燃烧、化工、光学与微电子学等课题范围，导致了 C_{60} 、 C_{70} 等碳的同素异型结构的发现。

1984 年，罗尔文 (E. A. Rohlfing) 用 530nm 的高功率激光短脉冲轰击石墨，使石墨蒸发以获得微团。他发现在 C_n^+ 中，除了在 $n < 30$ 中，出现幻数 3、11、15、19 以外，在 $n > 30$ 中，还存在 $n=60$ 、70 的幻数。1985 年，英国布赖顿的苏塞克斯大学波谱学家克罗托 (H. Kroto) 和美国休斯顿大学化学家斯莫利及其研究生吉姆希斯等人一起，进行了碳的激光蒸发实验。他们用大功率激光轰击石墨表面，并用氦气流将碳碎片构成的等离子体吸入带有喷嘴的集结区。在集结区碎片热碰撞形成新的碳分子。经质谱观察发现，产生了丰度约 40 倍于其它临近信号的 C_{60} 分子，同时还找到了 C_{70} 分子的质谱信号。这一实验给出了存在稳定 C_{60} 的有力证据。由于原子簇中“60”这数很大，又由于实验的结果异常稳定，他们认为 C_{60} 不应存在悬键。受到美国著名建筑师巴克明斯特·富勒设计成功的圆顶建筑的启发，他们把 C_{60} 分子设想为具有 12 个五边形和 20 个六边形组成的 32 面体结构，它近似为球形，恰有 60 个顶角，60 个碳原子各占一角，它们均处于彼此等价的位置。每一个六角环类似一个苯环。相邻的碳原子间以 sp^2 杂化轨道形成共轭双键，而在多面体构架的内外，围绕着电子云。显然这是一个单纯由碳元素结合成的大稳定分子，属于具有大共轭双键的芳香族。由于这一结构受到富勒的短线穹窿建筑所启发，遂命名为巴克明斯特·富勒烯，简称富勒烯 (Fullerene)，又因 C_{60} 分子的多面结构与足球酷似，又称为“巴基球” (Buckyball) 或“足球烯”。克罗托等人的这一发现具有重要意义。在他们所发表的论文中，曾预言由于 C_{60} 犹如一个小的微型钢球 (直径约 0.7nm)，可能成为超级润滑剂。此外，天文学家不久前观测到某些紫外吸收带的根源可能来自星际空间的 C_{60} 。他们甚至

根据某些星体、彗尾和星际空间存在有大量的碳元素，由此推断， C_{60} 可能是生命的摇篮，在生命出现以前，正是 C_{60} 的催化作用才产生了多种有机分子。

克罗托等人的发现，使许多物理学家和化学家纷纷竞相投入这一课题研究，从 1985~1990 年 5 年间，曾有数篇关于巴基球的论文发表。但是，关于 C_{60} 分子结构设想仍需进一步确证，其难点在于如何获得适量的样品，此时，对 C_{60} 的研究仍然处于潜在的发展阶段。直到 1990 年夏，霍夫曼 (Huffman)、克瑞史莫等人发明了电弧法，才解决了这一难题。从 70 年代起，霍夫曼等人开始对星际尘埃在紫外区域的奇异消光光谱进行了系统的研究，他们首先实现了在氮气中，利用石墨电极的弧光制备样品的实验。经过 10 年的努力，确定出合适的氮气压、电极形状及电流密度大小。他们在所收集的样品光谱中，发现了奇异的紫外双吸收峰，它们与过去天文观察中发现的非常相似。虽然这一发现先于克罗托等人，但是，他们不敢相信像 C_{60} 这样高度有序的东西竟然能在高度无序的电弧蒸气中生成，生产率又如此奇迹般地高，因而错过了首先发表发现 C_{60} 的机会。1990 年 5 月，他们想到 C_{60} 属于芳香族，必然溶于苯。于是，在氮气放电室中，约 200 安电流强度下，把从电极溅落下来的烟灰放入苯中，得到酒红色溶液，蒸发后终于获得了 C_{60} 和少量的 C_{70} 样品。从一开始，他们就能每天制备 100mg，足够用于当时的研究。他们的这一成果发表后，很快地又有一系列改进的实验方法问世。 C_{60} 的成批生产，掀起了一场全球性的 C_{60} 研究高潮，就连著名的美国贝尔实验室及日本电器研究所都卷了进来。新发现层出不穷，人们不仅获得了球状的 C_{60} 、橄榄球状的 C_{70} ，甚至还发现了管状的碳分子。

2. C_{60} 结构的确认

重要的是对 C_{60} 结构的确认，这不仅需要有足够的样品，还需要一系列测试手段与技术的开发，诸如质谱碳-13 核磁共振仪、傅立叶红外、紫外及可见光吸收光谱、高效液相色谱、隧道扫描显微镜、X 射线衍射等。但是当时用 X 射线对 C_{60} 进行晶体结构分析时，发现在 100K 低温下， C_{60} 分子晶体仍存在各向同性的旋转运动，使高分辨的 X 射线晶体结构分析无法进行，唯一的方法是破坏 C_{60} 的高度对称性。1990 年末，霍金斯 (J.M.Hawkins) 等人成功地制备出 C_{60} 的四氧化锇加成物。测试结果发现，每个碳原子离“球心”的平均距离为 $3.512(3) \times 10^{-10}m$ ，相邻六边形共边键长 $1.388(9) \times 10^{-10}m$ ，六边形与五边形共边键长 $1.432(5) \times 10^{-10}m$ 。利用扫描隧道望远镜也清楚地显示了紧密堆集的足球 60 角形阵列。自此， C_{60} 的结构设想完全被实验确认。

C_{60} 属于芳香族，它的每一个六角环都类似一个苯环，这一点使人们忆起苯结构的发现。苯结构曾是有机化学领域一度长期困扰人们的疑难问题之一。1925 年，著名物理学家法拉第从当时用作照明的气体中分离出苯。自苯问世起，它就给人们带来一系列不解的疑团。例如，为什么这样一种高度不饱和的烃却如此稳定。一般不饱和烃容易进行加成反应，而苯的取代反应倒比加成反应更容易。这一奇异的性质的关键在于它异乎寻常的结

构。德国化学家凯库勒(Kekule Von Stradonitz, Friedrich August 1829 ~ 1896) 解决了这一难题。凯库勒早年曾对建筑感兴趣, 加上苯问题长期萦绕, 生出灵感, 使他在 1865 年乘车打盹的时候, 看到许多原子在跳轮舞。它们排列起来, 像蛇吞下自己的尾巴一样, 首尾连接成一个个转动着的圆圈。据他讲述, 这个梦使他得到了开创性的结论, 苯的六个碳原子形成一个环。并且他一开始就指出苯具有正六边形对称特性。然而为保持碳的 4 价性, 必须假定, 苯环中应间隔地出现三个双键。这样将有两种凯库勒构式。无论哪一种都与 C-C 键等长的事实及正六边形对称性设想矛盾。显然凯库勒环状平面结构这一光辉思想解决了旧问题, 新的矛盾相继出现。

1931 年, 德国物理学家哈克尔(E. Hückel) 利用他的简化设想, 对上述问题做了解释。他以薛定谔方程为基础, 给出了哈克尔方程。解这个方程求出本征值和本征解, 解决了平面结构的共轭分子 电子轨道和能量, 表明苯中基态碳电子云呈双面包围状分布。由此证明, 苯中基态电子云分布并不是凯库勒结构中的任何一种, 而是二者以相同几率杂化分布, 这样就免去了等键长与正六边形对称性的矛盾。此外, 这种环状分布, 没有重叠于分子平面的节面, 波长必然较长, 减小了能量, 这就是苯环比较稳定, 不易进行加成反应的原因。可惜的是, 苯的奇异环状结构高度稳定性以及六边形对称结构当时没有引起人们的足够重视, 也很少有人继续思考, 如果 6 个碳能如此巧妙地首尾连接成一个高度对称的平面环, 能否有更多的碳连接成高度对称的立体结构。如果能较早地从苯结构及其奇异性质中受到启发, C_{60} 的发现, 将有可能更提早几十年。

随着研究的深化, 很快地发现了 C_{60} 的实用价值。首先, 理论和实验均证实, C_{60} 可以整齐地沉积在平坦的晶体上, 如砷化镓的表面, 形成面心立方结构。 C_{60} 固体又是一种类似 G_a-A_s 那样的直接能隙半导体。由于 C_{60} 分子在格点上做无序转动, 使 C_{60} 固体在某些方面又与非晶态类似, 因此, C_{60} 成为继硅、镓和镓-砷之后的新型半导体材料。此外, 还可以在 C_{60} 球与球间或球笼内掺杂, 这些均不仅为微电子技术开辟了新的天地, 也同时发现了它们在超导电技术方面的应用。1991 年 3 月, 美国贝尔实验室报导了他们在这方面的新发现。他们在固态 C_{60} 中掺入碱金属 K, 得到了 K_3C_{60} , 其超导临界温度为 18K。以后世界各地相继完成 C_{60} 的 R_b 、 R_b 、 C_s 、 C_s 的掺杂, 超导临界温度高达 30K, 已经高于超导合金的转变点, 并超过了以前的任何一种有机超导体。后来, 又有人用 T_i 部分地替代 R_b 掺入 C_{60} , 使临界温度达到 48K。这表明, 这类超导体的转变温度因掺杂金属元素而不同, 此外, 掺杂了的 C_{60} 可以形成各向异性的三维超导体, 它的临界电流、临界磁场及相干长度都较大, 易于加工成型, 因此作为实用化超导材料有着巨大的潜力。

四、聚变物理与等离子体物理进展

(一) 受控热核聚变研究

受控热核聚变研究旨在探索新能源，因此它是当代倍受世人瞩目的重要科研项目之一。在早期，这一课题的诞生经历了几十年的漫长时间。

1. 早期核聚变研究与劳孙条件

19世纪末，放射性发现之后，太阳能的来源很快地被揭开。这一发现应首先归功于英国化学家和物理学家阿斯顿(Aston, Francis William 1877~1945)。当时，阿斯顿正在剑桥卡文迪许实验室，利用他所创制的摄谱仪从事同位素的研究。实验中他发现，氦-4质量比组成氦的4个氢原子质量之和小大约1%左右。几乎在同一时期，卢瑟福也提出，能量足够大的轻核碰撞后，可能发生聚变反应。1929年英国的阿特金森(de Atkinson, R.)和奥地利的奥特斯曼(Houtersman, F.G.)联合撰文，证明氢原子聚变为氦的可能性，并认为太阳上进行的就是这种轻核聚变反应。在美国化学家尤里(Urey, Harold Clayton 1893~1981)发现氢同位素氘不久，1934年，澳大利亚物理学家奥利芬特(Oliphant, Marcus Laurence Elwin 1901~)用氘轰击氘，生成一种具有放射性的新同位素氚，实现了第一个D-D核聚变反应。1942年，美国普渡大学的施莱伯(Schreiber)和金(King)又首次实现了D-T核反应。二战期间，美国洛斯阿拉莫斯实验室在研制原子弹的同时，也进行了早期核聚变反应的系统研究。二战结束后，英国与前苏联也秘密地开展了受控核聚变研究工作。核聚变是诱人的，英国天体物理学家爱丁顿(Eddington, Sir Arthur Stanley 1882~1944)早在1920年就预言，“有一天，人类将设法把核能释放出来，为人类造福。”然而，实现这一目标却困难重重。仅以D-D反应为例，氘核带正电，发生聚变反应必须克服库仑斥力，使两核接近到核子间距离，即 10^{-13}cm ，必须具备10keV以上的能量。如果用加速器加速氘核，再使其轰击含氘的固体靶，加速氘核的绝大部分能量将损失在与电子碰撞的散射之中。还有人提出用两束高能氘核对撞实现聚变。这种想法很快被证明是行不通的，因为氘核在束中的平均自由程很大，两束氘核几乎是完全透明的。要使对撞发生，氘核束的密度必须很高，然而密度极高的氘核束很难获得，即使成功地制备了这种高密度氘核束，在氘核的互撞中，不可避免的多次库仑散射，将使偏转角很快地累计达到 90° ，而使氘核偏转离开原有的束流散失殆尽。

在这种情况下，人们很自然地想到了无规则的热运动。如果设法将一团氘核约束在一起，并加热使其到达足够的温度，核间频繁地碰撞，可望有核聚变发生。事实上，即使在聚变反应进行过程中，等离子体的能量也会通过多种途径不断散失。因此，如果热聚变发生，并且维持持续进行，不仅应保持高温等离子体的能量足够高，还要维持能量平衡，以达到聚变的自持条件。1957年，英国的劳孙(Lawson, J.D)计算了高温聚变等离子体能量平衡关系。他的考虑如下，若等离子体的密度为 n ，在温度为 T 时，如果不从外部获得能量，由于各种能量损失，等离子体最终将从高温降到室温，所维持的时间，称为能量约束时间。若维持能量平衡，可使聚变堆输出功率，经过效率为的热功转变系统，转变为电能回授给等离

子体，用来维持等离子体工作，并补偿轫致辐射能量损失。如果维持能量的得失得当，聚变堆即可持续工作。以氘氘各半的等离子体为例，单位体积 D-T 反应的聚变功率为

$$P_{\text{聚}} = \frac{n^2}{4} \langle \sigma v \rangle_{\text{DT}} E, \quad v \text{ 为反应速率参数,}$$

E 为每次反应释放的能量。

$$\text{等离子体的损失功率为 } P_{\text{损}} = an^2 T^{1/2} + \frac{3nT}{\tau},$$

其中第一项与第二项分别为轫致辐射与其它各途径的损失功率。由此，劳孙得到了等离子体释放的总功率为

$$P = n^2 \left(\frac{\langle \sigma v \rangle}{4} E + T^{1/2} \right) + \frac{3nT}{\tau}。$$

根据劳孙的分析，为了把单位时间等离子体释放的总功率变为电能，用来加热等离子体，并补充轫致辐射损失，必须有 $P = P_{\text{损}}$ 。由此，劳孙得到如下结果：

$$n\tau = \frac{3T}{\left(\frac{n}{1-\eta}\right) \frac{1}{4} \langle \sigma v \rangle_{\text{DT}} E - \alpha T^{1/2}}$$

这一结果称为劳孙条件，它表明，等离子体达到聚变温度后，为了实现聚变反应能量得失相当，对等离子体密度 n 、约束时间 τ 都应有一定的要求。

实现劳孙条件只表明聚变实现能量得失相当的最低情况，并没有多余的功率供输出使用。即使如此，这一条件仍然难以实现。概括起来，这个条件应满足两点，这就是极高的温度和充分长的约束时间。例如，D-T 反应时， $T_c > 5\text{keV}$ ， $n = 6 \times 10^{13} \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}$ ；而对 D-D 反应的要求就更苛刻， $T_c > 100\text{keV}$ ， $n = 10^{16} \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}$ ，这些数据称为劳孙判据。尽管实现这一目标，仅能达到聚变反应的收支平衡，它们仍被看作为聚变研究第一阶段的目标，因为只有实现了这一目标，才意味着受控热核聚变反应在科学上的可行性。

劳孙判据的得出，标志着受控热核聚变理论研究的重要进展。它向人们指出，实现受控热核聚变反应的两个最基本问题就是：等离子体的加热和等离子体的约束。此外，劳孙判据中的 n 值与等离子体的 T_c 的乘积 $n T_c$ 称为聚变品质因素，它已被列作判断聚变研究水平高低的标志。

2. 等离子体磁约束

在自然界中的等离子体，约束常是天然具有的。例如太阳和其它恒星，凭借自身巨大的质量，利用引力即可把等离子体约束在一起。地球的引力仅是太阳引力的 33 万分之一，依靠如此微弱的引力，不可能约束住高温等离子体。人们很自然地想到了磁约束的方法。磁场对等离子体的作用包括三种，即带电粒子所受磁场的洛仑兹力、磁场对等离子体束的磁应力以及等离子体电流所受磁场的箍缩力。洛仑兹力可以把带电粒子约束在磁力线的周围，使其在垂直磁场的方向上受到横向约束；磁应力来自磁场的不均匀性，使等离子体整体受到指向内部的作用，从而抵消等离子体的热膨胀；而箍缩力将使等离子体电流束沿径向被箍缩，从而受到约束。磁约束装置

的研制关键在于寻找到合适的磁场位形。

(1) 仿星器、磁镜

美国天文学家和物理学家斯必泽 (Spitzer, Lyman Jr. 1914 ~) 是早期磁约束装置研究中较为成功的一位。1935 年, 斯必泽毕业于耶鲁大学, 曾在著名天文学教授爱丁顿及罗素 (Russell, Henry Norris 1877 ~ 1957) 指导下攻读研究生学位, 1938 年获哲学博士学位。毕业后在耶鲁大学工作, 后到普林斯顿大学担任天文系系主任。斯必泽早期研究的课题是弱磁场下, 宇宙尘形成新恒星的过程。这项研究为他以后的成功奠定了基础。50 年代初, 随着早期核聚变研究的热潮, 他迅速地找准了研究方向, 即研究高温等离子体的磁约束。最初, 他设想用磁场把等离子体约束在一个圆柱形空间里。为解决等离子体在端点的泄漏, 他设想把两端连接成圆环状。然而激磁线圈产生的环形磁场内侧强, 外侧弱, 致使正带电粒子向下漂移, 电子向上漂移, 正负电荷的分离所产生的电场与磁场共同作用的结果, 把等离子体向外推, 因而不能形成稳定的约束。为了克服正负电粒子的分离, 斯必泽巧妙地把圆环状空间扭成 8 字, 于 1951 年 4 月提出了一种称为仿星器 (Stellarator) 的磁约束装置。等离子体沿 8 字形绕行一圈, 总的漂移被抵消。同年 7 月, 他得到 5 万美元的资助, 开始了这项理论研究工作。1952 年建成第一台小型实验用仿星器 Model-A, 以后又陆续建成规模更大一些的 Model-B 和 Model-C。60 年代以后, 由于实验结果不甚理想而进展缓慢, 美国基本上停止了仿星器的研究。然而英国、西德、前苏联和日本却坚持了下来, 并取得了较好的结果。例如 80 年代英国在 CLEO 仿星器上进行低电流欧姆加热实验, 能量约束时间为 5ms, 欧姆加热输入功率为 12 ~ 15kW; 西德的 W A 仿星器的大半径达到 2m, 磁场的螺旋变换角可以连续调节。实验发现, 用这种仿星器加热, 等离子体的温度与密度分布都优于同样规模的托卡马克装置。他们在该仿星器上还成功地进行了中性注入实验。

磁镜属于开端系统, 它用中间弱、两端强的磁场位形约束等离子体, 具有结构简单、值高、能稳态运行等优点。提出这一方案的是刚从斯坦福大学获得博士学位的波斯特 (S. Post)。1952 年, 他从斯坦福大学毕业后, 应聘到劳伦斯-利弗莫尔辐射实验室从事同步辐射研究。应该实验室热核聚变研究课题负责人约克 (H. York) 的邀请, 参与了核聚变研究。由于波斯特在微波与等离子体方面的知识背景, 使他很快地从地球磁场俘获带电粒子中受到启发。地磁具有中间弱、两端强的磁场位形, 被俘获的带电粒子在两极间来回反射, 称为磁镜效应。波斯特把这一效应用于解决直线型聚变装置的等离子体泄漏问题, 于参加工作的当年, 就建成了第一台人工磁镜装置。1976 年, 该实验室的 2 B 磁镜装置的等离子体温度已达到 13keV, 等离子体密度达到 $2 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ 。在采用中性注入技术时, 也未出现约束不稳定性问题, 所需要解决的是, 由于磁力线在装置内不闭合而带来的终端损失问题。有人提出终端能量的再循环使用, 以及在端头加“塞子”的堵漏设想。基于这一想法, 已产生了反向场磁镜、串联磁镜及环键磁镜等新设计。80 年代初, 劳伦斯-利弗莫尔实验室的大型串联磁镜已投入运行。它的中部磁场长 5m, 中心磁场 2kG, 等离子体密度 10^{13}cm^{-3} , 等离子体温度 10keV, 加热束流持续时间 25ms, 端部磁场中心场强 10kG, 端部磁镜用 5MW 的中性束注入加热。从发展趋势看, 磁镜有可能是托卡马

克的竞争对手，成为一种有前途的磁约束装置。

(2) 托卡马克

早在 50 年代初，前苏联著名物理学家塔姆 (Tamm, Igor Yavgenyevich 1895 ~ 1971) 就曾提出用环形强磁场约束高温等离子体的设想。1918 年，塔姆毕业于国立莫斯科大学。从 20 年代到 30 年代早期，他曾以量子理论为基础，研究固体的光色散问题。1937 年，他成功地解释了切伦科夫辐射现象，为此与另一位前苏联物理学家弗兰克 (Frank, Ilya Mikhaylovich 1908 ~) 共获 1958 年诺贝尔物理学奖。第二次世界大战后，塔姆转向受控热核聚变研究。他认为，把强电流产生的极向磁场与环形磁场相结合，可望实现高温等离子体的磁约束。受到这一思想的启发，莫斯科库尔恰托夫研究所的前苏联物理学家阿奇莫维奇 (Artisimovich, Lev Andreevich 1909 ~ 1973) 开始了这一装置的研究。最初，他们在环形陶瓷真空室外套有多匝线圈，利用电容器放电，使真空室形成环形磁场。与此同时，用变压器放电，使等离子体电流产生极向磁场。后来，利用不锈钢真空室代替陶瓷真空室，又改进了线圈的工艺，增加了匝数，改进了磁场位形，最后成功地建成了托卡马克装置。托卡马克这一名称由阿奇莫维奇命名，是俄文环流磁真空室的缩写。

为了克服一般环形磁场使带电粒子漂移，致使正负电荷分离而产生电场，破坏稳定约束的缺点，托卡马克的磁场位形极为巧妙。它的总磁场是非圆环形的，它由一个沿大环形的圆形磁场与一个沿圆环截面的小环形弱磁场叠加而成，这种合成场的磁力线既沿大圆环旋转，又沿小圆环缓慢旋转而形成螺旋线。带电粒子在这种具有旋转变换的磁场中，正离子绕行一周后，进入到电子漂移前的位置，而电子绕行一周后，进入到离子漂移前的位置。由于正负粒子互换，并不破坏原有的电中性，因而不再向外侧漂移。

奇特的旋转磁场位形，使托卡马克取得了重大的进展。60 年代末，前苏联的 T-3 和 TM-3 托卡马克的等离子体性能明显地优于其它环形装置。电子温度达到 1keV，离子温度 0.5keV，等离子体约束时间达到了“玻姆扩散时间”的 50 倍。这一神速进展在 1968 年召开的第三届等离子体和受控热核聚变研究国际会议上公布，立刻引起轰动。1969 年，英国卡拉姆实验室主任皮斯 (Pease, R.S.) 带领等离子体专家小组，对上述结果做了实地验证核实，证明准确无误后，引起了极大的反响。因为这一进展表明，人类不久即可在托卡马克装置上实现受控核聚变。由于阿齐莫维奇首创的托卡马克装置对国际核聚变研究发展中所做出的杰出贡献，在他逝世后，国际原子能委员会做出决定，在每年度等离子体物理和受控热核聚变研究国际学术会议上，将有一篇专题报告，纪念阿齐莫维奇的功绩。

自 70 年代伊始，世界范围内掀起了托卡马克的研究热潮。美国普林斯顿大学实验室将仿星器 Model-C 改装成 ST 托卡马克，橡树岭实验室则建成了奥尔马克 (Ormark)；法国冯克奈-奥-罗兹研究所建成了克利奥 (Cleo)；日本原子能研究所建立了 JFT-11 托卡马克，西德的普朗克研究所建立了普尔萨特托卡马克；几年以后中国科学院物理所也开始了托卡马克的研究，第一台小型托卡马克 CT-6 于 1975 年投入运行。1984 年 6 月，又建成了目前国内最大的托卡马克装置——中国环流 1 号 (HL-1)。它们为中国的核聚变研究做出了许多开创性的贡献，在其上所取得的实验成果，都已经达

到国际同类装置等离子体物理品质参数水平。

3. 惯性约束系统进展

为实现受控热核聚变，必须把等离子体约束足够长时间。然而，磁约束方式既存在各样的宏观不稳定性，又存在有各种微观不稳定性，它们都可能使约束受到破坏。50年代初，就有人从氢弹爆炸中受到启发，寻找到了—种通过惯性进行约束的方式。在氢弹爆炸中，氢的加热是由 ^{235}U 裂变炸弹爆炸完成的。由于自身的惯性，在爆炸的极短瞬间，等离子体来不及四外扩散，就被加热到极高温而发生聚变反应。60年代，激光问世后，为可控加热方式提供了可能。1963年，前苏联的巴索夫(Basov, Nikolai Gennadievich 1922~)与中国物理学家王淦昌分别提出了激光核聚变方案。利用激光打在燃料靶上，使靶材料形成等离子体，由于自身惯性，在未来得及四散开来以前，即被加热到极高温而发生聚变反应。

惯性约束的原理虽然简单，实现受控热核聚变尚需克服—系难题。首先，要有足够强的激光器。根据劳孙判据，要在极短时间(10^{-10}s)内，把直径1mm的氘氚燃料靶加热到热核反应温度，激光器的能量应达到 10^9J ，这几乎是不可能的。1972年，美国的尼科尔斯、华能等人又提出了一种“向心聚爆方案”。在核爆炸前，通过向心聚爆，把靶丸压缩到高密度，密度升高，可以相应降低热核反应温度，从而减小激光器的能量。当聚爆的瞬时高压达到 10^{17} 帕斯卡时，利用驱动器使靶丸吸收激光或粒子束的能量，靶丸表面融蚀，向外喷射形成超高强的向内压力。为达到这一目的，来自驱动器的激光或粒子束波形和靶丸的结构要匹配得当。这对驱动器和靶丸的要求都很严格。向心聚爆原理的提出，给激光核聚变研究带来了活力。目前，惯性约束已与磁约束—起，成为受控热核聚变研究的两大平行发展的途径。由于激光器与聚变堆是分开的，惯性约束反应堆将比磁约束聚变堆简单得多。此外，惯性聚变研究还可用于军事目的。由于用惯性约束聚变模拟真实热核爆炸，可以在实验室获得数据资料，免去实弹实验的巨额耗资，—些拥有核武器的国家也在积极进行此项研究。

在惯性约束系统中，激光核聚变的进展异常神速。采用直接驱动法的激光聚变技术进展最大的是日本GEKKO-钽玻璃激光器，它的能量达到10kJ，波长526nm，它已将氘氚靶丸压缩到固体密度的600倍。现计划将激光器能量再提高100倍，用24路激光束射向靶丸，可望公元2000年前实现点火实验。美国直接驱动的激光聚变研究基地在罗彻斯特大学实验室OMEGA激光器，它的能量达2~3kJ，光脉冲宽度为1ns，波长351nm，激光分24路射向靶丸，氘氚燃料可被压缩到200~300倍固体密度。现在正计划把激光器能量提高到30kJ，分60束输出，进行点火实验准备。

在间接驱动激光核聚变研究中，美国处于领先地位。这项研究的中心设在劳伦斯-利弗莫尔国家实验室(LLNL)。1985年已建成名为NOVA的钽玻璃激光器，其基波波长1054nm，可转换成二次或三次谐波。通常使用波长为351nm的三次谐波，以控制激光与等离子体相互作用产生的不稳定性。NOVA的输出能量为40kJ，脉冲宽度1ns，分10束输出，可将靶丸密度压缩到 $3.3 \pm 0.5\text{g/cm}^3$ ，离子温度达到 $2.2 \pm 0.8\text{keV}$ ，氘氚中子产生额为 $(8.1 \pm 0.8) \times 10^9$ 个。根据NOVA80年代以来的实验进展，1990年，美国国立科学院的评论报告和美国能源部的聚变咨询委员会的评论报告中联合提议，1994年财政年度将把NOVA装置升级到1~2MJ，1997年进行点火的

低增益演示。这项研究的重点课题是激光与等离子体相互作用物理问题、流体动力学的不稳定性、X 光驱动的不对称对靶丸聚爆的影响以及建立和验证实验结果的数值模拟计算。1991 年 4 月，在日本召开的惯性约束驱动器国际会议上，美国宣布已批准 1991 年财政年度支持 NOVA 增强运行能力的计划。与此同时，劳伦斯-利弗莫尔国家实验室也相应提出了将 NOVA 升级到 1.5~2MJ、脉冲宽度 3~5ns 的具体方案。

4. 当前聚变研究的前沿课题

目前，核聚变研究的前沿课题主要有如下几方面：(1)探索新的加热方式与机制为实现聚变点火，必须把等离子体加热到一定高温以上，如何加热等离子体，一直是核聚变研究的重要课题。40 多年来，不少加热方案陆续提出，其中最基本也是最普遍的是欧姆加热法。根据欧姆定律，加热功率密度应为 $p = j^2 R$ ， j 为电流密度， $R = 2.8 \times 10^{-8} / T^{3/2} \cdot m$ ，其中 T 为电子温度。 R 的确定是根据斯必泽公式由氢等离子体得到的。上述关系表明，随着温度的升高，热功率密度将明显地下降，在较高温度时，欧姆加热效果明显变差。当然为提高欧姆加热的效率，可以增大电流密度或提高等离子体的电阻率。然而，增加电流密度势必造成工程上的困难。而且，对于托卡马克装置，等离子体中的电流值不能超过某一极限。有人建议考虑等离子体的湍流因素，这是一种由微观不稳定性引起的等离子体混乱的集体振荡，如朗缪尔等离子体振荡、离子声波、阿尔芬波等。理论证明，这种湍流可以提高等离子体的电阻率。然而，湍流的存在，也会使等离子体的能量损失加快。此外，在用强电场驱动湍流时，电场还会引起等离子体中电子逃逸，因而破坏了等离子体的约束。由此看来，在一般情况下，欧姆加热可以作为等离子体的第一步加热法，进一步提高等离子体的温度，还必须寻找其它途径。

中性粒子注入是目前较成功的一种等离子体加热法。磁场可以约束带电粒子，高能中性粒子却能畅通无阻地进入等离子体。它们与带电粒子作用后，变为高能离子，从而被磁场约束在等离子体中。这些高能离子再与原有等离子体粒子碰撞，把能量转移给等离子体，使其温度升高。创造离子温度世界纪录的美国大型 TFTR 托卡马克就是采用这种方法加热的。用于注入加热中性粒子，一般是高能中性氘或氢原子束。为了有效地加热等离子体，所注入的中性粒子束束流功率必须足够大，以使粒子束能到达等离子体的中心区域，否则粒子束只能加热边缘区域的等离子体，使这些区域的等离子体粒子撞击真空器壁，不仅损失能量，还能把杂质带入等离子体。实践证明，中性束流的功率不能太大，当其能量超过 150keV 时，中性注入的效率会急剧下降。然而，聚变反应堆所要求的能量是 300keV 左右。此外，中性注入加热所需的设备庞大，结构复杂、造价高昂。目前，正探索射频波加热法，如电子回旋共振加热、离子回旋共振加热和阿尔芬波加热等。除了相关技术研究外，加热的共振特性，加热过程的能量转换及吸收机制与加热效率等一系列理论研究也在相应深入进行着。

(2)改善等离子体的约束性能

在实践中发现，高能中性粒子注入后，虽然提高了等离子体的离子温度，却随着温度的提高，约束性能也变坏。产生不稳定性出现的原因是注入高能中性粒子被电离后，所形成的高能离子的速度并不单一，速度的分布具有一定的宽度。这些高能离子使等离子体的速度分布受到影响，在速

度较大处又出现一个峰值而形成双峰分布。如果等离子体中存在有波，其相速度恰在升起峰值的上升区域，由于朗道增长，波的幅度也随之加大，因而使稳定性破坏。这种情况并非不能改善，当加热功率超过一定阈值时，等离子体边缘 D_α 线辐射强度突然下降，等离子体密度明显加大，粒子及能量约束性能也随之明显地改善。1982年，在西德中等托卡马克 Astex 上这一改善措施首次获得成功，这种现象被称为“L 模约束特性”。实践中还发现，满足一定条件时，随着中性粒子注入功率的增加，等离子体的约束性能反倒有所改善，这种现象称为“H 模约束特性”。H 模约束特性以及 L-H 转换机制是当前世界托卡马克装置上广泛研究的重要课题。L-H 转换机制的相关理论也相继出现。这些理论的基本思想是在等离子体边缘的旋转速度、径向电场以及它们的剪切力突然加大时，会使边缘的扰动得到抑制，从而改善约束性能，导致 L-H 转换。进入 90 年代，中国环流 1 号 (HL-1) 托卡马克装置，利用加偏压电极也实现了 H 模运行。研究人员同时外加径向电场对 H-L 转换及转换中等离子体的性质及变化过程进行了系统的研究，这一工作是我国核聚变研究的重要成果。

(3) 反常输运与涨落现象研究

等离子体通常处于非平衡的热力学状态，输运过程是一种既基本又重要的物理过程。此外，磁约束下的等离子体是一种准稳态力学平衡系统，它的状态变化以及所引起的耗散效应，甚至迅速变化过程，如波动、不稳定性或激波都主要由其输运过程决定，因此，研究输运过程对等离子体研究有十分重要的意义。等离子体输运过程的理论研究始于本世纪初，当时采用了李普曼-恩斯库格展开法对等离子体的输运系数进行计算。在 40 年代，著名的前苏联科学家朗道从理论上研究了等离子体波的性质，导出了描述库仑碰撞的朗道碰撞项。50 年代，印度-美国天文学家钱德拉塞卡 (Chandrasekhar, Subrahmanyan 1916~) 与美国天文与物理学家施必泽等人，曾运用福克-普朗克方程研究了库仑碰撞效应。钱德拉塞卡还引入了试探粒子的方法。托卡马克装置研制成功并大量运行后，最初，人们认为托卡马克装置中的等离子体能量损失主要来源于粒子的碰撞与输运过程，例如，对于电子，主要来自电子的辐射损失、电子对流输运损失和电子热导损失；对于离子，则来自电荷交换损失、离子对输运损失和离子热导损失。由于这些损失都是以库仑碰撞为基本机制，都可以利用经典输运理论得到解释，称它们为“正常输运过程”。然而，早在 1946 年，玻姆 (Bohm, David Joseph 1917~) 就首先注意到有反常的输运过程，它们不能利用经典的输运理论解释。对这种反常输运现象，他提出了一个扩散系数的半经典公式 $D = cT_e / 16eB$ ， D_B 称为玻姆扩散系数。这一关系表明， $D_B \propto T_e B^{-1}$ ，它与经典扩散系数 $D_c \propto n/T^{1/2} B^{-2}$ 的定标关系差异很大。 D_B/D_c 之值竟达到 10^4 。近年来，虽然磁约束装置的扩散和热导损失已低于玻姆值，但仍然高于经典值。除了反常扩散、反常热导外，还存在有反常电阻、反常粘滞性、反常趋肤效应、无碰撞激波层内的反常耗散等。反常输运现象不仅存在于磁约束的等离子体中，在惯性约束的等离子体中也经常出现。反常输运现象已成为受控热核聚变与等离子体物理的重要研究课题之一。

研究发现，引起反常输运现象的机制远比造成正常输运的库仑碰撞机制复杂得多。一般认为，它与等离子体中的微观湍流有关。主要地可归结

为带电粒子间相互作用的长程力导致的集体效应。这种相互作用所激发的每一种运输模式，都会引起强烈的运输过程。例如，沿垂直于磁场方向的反常扩散和反常热导的可能机制有：由不均匀性激发的各种低频波漂移，由电磁模不稳定增长导致的磁面破裂等。微观湍流在磁约束高温等离子体中普遍存在，目前对它们的起源及它们在反常运输中所起作用还了解不多，虽然已建立一些物理模型，但仍不能很好地解释所观察到的反常运输现象。受控热核聚变研究与等离子体物理的进展都急切地需要尽早地理论与实验相结合，弄清反常运输的物理机制。

(二) 冷聚变研究

1. 冷聚变研究的热潮

早在 1926 年，两位德国化学家潘尼斯和彼得斯就提出过冷聚变的设想。他们使氢通过加热的钷粉或钷石棉，发现透过物中含有氦，于是认定发生了核聚变。次年，他们把这一结果发表在英国《自然》杂志上。他们的这个观点受到了卢瑟福的批评。后来，终因发现所检测到的氦是石棉或玻璃容器释放的，遂撤回了他们的观点。1927 年，也曾有一位名叫唐伯格的人，申请一项瑞典专利。他声称，用普通水和电解装置，成功地产生了氦，并释放能量。但是，由于这个实验未能重复做出，专利未获批准。1947 年，前苏联学者邦特马尔夫也提出了“冷聚变”思想，但一直未被实验证实。60 年代，英籍捷克斯洛伐克裔的电化学家马丁·弗莱希曼 (Fleischmann, Martin) 声称，他在浓缩氘的过程，发现了一些奇异的反应。1975 年，弗莱希曼的研究生庞斯 (Pons, Stanley) 在用电极分离同位素的研究中，也发现了类似的怪现象。1984 年，这两位电化学家在美国盐湖城郊外的米克尔里克山谷散步时，萌生了“在室温条件下进行受控核聚变”的设想。也有人认为，弗莱希曼关于冷聚变的思想有可能来自潘尼斯，因为在 50 年代，弗莱希曼曾与潘尼斯同在英国的达拉姆大学化学系任教。就这样，弗莱希曼与庞斯自筹 10 万美元，在简单的装置上，开始了常温核聚变实验。

1989 年 3 月 21 日，犹他州盐湖城犹他大学召开了新闻发布会，发布了弗莱希曼和庞斯的实验结果。公布中明确说明，在室温条件下，他们用简单的重水电解装置，在钷电极上实现了持续的核聚变。他们所使用的电解装置极为普通，电解液由 99.5% 的重水和 0.5% 的普通水加入少量的氘氯化锂制成。电解液装在长 20.32cm 的试管中，温度为 27℃。重水中插入两根电极，阴极为钷极，阳极为铂极。通电流后，氘离子在钷极聚集、融合，并释放出核聚变的典型物质：氦、中子和 γ 射线，并有热量释放。所释放的热量比实验耗用的能量多出 4 倍，他们一致认为，这是一种“冷聚变”。

弗莱希曼和庞斯的这一发现，冲破了核聚变只能在上亿度的高温下进行的传统观念，使低成本的核聚变有了希望。同时，他们的发现又是以新闻发布会方式公布的，通过传媒炒起了强烈的轰动效应。新闻媒介把他们的发现，称为“试管中的太阳”，甚至认为，一旦进一步被证实，他们将是“有把握的诺贝尔奖得主”。很快，这一轰动效应所产生的热潮席卷到世界各地。几十个国家和地区的数百个实验小组，立即涌向冷聚变研究的行列。一些在物理前沿各个领域分别独领风骚的著名研究机构、大学及公司，如美国著名的劳伦斯-利弗莫尔国家实验室、布鲁克海汶国家实验室、美国海军研究所、圣地亚哥国家实验室、洛斯阿拉莫斯国家实验室、麻省理工学院、耶鲁大学、普林斯顿大学、德克萨斯 A&M 大学、美国商用机器公司 (IBM)、英国哈韦尔实验室、德国卡兴实验室等，纷纷跃入这场世界范围的冷聚变竞争之列。

由于对新能源的渴求，人人都知道冷聚变的实现意味着什么。政府、工商界对冷聚变的热情也不亚于科学部门。在新闻发布会召开后的次月，即 1989 年 4 月，犹他州政府就表示愿意拿出 500 万美金用于扩大实验。庞斯在美国化学年会上作报告的第二天，几位科学家便被召至白宫，向布什

总统介绍有关冷聚变的情况。在这次应召后，美国能源部长要求该部的一些实验室在 90 天内弄清冷聚变的真相，并每周向能源部有关负责人报告实验结果，以密切关注冷聚变研究的动态。当时，还有许多公司表示，愿为犹他大学的冷聚变研究作风险投资。这一切都表明，人们充分认识到冷聚变研究的价值及重要性。1989 年 3 月 21 日，即犹他州举行新闻发布会后不到一个月的时间，全世界范围的冷聚变研究进入了高潮。美国传统核电站的巨头与犹他州大学签订了首先取得了解实验结果的特权合同。前苏联莫斯科大学调集了一流的研究人员与仪器设备，准备全面铺开冷聚变的基础研究。意大利科研部强调把“冷聚变实验放在‘最优先地位’”。比利时科研国务秘书办公室专门召集有关专家会议，决定立即调集研究力量，投入这项研究。同年 4 月 10 日，美国德克萨斯 A&M 大学的 10 人研究小组第一个宣布，他们成功地部分重复了庞斯与弗莱希曼的实验，输出的能量比输入高出 20~80%。4 月 11 日乔治亚理工学院宣布，他们在冷聚变实验中，测到的中子信号比本底高出 13 倍，还检测到了聚变产生氦。4 月 12 日，前苏联莫斯科大学固体物理实验室报导他们重复了庞斯和弗莱希曼的实验，测到了热与中子流。就这样，从 4 月份开始，几乎每天都可以收到来自世界各地的冷核聚变研究进展的报导。

值得说明的是，在这场冷聚变热潮之中，世界各地化学家们所显现出来的特殊关注与热情。1989 年，即犹他大学新闻发布会当年的 4 月 12 日，第 197 届美国化学学会年会在达拉斯召开，会议专门安排了一个冷聚变小组会。庞斯和弗莱希曼第一次在学术会议上介绍他们的冷聚变实验，参加该小组会的人竟然达到 7000 多人。当会议主席向大家介绍庞斯和弗莱希曼时，受到了热烈的掌声，不仅流露出众多化学家对庞斯和弗莱希曼的信任与支持，也表现出他们对这项重大发明由化学家完成所持有的兴奋。大会主席克莱多·卡立斯的话代表了与会者的这种心情。他说：“物理学家在核聚变研究方面碰到了问题，现在似乎是化学家来拯救他们的时候了。”对这一席话，全场立即报以热烈的掌声。

事实上，就在冷聚变被世界各地科学家们炒得火爆时，反对者们的意见一直在持续着。4 月 12 日，就在冷聚变研究高潮之中，在意大利埃里斯的“世界实验室”主持召开的首次国际冷聚变讨论会上，大多数学者们持有保留态度，他们对冷聚变实验提出了四个带有关键性的问题：为什么实验中观测到的热效应与中子产率不相符；所观察到的大量热能到底从何而来；为什么实验中要使用重水而不是普通水；到底是核反应还是化学反应。与此同时，世界上有数百个研究组与研究机构，特别是一些世界一流的研究机构，都未能重复出庞斯和弗莱希曼的实验。例如，美国布鲁克海汶国家实验室与耶鲁大学的联合小组、美国麻省理工学院、英国哈韦尔实验室等，他们分别宣布，在冷聚变实验中既没有观察到特殊的热效应，也没有观测到中子。4 月 25 日，乔治亚理工学院首先声明，撤回他们以前关于测到中子结果的报导。他们指出，以前测到的“中子”，是由于仪器对温度敏感导致出错误的结果。4 月 27 日，庞斯和弗莱希曼也撤回了他们投向英国《自然》杂志的关于冷聚变的文章。因为他们不能给出审阅者所要求的用普通水实验的对比数据。5 月 1 日，在美国巴尔的摩召开美国物理学春季年会上，有 1500 名代表参加，除了少数几名代表发言支持庞斯和弗莱希曼的结果外，大多数物理学家都持否定态度。会后，有记者问

到会的 9 位负责人，是否认为这次会议已对庞斯、弗莱希曼的实验结果宣判了死刑，其中 8 位表示举手赞成，剩下 1 位虽然没有举手，却不意味他支持这个实验结果，只是庞斯和弗莱希曼没有到会辩护，认为缺席裁判是不公正的。5 月 7 日，在洛杉矶市召开 157 届美国电化学学会春季年会，使同行们感到遗憾的是，庞斯和弗莱希曼非但没能给出新的实验结果，反而承认他们在 射线和中子测试方面有错误。舆论普遍认为，他们过去的冷核聚变的声明是错误的。劳伦斯-利弗莫尔国家实验室甚至提出希望庞斯和弗莱希曼高价出售他们的实验设备和重水介质，以尽快解开冷核聚变之谜，这一倡议竟得到 1600 多位与会者的热烈响应。5 月 23~25 日，美国能源部和洛斯阿拉莫斯国家实验室联合在美国新墨西哥的圣塔菲召开一个规模巨大的专题讨论冷聚变的国际会议。来自 20 多个国家和地区的 450 位科学家出席了会议，其中也有中国的代表。庞斯和弗莱希曼虽被邀请，却未出席该会。大会提交的讨论报告有 100 多篇。代表来自的科研领域很广，学术气氛也很浓。发言和讨论的情况表明，一小部分仍对庞斯和弗莱希曼的实验结果持肯定态度；大部分则认为，即使有冷聚变，由于反应速率很低，只能产生极少量的中子与热量，离实用相差甚远；还有一小部分认为不存在有冷聚变。事情发展到这一步，似乎怀疑者又占了上风。在短短的几个月的时间内，冷聚变研究从陡然出现的高潮到迅速降温，其间充满了戏剧性。希望与失望、肯定与否定、支持与怀疑起伏跌宕，一时间真假难辨，前景莫测。但是，有一点是肯定的，这就是人们对核聚变的态度，已经从最初的狂热走向了成熟，冷核聚变也像其它一些学术问题一样，被人们认真严肃地探讨着。

2. 关于冷聚变的争论

庞斯和弗莱希曼冷聚变的实验结果与传统的物理观念有很大的不同，物理界，特别是核物理界对这一发现大多持怀疑态度。在意大利埃里斯“世界研究室”1989 年 4 月 12 日召开的首届国际冷聚变讨论会上，学者们提到的几方面问题最具有代表性。几年来，冷核聚变的理论与实验研究也始终围绕着这些问题进行着。

关于冷聚变的热效应

庞斯和弗莱希曼实验最引人注意的结果是，重水电解过程中所产生的大量的热。输出的热竟然比输入能量高出 4 倍，每立方厘米的钷能产生 10 瓦以上的功率，放热效应能持续 120 小时以上。他们认为，不能不把这些能量的释放归结为核聚变的结果。然而，任何一个对核物理稍微懂行一点的人，都会感到疑惑，为什么所观测到的中子数却与如此强的热效应不相符合呢？如果这个热效应确实是由氘-氘聚变反应引起，相应的中子产率应为 $10^{13}/s$ ，而在实验中却只观测到 $10^4/s$ 。对这一问题，反对者们的意见很强烈，支持者们却给予了种种方式的解释。例如，麻省理工学院的彼得·里格尔斯坦，X 射线激光的发明者，提出了一种解释，他认为，氘-氘聚变产物是激发态氦，它的能量被传送到钷晶格生热，只有少量的激发态氦-4 分裂成氦-3 和中子。庞斯在 1989 年 4 月 17 日又通过新闻发布会宣称，他们已经从电解池中测量到了大量的氦-4，其产率为 $10^{12}/s$ ，与观测到的热相匹配。然而，加州理工学院的路易斯却认为，这一含量与空气中含量相似。因为实验中用氦作冷却剂，周围空气中的氦未除净，所以庞斯测到的氦-4 是来自环境空气。

关于与普通水对比实验的争论

在意大利埃里斯召开的首届冷聚变讨论会中，不少科学家提出，为什么庞斯和弗莱希曼的实验只用重水不用普通纯水。庞斯投向英国《自然》杂志的文章也因为没有给出普通水对比的实验数据而被退回。庞斯后来用普通水做了对比实验，只产生很少的热。同样，德克萨斯 A&M 大学研究小组以及斯坦福大学的哈里斯等人也都证明，他们在普通水的实验中，只观察到极少，甚至没有热效应，对这一现象仍不能做出很好的解释。关于射线的测量聚变反应的证据除了强热效应就是中子产物，而产生中子的证明又与射线直接相关。庞斯与弗莱希曼指出，他们在 2.22MeV 附近，测量到了射线的能谱峰值，认为这是氘-氘聚变产生的 2.45MeV 的中子与溶液中质子的聚变反应生成的，从而证明了反应物中子的存在。然而，一些研究小组对此提出质疑，例如，麻省理工学院研究小组指出：庞斯和弗莱希曼所观测到的峰宽度仅只是仪器分辨率的一半，这是不可能被观测到的；中子与质子反应所产生的射线，应该在 1.99MeV 附近，有一个康普顿边峰；在由射线的强度计算中子产率上也有错误，计算值比应有值大了 50 倍；根据电视录下的射线谱图估计，射线峰应在 2.25MeV 位置上，而不是 2.22MeV 上。根据上述理由，他们认为，庞斯和弗莱希曼实验中所谓射线很可能是一个假信号。多伦多大学研究小组则认为，庞斯和弗莱希曼实验中的射线是氦衰变产物铀释放出来的。因为氦一般在地下室存在，庞斯和弗莱希曼的实验正是在地下室进行的，犹他州又有较多的铀矿，氦在地下环境中含量较大。

关于中子的测量

庞斯和弗莱希曼宣称，他们是用三氟化硼中子测试仪测量冷聚变中子的，中子产率为 4×10^4 /s。然而大多数研究组却指出，他们所做的实验却没有测到或测到极少中子。例如，布鲁克海汶国家实验室和耶鲁大学联合研究组在 7 天内只测到 2 个中子。一些小组还指出，三氟化硼测试仪对温度很敏感，重水电解时，又使周围的温度、湿度发生变化，因此，不适宜用它对冷聚变中子进行测试。1989 年 5 月 7 日在洛杉矶召开的第 157 届美国电化学学会春节年会上，庞斯和弗莱希曼也承认他们在测试射线和中子产率上有错误，原因是测试仪上出了问题。

3. 关于 μ 子催化冷聚变研究

还有一种冷聚变设想，认为 μ 子催化可引起常温下核聚变发生。

早在 1948 年，中国物理学者张文裕利用多层薄膜的云雾室研究宇宙射线与物质相互作用时发现，在 μ^- 粒子低速穿透物质时，受到原子核的正电吸引，被俘获后，代替电子绕核旋转，形成 μ 子原子。正是他们的这一发现，导致了关于 μ 子催化冷聚变的设想。一些著名物理学家，例如英国的弗兰克(F.C.Frank)和前苏联的萨哈罗夫(Sakharov, Andrey Dmitriyevich 1921 ~)曾预言，在生成 μ 子原子时， μ^- 还可能催化引起核聚变反应，而无需用高温等离子体。他们认为，把 μ 子注入氘气，所形成的 μ 子氘原子在与氘核接近时，由于前者电中性，不受核库仑斥力，因而可能进一步形成“ μ 子分子态离子”。在通常的氘气中，两个氘核平均距离为 0.74Å，发生氘-氘聚变反应的速率极小，但是在“ μ 子分子态离子”中，由于 μ 子质量是电子的 212 倍，两个氘核结合要紧密得多，平均距离将相应减小为原来的二百分之一，这就使聚变反应速率提高了 80 个数量级，因而有可

能实现冷聚变，这就是 μ^- 子催化核聚变的思想。

在实验上，首次发现 μ^- 子催化核聚变现象的是加州大学伯克利实验室的阿尔瓦雷茨 (Alvarez, Luis Walter 1911~)。1937 年，阿尔瓦雷茨从芝加哥大学获得博士学位。二战期间从事原子弹与雷达方面的工作。在加州大学伯克利实验室工作期间，曾利用格拉泽 (Glaser, Donald Arthur 1926~) 在 1952 年研制成功的气泡室 (格拉泽因此项发明获得 1960 年诺贝尔物理学奖) 测定出大量寿命极短的共振粒子。为解释这些共振粒子的存在，导致美国物理学家盖耳曼 (Gell-Mann, Murray 1929~) 和以色列物理学家尼曼 (Neman, Yuval) 几乎同时独立地提出关于重子分类的理论。由于在粒子物理方面所做出的决定性的贡献，以及在发展气泡室和数据分析技术的应用中所发现的大量的共振态，阿尔瓦雷茨获得 1968 年诺贝尔物理学奖。盖耳曼也因对基本粒子相互作用及分类方面的贡献而获得 1969 年诺贝尔物理学奖。1957 年，阿尔瓦雷茨研究组在伯克利实验室利用液氢气泡室，研究了 K 介子相互作用。当时 K 介子束流的质量较差，混有大量的 μ 子，然而，正是这些不受欢迎的 μ 子，导致了惊人的发现。在实验中， K^- 介子衰变为 $\pi^- + \bar{\nu}$ ，反应中释放的 μ 子应该具有 4.1MeV 的能量。令人惊异的是，阿尔瓦雷茨观察到所释放的 μ 子出奇地具有相同的能量，即都是 5.4MeV。这实际上是 μ^- 子诱发质子-氘的聚变反应。当 μ^- 在液氢中慢化至能量只有几个电子伏时，先形成 μ^- 氢原子， $\mu^- + H (P_2) + e$ ，由于液氢中含有氘分子，随后 μ^- 转移到氘上，形成 μ^- 氘原子 (p_2^-) + d (d_2) + p_0 (d_2) 与氢原子相碰，形成 (pd_2^-) 分子， μ 子比电子重约 200 倍，使 μ^- 束缚的分子 (pd_2^-) 尺寸很小，两个核非常接近，容易发生核聚变反应，(pd_2^-) $^3\text{He} + \mu^- + 5.4\text{MeV}$ ，所释放出来的 μ^- 重新再引起新一轮核聚变反应。由于 μ^- 起到了像化学反应中催化剂那样的催化作用，称这类核聚变为 μ 子催化核聚变。 μ 子催化核聚变的发现，曾一度燃起人们的希望，但美国普林斯顿大学杰克孙研究的结果却给人们泼了一盆冷水。1957 年，杰克孙作出估算， μ 子的寿命为 $2.2 \times 10^{-6}\text{s}$ ，它一生中只能催化 100 次核聚变，获得的总能量输出最多只有 2GeV，但是若用加速器束流来输入能量，每产生一个 μ^- 子，得需要 10GeV 的能量。这表明，输入要大于输出。如果再计入核聚变释放的核能转换电能使用的其它能量损失，输出的有效能量就会更小，显然用 μ 子催化核聚变方式，解决人类能源匮乏的问题还有许多问题有待解决。

70 年代末，又有一个新的理论预言，在氘-氘混合体中，有可能完成快速的 μ 子催化核聚变。1982 年，美国洛斯阿拉莫斯介子物理实验室在氘-氘混合体中观察到了每个 μ 子催化的聚变反应平均达 150 个，聚变产额甚至超过了理论预期值。尽管机制还不很清楚，这个结果却又重新激起人们对 μ 子催化核聚变的希望。目前，美国洛斯阿拉莫斯国家实验室、英国卢瑟福-阿普尔顿实验室、加拿大三所大学的介子实验室及日本的高能物理实验室正进行此项研究。 μ 子的半衰期太短，尽管由它催化的核聚变反应离实用还太远， μ 子催化实验却给人们以有益的启示，即启发人们寻找寿命更长、带负电且质量较大的准粒子，以进行大规模的催化聚变反应，这一课题已成为当前受控核聚变研究的热点之一。

五、天体物理学与宇宙学的进展

(一) 天体物理学的进展

1. 行星研究的三部曲

在 17 世纪，以牛顿力学和万有引力定律的发现为标志的这一历史时期，人类对行星的研究常常被形容为对行星各层次研究的三部曲。这三部曲的主角依次为第谷、开普勒和牛顿。第谷 (Tycho, Brahe 1546 ~ 1601) 是最后一位也是最伟大的一位用肉眼进行观测的天文学家。他出身于一个瑞典血统的丹麦贵族之家，13 岁即进入哥本哈根大学学习法律与哲学。在 1560 年，一次偶然观测日蚀后，转向了天文学与数学研究。他做出的第一件引人注意的事，是在 1563 年发现了木星最接近土星的时间，比西班牙君主阿尔丰沙十世 (Alfonso X of Castile 1221 ~ 1284) 在世时，制定的行星表预计的时间相差有 1 个月。在这以前，人们使用阿尔丰沙十世的行星表长达 300 年之久。这件事后，第谷开始着手修定行星表，他所制作的新行星表定位精度达到了 30 弧秒。第谷做出的第二件有名的事，是在 1572 年观测到一次星球爆发，后人称它为第谷星，这是继 1054 年中国人首次观测到的新星之后的第二颗新星。第谷首次引入“新星”这个概念，他通过视差测量出这颗新星比当时人们认为的宇宙边界要远得多，这是对亚里士多德的“天空是完美无缺和永恒不变的”观点的有力冲击。第谷第三件有名的事是对彗星的研究。1577 年，第谷对天空出现的一颗巨大彗星研究的结果表明，它不仅来自当时人们认为的“天界”之外，其运行也有特定的轨道。这不仅再次冲击了亚里士多德的天空观念，而且与伽利略坚持的“彗星不能与其它天体的永恒性和规律性相比，它仅仅是一种大气现象”的说法大相径庭。第谷一生对行星的观测，积累了有关行星的位置及运行的大量数据，它们达到了前所未有的精确程度。在丹麦国王腓特烈二世的支持下，第谷在丹麦与瑞典之间的赫维恩岛上，修建了人类第一座天文台。他还不惜工本地建造了一个直径 5 英尺的天球仪。1597 年，第谷应德国国王鲁道夫二世之邀，离开丹麦前往布拉格新区定居，此行使他发现了开普勒这位德国青年助手。

开普勒 (Kepler, Johann 1571 ~ 1630) 1588 年毕业于德国蒂宾诺大学。1591 年获得该校硕士学位。他在数学上的才华很快地崭露头角，1597 年开始担任第谷的助手，替他制作行星运行表。1601 年第谷去世后，开普勒继承了一大批非常宝贵的资料。他以这些观测结果为基础，计算出一个能描述星体运行的体系。一开始，他把大量精力用到了行星运行的正多面体理论之中，几年之后才发现，这一理论不适用第谷观测的结果。后来，他从希腊数学家阿波洛尼乌斯 (Apollonius B.C. 262 ~ 190) 的圆锥曲线那里受到启发，终于发现，第谷观测到的火星位置与椭圆轨道符合的精度很高，而太阳恰好位于椭圆轨道的一个焦点之上。以后，他陆续找到其它行星的椭圆轨道，太阳则总在这些轨道的焦点之上。1609 年，开普勒在《新天文学》一书中，公布了他对行星按椭圆轨道运行的研究成果，这就是现在的开普勒第一和第二定律。开普勒第三定律发表在另一部著作中。以后，开普勒根据第谷的观测资料和他的椭圆轨道理论，终于制作成功了新的行

星运行表。这一部运行表发表于 1627 年，在书的扉页上，开普勒写了献辞，以纪念他的导师第谷。在行星表的计算中，开普勒首次采用了苏格兰数学家耐普尔（Napier, John 1550 ~ 1617）所发明的对数。耐普尔的对数表发表于 1614 年，由于对数大大简化了繁琐的数字运算，像计算机给予现今科学技术以巨大冲击一样，对数的发明也给予当时的科技发展极大的推动。

尽管开普勒以惊人的洞察力和坚韧不拔的精神，在第谷大量的资料中找到了行星运行的三大定律，尽管开普勒的理论使延续两千多年的圆运动的神圣不可侵犯受到了冲击，但是开普勒却没能对这一运行规律做出解释。显然，是太阳在以某种方式支配着行星的运动，为此，开普勒曾沿用英国物理学家吉尔伯特（Gilbert, William 1544 ~ 1603）的看法，认为使行星保持在一定轨道上的是一种来自太阳的“磁性引力”。直到半个世纪之后，才由牛顿提出了一个满意的解释。

从古代到中世纪，人们都信奉亚里士多德的哲学，认为天地受不同体系自然规律支配，地上的一切是可变的、污浊的，而天上的一切是永恒的、光辉的，天上与地下万物各自遵循迥然不同的运动法则。牛顿却大胆地提出，天地二者的规律是完全统一一致的。在他的《自然哲学与数学原理》一书中，牛顿首次提出，在没有其它外力的作用下，天体受到“第一次推动”之后，将始终维持惯性运动。牛顿还根据他著名的运动三定律，导出了地球与月球的引力规律，由此提出了著名的引力定律，并认为这一规律适用于宇宙万物任何两物体之间。一个世纪之后，卡文迪许确定了引力常数 G 值，从而得出了地球的质量数值。以后，又据此值估算出来木星与土星的质量，这些估算值都相当准确。牛顿万有引力定律的成就是空前的，它不仅对开普勒三定律做出了解释，还能解释当时人们所知道的一切天体运动。它解释了二分点岁差的成因，甚至还说明了开普勒也没解释清楚的月球运动的复杂变化。牛顿甚至还预言了引力对人造卫星运动的控制方式。牛顿的成就使天文学脱离了单纯的观测与测算，从单纯描述天体运行的经验规律上升为认识天体相互作用的普遍规律。它使一个半世纪前，由哥白尼开创的科学革命迈向又一个更高的顶峰，这是人类几千年来，对行星运动认识从现象到本质的巨大飞跃。在这一巨大飞跃中，人们认识到了天文学研究在天文观测、资料积累、资料处理分析、模型建立、理论的得出等步骤的分工、衔接以及循环提高的意义。

2. 恒星层次的研究——天体物理学的建立

本世纪初，继第谷—开普勒—牛顿时后，天文学再一次的重大突破反映在恒星演化理论的建立之上。

在 19、20 世纪之交，人们已记录有 6 万颗恒星的位置与亮度，精确测量了数以千计的恒星的物理参量，建立了有关恒星亮度、光谱、颜色、位置及由位置微小变化所导出的“视差”与自行的定量标准。在此基础上，积累了近 10 万颗恒星的光谱分类资料。

1905 年，丹麦天文学家赫兹普龙（Hertzsprung, Ejnar 1873 ~ 1967）从拍摄的照片上发现恒星的颜色与亮度间的内在关系。这一现象还由美国天文学家罗素（Russell, Henry Norris 1877 ~ 1957）独立发现。赫兹普龙把这一关系表述在“光谱型—绝对星等图”中。他用横坐标表示恒星表面温度的对数，将纵坐标与恒星表面亮度的对数成正比，恒星的对应点居然大部分集中在一条斜线的附近，这就是后人所称的赫茨普龙-罗素图。该

图表明，恒星沿着一条生命线演化，这无疑是恒星内部物理结构以及各恒星间某种演化关系的反映。如果说在早期人们还没有意识到恒星研究与物理学之间有任何联系，赫兹普龙与罗素的发现却使人们开始意识到，恒星的演化必然遵循某些规律，这些规律一定与恒星结构及演化中从外界获得的关键物理信息有关，这无疑把恒星的研究导向了天体物理学方向。

3. 玻尔的氢原子模型与天体物理学进展 德国物理学家基尔霍夫 (Kirchhoff, Gustav Robert 1824~1887) 是较早注意到恒星颜色与亮度的人。1854年，他在海德堡大学担任物理学教授时，便与本生 (Bunsen, Robert Wilhelm E-berhard 1811~1899) 共同研制成功第一台分光仪，并把它用于光谱学研究。1859年，他们用这种方法发现了铯元素，这一发现于1860年发表。1861年又发现了元素铷。很快地，基尔霍夫又通过对太阳吸收光谱研究了太阳的化学组成，而且发现太阳某些元素的谱线具有一定的规律，特别是氢元素的谱线，随着波长的减小，靠得越来越近。他还发现，钠光谱的亮双线位置上，恰好对应太阳光谱中夫琅和费标有D线的暗线位置上，他使用太阳光和钠光同时照射狭缝，希望能在纳线位置上得到补偿，不想暗线变得更暗了。这些实验使他得到了谱线吸收的基尔霍夫定律。对太阳光谱的研究成果，使基尔霍夫一举成名。基尔霍夫的财产保管人，一位银行家曾问基尔霍夫，“如果不能把太阳中的黄金取到地球上来，发现它又有何用呢？”当基尔霍夫因其研究成果被英国授予一枚奖章和一笔金镑，他把它们交给这位银行家保管时，曾风趣地说：“这不就是太阳的黄金吗？”事实上，“太阳的黄金”的价值远非如此，基尔霍夫研究的成果不仅使人们找到了获得“外部世界”信息的方法，它们也成为人们研究原子“内部世界”的向导。

基尔霍夫对太阳谱线的研究引起了瑞士数学家和物理学家巴耳末 (Balmer, Johann Jakob 1825~1898) 的注意，巴耳末为氢元素谱线系的波长提出了一个简明的公式表述，这个公式发表于1885年。由于他未给出这个经验公式的任何解释，在提出后的20年内，一直未引起人们的注意，直到玻尔把这个公式作为他提出的氢原子结构理论的证据时，人们才看到了巴耳末公式的重要性。

1913年，玻尔以《论原子与分子的构造》为题，发表了三篇论文。在这些论文中，玻尔强调了他的基本观点，这就是当体系在不同定态间过渡时，不能应用普通的力学处理，这一过程伴随着辐射，辐射的频率与发射能量关系将由普朗克理论确定。根据这一准则，玻尔不仅建立了氢原子模型，而且进一步由此解释了谱线的结构。尽管玻尔的氢原子模型还太简单，尚不足以说明更复杂的原子结构，也不能说明谱线的精细结构，尽管这一理论还需做出进一步的修正，但仍不失为用原子结构解释谱线，又反过来用谱线解释原子结构的首次成功的尝试。早在玻尔开始研究原子结构以前，原子光谱就不仅是实验物理的热门课题，而且也是天体物理学的重要课题。当人们通过普通光源实验观察到12条巴耳末线系时，就已经在星体光谱中见到33条了。对玻尔理论发展的促进也正是来自天文学。1896年，美国天文学家皮克林 (Pickering, Edward Charles 1846~1919) 与其弟亨利·皮克林在秘鲁他们共同修建的天文台观测到了一组特殊的星系谱线，它们不能应用玻尔理论解释，这些谱线后被称为皮克林谱线。为此，玻尔又大胆地断言，巴克林谱线系不是属于氢而是属于氦的，玻尔用一个公式，

$$\text{即 } \frac{1}{\lambda} = R \left[\frac{1}{(n_1/2)^2} - \frac{1}{(n_2/2)^2} \right]$$

为这些谱线系做了统一的表示，并认为星体大气环境中，由于氢、氦的混合，氦更容易以离子形式存在。玻尔的研究成果在天体物理学的进展中拥有着特殊的意义。按照玻尔理论，原子体系平衡与稳定的原因，是由于静电吸引力与“电子量子性所决定的排斥力”相平衡的结果。所谓“量子性所决定的排斥力”即为以后所称的简并压力。玻尔的研究，还使人们认识到各种宏观物态之所以稳定存在的微观依据。正因如此，玻尔的理论也成为人们研究各种星体稳定体系的依据。人们对各种稳定体系的概括

：静电力+简并压力 原子、分子液体、固体、星际尘埃、小行星等

引力+简并压力 行星、白矮星、中子星等

引力+热压力 主序星、红巨星等

正是把玻尔的原子平衡思想直接推广到星体尺度世界的结果。4. 恒星演化理论与核天体物理学的建立 1812年，德国物理学家夫琅和费（Fraunhofer, Joseph Von 1787 ~ 1826）在测试他用玻璃制造的棱镜时，发现了太阳光谱中的暗线，由此，开始了对太阳吸收光谱的研究。夫琅和费所观察到的太阳光谱暗线共 576 条，统称为夫琅和费暗线。他把其中比较明显的暗线用字母加以标识，并应用衍射原理计算出这些暗线对应的波长。他首次使用光栅作为色散装置，并注意到一些其它恒星光谱中暗线的位置并不完全与太阳的相同，但这一发现并未引起当时人们的重视。在夫琅和费发现的 100 年以后，德国天文学家魏茨泽克（Weizsacker, Carl Friedrich, Baron Von 1912 ~ 1938）又独立地发展了恒星能源机制的理论。他认为，形成太阳系的原始尘埃并不像康德-拉普拉斯最初提出的那样，只是一种单一的系统，而是一种涡旋系。这种涡旋系逐步演化成为一种较稳定的同心圆环状体系。每个圆环内还有数个涡旋，环与环之间，涡旋与涡旋之间还有一些次级的涡旋，行星即在其中形成。魏茨泽克这一理论的重要思想是，认为行星的形成乃是恒星演化中的一个组成部分，宇宙间的行星系统是伴随众多恒星而形成的。1937年，魏茨泽克提出了关于太阳辐射能源机制的解释。他认为，太阳的辐射能源主要来自 4 个氢核聚变为氦核的过程，称为 p-p 反应。此外，他还研究了关于宇宙学及恒星演化的若干问题，认为宇宙起源于由氢元素组成的超巨质量恒星，其上其它元素皆由氢演变而成。随着这个巨大的“氢球”爆炸，带有其它元素的碎片四散开来，逐渐演化成现今的宇宙。魏茨泽克的“大爆炸”思想给以后的研究以重要的影响。与魏茨泽克同时，美国物理学家贝特（Bethe, Hans Albert 1906 ~ ）也独立地提出了恒星机制的理论。贝特曾在法兰克福大学学习物理，毕业后在慕尼黑大学研究理论物理学，并于 1928 年在该校获得博士学位。1933 年，希特勒执政期间，他离开德国到英国任教，后又受聘到美国康奈尔大学工作。1936 ~ 1938 年，贝特与他的合作者发表专著《原子核物理学》，这部巨著澄清并系统地整理了关于核力、核结构以及核反应的理论，成为后人长期参考并引用的经典之作。1938 年，贝特提出了关于恒星能源机制的碳循环设想。他认为一个碳-12 核相继与 3 个氢核（质子）反应，形成氮-15，再通过与第四个氢核聚变，生成一个氦核（ α 粒子）和一个碳-12，并释放能量。由于这一理论的提出，贝特获得了 1967 年诺贝尔物理学奖。

在同一时期，对恒星能源机制研究做出重要贡献的还有美籍苏联物理学家伽莫夫 (Gamov, George 1904 ~ 1968)。伽莫夫早年从事原子核物理研究，1928 年曾提出核衰变理论。1936 年建立了衰变的伽莫夫-特勒选择定则。1938 年以后，伽莫夫转向天体物理学研究，专门研究恒星的核能源机制与恒星的演化。他曾对魏茨泽克所设想的早期宇宙的氢核燃烧阶段提出质疑。他认为超巨球体的自身是极其不稳定的，进而伽莫夫与他的合作者提出了热大爆炸学说的宇宙早期模型。大爆炸学说不仅成功地解释了许多天体物理的观测结果，而且促进了以研究恒星演化过程及能源机制为核心的核天体物理学的进展。在贝特与魏茨泽克分别提出太阳能量来源于其内部的 p-p 核反应以后，很自然地使人们面临一个新问题，重于 ${}^4\text{He}$ 的原子核是如何产生的？伽莫夫的理论也面临同样的问题，因为不存在质量为 5 和 8 的稳定元素，这表明，大爆炸的最初，核的合成应终止到 ${}^4\text{He}$ ，因为氦核不能俘获一个质子或另外的一个氦核形成新的稳定的原子核。似乎重元素需要在极高温、极高压、极高密的环境下才能生成，然而根据伽莫夫最初的理论，大爆炸宇宙是急剧膨胀的，它的整体温度与密度将持续不断地降低，如何在宇宙进展的环境下有新的重核形成，显然是一个问题。

5. 元素合成理论与天体核反应研究

早在上一世纪后期，人们就对元素及其同位素在自然界的丰度进行了研究。从 1883 年到 1924 年，美国地质调查局总化学师克拉克 (Clarke, Frank Wigglesworth 1847 ~ 1931) 在地壳厚度 16 千米的范围内，广泛地调查了地壳的化学组成，发表了地壳中化学元素的丰度调查结果。此后，又有人收集了大量的陨石、太阳、其它恒星、星云的各种元素及同位素分布的资料。曾致力于研究同位素理论、特别对重氢研究做出重要贡献的美国物理学家与化学家尤里 (Urey, Harold Clayton 1893 ~ 1981) 在 1956 年，根据地球、陨石及太阳的资料绘制出更为详细、更为标准的元素丰度表，这一资料已成为元素合成理论的重要依据之一。从尤里的研究结果看出，元素及其同位素的分布是极其复杂又有一定规律的。这一规律一方面来自原子核结构的规律性，一方面又与元素的起源及演化史密切相关。任何有关元素起源与合成的假说都必须首先能解释这一分布的规律性。

早期提出的元素起源与合成假说有平衡过程假说、中子俘获假说与聚中子裂变理论，它们都试图用单一过程解释全部元素的成因，最后都因矛盾百出不能自圆其说而失败。较为成功的元素核合成假说，是本世纪 50 年代提出的 BBFH 理论。BB 代表伯比奇夫妇，伯比奇 (Burbidge, Eleanor Margevet 约 1925 ~) 为英国女天文学家、格林威治天文台第一任台长，长期致力于类星体和元素在恒星深处的核合成理论研究。1955 年伯比奇的丈夫受聘到美国加州帕萨迪那附近的威尔逊山天文台工作，伯比奇到加州理工学院任教。与伯比奇夫妇一起提出元素合成理论的还有美国核天体物理学家否勒 (Fowler, William Alfrad 1911 ~) 及英国天文学家霍伊尔 (Hoyle, Sir Fred 1915 ~)。他们以尤里提出的元素丰度分布曲线为出发点，以核聚变理论为基础，认为宇宙间全部元素并非由单一过程一次形成，而是通过恒星各个演化阶段的相应八个过程逐次形成的。这八个过程是：氢燃烧，在 $T \sim 7 \times 10^6\text{K}$ 条件下，四个氢核聚变为氦核的过程；氦燃烧，即 $T \sim 10^8\text{K}$ 条件下，氦核聚变为碳核和氧核、氦核等的过程； α 过程， α 粒子与氦核反应，相继生成镁、硅、硫、氩等元素原子核；e

过程，元素丰度曲线上的铁峰元素（钒、铬、锰、铁、钴、镍）等生成；
s 慢中子俘获过程； γ 快中子俘获过程。这后两个过程分别简称 s 过程和 γ 过程，通过它们生成比铁重的元素； β 生成低丰度的富质子同位素的质子 p 的俘获过程，以及 β 生成低丰度轻元素（如氘、锂、铍、硼等）的 X 过程。BBFH 理论发表以后，不断得到核物理、天体物理以及宇宙化学等领域新成就的补充与修正，例如补充了碳燃烧、氧燃烧和硅燃烧等新过程，大爆炸宇宙学又为氦的丰度较大提出了进一步的解释。

近年来核天体物理学的一个研究热点是恒星晚期，特别是新星爆发附近阶段中较重元素的合成问题。在这个阶段，由于参与 s 过程的全部核素集中于 β 稳定谷附近，利用现有的核实验装置即可得到一些个别的核反应并测出其反应率，再计入所观测到的天文环境，人们可以建立过程模型，力图利用它拟合观测到的元素丰度。1956 年以来，核物理学曾预言存在有一个稳定的超重元素岛。岛中心的原子核是中子数和质子数填满闭壳的双幻核（ $Z=114, N=184$ ）。这个核非常稳定，其自发裂变的寿命估计可达 10^{19} 年。在其附近的原子核对于自发裂变、 α 衰变也比较稳定。除了这个超重核的稳定岛外，核物理学还预言存在另一些更重超重核的稳定区。理论预言，对于这些更重的超重核，由于库仑势能加大，发射 α 粒子的能量、裂变平均动能以及每次裂变释放的中子数都将比常规核情况大得多。证实这些预言存在与否都将是对原子核理论的检验。目前，物理学家正试图通过对 β 过程的研究解开这个谜。由于 β 过程产生远离 β 稳定线中子大量过剩的核，在实验室条件下，难以测量其反应截面，因此常利用地下核爆炸进行 β 过程研究。到目前为止，在规模巨大的天体核反应研究方面，虽然在确定核反应截面的工作上取得一些成果，从而丰富了人们对于天体核反应规律的认识，但这种认识毕竟是很初步的，因为对于恒星晚期进行的核反应，至今还不能在实验室条件下研究，对于它们的抛射物化学成分还需要做进一步的了解和解释。本世纪 90 年代以来，人们正开始采用超巨型计算机，进一步启用更新的核物理实验装置，将发射空间红外望远镜以探测原始星系初始核合成，哈勃望远镜将收集关于恒星在可见光及紫外波段的更高分辨率的观测资料，人们还将建造规模更为宏伟的同位旋实验室，以期获得目前难以得到的不稳定核。以上这些规划与进展不仅可以从实验上和理论上探讨核天体物理问题，而且还能加深人们对宇宙演化的认识。

6. 太阳中微子事件研究

1931 年，泡利为解释 β 衰变能量与动量的守恒问题，提出可能存在某种未知的中性粒子。1933 年，费密进一步研究了泡利的假设，把这个未知粒子定名为中微子。1953 年，美国物理学家科恩（Cowan, Clyde Lorrain 1919~）和莱因斯（Reines, Fred-erich 1918~）利用 $\nu_e + p \rightarrow e^+ + n$ 的俘获过程证实了反中微子的存在。1955 年戴维斯（Davis）在布鲁克海汶国家实验室又成功地观测到 $\nu_e + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow {}^{37}\text{Ar} + e^-$ 的俘获过程，证实了电子型中微子的存在。1962 年丹比（Danby）等人发现，在 π 介子蜕变中产生的中微子与电子型中微子不同，将它命名为 μ 子中微子 ν_μ 。1976 年，随着 ν_μ 粒子的发现，人们又提出第三种中微子 ν_τ 存在的假设。

中微子与物质的作用极弱，在通常的物质密度条件下，它的平均自由程约为 1000 光年。这表明，研究中微子的意义不仅在于它能为核物理中的

弱相互作用理论和中微子的某些自身属性提供资料，还由于它能把太阳内部信息有效地传递出来，人们通过对太阳中微子通量和能谱的精确测量，得到有关太阳内部能量产生机制的重要参量，如温度范围、离子密度、化学成分等。在天体演化的后期，如太阳情况，高温的膨胀作用与引力的聚缩作用，使太阳处于流体的静力学平衡状态，其中心区域，高温环境下的热核反应，产生大量电子和正电子，它们相撞湮灭过程转变为中微子和反中微子 $e^+ + e^- \rightarrow \nu + \bar{\nu}$ ，此外，还有光生中微子 $\gamma + e \rightarrow \nu + \bar{\nu} + e$ 产生，以及等离子体中传播的光子蜕变为中微子。当星体的温度高到一定程度（1 亿到 10 亿度以上）时，上述将成为星体耗散能量的主要过程。理论计算表明，当温度达到 100 亿度时，仅只电子与正电子湮灭过程，能量耗散率就可达 10^{25} 尔格/立方厘米·秒，因此一定温度的天体仅在毫秒的短暂时间内，通过中微子对的产生，即可耗尽天体的能量。对星体中微子耗散能量研究较早的有伽莫夫和熊堡。他们认为，在 β 衰变和反 β 衰变 $(Z, A) \rightarrow (Z+1, A) + e^- + \nu_e$ 和 $e^- + (Z+1, A) \rightarrow (Z, A) + \nu_e$ 过程中，电子热动能将随中微子对的产生而释放出来。他们用巴西的一个赌场名字 URCA 命名这一对过程，以比喻电子能量流失的神速。

由于中微子的产生与逃逸，巨大能量损失导致星体的引力塌缩。内缩物质与硬核心碰撞后，反弹所形成的冲击波可能导致超新星的爆发。此外，中微子的产生又维持了星体核聚变过程的中子数平衡，使核聚变、核合成和中子化过程得以持续进行。可见中微子在天体演化中伴演了极其重要的角色，研究与探测中微子成为天体物理学的重要课题之一。

超新星爆发的中微子虽然流量很大，但是产生的频数极小，持续的时间极短，俘获它们极为困难。太阳是一个强大而持续的中微子源，在太阳中心区域进行着两个热核反应序列，它们分别是质子-质子反应链和碳氮氧反应链。按照有关理论，第一个反应链是太阳核反应的主要序列，它包含有四个核反应，分别是 $p+p \rightarrow {}^2\text{H} + e^+ + \nu_e$ ， $p + e^- + p \rightarrow {}^2\text{H} + \nu_e$ ， ${}^7\text{Be} + e^- \rightarrow {}^7\text{Li} + \nu_e$ ， ${}^8\text{B} \rightarrow {}^8\text{Be} + e^+ + \nu_e$ 。其中第一个反应决定着 p-p 链整个过程的速率，然而这一过程的反应截面相当小，不可能用实验方法确定。p-p 链的四个核反应产生四组中微子，它们在地面上的流量可达 10^{10} /秒·厘米²数量级。探测它们，不仅是获得太阳内部信息的唯一途径，也是研究天体演化的重要手段。

早在 1946 年，意大利物理学家蓬蒂科尔沃就提出了一种探测中微子的方法。他指出： ${}^{37}\text{Cl}$ 可以通过弱作用吸收一个高能中微子，经发射一个电子后，衰变为 ${}^{37}\text{Ar}$ ，即发生 $\nu_e + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow {}^{37}\text{Ar} + e^-$ 的核反应，若利用 ${}^{37}\text{Cl}$ 探测到 ${}^{37}\text{Ar}$ ，就证明探测到中微子存在。1948 年，加利福尼亚大学的阿尔瓦雷斯 (Alvarez, Luis Walter 1911 ~) 也独立地发现了这一方法，并在 1949 年提出一个测量太阳中微子俘获率的实验方案。从 50 年代末起，美国布鲁克海汶实验室的戴维斯等人就着手进行太阳中微子测量。为减少宇宙射线本底，他们把实验场地选在南达科他州的霍姆斯塔克金矿的大约 1500 米深的矿井中。探测器为一个装满 40 万立升的纯过氯乙烯溶液的巨大钢瓶，它相当包含 2.2×10^{30} 过氯乙烯分子。氯的天然丰度决定了在每一个过氯乙烯分子中的四个氯原子中，就有一个 ${}^{37}\text{Cl}$ 。 ${}^{37}\text{Cl}$ 俘获中微子反应有 0.81MeV 的阈值，所以实验探测的主要是 p-p 链中的 ${}^8\text{B}$ 中微子。 ${}^{37}\text{Cl}$ 俘获中微子后

产生的 ^{37}Ar 是不稳定的，半衰期为35天，但当把过氯乙烯在太阳中微子场中放置大约15天以后，溶液中生成的 ^{37}Ar 数就会达到平衡。理论上估计，平衡后，探测器中的 ^{37}Ar 原子数应有50个。从1964年以来，戴维斯一共进行了49次观测，每一次找到的 ^{37}Ar 原子数均不超过10个，扣除背景后，折合太阳中微子单位只有 $1.6 \pm 0.48\text{SNU}$ ($1\text{SNU}=10^{-36}$ 个中微子俘获/秒·靶核)，这个值只是太阳标准模型理论预言值 4.7SNU 的三分之一。

戴维斯等人的测试结果引起物理学界和天文学界的极大关注。人们首先对理论值的正确性产生了怀疑。20年来，对所谓“中微子失踪”的解释众说纷纭，其中主要的说法有：太阳中心的温度实际应低于标准模型给出值。 ^7Be 中微子与 ^8B 中微子对温度十分敏感，如果太阳温度比给出值低10%， ^7Be 中微子与 ^8B 中微子的产生率即可足以解释实验结果。中微子有可能有微小磁矩，逃离太阳时，受电磁作用损失能量，使它不能与 ^{37}Cl 发生作用。中微子自身因“老化”而损失能量。可能有自由夸克存在，它们对p-p反应的催化作用，减少中微子通量。中微子的质量不精确为零。根据弱电统一模型理论，只有小于临界能量 E_0 的中微子 ν_e 才能被观测到，能量大于 E_0 的中微子与太阳物质作用，转化为 μ 型中微子 ν_μ ，因而观测不到。在太阳中微子事件的研究中，很重要的一点涉及到了中微子的质量问题。理论研究结果表明，静止质量非零的粒子若自旋为 $1/2$ ，将可能具有四种状态，即正粒子的自旋分别平行和反平行于动量的右手态和左手态，加上反粒子相应的两种态。这四种态组成四分量，而零质量粒子则只具有二分量，即正粒子只有左手态，反粒子只有右手态。中微子的自旋为 $1/2$ ，若质量非零将具有四种态。最近研究的一种观点认为，左手中微子与右手反中微子虽然在通常的弱作用过程可以借助左手中间玻色子媒介产生，然而在一种更弱的超弱作用中，借助右手中间玻色子却可能产生右手中微子与左手反中微子。因此，从本质上说，中微子应是四分量的，所说它是二分量粒子，仅只是略去超弱作用过程的一种近似。

如果说中微子同时具有左、右手态，那将不存在任何使其质量为零的禁戒，e型、 μ 型与 τ 型中微子的质量也将不再严格彼此相等，并且三者之间将会发生跃迁，例如e型中微子经过一段距离，可能转变为 μ 型中微子，再经过一段距离，又可能转变回e型中微子，这种现象称为中微子振荡。中微子振荡的可能性首先由庞特科夫在1967年提出。然而由于三种中微子属于不同“味”的轻子，人们很关心，当它们以一定的几率振荡时，是否会破坏轻子“味”的守恒关系，因此，中微子振荡无疑地与轻子“味”守恒、中微子质量密切相关。对于它们的研究，不仅有助于对中微子性质的认识，也有助于对弱作用基本规律的认识，此外，由于中微子在天体演化，甚至宇宙早期阶段所伴演的重要角色，对中微子的深入研究更有助于人类对宇宙及天体的演化规律的深入认识。

7. 中子星的研究

有一种看法认为，晚期恒星逐级热核反应直至进行到合成铁。引力塌缩致使核中心部分中子化，所放出的大量中微子将会把富含铁核的星体外壳压碎，产生猛烈的超新星爆发，被压碎的外壳形成星云状超新星遗迹，而中子化的核心则形成中子星。最早提出中子星设想的是前苏联著名物理学家朗道(Landau, Lev Davidovich 1908~1968)。1932年，英国物

理学家查德威克发现中子的消息传到哥本哈根不久，正在丹麦访问的朗道就预言，可能存在由中子组成的致密星体。1934年，以超新星为主要研究领域的德国-美国天文学家巴德（Baade, Walter 1893~1960）和瑞士天文学家兹维基（Zwicky, Fritz 1898~1974）分别提出，在超新星爆发之后，其核心将形成中子星。1939年，美国物理学家奥本海默与沃尔科夫根据广义相对论进一步求出了中子星的结构。但是对中子星观测的进展却进行得十分缓慢。普通的恒星在辐射性质上，近似一个绝对黑体，其光学波段的温度约相当1000K。根据斯特藩-维恩定律，恒星表面单位面积的辐射功率正比于其绝对温度的4次方。然而中子星非常致密，其表面积积极小，即使应用现代望远镜，一般也无法观测到。此外，中子星已不具备可供核反应的燃料，不能像普通恒星那样发出明亮的光，对中子星的观测确实成为一个难题。

近年来对中子星理论研究的发展，提供了对其观测的有效途径，途径之一就是短标研究。中子星极小，其直径 l 大约只有十几到几十千米，其上若发生某一瞬间现象，在地球上将可能观测到该现象持续 $\sim l/c$ 一段时间，在地球上若能观测到这种短标的变光现象，将有可能与中子星有关。途径之二是天体电磁场研究。由于每个中子具有磁矩，顺向排列的中子将使中子星具有 10^5 特斯拉的强磁场。随着中子星的转动，还会感应强电场。因此，伴随中子的变化过程，常有极强的电磁能量辐射，这种辐射可能在X射线或 γ 射线波段。随着空间技术的进展，在大气层外上空的X射线和 γ 射线天文卫星将成为观测中子星的重要工具。

迄今为止，人类发现的中子星近两千多颗，其中为数较多的是脉冲星和 γ 射线爆两大类。脉冲星的发现有赖于英国射电天文学家赖尔（Ryle, Sir Martin 1918~）的基础性工作。二战期间，他从事雷达研究，战后在剑桥的卡文迪许实验室担任研究员，研究射电天文学。1948年他发现了强射电源——仙后座A。在他领导下，剑桥射电天文小组进行了系统的巡天观测，编写出一系列射电源表。其中的第三表对发现类星体至关重要，正因如此，人们对最初发现的类星体都冠以“3C”字样，意为剑桥第三表。1960年，为提高射电望远镜的分辨本领，赖尔设计成功具有独创性的观测系统，其中最突出的是，两天线最大变距为1.6千米的综合孔径射电望远镜，使分辨本领达到了最佳水平。1967年，剑桥大学建造了占地2万多平方米的 16×128 个偶极天线阵，用以研究短标的星际闪烁过程，工作波段在81.5MHz。利用这一装置，于1967年7月，英国天文学家休伊士（Hewish, Antony 1924~）和他的研究生贝尔观测到，来自织女星和河鼓两颗恒星间某处周期稳定而短暂的射电脉冲。经系统观测后，它的详细情况于1968年2月报导了出来，并将所发现的星体定名为脉冲星。此后，他们又检查了早期的一些类似观测，又确定出另外三颗脉冲星的位置。自此，脉冲星被陆续地发现。由于首批脉冲星的发现，休伊士与赖尔荣获1974年诺贝尔奖金。

第一颗脉冲星发现的当年，奥地利-英国-美国天文学家和宇宙学家戈尔德（Gold, Thomas 1920~）就给予了脉冲星以正确的解释。他认为，脉冲星的周期如此之短，又异常稳定，唯一的解释只能是一颗快速自转着的中子星。他应用广义相对论理论，初步计算出中子星的直径约为1千米，质量却比太阳还大，并预言，它的自转速度将不断减慢，脉冲周期应逐渐

加大。戈尔德的大部分预言均被以后的观测所证实。第一批脉冲星被发现不久,于 1968 年斯塔林与莱芬斯坦又发现了最著名的脉冲星,即蟹状星云中心星 PSR0531+21,它的闪烁周期为 0.0331 秒,能在射电、红外、可见、X 射线及 γ 射线等波段发出脉冲辐射。根据这颗脉冲星周期变化及蟹状星云膨胀速度与诞生时间估算,人们认为蟹状星云的中心星即为中国宋代(约 1054 年)记载的金星座客星爆发后的残骸,蟹状星云则是超新星爆发后,抛出的壳层遗迹。无独有偶,1990 年人们从理论上预言,后又经美国 γ 射线卫星康普顿天文塔所证实的 PS1509-58 是一颗 γ 射线脉冲星。根据它的位置、周期变化,人们同样认为它就是中国东汉天文学家在公元 185 年发现的超新星爆发遗迹。在银河系内,历史上有记载的超新星爆发一共有 7 次,中国均有记载,其中公元 185 年的那次超新星爆发,全世界只有中国有记载。

在对中子星的研究中,人们普遍关心的是它的稳定性机制、内部结构以及应给予它什么样的模型。一种看法认为,中子星就是一个巨大的原子核。人们最常接触到的原子的原子核,无论是天然的还是人工的,稳定的还是放射性的,长寿命还是短寿命的,都具有一些共同的特点。其一是,随着质子数的加多,库仑斥力增大而趋于不稳定,所以,随着质量数的加大,稳定的核将中子比例加大,质子的比例变小。例如氮原子核 ^{14}N 由 7 个质子和 7 个中子组成,钙原子核 ^{40}Ca 由 20 个质子和 20 个中子组成,都各占一半;铁原子核 ^{56}Fe 由 26 个质子和 30 个中子组成;碘原子核 ^{127}I 则由 53 个质子和 74 个中子组成。其二是随着原子核质量的加大,越不稳定,越容易自发裂变。 $Z > 92$ 的超铀元素原子核都是不稳定的。迄今为止, $Z > 106$ 的原子核还无法观测到。根据核壳层模型理论的预言,原子核也具有类似元素的周期性,当中子数或质子数为一定数值,即为幻数时,核特别稳定。 $Z=114$ 是一个幻数,在它附近,应存在一些稳定或比较稳定的原子核。虽然这个超重核岛至今还没有被实验发现,人们却相信,中子星是一个由 10^{57} 数量级的中子和 10^{55} 数量级的质子组成的原子核,它依靠万有引力束缚在一起非常稳定,结合能可以达到 100MeV。

还有一种看法,认为中子星是一个巨大的汤姆逊原子。1897 年, J. J. 汤姆逊发现了电子以后,他把电子看作构成物质的成分之一,并提出了原子的汤姆逊模型,认为原子由一个带正电的球体,内中有数量恰好中和正电的带负电的电子嵌入其中构成。这个理论虽然是研究物质结构的良好开端,但是不久,即被他的学生卢瑟福的理论所替代。后来,卢瑟福行星式的原子模型又由量子理论所取代,即使如此,对于电子不可能被束缚在极小的原子核空间内两种理论却是公认一致的。中子星的发现,使这种认识的发展有了转机。如果说中子星是一个体积巨大的原子核,电子被包含在其中似乎有了可能。在中子星的内部,可以具有少量的、但数量相同的质子和电子,它们一方面维持了中子星的电中性;另一方面,根据泡利不相容原理,由于质子与电子的存在,填满了可能的状态,防止了自由中子衰变为质子、电子与中微子的可能性,维持了中子星这一个巨大的汤姆逊原子稳定的存在。综上所述,研究中子星的组成与结构,无疑将丰富人们关于物质结构的认识。

中子星同样为人类提供了第一个引力波存在的定量依据。1974 年 9 月,正在马萨诸塞大学任教的泰勒 (Taylor, Joseph Hooten 1942 ~) 与

他的研究生赫尔斯 (Hulse, Russell Alan) 利用 305m 口径大型射电望远镜, 发现了一颗脉冲周期约为 59 毫秒的射电脉冲星, 根据它在空间的方位, 定名为 PSR1913+16。这颗脉冲星与其它脉冲星有所不同, 它除了具有一个 59 毫秒的脉冲周期外, 还存在有一个缓慢变化着的周期 0.323 天。泰勒和赫尔斯立即意识到, 这颗脉冲星一定还有一个伴星, 由于它们相互绕行, 径向速度呈周期性变化。这一脉冲双星的发现, 使人们看到, 质量如此巨大、以如此短周期相互绕行的二体运动, 将是人们检测引力理论的最好实验渠道, 这是在地球、乃至整个太阳系范围内难以获得的。正因为引力研究方面的重要研究价值, 脉冲双星的发现, 使泰勒与赫尔斯共同获得了 1993 年诺贝尔物理学奖。

除了比地球表面还要强 10^{11} 倍的极强引力条件外, 中子星表面处的磁场也极强, 可达 10^5 特斯拉。在地面上, 目前采用最先进的技术, 也只不过能产生 10 特斯拉左右的磁场。此外, 中子星内部压强可以达到 10^{33} 帕斯卡, 这些物理条件将是在地球上难以获得的。这表明, 中子星提供了一个天然的极端条件的实验室, 研究其上发生的各种物理现象, 能使人类更全面、更完整地认识物质规律, 甚至从中获得一种全新的认识。

8. 黑洞物理学的建立

早在 1783 年英国地质学家与天文学家米歇尔 (1724 ~ 1793) 就预言有“看不见的天体”存在。1796 年, 法国天文学家和数学家拉普拉斯 (Laplace Pierre Simon, Marquis de 1749 ~ 1827) 也曾独立地做出相同的预言。米歇尔和拉普拉斯预言的根据是牛顿力学与牛顿的光微粒说。他们认为, 根据牛顿力学, 在一个质量为 M 、半径为 r 的天体上, 挣脱引力束缚的最低速度, 即逃逸速度为 $v = \sqrt{2GM/r}$, 若天体的 M 与 r 之比足够大, 以致使逃逸速度达到光速, 这个天体将不再发光。显然, 这一假说把光粒子认作服从牛顿力学的粒子。然而, 在 19 世纪, 光的波动说占了上风, 光波被认为不受引力作用, 这一预想就被搁置了起来。

黑洞设想被重新提起, 是在爱因斯坦发表了他的广义相对论之后。1916 年, 爱因斯坦创立了广义相对论, 并建立了引力场方程。在同一年, 正值第一次世界大战, 德国天文学家、数学家史瓦西 (Schwarzschild, Karl 1873 ~ 1916) 正随炮兵部队在俄国前线作战, 就在战时, 他得到了爱因斯坦场方程的一个解, 并首先计算了全部质量集中在一点上的恒星附近的引力现象, 很可惜, 不久他因一种罕见的代谢失调病而去世。

史瓦西所假定的引力源是一个球对称分布的中心天体, 史瓦西给出了它的内部与外部引力场分布, 即时空弯曲特征。根据史瓦西解, 当中心天体质量 M 足够大、半径足够小时, 它的时空弯曲很大, 以致任何粒子, 包括零质量的光粒子都将不能逃逸出来, 这个特殊的时空区域即为黑洞, 其边界称为视界, 视界的半径即为史瓦西半径, 它的大小为 $r_g = 2GM/c^2$ 。

显然, 黑洞是爱因斯坦广义相对论, 或者更具体地说是史瓦西解的一个直接推论。从表面看, 由广义相对论和牛顿力学得出的黑洞半径完全一致, 然而二者却有着本质的差别。拉普拉斯等人的黑洞只是一种球状天体, 它成为黑洞完全是根据牛顿引力理论得出的, 然而在质量很大、半径很小的星体强引力场中, 牛顿的引力理论不再适用, 强引力场中的时空不再平直, 黑洞即为时空弯曲的产物, 或者说它就是特殊的时空区域, 黑洞的视

界仍是这个特殊区域的一个边界。

史瓦西黑洞是一种最简单的黑洞，它的外面被一个光层所包围，只具有质量，不带电荷和磁荷，也不旋转，它的表面就是视界，奇点则在黑洞的中心。从 1916 年至 1918 年，赖斯纳(Reiss-ner)和诺兹特隆(Nordström)又用极坐标得到了具有球对称质量、带电荷或磁荷的引力场方程解，它称为赖斯纳-诺兹特隆解，而具有电荷或磁荷的黑洞就称为赖斯纳-诺兹特隆黑洞。这种黑洞的中心有一个奇点，它有两个视界。若所带电荷或磁荷较少时，内视界半径甚小；反之，外视界收缩、内视界扩大；当 $M=Q$ （自然单位制）时，两视界合二而一； $M<Q$ 时，视界消失，只剩下一个裸奇点；在 $Q=0$ 时，赖斯纳-诺兹特隆黑洞则退化为一个史瓦西黑洞。

关于黑洞研究的重要进展是在广义相对论提出的半个世纪之后。1963 年，正在美国德克萨斯大学执教的澳大利亚数学家克尔(R.P.Kerr)用椭圆坐标得到了球对称质量、转动物体的引力场方程解，由这个解立即得出了转动黑洞，后来它又被证明是唯一解。克尔解的得出是 20 世纪理论物理学的重要进展之一。克尔黑洞的奇异域为一个环，一般有两个视界。当转动较慢时，两个视界包围住奇异环；转动较快时，两个视界彼此靠近，在极端条件下，合二而一，最后也可能消失而露出一个裸奇异环。在克尔解得出的两年之后，即 1965 年，以纽曼(E.T.Newman)为首的一个研究小组发表了一个更为复杂的爱因斯坦引力场方程解，这是一个静态、轴对称引力场方程解，它称为克尔-纽曼解。克尔-纽曼黑洞具有质量、电(磁)荷和角动量三种特征，当电量 $Q=0$ 时，克尔-纽曼黑洞退化为克尔黑洞；当角动量 $J=0$ 时，它退化为赖斯纳-诺兹特隆黑洞；而当 $Q=J=0$ 时，还可以还原为最简单的史瓦西黑洞。

从 60 年代末到 70 年代初，理论物理学家和天体物理学家们在探索物质处于黑洞状态时，有哪些特征被保留下来。普林斯顿大学的惠勒(Wheeler, John Archibald 1911~)认为，仅有质量、电荷(或磁荷)及角动量三个基本量为黑洞所保留，而在这三个特征中，质量与角动量又是最重要的，因为，在形成黑洞的引力塌缩过程中，星体的转动速度越来越大，而且在观测中发现，星体的质量越大，转动速度也就越大，角动量越大。在黑洞形成过程，引力场极强，更不可忽视的是潮汐力的作用，强大的潮汐力，将气体分子或原子撕碎，裸露的电荷与磁荷成对中和，使黑洞形成后，只具有少量的电荷或磁荷，因此，在多种黑洞之中，克尔黑洞更具有实际意义。在黑洞力学研究中，用于描述黑洞的重要物理量有：黑洞视界面积、不可约化质量、视界表面引力和视界表面转速。理论的研究结果表明，克尔黑洞的能层中引力非常强，若粒子以某种速度运动，其引力束缚能有可能超过它的静止能与动能之和，这表明粒子的总能量将是负值，这一奇特性质引起了彭罗斯(R.Penrose)等人的注意。60 年代以来，彭罗斯等人引入了整体微分几何方法，大大推进了关于黑洞与引力塌缩的研究。60 年代末，彭罗斯又推出了“宇宙信息监督假说”，认为奇点只能出现在黑洞之内，由此认为引力塌缩不可能形成裸奇点，裸奇点在现实世界中是被绝禁的，证明这一猜测已成为当今广义相对论的主要课题之一。1969 年，彭罗斯又根据克尔黑洞中粒子可能处于负能态的特性，提出了从黑洞中提取能量的设想。假定从无穷远向克尔黑洞能层中移入一个正能粒子，并在能层中使其分为两个碎片，若其中的一个碎片进

入负能轨道，另一碎片穿出能层又飞向无穷远时，根据能量守恒原理，飞出碎片的能量将比原注入的整个粒子能量还大，多余的能量即来自黑洞。次年，克利斯托德洛 (Christodolou, D.) 从理论上证明，用彭罗斯过程提取黑洞能量 (质量) 有一个上限，即 $M = M - M_{\text{ir}}$ ， M_{ir} 对应不能提取的那部分质量，又称为不可约化质量。根据能量关系，在黑洞总质量 M 、不可约化质量 M_{ir} 和角动量 J 之间具有确定关系 $M^2 = M_{\text{ir}}^2 + J^2 / (4M_{\text{ir}})^2$ ，这一关系表明，黑洞的总能量由两部分组成，第一部分为与不可约化质量对应的所谓“冻结能”，另一部分则是与转动相关的所谓“活动能”，彭罗斯设想的提取能即来自这部分活动能，随着转动能量被提取，克尔黑洞转速逐渐变慢，能层变小，最终将成为一个不能再提取能量的“死黑洞”，此时，黑洞质量 $M = M_{\text{ir}}$ 。

从 60 年代末到 70 年代初，黑洞力学逐渐发展到成熟阶段，突出的代表是英国理论物理学家霍金 (Hawking, Stephen William 1942 ~) 等人的工作。霍金毕业于牛津大学物理系，后在剑桥大学获得博士学位。在黑洞的研究方面，他成功地把相对论与量子力学结合，提出了关于黑洞的爆炸理论。在 1971 年他提出，在宇宙大爆炸后，可能形成数以百万计的微小黑洞，它们既遵守相对论规律，又遵守量子力学规律。1974 年，霍金又根据量子力学做出黑洞能不断产生物质、放出亚原子粒子，并在最后耗尽能量发生爆炸的预言。霍金做出的这些预言都已成为目前天文学家观测研究的主要目标。霍金患有严重的肌萎缩性脊髓侧索硬化症，行动、言语极为困难，竟能在物理学的前沿领域做出突出贡献，因此倍受人们尊敬。1974 年，他当选为英国皇家学会最年轻的会员，1979 年担任剑桥大学卢斯卡讲座教授，这些都是牛顿曾担任过的职务。

从 60 年代末开始，霍金、巴丁 (Bardeen, J.H.) 与卡特 (Carter, B.) 等人就着手证明了一系列有关黑洞的经典理论重要定理，其中包括：
黑洞视界面积不随时间减少，即 $\frac{dA}{dt} \geq 0$ ；
稳态黑洞视界上引力处处相等；
不能通过有限的步骤把 $\frac{dA}{dt}$ 降为零；
黑洞质量的变化一定伴随着黑洞的面积、角动量 J 而变化，这一关系可以表示为守恒定律的形式，即 $dE = (\frac{1}{8\pi}) dA + \omega dJ$ ，式中 ω 为黑洞自转角速度。这一规律的奇特之处在于，其中第 1 的面积不减定理正对应于经典热力学第二定律，两个定律的相似性暗示着黑洞很可能是一个热力学系统，它的温度与黑洞视界表面积成正比，如果把黑洞的熵定义为与视界面积成正比的有限值，与热力学第二定律做对比，可以得到黑洞的温度与视界表面的引力成正比。由此，上述定理 1 恰与转动物体的热力学第一定律 $dE = TdS + \omega dJ$ 式中 E 、 T 与 S 分别表示转动物体的能量、温度与熵值， ω 与 J 分别为转动物体的角速度与角动量。上述定理 1 则恰好与热平衡体系的温度处处相等相对应。据此，仿照热力学的四个定律，有所谓的黑洞热力学四定理，分别称 1、2、3、4 为黑洞热力学第零、第一、第二定理，而 1 则根据这种对应关系推出的一个猜测结果，称为黑洞热力学第三定理，它实际为“宇宙监督原理”的一个结果。

尽管人们在黑洞物理与热力学之间看到了某种相似，但是在当时却普遍认为这种相似仅只是数学形式上的，并不具有物理上的实在意义，因为人们认为黑洞与一般的黑体不同，一般的有限非零温度热体，既能向外辐射热量又能吸收热量，而黑洞则只能吸收辐射，这就给从热力学角度描述

黑洞带来了原则上的困难。果然，不久就有人对黑洞的热力学性质提出了诘难，由这些难题的提出与解决，展开了黑洞热力学与黑洞量子力学的研究。

9. 黑洞热力学与黑洞量子力学崛起

如果说 60 年代是黑洞力学走向成熟时期，70 年代则是黑洞热力学与黑洞量子力学崛起并发展的时期。黑洞的奇特热力学性质，首先使惠勒对热力学第二定律提出了质疑，他撰文指出，如果向黑洞投入物块，外部世界将由于失去物块总熵将减少，但是物块进入黑洞后，却无法判断其熵是增加还是减少，在这种情况下，热力学第二定律是否还成立？这就是所谓的“惠勒妖”。还有人设想，若黑洞的温度高于周围热辐射气的温度，根据热力学理论，将有热量从黑洞流向热辐射气，但是根据经典黑洞理论，黑洞将从周围介质吸收热量，这又显然发生矛盾。由于上述质疑，不少人认为黑洞四定理与热力学四定律之间仅仅在数学形式上相似，这种相似性并不具有物理上的实在意义。针对这一看法，贝肯斯坦(Bekenstein, J.D)利用黑洞视界面积建立一个与之成正比的有限熵概念，将其定义为 $S_b = (k) (\frac{A}{L_p^2})$ 其中 k 为无量纲常量，其下限的估计值为 $\ln 2/8$ ， $L_p = hG/c^3 = 10^{-33} \text{cm}$ ， h 与 G 分别为普朗克常量与万有引力常量， c 为真空中光速， k 为玻尔兹曼常量。在 $c=h=G=k=1$ 的自然单位制中，该熵值 $S_b =$

。接着，贝肯斯坦又根据热力学关系，得到了黑洞的温度为 $T = 1/8$

。在此基础上，贝肯斯坦把熵的概念加以推广，建立了一个广义熵概念， $S_g = S_b + S_m$ ，式中 S_b 和 S_m 分别为黑洞熵和黑洞以外物质的熵。他认为宇宙间广义熵不随时间减少，这就是广义热力学第二定律。贝肯斯坦列举了诸如谐振子、辐射气、粒子等落入黑洞的情况。通过计算表明，它们落入黑洞后，外部世界熵 S_m 即使减少，但是随着物质的落入，黑洞质量、面积随之加大，黑洞熵值 S_b 的增加量将大于普通物质熵的减少量，广义熵依然大于或等于零，但是限于经典黑洞理论，广义热力学第二定律的普适性依然不能做出普遍的证明。

1974 年，霍金引入了黑洞引力场中的量子效应，根据量子场论关于真空涨落的机制，他认为，在黑洞视野外附近的真空中，虚正、反粒子对有可能实化为实正、反粒子对，其中一个进入视界的负能层，使黑洞的质量减少，另一个逃逸到无穷远，形成黑洞的“蒸发”，发射出来的粒子谱恰好对应黑体谱。以史瓦西黑洞为例的进一步计算表明，黑洞黑体谱的温度确实与其质量成反比，黑洞蒸发的放能率与黑洞质量的平方成反比，而黑洞的寿命则与黑洞质量的立方成正比。当黑洞极小时，它将具有极高的温度、极大的放能率与极短的寿命，这实际是一次强烈的爆炸，小黑洞在爆炸后转化为高温的星云。

霍金等人的工作不仅表明，黑洞的温度与熵不仅具有实在的意义，而且证明，由于真空的量子涨落与物质的量子隧道效应，黑洞也像一个黑体一样，具有量子化热辐射过程。计入了量子效应以后，黑洞的经典热力学性质发生了明显的变化，例如在热辐射时，黑洞的视界面积在减小，所谓经典的面积不减定理不再成立。然而，当计入贝肯斯坦的广义熵之后，黑洞的热力学性质在广义热力学第二定律的框架之下，依然满足普遍的热力学规律。

黑洞理论已取得不小的进展，在广义相对论与量子力学的结合上，在引力作用与其它作用的统一上，人们所做出的一些尝试已经取得了部分的成功；在黑洞的研究中，有关物质世界中的宇观、宏观与微观领域研究的结合上，在时空几何与物质之间的统一关系上，人们也做出了部分成功的尝试；黑洞的研究正在对现今公认的物理理论提出了新的挑战与新的课题，人们发现，研究黑洞无论对物理学还是对于天文学都具有深刻的意义。尽管如此，在黑洞研究方面存在的问题仍然很多。例如“宇宙监督原理”的基础有待于进一步考察；黑洞熵的本质仍不很清楚；用杨-米尔斯理论中十分成功的微扰技巧处理引力问题并不很成功；人们仍然在受到引力量子理论不可重整化的困扰；人们预测，在普朗克尺度内，将存在有度规涨落与拓扑学涨落，如何解决这种涨落问题仍不很清楚……很有可能，所有这些问题会在最后所建成的一个完备而自洽的量子理论中，一揽子获得解决，这可能就是人们期盼的包括引力与物理学其它相互作用在内的超大统一理论。

(二) 引力研究

1. 牛顿引力思想的简短回顾

牛顿是引力物理的奠基人，他的《自然哲学和宇宙体系的数学原理》一书，已经成为引力物理的第一部经典著作。牛顿所建立的平方反比的引力规律在大范围的引力作用中，以极高的精度成立，至今仍成为航天技术、空间技术、天文学、天体物理学的基础。

牛顿在引力研究方面的贡献决不仅限于引力定律的建立。在建立引力定律的同时，牛顿提出了引力研究的重要观点与方法。首先，他强调了引力的普适性与万有性。牛顿观测到，太阳系内的行星运动并非严格的椭圆，根据这一事实，牛顿指出，不仅应考虑太阳的引力，还应计入“行星间的彼此作用”，由此，牛顿在 1865 年《论运动》一文中进一步指明“一切物体必定相互吸引”，这本身就指明了引力作用的普适性与万有性。几百年来，人们始终在致力于物理定律普适性的研究。物理定律除了在原有的自身范围内适用以外，如何向着更大的范围内延拓，如何在更大的范围内与其它规律相容，都是人们密切关心的问题。因为，普适性越广，就越能深入地揭示事物的物理本质。正因如此，普适性已成为物理发展高度与统一性高度的判据。正是人们对普适性的追求，才使引力物理从牛顿阶段发展到爱因斯坦的引力物理阶段。

牛顿的引力理论还强调了引力的不稳定性与非平衡性。在写给本特利的信中，牛顿提到，引力作用使宇宙间物质趋向于它们的内部，“其中有些物质将聚集成一个物体，而另一些物质则会聚集成另一个物体，以致产生无数个巨大的物体，它们彼此距离很远，散布于整个无限的空间中”，“很可能太阳和（其它）恒星就是这样形成的”。在这里，牛顿揭示了引力及引力不均匀性的重要作用，并提示人们，宇宙并非走向热死，正是由简单走向复杂，由无结构走向有结构、由热平衡演化到非热平衡的原因正是引力作用。

2. 平方反比定律的检验

物体间的引力反比于其间距离的平方是引力的基本属性。在当前新发展的一些理论中，预言有一些新的弱作用粒子，由于它们的存在，有可能破坏这一基本属性。检验平方反比律不仅能进一步确定引力规律的精确程度与适用范围，还将能判断某些新理论的真伪，影响着整个物理学的发展，人们还期待这一研究能对物理学统一的途径提供有益的线索与启示。虽然引力的平方反比律与库仑定律相似，但是对引力规律的检验要比对库仑定律检验困难得多。除了引力很弱，难以测量得很精确以外，由于尚未发现有负质量，环境引力的干扰很难屏蔽。因此，降低或消除干扰成为检验引力平方反比律的关键。目前，在较大的距离上，例如在太阳系尺度范围内，引力的平方反比定律已经有了较好的证据。通过对各行星、宇宙飞船、人造卫星以及火箭等的运行轨道研究证明，平方反比定律中的距离 r 的精度已达到了 10^8 ，然而在较小的距离上，例如 1 米以下到几厘米，的精度目前只能达到 10^2 。近距离的实验更具有较大的困难。首先距离小物体就应特别小，引力就更弱，难以准确测量；其次近距离下，引力干扰相应加大，在引力不可屏蔽情况下，实验结果的可靠性就成了问题。澳大利亚地球物理学家斯塔西等人，通过测量几千米深矿井中的地球引力，再与

地面上地球引力做比较，判断近距离下的平方反比定律。然而，这种方法事先需假定地球是一个匀质球体或椭球体，从他们得到的实验结果看，很难说明是平方反比律不准确还是地球本身是非匀质的。

3. 等价原理的研究

引力的普适性由爱因斯坦给出了进一步的解释。他认为，引力的作用是时空的弯曲效应造成的。由于物质在时空中运动，弯曲的时空对物质的作用就等价于受力。任何物质都不能脱离时空的作用，这就是引力定律普适性的根本原因。引力普适性的一个重要具体表现就是，任何物体在引力场中运动，同一点上的引力加速度都是同一个常数，即

$$\frac{\text{引力质量}}{\text{惯性质量}} = \text{普适常数}$$

这个普适常数与物质的性质无关。选择适当的单位制，它将可能为 1，于是引力质量与惯性质量相等，因此引力的普适性的又一个重要表现就是引力质量与惯性质量等价，这就是等价原理。首先对等价原理做出证明的就是牛顿。他利用单摆在 10^{-2} 精确度范围内，证明了两个质量的等价。在等价原理研究上，做出重要贡献的是匈牙利物理学家厄卓 (1848 ~ 1919)，最初他利用扭秤测量地球表面重力的微小差异，以判断地表下的地质结构。在这一地球物理学课题研究的基础上，他进而测出地球重力加速度的精确值，使对等价原理的证明达到了 10^{-9} 精度以上。本世纪 60 年代，曾对宇宙微波背景辐射研究做出突出贡献的美国普林斯顿高等研究所的迪克 (Dicke, Robert Henry 1916 ~) 又改进了厄卓实验，使等价性证明的精度达到了 10^{-11} 。其后不久，前苏联的布拉金斯基 (Bra-ginsky, V. B.) 等人又把实验的精度提高到 10^{-12} 。为消除地面实验中的各种干扰及其它不利因素，近年来计划把厄卓实验装置放到宇宙飞船上，估计实验精度可达到 10^{-15} ，若放在无引力的自由飞行器上去完成该实验，精度可望达到 10^{-18} 。

除了厄卓扭秤实验外，有人从伽利略比萨斜塔实验中受到启发，提出通过精确测定月、地距离证实等价性原理。在太阳引力场中，地球月球属于在同一位置上自由下落的物体，若有共同的加速度，月、地应保持相同的距离，如果向日的加速度稍有不同，其间距离会有系统性的变化。通过阿波罗 14 号放置到月球表面上的角反射器，再利用激光往返信号的时差，即可把月、地距离的精确度提高到误差在 1 厘米左右。

4. 引力常数的测定

最初确定 G 值是为了测量引力。牛顿曾设想出两种测 G 的方法，一是直接测量两物体间的引力，再利用引力公式确定 G 值；另一种方法是利用大山附近单摆的偏角测定 G 值。限于当时的实验条件，这两种方法均未能付诸实现。1774 年，英国天文学家马斯基林 (Maskelyne, Nevil 1732 ~ 1811) 利用大山吸引物体的方法测定 G 值，由于大山的质量很难精确确定，加上气流的影响，实验结果不稳定，误差也很大。首次对 G 值做出精确测量的是英国物理学家卡文迪许，他最初的目的是想确定整个地球的质量。1798 年，他利用英国地质学家密歇耳 (Michell, John 1724 ~ 1793) 所发明的扭秤测定出的地球质量约为 6.6×10^{20} 吨，其平均密度约为水的 5.5 倍。在此一个世纪之前，牛顿曾较准确地判断出地球的平均密度约为水的

5~6倍,并由此推算出G值约为 $6.7 \times 10^{-11} \text{m}^3 \text{s}^{-2} \text{kg}^{-1}$,而卡文迪许对G的实验测量值为 $(6.754 \pm 0.041) \times 10^{-11} \text{m}^3 \text{s}^{-2} \text{kg}^{-1}$ 。

对G测量的前期研究情况表明,扭秤是消除其它引力干扰的有效工具,因为它利用横置悬杆两端严格对称的球,消除了外界的引力影响。从早期的卡文迪许实验到近年来对G值的测量,人们大都采用了扭秤。随着扭秤性能和使用方法的改进,对G值测定的技术也在不断地提高。例如毕姆斯(Beams, J.W.)等人所采用的扭秤可以整体做角加速转动,使引力作用在转盘转动中引起的悬丝转角改变值积累得比较大,而其它的引力噪音干扰则没有这一积累,因而减少了实验的环境误差。他们得到的G值为 $6.674 \times 10^{-11} \text{m}^3 \text{s}^{-2} \text{kg}^{-1}$ 。值得注意的还有美国朗(Long, D.R.)等人的工作。

由于相互作用的球体密度要求非常均匀,否则质心位置偏离球心,影响距离的准确测定。为此,朗等人用环形物代替球体,一来环形物轴线上的引力场在一定的范围内,随距离的变化比较缓慢,若环的尺寸及组合匹配适当,甚至可以在一个较宽的范围内得到均匀引力场;二来,在环形物轴线上,这个变化较平缓的引力区,正是它引力场较强的区域,即其一阶微商为零的转折区域。将扭秤小球置于这个区域,相互作用质心的距离不仅可以得到较高精确度的确定,而且相互作用力也更明显。朗等人的测量显示了两方面的重要结果,其一是在实验室范围内,引力的平方反比律并不严格成立,引力常数G随着环的尺寸有微小的变化;其二是引力常数G与相互作用的质心距离r有关,它随r的变化关系是 $G(r) = G_0 [1 + (0.002) \ln r]$,这一结果引起了不少实验与理论物理学家的注意。

虽然扭秤装置可以有效地消除外界引力噪音的干扰,但是它也有一些不易克服的困难,例如由于悬丝蠕变,其扭转的弹性性能不易保持稳定,给重复测量带来困难。此外,待测的几何量较多,影响实验系统误差的因素就较多。有人受到伽利略落体实验的启发,提出了用等价原理测量G值的方法,其中较典型的是富基(Fujii, Y.)所提出的设想。他设想,两个小球在真空中自由下落,根据等效原理,它们始终保持相同的加速度,彼此间距离保持相同,也就是说在加速下落系中,引力被局域地消除。然而,两球之间的引力却不可能在该系中被消除,因此,一旦发现两球间的距离有改变,定是未被消除的彼此间的引力作用结果。这一设想为近距离内验证引力平方反比律及G值的测定提供了一个可能的途径。他预料,若使用直径10厘米、质量10千克和另一直径1厘米、质量10克的两个钨球,彼此相距1毫米自由下落,由于彼此间的引力作用,在下降1米后,距离将可能有 10^{-6} 厘米数量级的改变;而下降5~6米以后,距离的变化可为 10^{-5} 厘米数量级,G值测量可望获得5位有效数字。如果使用直径1厘米10克和直径1毫米的两个小球,使其间距离1毫米自由下落5米,可望能在3位有效数字的精度内检验出在1厘米内G值是否有偏离。

5. G值随时间变化的研究

本世纪初,有一些学者曾对G值是一个恒量表示怀疑。1937年,英国物理学家狄拉克曾提出“大数假说”。他注意到,质子与电子间静电引力与万有引力间的比值

$$\frac{e^2}{Gm_p m_e} = 10^{40}$$

恰与用时间的原子单位表示的宇宙年龄的数量级相符合。狄拉克所选的时间的原子单位为

$$\frac{e^2}{m_e c^3}$$

后来根据英国-美国物理学家戴森 (Dyson, Freeman John 1923 ~) 建议,

$$\text{改为 } \frac{\eta}{m_e c^2}, \text{ 其数值约为 } 10^{-21} \text{ 秒。}$$

如果狄拉克的这一发现不是偶然的, 它不仅表明宇宙学与两个长程力——万有引力与静电力间的基本关系, 还表明比值 $\frac{e^2}{Gm_p m_e}$ 随宇宙的年龄在增加。狄拉克假设, 电子电量、质量和质子质量 e 、 m_e 和 m_p 是不变的, 这必然导致万有引力常数 G 随时间在减小。

关于 G 随时间减小, 还有人从马赫原理处找到依据。马赫原理指出, 物体的惯性并非自身的属性, 它是宇宙中其它一切物质对该物体总引力作用的结果。由于宇宙在膨胀, 物质在彼此远离, 宇宙中总物质对任意一个局部物质的影响在减小, 因而引力常数在减小。该减小率应当与所观测到的宇宙膨胀率有关, 根据计算结算, 约为 $(5.6 \pm 0.7) \times 10^{-11}$ /年。目前要测出如此微弱的变化率只能在漫长的宇宙演化或星球运行中寻找它的影响。为此, 有人提出了观测月掩星的方法。在月球环绕地球的运行中, 由于月球没有大气折射, 能较准确地确定它所掩蚀恒星的时间。如果引力在变弱, 月球将缓慢地远离地球, 所观测到掩星时刻应当落后于引力不变条件下的理论计算结果。根据原子钟测定的时间, 对月球掩星 20 年连续观测的结果, 发现月球环绕地球运行周期以 $(22.2 \pm 3.5) \times 10^{-11}$ /年的速率在增长, 除去地球由于潮汐摩擦、角动量减小, 通过月地间引力耦合, 使月球远离地球, 并使其周期加大的因素外, G 值的减小速度为 $(3.6 \pm 1.8) \times 10^{-11}$ /年。有人认为, 这一结果还应计入太阳质量变化的影响, 太阳风不断在辐射粒子、电磁辐射、日珥或耀斑等太阳爆发过程, 都会使太阳质量不断地减小, 然而这些因素所影响到的月地距离增大值仅只是观测结果的 30 分之一。由于月球周期增大所得到的 G 值减小率与宇宙膨胀速率得到的结果有较好的吻合, 所以引力常数减小的预言, 很有可能在月掩星观测中得到支持。

近年来的理论进展表明, 引力常数不是恒量将对物理学的发展产生深远的影响。本世纪 50 年代以来, 约旦 (Jordan, Ernst Pascual 1902 ~) 就曾根据 G 随时间的变化, 建立起一整套引力常数可变的引力理论。在该理论中, 变化的引力常数由一个静止质量为零的标量场所代替。后来, 布朗斯 (Brans, G.) 和迪克也建立了类似的引力常数可变的引力理论, 根据布朗斯-狄克的这一标量-张量理论, G 值变化率在 $(0.007 \sim 0.8) \times 10^{-11}$ /年。1961 年, 布里尔 (Brill, D.R.) 得到了半径为 R 均匀各向同性宇宙情况的约旦引力场方程解, 除了利用该解建立了引力常数可变的宇宙模型, 并

由它得到了与标准模型相应的预言以外，它还提供了检验 G 值的途径。根据布里尔的结果，由于星体发光度强烈地依赖于 G 值($L \propto G^7$)，随着 G 值的减小，将影响着星体的演化过程，例如星体的年龄在 G 值随时间变化的情况下，将与过去的推算值有很大的差异。迪克等人根据他们的引力理论，曾计算出若干古老星体的年龄，所得到的结果恰与由哈勃膨胀推算出的宇宙年龄 8×10^9 年相符。由于 G 值对时间的依赖关系，迪克认为，不仅将由于太阳的温度变化影响地球与月球的温度，还会导致其它的一些地球物理现象发生。例如，随着引力常量的减小，地球连续膨胀，如果引力常量以 $G/G=3 \times 10^{-11}$ /年的速率减小，在整个地球历史年代中，赤道将增长 700 千米。迪克甚至认为，非洲与南美大陆的巨大断裂就是这种连续膨胀造成的，这些推论与猜测目前尚未得到进一步的观测证实。

大数假说与 G 值随时间变化对物理学产生的另一方面深刻影响是关于“物质创生”说。宇宙中的核子总数估计为 10^{80} ，恰为宇宙年龄 10^{40} 的平方，根据前述的思路，很容易得出，随着宇宙年龄的加大，宇宙中的核子数也在随时间的平方成正比地加大，这一结论恰为狄拉克大数假说中，G 值随时间减小假设的一个重要推论。尽管物理界有不少人对狄拉克的“新物质创生”推论持犹疑态度，大数假说的支持者们却认为，不能由于想象不出新核子在宇宙中的创造方式，而忽略了狄拉克的这一预言。为此，有人提出了“引力屏蔽”理论，为“物质创生”做出解释。这一理论认为，致密物体对引力有屏蔽作用，表现为抵抗运动状态变化能力的惯性质量与核子总数成正比，而表现为引力作用强弱的引力质量则只与未被屏蔽的核子数成正比，当引力常量减小时，巨大天体表面层重量减小，随之引起天体膨胀，物质密度减小，屏蔽效应减弱，因而有更多的核子对外界的引力做出贡献，使引力质量加大，表现为天体的核子数在加大，但并不意味着有新物质的创生。由于天体引力屏蔽层表面积随时间的平方增加，表现出的引力质量与核子数也随时间平方加大，这恰好满足了大数假说的要求。尽管大数假说及其推论以及其它人所做的解释都带有猜测的性质，人们还是一致认为，所观测到的事实反映出，自然界尚有某些未知的规律在起作用，有些未知规律的发现将紧密地依赖于对 G 值的研究。

(三) 现代引力理论进展

1. 爱因斯坦前引力理论的回顾

从牛顿时代至今，人类对引力的定量研究已有三百余年，在这三百年中，引力研究经历了复杂而曲折的过程。牛顿在 1686 年所建立的引力定律，涉及的仅只是两质点间的作用力。意大利-法国天文学家和数学家拉格朗日(La-grange, JosephLouisComtede1736~1813)曾致力研究牛顿“留下的一个悬而未解的问题”，这就是找到解决两个以上天体系统运动的数学方法。他与其学生法国天文学家、数学家拉普拉斯(Laplace, PierreSimonMarquisde1749~1827)合作，研究了太阳系的天体摄动问题。1773 年，拉格朗日引入引力场概念，并建立了引力势函数。1782 年，拉普拉斯建立了自由空间的引力势函数的微分方程，即拉普拉斯方程 $\nabla^2V=0$ ，并于 1799~1825 年间，撰写成功五大卷《天体力学》巨著。在这部著名的传世之作中，拉普拉斯对经典引力理论做了系统的总结。以后，拉格朗日及拉普拉斯的学生泊松(Poisson, SimeonDenis1781~1840)又继续了他的两位老师的引力研究，于 1813 年推广了引力场理论，建立了引力场的泊松方程 $\nabla^2V=4G$ 。引入了引力场概念后，引力理论从牛顿引力形式下得到了推广。尽管，引力理论已发展到相当完善的程度，但是它仍存在有几个较为明显的问题。首先，由于不显含时间，这一引力理论仅能描述超距作用，其二，它不具有洛仑兹变换下的协变形式。普适性是物理理论的生命，而协变性就是普适性的重要特征，一个具体的物理规律如果不能纳入协变性的理论框架，它的普适性就值得怀疑。此外，在引力领域内，人们还发现了牛顿理论所不能解释的水星近日点的进动问题，首先发现这一问题的是海王星的发现者、法国天文学家勒威耶(Leverrier, UrbainJeanJoseph1811~1877)。海王星的发现曾使牛顿引力理论的威信达到了它的顶峰。勒威耶先通过计算预言，以后经观测证实了海王星的存在。在牛顿理论发展的全部历史过程中，通过纯粹的计算发现一颗巨大的行星成为当时人们瞩目的一项伟大成就，可以说，它消除了人们对牛顿理论价值的最后一点疑虑。然而，富有戏剧性的是，正是这位对牛顿理论正确性做出重大贡献的勒威耶，却在发现海王星的头一年，即 1846 年，通过计算发现了水星的反常运动，水星的近日点进动值比牛顿理论的预期值每百年快 35"。这一发现被加拿大天文学家纽科姆(Newcomb, Simon1835~1909)观测证实，他得到的这一进动附加值是 43" / 百年。虽然牛顿引力出现的这一微小偏差，远不足以使当时的人们产生紧迫感，然而“能在如此完美无瑕的牛顿理论中，发现某种瑕疵，这本身就是一项非常了不起的成就”，因为它们有可能成为新引力理论的生长点。

1906 年，法国数学家庞加莱(Poincare, JulesHenri1854~1912)在所发表的一篇论文中，以实现洛仑兹群协变的要求为前提，构造了第一个相对论引力理论。他认为洛仑兹变换下的协变性不仅应体现在麦克斯韦电磁场方程的数学结构中，对于一切非电磁起源的力，包括引力，也应具有类似的协变特征。与此同时，庞加莱还指出，引力作用也像电磁作用一样具有光速的传播速度。以后，俄国-德国数学家闵可夫斯基(Minkowski, Hermann1864~1909)和德国物理学家索末菲(Sommerfeld, ArnoldJohannesWilhelm1868~1951)又把这一理论表述为四维矢量分析形式。

尽管庞加莱、闵可夫斯基等人的引力协变理论尚存在着一些缺陷，但是他们毕竟找到了第一个协变性的引力理论，由这一理论得出的计算结果与观测值相比较，比牛顿理论的精确度要高，它还成功地给出了引力质量与惯性质量的等同性解释，更注意满足了场论的要求。他们的工作，不仅为以后的物理理论几何化研究奠定了基础，而且这一理论的尝试与缺陷都已成为爱因斯坦建立更为成功的引力理论的借鉴。

2. 爱因斯坦建立新引力理论的最初尝试

虽然洛仑兹与庞加莱对洛仑兹变换都有着浓厚的兴趣，但是真正能够理解它，并赋予它物理实在意义的却是爱因斯坦。在这方面，他们之间的主要差异就在于对时间，即同时性的理解。只有认识到，时间与空时不可分割，它们统一在同一个变换方式之中，才能真正地把洛仑兹变换当成一种物理实在，而不仅仅是一种数学手段。

1905年，爱因斯坦发表了《论动体的电动力学》论文，“爱因斯坦用他的相对论发动了物理科学中的一次思想革命”，在这篇论文中，爱因斯坦是这样总结的，“狭义相对论导致了空间和时间物理概念的清楚解释，并且由此认识到运动着的量杆和时钟的行为。它在原则上取消了绝对同时性概念，从而也取消了牛顿所理解的那个即时超距作用概念。它指出在处理同光速相比不是小到可忽略的运动时，运动定律必须加以修改。它导致了麦克斯韦电磁方程形式上的澄清，特别是导致了对电场和磁场本质上同一性的解释。它把动量守恒和能量守恒这两条定律统一成一条定律，并且指出了质量与能量的等效性。”1907年，爱因斯坦又在《关于相对论原理和由此得出的结论》论文中，进一步阐明 $E=mc^2$ 的意义。1906年，相对论的最早支持者普朗克证明，运动方程可以借助引入拉格朗日函数 $L=-m_0c^2(1-v^2/c^2)^{1/2}$ 利用最小作用量原理推出。1907年，担任普朗克助教的德国物理学家劳厄(Laue, Max Theodor Felix von 1879~1960)运用相对论运动学导出了菲涅耳曳引系数，并解释了菲索实验。1909年美国物理学家刘易斯(Lewis, G.N.)和托尔曼对具有绝对时空观的牛顿力学进行了改造，引入了相对论动量，使动量守恒与能量守恒定律具有了协变形式，为相对论动力学研究奠定了坚实的基础。在这些成果中，最引人瞩目的、也是对广义相对论的建立最具有影响的是闵可夫斯基四维时空的提出。1908年9月21日在科隆举行的第八届德国自然科学家和医生大会上，闵可夫斯基做了《空间和时间》的著名讲演。闵可夫斯基不仅是爱因斯坦以外，第一个明确了时空观念的变化，同时还利用他的四维时空给予了相对论理论一个非常优美和简洁的数学形式。他的四维理论在简化了相对论理论体系的同时，也成为狭义相对论向广义相对论过渡的连接纽带，自然为广义相对论的建成奠定了基础。

狭义相对论的两个缺陷是明显的，它依赖于惯性系，并承认它的特殊地位。在它的理论框架中，不包容引力理论。最初，爱因斯坦试图在狭义相对论的理论框架之中，建立一个新的相对论理论，以包容引力理论。“最简单的作法是当然保留拉普拉斯的引力标量势，并用一个关于时间微分项，以明显的方式来补足泊松方程，使狭义相对论得到满足。”但是，很快地他就察觉到了其中的困难，而且意识到“虽然惯性和能量之间的关系已经如此美妙地从狭义相对论中推导了出来，但是惯性和引力之间的关系却没能得以说明，我猜想，这个关系是不能依靠狭义相对论来说明的。”

3. 物理几何化

在建立相对性引力理论过程中，爱因斯坦、庞加莱及闵科夫斯基最初的尝试都未能成功，其关键都在于与理论相关的时空结构。

在迈向成功的道路上，爱因斯坦获得飞跃性的认识来源于对刚体转动圆盘的研究。在他 1912 年 2 月所发表的《光速和引力场的静力学》一文中，他认为，由于洛仑兹收缩，圆周与半径之比不再为 2π ，这表明，惯性系的观察者得出沿圆周运动方向运动的尺有尺缩效应，而相对非惯性旋转系的观察者根据等效原理，会认为所在系是静止不动的，却存在着一个“离心的引力场”，由于圆周与半径之比不再为 2π ，他自然会解释为，由于这一引力的存在，使欧几里德几何不再成立。将这一结论扩展到一切真实引力场，有引力的空间都将不再是欧几里德的。这就是爱因斯坦所解释的，“把等效原理和狭义相对论结合起来，很自然地得出，引力与非欧几何联系在一起”的结论。当时爱因斯坦对非欧几何所知甚少，仅在大学读书时从基塞(Geiser)教授那里学到一点微分几何的知识，正是其中有关高斯曲面理论使爱因斯坦受到启发。他曾回忆道，“直到 1912 年，当我偶然想到高斯的曲面理论可能就是解开这个奥秘的关键时，这个问题才获得了解释。我发现，高斯曲面坐标对于理解这个问题是十分有意义的。”

德国数学家高斯(Gauss, Johann Karl Freidrich 1777 ~ 1855) 从大地测量中受到启发，创立了二维曲面的微分几何理论。他在曲面上引入曲线坐标 u 和 v ，并证明曲面上任意线元具有如下普遍形式

$$ds^2 = g_{11}du^2 + g_{12}dudv + g_{21}dvdu + g_{22}dv^2$$

其中 g_{11} , g_{12} , g_{21} , g_{22} 均为变量 u 和 v 的函数，称之为度规，它们由曲面的物质所决定。根据高斯的曲线坐标和度规，不仅可以确定曲面上的测地线（即弯曲空间的“直线”），还可以找到曲面的曲率，并进一步证明曲面所在空间的非欧几里德性质。高斯曲面即为一种弯曲的二维空间结构，然而在其中一点的任意一个小的邻域上，它应近似为平面，在这个局域，欧氏几何仍将成立，并与局域的笛卡尔系相对应。

爱因斯坦把引力空间与高斯曲面理论做了类比思考，他发现，引力所在的空间具有类似高斯曲面的几何性质，特别是当他把闵可夫斯基对狭义相对论所做的解释与引力问题联系起来以后，就更认识到其中的重要含意，这些观念成为了广义相对论理论形成的重要因素。他曾说“没有这个观念，广义相对论恐怕无法成长”，因为闵可夫斯基的四维世界“与高斯曲面理论相结合，向人们展示，存在引力场时，空间是弯曲的，欧氏几何不再成立，这表面引力场中不存在全局性的或大范围的惯性系，但对每一时空点附近的一个小的局域而言，却是闵可夫斯基平直的，欧氏几何仍成立，同时也存在与之对应的‘局域惯性系’。”这实际就是“爱因斯坦升降机”的思想。爱因斯坦明确地指出，“高斯的曲面理论与广义相对论间最重要的接触点就在于度规的性质，这些性质是建立两种理论概念的重要基础。”在 1912 年 3 月，爱因斯坦在《静引力场理论》中又指出，“等效原理只能在局域中成立”，这一系列思想表明，爱因斯坦看到了引力与时空几何结构间的联系，这就是引力场影响着时空结构，乃至决定着它的度规的规律。

在广义相对论建立过程中，更具有重要意义的事情就是爱因斯坦与他

的老同学格罗斯曼 (Crossmann, M. 1878 - 1936) 的合作。在格罗斯曼的帮助下, 他学习了黎曼几何、里奇与列维-契维塔的张量分析, 这一理论体系是以高斯-黎曼及克利斯托菲尔关于非欧几何流形的研究为基础发展起来的, 它很快地被用到了广义相对论的引力理论之中。从 1912 年 8 月开始, 爱因斯坦与格罗斯曼合作, 先后发表了三篇论文, 它们标志着广义相对论走向建成的重要阶段。

在 1913 年, 爱因斯坦与格罗斯曼联合发表的重要论文《广义相对论纲要和引力理论》中, 他们提出了引力的度规场理论, 用来描述引力场的不再是标量势, 而是以 10 个引力势函数的度规张量, 引力与度规的结合, 使黎曼几何获得了实在的物理意义, 物理研究向着几何化迈进了决定性的一步。

4. 引力场方程的提出

在格罗斯曼的帮助下, 爱因斯坦找到了适用于广义相对论理论所需要的数学工具——绝对微分学。但是, 在一开始所得到的引力场方程只对线性变换才是协变的, 还不具有广义相对性原理所要求的, 在任意坐标变换下所具有的协变性, 这是因为在当时, 爱因斯坦还不太熟悉张量运算, 他只保留了守恒定律而放弃了广义协变关系。尽管这一尝试还不算成功, 以研究复变函数、特殊函数, 并于 1902 年得到拉普拉斯方程普遍解而成名于世的英国数学家惠特泰克 (Whittaker, Edmund Taylor 1873-1956) 却给予它很高的评价。他认为用十个引力势函数 g_{ij} 确定引力场是一个巨大的创新, 因为它意味着抛弃一个由来已久的信条, 即引力场能被一个单一的标量势所描述。在爱因斯坦重新回到普遍协变要求, 并对黎曼-克利斯托菲尔曲率张量有了新的认识以后, 相对论引力理论的研究有了真正的进展。此时, 引力问题与两个里奇张量联系在一起,

$$G_{im} = R_{im} + S_{im}$$

$$\text{其中 } R_{im} = -\partial \Gamma_{im}^l / \partial x^e + \Gamma_{il}^p \Gamma_{pm}^l$$

$$S_{im} = -\partial \Gamma_{il}^l / \partial x^m - \Gamma_{im}^p \Gamma_{pl}^l$$

再补充以协变性要求, 爱因斯坦得到了引力场方程

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu}$$

在自由空间中, 该方程变为

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = 0$$

其中 R_{ij} 是里奇曲率张量, R 为标量曲率, T_{ij} 为能动张量, Λ 为宇宙学常数。

广义相对论理论依赖于两个彼此独立的假定。第一个假定是, 引力场对物质的影响可以利用弯曲时空度规 g_{ij} 代替平直时空度规——闵可夫斯基度规描述。其实, 这就是等效原理的数学表述, 这一假定已被厄卓扭秤实验, 以及以后的迪克、贝林斯基 (Belinsky) 等人的实验所证实。第二个假定便包含在爱因斯坦的引力场方程之中。这个方程假定了描述时空弯曲的度规与物质及能量分布间的联系, 又因为能动张量还与其它非引力性质的力有关, 这一方程又反映了引力场与其它力的关系。

与麦克斯韦电磁场方程不同, 引力场方程所包含的十个关于 g_{ij} 变量

的方程组都是非线性的，但是，它对任意曲线坐标变换却是不变的。由于缺乏严格解的普遍方法，只能逐个找到特殊情况下的近似解。例如史瓦西所得到的方程解就是静态球对称引力场方程的特殊解，它已经被著名的三大实验所验证。在得到史瓦西解的同时，一个棘手的问题也随之出现，这就是在史瓦西半径上的度规分量奇点的出现。尽管后来爱丁顿与奥本海默分别找到了消除奇点的坐标系，但是直到 40 多年以后，即 1959 年，弗伦斯克尔(Fronskel)、芬克尔斯坦(Finkelstein)及克鲁斯克尔(Kruskal)引入了新坐标系，奇点不仅被消除，在 $r=2M$ 处还能以“咽喉”将两个渐近平直区域连通起来，此时，人们对奇点有了更进一步的认识。

5. 引力波研究

在引力几何化的过程中，爱因斯坦很重视引力场与电磁场的相似性。1912 年 7 月，在他写给埃伦菲斯特的一封信中说，他注意到他关于静引力场的讨论对应着电磁理论中的静电场情况，而他所称的“广义静止情况”却与静磁场相似。他的“转动圆盘”将产生一种静止的引力的“磁场”，既然电磁波是一种由电场与磁场相互作用的运动形态，引力的“电”与“磁”分量就有可能对应着引力波的存在。

早在 1916 年，即建立了广义协变的引力场方程不久，爱因斯坦就得到了引力场方程的线性近似引力波波动方程解。1922 年，爱丁顿强调指出，这些解从理论上预言了引力波的存在。对于物理理论工作者来说，问题在于如何从实验上探测到引力波以证实它的存在，并如何从实验上确定它的性质，如传播速度与偏振特性等。1918 年，爱因斯坦首先证明，仅仅处于加速状态的质量体系，并不能像电磁偶极子辐射电磁波那样，辐射引力波，这是因为质量总是正的，并且一切物体的引力质量与惯性质量总是精确地保持一致的结果。然而，如果一根质量为 M 、长度为 $2l$ 的质密棒，沿垂直于棒的中心轴高速旋转，并且具有时变的四极矩时，将会有引力辐射产生。首先设法在实验室条件下，对引力波进行探测的是韦伯。1970 年，他宣布实验探测到发自银心的引力波，虽然这一结果被其后类似的其它实验观测否定，但是韦伯的开拓性工作仍具有很重要的意义。从 60 到 70 年代，天文学以及天体物理学的进展表明，某些天体有可能辐射强大功率的引力波。1974 年，通过阿雷西波天文台直径 305 米的巨型射电天文望远镜，泰勒(Taylor, Joseph Hooten Jr.)和他的研究生赫尔斯(Hulse Russell Allen)共同发现了第一颗脉冲双星 PSR1913+16。这颗脉冲双星似乎是专门为验证广义相对论而提供的太空实验室。首先，引人注目的是这颗星发出的脉冲频率。它的频率为 $16.940539184253(1)\text{Hz}$ ，只有最后带括号的一位数字才是不准确的。它的频率随时间的变化又极为缓慢，变化率稳定在 $-2.47583(1) \times 10^{-15}\text{Hz/s}$ 。如果把它视为一台时钟，其精确程度可以与石英钟相媲美。描述脉冲星的轨道运动有五个主要参量，其中一个参量是描述主轴的取向，它类似于太阳系行星的近日点，称为近星点。与水星做对比，它的近星点进动率要比水星近日点进动率高 3 万倍以上，这就为高精度地验证广义相对论提供了方便。泰勒测量到的脉冲星近星点进动率为 $4.2262(1)^\circ/\text{年}$ ，与广义相对论符合得极好。他们还根据年进动率、轨道延迟时间和引力红移等数据综合分析，得出这颗脉冲星的质量为 $1.4410(5)M$ ，其伴星则为 $1.3874(5)M$ 。

在此之前，对广义相对论的验证都是在太阳系内获得的，由于太阳的

引力很弱，使以前对引力理论的验证（如水星近日点进动、光线的引力弯曲以及信号延迟等）仅限于验证引力理论在弱引力近似情况下与牛顿引力的微小偏移，因而难以提高对引力理论的判断与限制，更不能在弱引力情况下，对引力波的预言做出检验。根据广义相对论，双星系统是一种旋转着的质量四极子，它应能以引力波方式辐射能量。与所有束缚在一起的二体引力系统一样，其运行轨道周期将随着能量的辐射而减小。在发现脉冲双星 PSR1913+16 以后，泰勒及其后来的合作者威斯伯(Weisberg, J.M.)、曼彻斯特(Manchester, R.N.) 等人坚持长时间的跟踪观测，对脉冲星扫过的总轨道角及它们随时间如何偏离的线性关系积累了大量的观测数据。此外，为尽可能准确地判断脉冲周期，还需扣除星际介质色散和地球自身运动的影响，再将脉冲到达时间转换到脉冲星参考系。在这一转换中，除要考虑脉冲星及其伴星相互绕行的轨道运动外，还应考虑脉冲星自转及各种相对论效应。排除了上述各因素的干扰之后，他们得到的该双星系统轨道周期随时间的变化率是

$$\frac{dP_b}{dt} = - (2.4101 \pm 0.0085) \times 10^{-12} ,$$

与按广义相对论理论预计值 $dp_b/dt = - (2.4025 \pm 0.0001) \times 10^{-12}$ 极为接近。脉冲双星的发现以及通过对其周期长时间的观测结果，不仅使爱因斯坦的引力理论再一次地获得了高精度地检验，而且进一步证实了引力波的存在，这一重大成果提供了一个基础理论研究与现代高科、技术结合以及各基础研究领域彼此相互渗透的典范。

泰勒 1941 年生于美国费城，1963 年毕业于宾夕法尼亚州哈弗福德学院，1968 年在哈佛大学天文学系获得博士学位。1968 ~ 1969 年，在哈佛大学天文台任天文学讲师并从事研究工作。1969 ~ 1976 年，在马萨诸塞大学任天文学副教授，1976 ~ 1981 任教授，1981 年以后在普林斯顿大学担任物理学教授。研究领域是射电天文学、设计和发展射电天文望远镜与信息处理系统，对脉冲星研究造诣尤深。赫尔斯 1972 年毕业于马萨诸塞大学，1975 年在泰勒指导下，获得博士学位，此间这对师生所研究的课题使他们获得 1993 年诺贝尔物理学奖。1975 ~ 1977 年，赫尔斯在美国射电天文台从事研究工作，1977 年转入普林斯顿大学，在该校等离子体物理实验室进行研究工作，主要的研究领域是，托卡马克受控热核聚变等离子体中的粒子迁移及原子过程的计算机模拟研究。

虽然赫尔斯较早地离开了脉冲星及射电天文研究，泰勒及他以后的合作者们却对脉冲星进行连续观测长达 18 年之久。他们为引力辐射研究积累了大量的技术数据。已记录的脉冲星 PSR1913+16 的站心时间就有 4500 个，其轨道周期的衰减速率的测量精度达到了 0.35%，这些数据可以决定五个开普勒轨道参量和一个后开普勒参量，其精度达到了百万分之几，可以从几个不同的方面“对广义相对论作出有说服力的验证，特别检验了‘电四极矩’导致引力辐射，引力波必须以光速传播”。为了观测脉冲星周期这样一个随时间二次方偏离的效应，长时间的连续观测是必不可少的。在现今社会中，有一种只看重短期效益、崇尚所谓短线科研的趋向。泰勒和他的几个学生、博士后及其它合作者们，潜心专注于大科技领域中的小课题研究，在阿雷西波研究所使用最普通的仪器设备，耐心地进行令人感到乏味的观测研究长达近 20 年之久的上千次观测，这种精神境界以及所取

得的辉煌成果都为世人提供了出色的范例。近几十年的研究发现，宇宙间大致有三种类型的引力波，除了发自脉冲双星的这种频率稳定而持续的引力辐射外，还有引力波背景辐射，它们是宇宙发展各阶段，特别是早期宇宙各个物理过程残留引力辐射的叠加波，它们与其它背景“噪音”混杂，难以区分与观测；第三种是脉冲式或扰动式的引力波，它们由超新星爆发、致密天体塌缩、活动星系核中的剧烈扰动、星震等形成。这种引力辐射的强度虽然较大，但持续时间极短，频带也比较宽，给观测带来较大困难。比较起来，双星的引力辐射既稳定又能持续，频率还确定。如果两颗子星的质量足够大，相距又比较近，它们互相绕行的速度与加速度都比较大，由于引力辐射损失能量，轨道缩小、周期随之变短的效果就比较明显，观测其轨道周期的变化率，将不仅能定量地检测引力波的存在，还能确定引力辐射的特征。到本世纪90年代初为止，在证实引力辐射方面，除了人们公认的 PSR1913+16 是满足上述条件的最好观测目标以外，1990 年还发现了脉冲双星 PSR1534+12，它的轨道周期为 36351.70270 秒，两颗子星相距很近，质量均为 $1.3M_{\odot}$ 。目前正在积累观测资料，以准确地确定其轨道周期变率，人们正期待着这一观测前景。

6. 引力理论的进展

引力是自然界最弱的相互作用，过去在相当长一段时间内，引力研究的进展不仅缓慢，而且除了天体物理以外，与其它学科的联系也甚少。然而，近二三十年来，情况却有所改观，一方面是引力物理随着宇宙学与高能天体物理的进展而发展，另一方面，在凝聚态物理、材料科学中，微引力物理的发展令人瞩目地崛起，与此同时，引力理论自身也在迅速地发展着。最初，引力理论沿着两个不同的方向发展，一是把电磁场理论纳入引力理论之中的研究，一是引力理论向宇宙学方向发展。(1) 引力与电磁场的统一性研究

电磁场是一种规范场，麦克斯韦方程是一种最简单的规范场方程。包括电磁场、引力场在内的规范场都可以被视为一种几何结构，它们都具有拓扑性质，也具有可以以几何方式表述的辐射特征。在建立相对论后不久，爱因斯坦即注意到了这些相似性。他认为“存在两个独立的空间结构，引力的、电磁的，这两种场应该存在于一个统一的空间结构之中。”1930 年以后，爱因斯坦把他的大部分精力投入到引力与电磁力的统一研究之中。与爱因斯坦一起，还有几位数学家，如列维-契维塔(Levici-vi-ta)、嘉当(Cartan)、魏尔(Weyl)等人，都热衷于这一工作。魏尔曾试图像爱因斯坦那样，从几何学上用弯曲时空解释这两种力。他确信，通过对时间、空间连续体的研究，可以把引力与电磁力联系起来。首先必须把电磁场方程用于黎曼空间，以便与爱因斯坦的引力理论接轨。为此，魏尔大胆地尝试着应用规范不变性的设想，令时空两个无限临近点 x^{ν} 与 $x^{\nu} + dx^{\nu}$ 间，

场量 f 分别取 f 与 $f + \partial f / \partial x^{\mu} dx^{\mu}$ 值。

考虑到在规范变换中，各时空点的变换率不同，

在两个时空点间应从 f 到 $f + (\partial_{\mu} + S_{\mu}) f dx^{\mu}$ 变换。

由于规范场 S_{μ} 与电磁场量 A_{μ} 都具有四个分量，

而且为保持变换不变性要求，

S_{μ} 与 A_{μ} 都分别以 $\partial_{\mu} S_{\nu} - \partial_{\nu} S_{\mu}$ 及 $\partial_{\mu} A_{\nu} - \partial_{\nu} A_{\mu}$

相同的方式出现，按此方式可以把电磁学统一起来。虽然在初期，这一工作取得了一些进展，但是毕竟引力场与电磁场分属于两个完全不同的范畴，进一步的研究遇到了难以克服的困难。泡利和爱因斯坦都认为魏尔的理论虽然在数学上很有趣，但与电磁学理论的联系越来越远，以致后期的进展不大，最后魏尔放弃了原来的想法。

在量子力学诞生后，于 1927 年，福克(Fock)和伦敦(London)注意到电磁动量应用

$$R\mu - \left(\frac{e}{c}\right)A\mu \text{ 改变为 } \partial\mu - \left(\frac{ie}{hc}\right)A\mu \text{ 表示,}$$

规范场量 $S\mu$ 应看作为 $-(ie/hc)A\mu$ 。

i 的引入表明，应当把规范变换换作为位相的变换。由于电磁场的位相在复平面单位圆上是 $U(1)$ 位相，而单位圆上的两个复数相乘仍在单位圆上，它们形成变换群，即李群。由这种复杂的位相所组成的变换不变性，称为非阿贝尔规范理论，

$$\text{于是电磁理论可以表示为 } S^{\kappa\mu\nu} \partial_\lambda F_{\mu\nu} = 0 \quad (1), \quad \partial^\nu F_{\mu\nu} = j_\mu \quad (2),$$

(1) 表示法拉第定律和高斯定理，(2) 表示安培定律和库仑定律，而非阿贝尔运动方程则为 $S^{\kappa\mu\nu} D_\lambda^{\mu\nu} F_{\mu\nu}^j = 0$

$$(3) \text{ 和 } D_j^{\nu i} F_{\nu\mu}^j = j_\mu^i$$

$$(4), \text{ 其中 } D_\lambda^{\mu\nu} = \delta^{\mu\nu} \partial_\lambda - ig C_k^{\mu\nu} B_\lambda^k, \quad F_{\mu\nu}^i = \partial_\mu B_\nu^i - \partial_\nu B_\mu^i - v B_\mu^i - ig C^{ijk} B_\mu^j B_\nu^k.$$

从对比中不仅看到了它们之间的相类似之处，而且根据位相概念，很自然地引入了 C^{ijk} 与 B^k ，并用普遍的协变微分替换了普通的微分。

本来，在 $U(1)$ 情况下，一个变换只对应圆周位置上的一个参数，但在复杂的李群情况下， $SU(2)$ 需要 3 个参数， $SU(3)$ 需要 8 个参数，使变换异常复杂起来。虽然电磁力与引力的统一至今没有结果，有一点却是肯定的，它导致了对电磁场是一种位相场的正确认识。一个复杂的位相场就是李群，而复杂的位相所组成的变换不变性即为非阿贝尔规范理论。电磁力与引力的统一应该与非阿贝尔理论紧密相关。

非阿贝尔规范理论是在 1954 年由杨振宁和密耳斯(Mills, R.L.) 提出来的。1961 年，格拉肖(Glashow, Sheldon Lee 1932 ~) 首先把这一理论用于电磁作用与弱作用的统一。1967 年温伯格(Weinberg, Steven 1933 ~) 与萨拉姆(Salam, Abdus 1926 ~) 又在对称性自发破缺的基础上，提出了电磁与弱相互作用的具体模型，并预言了弱中性流的存在。1970 年胡福特(Hoof t) 等人又将这一模型做了重正化发展。1973 年，美国费密实验室与欧洲核子中心相继发现与模型一致的弱中性流。人们确信，非阿贝尔规范场理论不仅是把电、弱，甚至还将是把引力以及强相互作用都统一在内的有力工具。

(2) 引力的“磁性”研究

与引力和电磁力相关性研究相紧密联系的还有关于引力的“磁性”研究。广义相对论的三个经典检验都只涉及引力的“电”分量，即广义相对论中的引力势部分。在牛顿引力理论中，引力只具有“电”分量，它是相对论引力理论在弱引力情况下的近似。然而在广义相对论的理论框架之下，引力应该有其“磁”分量，这一分量与牛顿引力没有近似的对应关系。爱因斯坦在他的转动圆盘中，早就做出过预言，静止的质量只引起引力的

“电”分量，而运动的质量将引起引力的“磁”分量，旋转的质量会有引力的“磁矩”，两个运动着的旋转体之间会有引力“磁矩”的相互作用，这些均是牛顿引力理论中所没有的。检验引力的“磁”分量是否存在，自然成为鉴别牛顿引力理论与广义相对论二者的关键之一。

检验的原理很简单，用一个在空中旋转的陀螺，根据广义相对论，在旋转的陀螺和旋转的地球之间应该有引力的磁力作用，陀螺会发生进动，进动的方向和进动的速率与地球的旋转有关。这种相互作用与原子物理学中自旋-自旋相互作用十分相似。自旋-自旋相互作用十分微弱，只引起光谱中的谱线的超精细结构。陀螺与地球之间的引力“磁”作用也十分微弱，对一个放置在 600 千米高空的陀螺，地球引力磁作用，所引起的最大进动率也只有 0.044 /年。

相对论陀螺实验开始于本世纪 80 年代，美国斯坦福大学物理系一个实验小组计划在本世纪完成这项实验。他们的回转仪是一个不球度和不均匀度均极小（相对几何不球度和相对密度不均匀度均小于 3×10^{-7} ）的熔融石英晶体球，球外由铌超导体覆蔽，并由安放在真空度小于 10^{-8} 托的高真空石英球腔内的静电装置旋空支撑，整个装置安放在卫星舱内的液氮中，使腔壁冷却温度在 9K 以下。利用液态氦气流吹动小球，使其转动角速度达到每秒几百转。为了精确地测量到回转仪的进动，必须在无接触条件下，精确地确定回转仪转轴相对卫星的指向。他们选择了七妙的方法，这就是利用磁场进行。当然首先需要对卫星有良好的磁屏蔽，以消除地磁及其它杂散磁场的干扰，它们的强度不得高于 10^{-7} 高斯数量级。旋转超导球由于伦敦效应被磁化后，磁矩的轴与旋转的轴相垂直，轴的方向可以利用根据约瑟夫森效应工作的高灵敏度超导磁强计测出。这一实验对卫星的要求也很严格。首先它应相对宇宙空间某颗不动的恒星保持定向，定向角度的偏离不得大于 $0.001''$ 。为此，装在舱内的定向望远镜镜片应由石英制造，并冷却到液氮温度，在液氮温度下，它们的主光轴由于湿度变化的漂移角度不得超过 $0.001''$ 。这一实验的构想新颖，设计巧妙，不仅难度很大，而且应持续数年、十数年甚至数十年才能有明显的结果。在这以前，对广义相对论的检验只涉及引力势的相对修正量测量，即只涉及引力的“电”分量，而这一实验，是从引力的旋度分量，即只涉及引力的“磁”分量，而这一实验，是从引力的旋度分量，即从“磁”分量入手进行引力理论的检验，因此它具有十分特殊的地位，世人正以极大的兴趣密切地注视着它的进展。

(3) 奇性与宇宙监督原理

引力场方程在静态球对称真空条件下的史瓦西解是一个精确解，它描述了渐近平直空间中，质量为 M 的孤立球对称物体的引力场。在通常使用的坐标系中，度规分量在史瓦西半径 $r=2M$ 处变为奇点。在 1959 年，经弗伦斯卡尔(Fronskel)、芬克尔斯坦(Finkelstein)及克鲁斯克尔(Kruskal)所证实，这一奇点仅是一个“虚假的”数学奇点，时空结构在这一点所产生的“质变”可以通过坐标系的重新选取而消除。虽然如此，相对性引力理论的奇点问题并未消除。

由于引力可以在整个宇宙中产生一种宇观的效应，任何引力理论的发展都会导致对宇宙整体结构的一种解释，随之出现与之相应的一种宇宙模型。牛顿引力理论也如此，然而它所面临的问题是，由这一理论，导致宇

宙中的一切物体必须回落到一起，这与当时人们所认为的宇宙基本上不随时间变化的观念相矛盾。广义相对论建成后，爱因斯坦只是靠把宇宙学项硬加到场方程中，才克服了这个“吸引”问题。此外，爱因斯坦的静态宇宙模型仍然是不稳定的，只要有一点微小的扰动，就会使它无休止地塌缩或膨胀起来。1920年，美国天文学家斯里弗(Slipher, Vesto Melvin 1875 ~ 1969)与哈勃(Hubble, Edwin Powell 1889 ~ 1953)观测到遥远星系的退行以后，爱因斯坦的静态宇宙模型即被人们放弃了，描述膨胀的第一个宇宙模型由美国物理学家弗里德曼(Friedman Herbert 1916 ~)给出。1922年，弗里德曼的宇宙模型又被罗伯孙(Robertson)与沃克(Walker)所推广，他们的模型假设宇宙是均匀和各向同性的。1951年，陶伯(Taub)建立了第一个各向异性的宇宙模型，其后又被赫克曼(Heckmann)和舒金(Schucking)所发展。1965年，彭齐阿斯和威尔孙发现了具有高度各向同性的微波背景辐射表明，宇宙的大尺度结构相当近似于弗里德曼模型。很快地，观测得到的宇宙氦和氘的丰度又与弗里德曼模型中的合成计算符合得很好。这些都证明，弗里德曼模型是一个较好的近似宇宙模型。然而，弗里德曼宇宙模型却要求有一个初始奇点，即初始大爆炸产生。

从弗里德曼模型问世时起，回避该模型的奇点研究就一直在进行着。1948年，邦迪(Bondi)、戈尔德(Gold)与霍伊尔(Hoyle)就曾提出宇宙处于稳恒状态，即全部时空点处于相同的面貌，当星系彼此退行时，各时空点的物质也在随时相应地产生，宇宙总保持着密度、状态上的稳恒。这一解释虽然避开了奇点，却与后来的射电源及宇宙微波背景辐射的观测相矛盾。回避奇点的研究还在其它几种途径上进行着，例如，1963年，利弗席兹(Lifshitz)和卡拉特尼科夫(Khalatnikov)把具有奇点的引力场方程解在奇点附近做幂级数展开，他发现，在具有奇点的解中所包含的任意函数比普通解中要少，因而做出推测，具有奇点的解在全部解空间中的测度可能为零。然而后来发现，情况并非如此，在有的普通解中，任意函数仍足够多，奇点仍不可避免。几十年来的理论研究表明，所有回避奇点的尝试都不太成功。1965年彭罗塞(Penrose)通过整体微分几何证明，如果某些整体性条件得以满足，恒星塌缩过程中的奇点是不可避免的。彭罗塞的方法又被霍金和杰罗奇(Geroch)所推广。从1965~1970年间，他们提出了若干理论，并把它们用于宇宙学研究。他们于1970年提出奇点定理。

该定理表明，若满足下列整体条件：广义相对论正确，对任何类时向量 V^a ，物质的能动张量满足

$$(T_{ab} - \frac{1}{2}g_{ab}T)V^aV^b > 0,$$

不存在闭合类时曲线，任何类时或零测地线上都包含某一点，在该点处有 $V_{[a}R_{b]cd[e}V_f]V^cV^d > 0$ ，在某点 p ，使从 p 发出的指向过去或未来的零测地线再次收敛时，奇点是不可避免的。实际上，在现有的相对论引力理论框架下，上述这五项条件都是合理的。条件 已被若干实验所证实，条件 适用于任何正质量密度和正压力的物质，条件 表明不可能回到自己的过去，这是对因果律的要求，条件 表明，每一条类时或零测地线都会与某些物质或曲率取向无规则的点相遇，条件 要求宇宙中的物质或能量足够集中，使从某点 p 发出的指向过去的每一条光线会聚，这意味着宇宙中存在有足够多的物质，得以使条件 满足。

奇点定理表明，广义相对论的本身就预言了奇点的存在，因为在一般情况下，每一条类时或零测地线都会存在一个起点。这一定理还表明，当一个恒星收缩到小于史瓦西半径内，就会出现奇点。在奇点处，人们不知道所遵循的规律，丧失了预言未来的能力，而且每一次的恒星塌缩都会在宇宙中增加一个不可知的因素。为摆脱这一困境，人们提出了如下猜想，奇点虽不可避免，但是所形成的奇点是出现在所谓的黑洞范围以内，光线与其它任何信息都不可能从那里逃离出来，人们不能观测到奇性，或奇性与人们日常生活的经典范围不可能发生任何联系，因而物理原则也就不可能被破坏，这一猜想即被称为宇宙监督原理(hypothesis of cosmic censorship) 无论证明或否定这一原理都是相对论引力理论所面临的重要课题之一。参与这一课题研究的有威勒(Wheeler, J. A.)、伊斯瑞尔(Israel, W.)、德洛奇克维奇(Doroschkevich, A.G.)、杰尔多维奇(Zel'dovich Ya.B.)和诺维柯夫(Novikov, S.P.)。

(4) 量子引力理论

20世纪基础物理研究的巨大成就，当归功于相对论、量子论与引力论的建立。相对论、量子论和引力论都具有普适性，它们的普适性的一个重要体现分别表现在 c 、 h 和 G 这三个普通常数上。然而，三个理论是否真的具有普适性，还在于它们彼此间的相容性，广义相对论的建立证实了引力论与相对论的相容性。

量子理论的发展证明，物质的各种运动形态都遵从量子化的要求，与此同时，一切相对论性场，如电磁场也应是量子化的。在场量子化研究的初期，曾出现了一系列的发散困难。在 40 年代末，量子化电磁场的发散困难初步通过重正化理论得以解决。发散困难的最根本解决是在 60 年代完成。弱电统一理论的建立，不仅解决了弱相互作用中的发散困难，而且在类似弱相互作用的框架之中，还可望在强相互作用领域解决相对论与量子论的相容性。最困难的一步就是引力论与量子论的相容，这一步骤的一个主要目标就是建立量子化的引力理论。量子引力理论的研究还起源于广义相对论的奇点问题。由彭罗塞提出，后经霍金和杰罗奇等人最终建立的奇点定理表明，在相当宽的物态条件下，引力场方程的解必定具有奇性。奇性的存在表明，广义相对论属于服从因果律的经典物理范畴，在奇点处，这一理论不再适用。有可能在考虑到引力场的量子性之后，奇性自然消失，这一猜测随后在霍金黑洞蒸发理论中得到了支持。

迫使人们研究量子引力理论的第三个动机来源于大统一理论。弱电统一理论已经建成，弱电与强相互作用的大统一理论正是当前的热门课题，研究过程表明，必须同时考虑到它们与引力作用的统一，而这一统一的实质就是建立量子引力理论。经典物理学的理论框架是建立在因果律的基础上的，经典物理学依赖于物理定律和它相应的边界条件，然而当问题涉及到奇点，而这个奇点又不是数学或模型的缺陷由人为造成的时，奇点很难消除，又很难给出合理的边界条件，这就迫使人们必须重新考虑原有的理论。

沿着膨胀和暴涨的宇宙反向历程，应用经典宇宙学所给出的框架，回溯宇宙在暴涨之前的状态，很自然地会得到宇宙的尺度将趋于零。这意味着，引力场的强度以及物质场的能量密度将趋于无限大，宇宙是从一个奇点演化而来的，而这个奇点并非由于模型的缺陷人为引起的。早在 60 年

代，彭罗塞和霍金就曾利用整体微分几何证明过，奇点不仅是高度对称的，而且是广义相对论的必然产物。这意味着，在广义相对论的理论框架之中，不可能找到解决奇点的方案，或者说，尽管广义相对论揭示了时空的引力弯曲，但它对于极高曲率的空间并不适用。量子论的鼻祖普朗克很早就主张，应在所有的自然力之间建立联系。1899年，他首先提出了“普朗克长度”这一普适的这一最小长度 L_p ，以后又陆续提出了“普朗克时间” t_p 、“普朗克温度” T_p 与“普朗克质量” M_p ，它们分别为 $L_p=(hG/c^3)^{1/2}=4.05 \times 10^{-33}\text{cm}$ ， $t_p=(hG/c^5)^{1/2}=1.35 \times 10^{-43}\text{s}$ ， $M_p=(hc/G)^{1/2}=5.45 \times 10^{-5}\text{g}$ ， $T_p=(hc^5/k^2G)^{1/2}=3.56 \times 10^{32}\text{K}$ 。由于 h 、 c 和 G 三个常量都是相对论不变量，以它们为基准的普朗克自然单位将是不变和唯一的，这一点具有深刻意义。审查上述量的大小不难看出，温度 T_p 极高，甚至比宇宙大爆炸时刻的温度还高，长度 L_p 、时间 t_p 却极小，质量 M_p 也不很大，虽然这些值都是实验室条件下无法得到的，它们却使人们想到，在暴涨之前的宇宙这些是否是可以接近的尺度，因此，应该由一个量子化的广义相对论取代经典广义相对论。

本世纪初，量子力学诞生之后，量子力学原理首先用于解释微小系统——原子结构方面的困难，确立了薛定谔方程，同时也得到了有关原子特征的一系列量子力学描述。本世纪60年代以来，当人们试图用量子力学解释巨大的体系——宇宙结构时，却发现它们之间有着惊人的相似。首先，在具有电磁作用的质子与电子微小体系中，重要自由度 $r(t)$ 在趋于零时，产生奇点的经典困难，而在具有引力作用的大物质体系中，重要自由度标度因子 $R(t)$ 在趋于零时，也产生奇点的经典困难；微小电磁体系具有玻尔半径 10^{-8}cm 的量子长度，而引力作用体系则具有普朗克长度 10^{-33}cm 的量子长度；微小体系服从薛定谔方程的动力学规律，而引力体系则有惠勒-德维特方程。关于这两个体系间的相似与联系，近年来的研究又有了新的进展。本世纪60~70年代，德维特(DeWitt, B.S.)、米斯纳(Misner, C.W.)和惠勒等人在量子宇宙学方面做出了重要的基础性工作，他们建立了描述宇宙量子特征的惠勒-德维特方程，然而求解这个方程却面临边界条件的确立。因为最初宇宙究竟处于什么状态仍然不能确定。

1967年，德维特曾企图不依靠边界条件，仅仅根据数学上的自洽，得到惠勒-德维特方程的解，即宇宙的波函数，但是这个愿望最终没能实现。从70年代末到80年代，哈特尔(Hartle, J.B.)和霍金又提出了一个称为“无边界”的方案。他们利用40年代由费因曼(R. Feynman)发展起来的路径积分法的量子力学形式，大胆地确定了一个称为无边界条件的宇宙波函数。此外，林德(Linde, A.D.)和维伦京等人又分别提出了“隧道效应”方案，由此得出了称为隧道波函数的宇宙波函数。这两个波函数都表明，宇宙在足够大，即几千个普朗克长度时，时空是经典的，理论结果与观测宇宙学的结果相一致；但当宇宙尺度极小时，宇宙不仅有着极为复杂的拓扑结构，这个结构还不断发生变化，这种变化是起伏的，人们把它形容为“长满了茸毛”的普朗克尺度极早期宇宙，宇宙在“量子茸毛”中创生。尽管到目前为止，尚没有一个成熟的量子引力理论，然而80年代以来，在量子引力课题的研究方面，已经取得了一些有价值的成果。首先，已能较好地说明了均匀性问题。大爆炸宇宙学的均匀性问题曾使人们多年来感

到困惑，原因是在宇宙中，各种尺度的星系、星系团、超星系团结构是高密度区，巨洞又是低密度区，宇宙中物质的分布是不均匀的。然而，从微波背景辐射的观测可以看出，各向同性不超过万分之一，甚至十万分之一，这表明，物质在早期宇宙的分布是均匀的，此外，各种天体氦含量的一致以及不同方向计数结果的一致，也同样表明早期宇宙物质的均匀性。当今宇宙的非均匀性应当从早期的均匀状态演化而来，而非均匀性发展的机制就来自于引力的不稳定性。然而，最初不稳定性的机制来自何处，这正是大爆炸宇宙学的难题之一。原来所提出的热涨落机制已被证明是不存在的，因为这种热涨落所产生的涨落谱，还不能说明当今宇宙所呈现非均匀性的定量特征。

80年代以来，在用量子引力理论解释非均匀性起源机制方面，已经取得了一些进展。有两个非均匀性起源的机制理论很有生命力。其一是宇宙真空量子涨落，它认为，宇宙年龄在 10^{-36} s 以前，真空涨落是唯一可能的起伏源。虽然这一涨落只在普朗克常数数量级，但是由于整个暴胀阶段是一个熵增加的耗散过程，初始的量子涨落将具有 Zel'dovich 谱，由它可以解释星系成团结构的出现。另一种解释是宇宙弦理论。该理论认为，当温度足够高时，由于自发对称破缺，真空相变起伏，宇宙将出现面、线、点等缺陷。线状宇宙弦还可能重联后，演变成环或弦，它们再吸引物质，就形成各种尺度的天体，这一解释正好又说明了天体分布的自相似性。目前，这两个模型在解释有关星系的条状结构、巨洞结构，星系的亮度，星系、星系团的运动速度、角动量以及 3K 背景辐射的各向异性、红外背景辐射、引力波背景等方面都取得了不同程度的成功。

(三) 宇宙学的进展

在物理学研究深入发展的同时，人们也在力求对时空大尺度上，即从整体上认识宇宙。宇宙的起源、结构和演化都是人们关心的课题。物理学与高科技的结合，创造了口径相当于 25 米的巨型光学望远镜、空间 X 射线和红外线望远镜以及地域甚大的天线阵列射电望远镜，这不仅使人们观测宇宙的窗口从红外、可见光一直延伸到 X 射线和 γ 射线整个波段，还使观测宇宙的时空尺度伸展到了 170 亿光年。如今，在人类面前，已展现出一幅生动壮丽的宇宙画面。

以现代高能粒子物理与广义相对论为基础建立起来的理论宇宙学，已能从理论上描述出从原始火球大爆炸，到星系形成和演化的整个过程。大爆炸模型已经由现代天文学的观测，如河外星系谱线红移、3K 微波背景辐射以及氦丰度等得到了一定的证实。与此同时，在解决这一模型自身的问题，如视界问题、平坦性问题和磁单极问题等的过程中，与高能物理真空相变理论相结合，又发展成更为完善的暴胀宇宙模型。虽然具有暴胀机制的大爆炸模型为宇宙学的发展奠定了基础，然而随着量子引力理论的发展，有关量子宇宙学的一系列更深层次的问题，如宇宙时空拓扑结构、基本耦合常数的真空参数问题、宇宙常数的动力学解释等，又引起了新一轮的激烈争论。这场理论研究的重要进展的源头，即把世人的目光从一般天体引向宇宙整体的就是哈勃定律的建立。

1. 哈勃定律与膨胀的宇宙

研究表明，宇宙的年龄、演变及结局，在很大的程度上决定于它的膨胀速率。对宇宙膨胀的观测大体分成两个方面，这就是测定星系的运动速率与测定地球到星系的距离。前者关系到宇宙的形成模型及有关理论的发展，而后者则是估算天体亮度、质量和大小的重要依据，然而无论哪一种，都取决于哈勃常数的测量。哈勃常数已成为近代宇宙学中最重要基本常数之一。20 世纪初，几台口径 1 米的大型望远镜陆续建造成功，它们为河外星系的系统观测创造了条件。美国天文学家哈勃 (Hubble, Edwin Powell 1889 ~ 1953) 在这种条件下，为现代天文学与宇宙学做出了重要的贡献。哈勃 1910 年毕业于芝加哥大学天文学系，后到英国牛津大学读书，在那里获得法律学硕士学位。1914 年至 1917 年在耶基斯天文台攻读天文学博士学位。第一次世界大战期间，曾在法国服役，战后在威尔逊山天文台从事星系的观测研究。当时的威尔逊山天文台已建成 100 英寸的天文望远镜。利用这台望远镜，哈勃把观测的目标集中在他所称的“一片片的亮雾”之上，这就是星云。与哈勃同时代的一些天文学家也在对这些星云做了大量的观测工作，例如在里克天文台工作的美国天文学家柯蒂斯 (Curtis, Heber Doust 1872 ~ 1942) 致力于河外星系的研究，他借助对新星的观测及利用星系角大小估算距离，认为所观测到的绝大部分星云都属于河外星系。热衷于星系观测与研究的还有美国天文学家沙普利 (Shapley, Harlow 1885 ~ 1972)，他曾任美国哈佛大学天文台台长，1915 ~ 1920 年间，曾用威尔逊山天文台 100 英寸望远镜研究旋涡星云，他利用勒维特 (Leavitt, Henrietta Swan 1868 ~ 1921) 发现的造父变星作为量天尺，确定了这些星云的距离，认为它们大约距太阳 5 万光年左右，应该属于银河系，因此将银河系的尺度扩展到原有的 3 倍。沙普利还第一个提出，太阳系不

处在银河系的中心，虽然他把太阳从银河系的中心地位赶了下来，却又把银河系放到了宇宙的中心之上。柯蒂斯看法则不同，他认为宇宙中充满着大量的像银河系那样的恒星系统。1920年，在美国国家科学院，柯蒂斯与沙普利的两种不同观点正式交锋，虽然在这场论战中柯蒂斯占了上风，却并未有得出公认一致的结论，直到三年后，哈勃给出的观测事实，才使上述论战有了决定性的结果。1923年，威尔逊山天文台建成了2.5米口径的天文望远镜，哈勃利用它在仙女座星云外缘找到一颗造父变星，根据其光变周期与光度之间的关系，他推断出该星的距离为15万秒差距（实际为80万秒差距），比沙普利的银河系要大得多。这表明，仙女座大星云是一个河外星系，从而结束了河外天体是否存在的辩论，使天文学家的研究领域迈出了银河系。与哈勃同时代的另一位天文学家斯里弗(Slipher, Vesto Melvin 1875~1969)也对星云研究感兴趣。他对星系光谱做了大量的观测。1921年，他首先把多普勒-斐索效应应用于仙女座大星云，发现所观测到的星系光谱波长大多比实验室观测到的要长，这表明，这些星云都在远离地球退行，其退行速度大大地高于恒星的视向速度。1929年，在同行们研究成果的基础上，哈勃仅以24个已知距离星系的观测资料为依据，做出了速率-距离的关系图。图中显示速率与距离值成正比，即 $v_r = H_0 r$ ， v_r 为星系对银河系的视向速率，上式即为哈勃定律，式中的常数 H_0 就是哈勃常数，由这一常数得到的宇宙年龄 $H_0^{-1} = 1.84 \times 10^8$ 年，该值恰与当时用散射方法观察到的地壳中古老岩石年龄 1.8×10^8 年惊人地一致，哈勃的结果，很快地得到认同。哈勃的这一结果，不仅证明了整个宇宙处于膨胀之中，而且这种膨胀速度与距离 r 成正比，因而既是处处没有中心又是处处为中心的。为了扩展观测的范围，需要能观测到更为遥远星系团中的星系。由于工作量的骤增，哈勃开始与赫马逊(Humason, Milton LaSalle 1891~1972)合作。哈勃负责测量星系的亮度，赫马逊负责测量红移量。赫马逊并非科班出身，最初只是威尔逊山天文台的一位看门人，工作之便使他热爱上了天文学，在为别人假期代班的天文观测中，显示了他出众的才华和娴熟的观测技巧，不久即正式投入天文学研究。在哈勃去世后，他继续了哈勃的天文观测事业，1956年，他又与其他人合作，利用观测到的资料，改进了哈勃定律，因而与勒梅特和盖莫夫的大爆炸理论取得了一致。

2. 哈勃常数值修正的三次高潮

从原理上看，似乎哈勃常数的测定是简单的，即只要测出星系距离与退行速率，即可由哈勃定律得到哈勃常数。然而在实际上并非如此，星系的速率可以直接从谱线红移获得，可是距离的测量却是既困难又复杂的。对于1000万光年以内附近星系的距离，天文学家们的测量结果都比较一致，这种测量以造父变星为量天尺进行。1908年，在哈佛天文台工作的勒维特在南非观测时发现，造父变星的亮度周期性变化，光变周期越长，平均亮度也越大。这一发现具有不寻常的意义，因为观察亮度变化的整个过程，就可以得到光变周期和视亮度，随后即可计算得到它的绝对亮度。再根据距离加大，视亮度递减的关系，即可由绝对亮度与视亮度之比，确定造父变星的距离。因此，把造父变星作为量天尺，利用三角视差法，逐步扩大测量范围，不仅可以量出银河系的大小，还能测量出各河外星系的大小和距离。在20年代，哈勃用造父变星证实了银河系以外还存在有其它星

系以后,从 30 年代到 50 年代,哈勃与桑德奇(Sandage, Allen Rex 1926~)等人,又在附近星系中寻找更多的造父变星以确立更新的量天尺,为此做了大量的工作。他们成功地测量了十几个星系的距离,改进了确定哈勃常数的基础。

最初的哈勃常数值为 $H_0=550$ 千米/秒/百万秒差距(以下单位略)。1936 年,考虑到星际消光因素,哈勃常数被修定为 $H_0=526$ 。在最初,这一数值被认为是准确的,因为按 H_0^{-1} 得到的宇宙年龄恰好与当时的地质观测结果相一致。二战之后,利用造父变星为量天尺,使哈勃常数逐渐得到了修正。1952 年,在威尔逊山帕洛马天文台工作的旅美德国天文学家巴德(Baade, Walter 1893~1960)掀起了哈勃常数修正的第一个高潮。这次高潮是由修改量天尺引起的。此时,帕洛马天文台 5 米口径天文望远镜建成并开始运转。巴德利用他的精确而系统的测量,不仅在仙女星座中找到了 300 个以上的造父变星,而且还发现恒星分为两种星族,每一星族都有自己的造父变星,它们只适用于附近星系,而原有哈勃定律所针对的则都是建立在第一星族基础上的造父变星。随着对造父变星周光曲线的修定,随着观测尺度的加大,必须更换原有哈勃常数测定中的量天尺。经巴德计算,遥远星系的距离比原来的估计值增加了一倍,哈勃常数将比原来减小一倍。1952 年,巴德在罗马举行的第 8 届国际天文学大会上,宣布了他的结果, $H_0=260$ 。

哈勃常数修正的第二个高潮由哈勃的接班人桑德奇掀起。桑德奇是一位著名的实测天文学家,从 1956 年开始,他在帕洛马天文台对哈勃常数进行了系统的测量工作。在几年的时间内,他得到了 600 多个星系的数据,最大的红移量值达到 $Z=0.202$,所得到的哈勃常数值为 $H_0=180$ 。在此基础上,桑德奇又对哈勃常数做了进一步的修正,他们再度更换量天尺并把观测范围进一步加大,此时原有确定距离的方法已不再适用,因为当星系距离达到了几百万秒差距时,望远镜已无法区分星系中单个的星,必须寻找代替造父变星做为新距离标准的“指示体”。他们通过天体的绝对星等和视星等的关系,先确定指示体的距离,再由指示体确定星系距离。他们认为能作为距离指示体的有,造父变星、H 区、球状星云、超新星和椭圆星系等。1961 年,桑德奇在美国伯克利召开的国际天文学大会上宣布,总估各种测量结果,哈勃常数值应在 75 与 113 之间,最或然值为 $H=98 \pm 15$,一般可取为 100。这一结果表明,宇宙的尺度要比人们早期预期结果远大得多。

进入 70 年代以来,哈勃常数的测定日益受到天文学家们的重视,对它的测量方法也更加系统,测量的精度也日益提高,因而形成了哈勃常数修正的第三次高潮。然而,这次修正高潮之后,局面却日益复杂化。哈勃常数的各次测量值越来越多地接近高低两个值上。桑德奇和他的合作者塔曼得到的值是 50,而德克萨斯大学的德瓦科列尔(de Vaucouleurs)的结果却是 100,两个值的测量方法都是以造父变星为起点,其后选用不同距离的指示体进行的,结果竟然相差一倍,不仅出现了哈勃常数纷争的局面,也使人们在实际运算中,出现了任意选择的局面,有人选取 50,有人选取 100,还有人选择平均值 75,虽然这些值的选取都具有权威性,但是仍无法最后判定哪一个最准确。目前,对哈勃常数做出裁决为时尚早,但是,

从其它方面得到的佐证中，仍然可以提出带有倾向性的意见。

根据哈勃常数值，宇宙的哈勃年龄应为 $t_0=19.7 \times 10^9$ 年和 $t^9=9.8 \times 10^9$ 年。然而宇宙的年龄还有其它的估算方法。一种方法是测量矿石中放射性元素的含量，根据其半衰期加以估算。对各种放射性元素综合测量的结果，所给出的宇宙年龄是 1×10^{10} 另一种较为有效的方法是测定球状星团的年龄。根据球状星团的赫罗图，得出它们的年龄在 $(10 \sim 20) \times 10^{10}$ 综合这些从不同角度得到的估算结果，宇宙的年龄不超过 200 亿年，这表明取小值哈勃常数更符合实际。

由于哈勃常数已成为近代宇宙学中最重要也最基本的常数之一，近年来，对它的研究已成为十分活跃的课题。正式发表的有关哈勃常数的论文已有数百篇。1989 年，著名天体物理学家范登堡 (Van den Bergh) 为天文学和天体物理评论杂志撰写了一篇权威性论文，它综述了截止到 80 年代末所有关于哈勃常数的测量和研究结果，最后认为，哈勃常数的取值应为 $H_0=67 \pm 8$ 。

3. 多余天线温度的发现

1963 年初，在贝尔实验室工作的年青物理学家彭齐亚斯 (Penzias, Arno Allan 1933 ~) 和射电天文学家威尔逊 (Wilson, Robert Woodrow 1936 ~) 合作，测量银河系内高纬星系的银晕辐射。他们所使用的射电望远镜原是由于接收人造卫星“回声号”回波用的大喇叭口天线加辐射计制成。他们还采用了当时噪音最低的红宝石行波微波激射器，并利用液氮致冷的波导管作为参考噪音源，因为它能产生功率确定的噪音以作为噪音的基准，使噪音的功率可以用等效的温度表示。由于当时的手头正好有一台 7.35cm 的红宝石行波微波激射器，他们就先在 7cm 波段上开始了天线的测试工作。

彭齐亚斯和威尔逊的测量结果表明，天线的等效温度约为 $6.7 \pm 0.3K$ ，天线自身的温度为 $3.2 \pm 0.7K$ ，其中大气贡献为 $2.3 \pm 0.3K$ ，天线自身欧姆损耗和背瓣响应的贡献约为 $1K$ ，扣除这些因素，最后得到，天线存在有多余噪音，它的等效温度约为 $3.5 \pm 1K$ 。尽管他们采用了各种措施，把各种估计到的噪音来源尽量消除，这个多余噪音的等效温度值依然存在，它不仅稳定，而且均匀无偏振，在任何方向都能接收到。

彭齐亚斯和威尔逊观测到天线多余噪音温度现象，带有一定的偶然性，因为实验并没有在理论的预言或指导下进行。然而可贵的是，他们重视观测的结果，忠实于原始资料，不但没有轻易放弃偶然观测到的现象，反而抓住它们一追到底。并想方设法挖掘观测事实背后的意义，这就使他们能不失时机地做出重大发现。在这一成功之中，更难能可贵的是贝尔实验室对实验工作的支持。这一当今最大的工业实验室，拥有数千名才华出众的科技工作者，他们在进行电话、电报技术发展与开发业务的同时，始终重视基础科学，特别是基础物理学的研究工作。它在世界通讯事业中起着中流砥柱的作用，在物理学研究中，也取得了许多令世人瞩目的成果，例如，在天体物理学方面，1931 年，贝尔实验室的电信工程师央斯基 (Jansky, Kart Guthe 1905 ~ 1950) 首先发现了来自银心的周期性噪音射电辐射，从此开创了射电天文学的新领域。这次彭齐亚斯与威尔逊的观测是贝尔实验室与国家射电天文观测台合作进行，贝尔实验室远见卓识地

从人力、设备与资金上给予了大力支持，提供了当时世界一流的灵敏毫米波谱线射电望远镜、热电子辐射计、液氦致冷参照噪音源，为实验的成功起到了至关重要的作用。

4. 宇宙微波背景辐射的证实

在与彭齐亚斯、威尔逊实验观测的同时，另一些人也在对同一目标搜寻着。他们是以迪克 (Dicke, Robert Henry 1916~) 为首的普林斯顿大学的一个研究小组，正在开展一项有关宇宙学的探索性研究。1941 年，迪克从罗彻斯特大学获得博士学位。1946 年前，他在普林斯顿大学物理系执教。迪克成名于他的一项重要成果——标量-张量场论的提出。这一理论与爱因斯坦的引力理论并驾齐驱，也能成功地解释引力研究中的一些观测现象，以致在引力场研究中，谁是谁非还一时难见分晓。在 60 年代，随着宇宙学研究的兴起，迪克对伽莫夫的宇宙原始大爆炸理论产生了浓厚的兴趣。他曾设想，至今宇宙应残存有大爆炸的遗迹，例如宇宙早期炽热高密度时期残留的某种辐射。他与他的合作者认为，这种辐射有可能是一种可观测到的射电波。迪克建议罗尔 (Roll, P.G.) 和威尔金森 (Wilkinson, D.T.) 进行观测，还建议皮布尔斯 (Peebles, P.J.E.) 对此进行理论分析。皮布尔斯等人在 1965 年 3 月所发表的论文中明确指出，残存的辐射是一种可观测的微波辐射。叙述了极早期宇宙中重元素分解后，轻元素重新产生的图景。皮布尔斯后来在霍普金斯大学做过的一次学术报告中，也阐明了这个想法。1965 年，彭齐亚斯在给麻省理工学院射电天文学家伯克 (Burke, B.) 的电话中，告之他们难以解释的多余天线噪音，伯克立即想起了在卡内基研究所工作的一个同事特纳 (Turner, K.) 曾提到过的皮布尔斯的那次演讲，就建议彭齐亚斯与迪克小组联系。就这样，实验上和理论上的两大发现由此汇合并推动事态迅速地发展起来。先是彭齐亚斯与迪克通了电话，随即迪克寄来一份皮布尔斯等人论文的预印本，接着迪克及其同事访问了彭齐亚斯和威尔逊的实验基地，他们在离普林斯顿大学只有几英里之遥的克劳福德山讨论了观测的结果之后，双方协议共同在《天体物理学》杂志上发表了两篇简报，一篇是迪克小组的理论文章《宇宙黑体辐射》，另一篇是彭齐亚斯与威尔逊的实验报导《在 4080MHz 处天线多余温度的测量》，虽然后一篇论文考虑到自己尚未在宇宙论方面做出什么工作，出于慎重，论文并未涉及背景辐射宇宙起源的理论，只是提到“所观察到的多余噪音温度的一种可能解释，由本期 Dicke、Peebles、Roll 和 Wilkinson 所写的另一篇简讯中给出”，但是，两篇论文分别从理论与实验的不同角度表述的研究成果竟如此珠联璧合，不能不令人惊叹。两篇论文发表后，引起了极大的反响。人们意识到，如果能给出天线多余温度确实来自宇宙背景辐射的证明，这个成果对宇宙学的发展的影响将是不可估量的。根据理论分析，早期宇宙极热状态下的光辐射是处于热平衡状态下的，它应具有各向同性且热辐射能量密度分布遵守普朗克定律等特点。随着宇宙的热膨胀，宇宙逐渐冷却，残存的光辐射谱仍应保持普朗克分布。彭齐亚斯与威尔逊所检验到的辐射是否遵从这一分布，应是检验天线多余温度是否来源于宇宙背景辐射的一项重要标准。从 1965 年到 70 年代的中期的近十年时间里，不少研究小组相继完成了各种测试。迪克小组在 3.2cm 波段上得到了 $3.0 \pm 0.5\text{K}$ ，夏克斯哈夫特和赫威尔在 20.7cm 上测得 $2.8 \pm 0.6\text{K}$ ，彭齐亚斯和威尔逊在 21.1cm 上测得 $3.2 \pm 0.1\text{K}$ 。然而 3K 黑体辐射

的峰值应在 0.1cm 附近，为取得 0.1cm 附近的测量值，康奈尔大学的火箭小组和麻省理工学院的气球小组的高空观测结果是，在远红外区有相当于 3K 的黑体辐射。加州大学伯克利分校的伍迪小组用高空气球测出，在 0.25cm 到 0.06cm 波段，有 2.99K 的黑体辐射。至此，实验结果与理论已得到极好的符合，彭齐亚斯和威尔逊观测到的多余天线温度确实是宇宙微波背景辐射，这种辐射在宇宙各处的各向同性、无偏振、具有大约 3K 的黑体谱。这项成果对宇宙学的研究具有重大意义，为此，彭齐亚斯和威尔逊获得了 1978 年诺贝尔物理学奖。

5. 宇宙标准模型——大爆炸宇宙学的建立

1917 年，爱因斯坦发表了著名论文《用广义相对论对整个宇宙的考察》，开创了宇宙学的研究。爱因斯坦根据广义相对论认为，任意一点的四维时空连续区的度规应由物质及其分布状态决定。由于物质分布在局域上看是不均匀的，时空连续区的局域度规也将是复杂的。然而从大的范围上看，宇宙的物质及状态的分布是均匀的，所以度规是缓慢弯曲的，呈近似球形空间。为了使物质有可能呈准静态分布，爱因斯坦在引力场方程中增补了一个 $\lambda > 0$ 的附加项，此时度规线元中表示符号的系数 $k=+1$ ，对应于爱因斯坦的静态宇宙模型。

1922 年，前苏联数学家弗里德曼 (Friedmann, Alexander Alexandrovich 1888 ~ 1925) 在 $\lambda > 0, k = \pm 1.0$ 的情况下，得到了引力场方程的解，该解称为弗里德曼宇宙模型。同一年荷兰天文学家德西特 (de Sitter, Willem 1872 ~ 1934) 又得到了 $k=0$ 情况下的引力场方程解，称为爱因斯坦-德西特静态宇宙模型。1927 年，比利时的勒梅特 (Lemaitre Abbe Georges Edouard 1894 ~ 1966) 又得到了 $\lambda = 0, k = \pm 1, 0$ 情况下的引力场方程解。该模型提出大尺度宇宙空间随时间膨胀的预言，在物理学与天文学界产生了巨大的影响。人们很自然地把时间反推回去，得出整个宇宙曾被挤在一个“宇宙蛋”或“超原子”之中，是一场大爆炸把它炸开来，几十亿或上百亿年后，最初的大爆炸即留下现今的膨胀局面。伽莫夫是勒梅特“宇宙蛋”大爆炸理论的最积极支持者。1948 年，他发展了勒梅特的理论，与艾尔弗 (Alpher, R.) 及赫尔曼 (Herman, R.) 一起，提出了大爆炸宇宙学说，又称为宇宙标准模型理论。该理论的提出，标志着现代宇宙学的开端。大爆炸宇宙论认为，极早期的宇宙温度和密度极高，充满着各种基本粒子和辐射，它们之间强烈作用。虽然目前对强相互作用的了解还不够完备，对极早期的宇宙的情况尚无定论，但是大爆炸宇宙学却给出了两点十分重要的假设，其一是，早期宇宙中，各种物质粒子和辐射场均处于热平衡状态。这一假设使对早期宇宙的讨论大为简化，因为可以根据统计力学与粒子物理的理论确定每个时刻的状态。另一个假设是，在宇宙的初期，强子数略多于反强子数，这一差异虽然极小，它却决定了现今宇宙物质的存在及数量。近年来，随着高能物理的进展，人们对高能粒子和辐射场间相互作用有了进一步的了解，大爆炸宇宙学也得到了进一步的发展，对于宇宙从创生到近期的发展有了更详细的预言。大爆炸宇宙论认为，宇宙最早创生期年龄仅有 10^{-44} s，它只是一个温度极高 ($10^{11} \sim 10^{12}$ K) 的灼热奇点，由于时空连续性的破坏，人们预言这一时期应用量子宇宙学描述。其次是宇宙的极早期，年龄为 10^{-35} s，这一时期宇宙物质以夸克、胶子、正负电子对、光子等粒子状态呈现。进入宇宙早期

时，宇宙年龄约为 100s，这一时期宇宙膨胀的结果，使温度下降，高速运动的夸克、胶子生成质子、中子等基本粒子，并形成原子核，进而与电子结合形成各种轻元素的原子。当宇宙到达 10 万年之后，宇宙进入近期，由于引力，使宇宙由均匀进入有结构状态，形成各种尺度的星体及星体体系，现在的宇宙年龄已有 200 亿年，宇宙的温度降为 3K。

宇宙标准模型给出了一个以大爆炸为起点，一直推演到现今宇宙演化的时间表。讨论宇宙的诞生以及诞生后极短瞬间的迅猛变化，而这些在短瞬间发生的事，竟然又奠定了宇宙亿万年以后的全部演化的基础，似乎是不可思议的事。然而标准模型给出这些结论，只不过是根据广义相对论、统计力学和热力学、量子力学、原子核物理以及粒子物理学这些较成熟的理论作出的，它是这些理论的自然推论，其间并未掺入其它什么离奇的假设，只是讨论到宇宙极早期时，才利用了一点尚带有猜测性的大统一理论。包罗万象的宇宙整体，是一个“巨大的”研究对象，仅以部分观测事实为基础，仅以一些较成熟的理论为依据，竟然能对这个“庞然大物”给出一种自洽的演化图景，还能进一步获得观测上的支持，这不能不说它是一个十分了不起的成就。

6. 观测宇宙学的进展，暗物质困境

1917 年，爱因斯坦的《用广义相对论对整个宇宙的考察》一文发表，他把广义相对论理论用于宇宙大尺度时空结构，这一开创性研究不仅标志着宇宙学研究的开端，也诱发了观测宇宙学的形成。

观测宇宙学是宇宙学的一个重要组成部分，它侧重于发现宇宙大尺度时空结构的观测特征，使宇宙学在自洽的途径上得以发展。哈勃定律的建立，标志着观测宇宙学正式以一门独立的分支学科问世。然而，在射电天文学的建立以前，由于观测宇宙手段受到技术条件限制，观测宇宙学的发展一直受到影响。二战之后，射电天文学在雷达技术发展的影响下，飞速发展着。特别是直径 5m 的大型天文望远镜的投入使用，导致了 60 年代天文学方面的一系列重大发现，其中最有代表性的是宇宙微波背景辐射、类星体、脉冲星、星际分子等的发现，使观测宇宙学迈进一个全新的时代。进入 70 年代和 80 年代，由于多架大口径、大视场的光学及射电天文望远镜投入使用，以及紫外、X 射线和红外天文望远镜相继被送上太空，使观测宇宙学又迈入了一个空间与全波段时代，此时期，对宇宙线、中微子甚至引力波的探测都有了长足的进展。

1986 年 6 月，国际天文联合会 (IAU) 在中国北京召开第一次正式以“观测宇宙学”命名的国际学术大会。大会的召开，成为观测宇宙学史上的一个划时代的事件。观测宇宙学创始人桑德奇 (Sandage) 认为“这次学术讨论会标志着观测宇宙学的开端”。目前，更大容量、更高速度的电子计算机、更大型望远镜和更高灵敏度的多种探测器以及新的统计方法的投入使用，随着已升空的哈勃望远镜的修复，观测宇宙学将会面临新的突破。观测宇宙学的第一项重大成就就是宇宙微波背景辐射的发现及而后的系统观测成果，它们为大爆炸理论提供了有力的证据，又间接地为之提供了另一个重要的证实途径，即氦的丰度。根据宇宙在膨胀和存在微波背景辐射所具有的黑体辐射特征及 3K 的温度，可以计算出当今宇宙中的光子数密度为 $n_\gamma=500$ 个/cm³，由观测估计，当今重子数密度 $n_b=0.2$ 个/cm³，可以推出

光子与重子数之比 $n_\gamma/n_b=10^3$ 。理论认为，该值在宇宙膨胀中保持不变。由此，皮布尔斯等人又推算出宇宙早期的氦丰度。按质量计，氦核占 25%~30%，氢核占 70%，这个结果与 60 年代的实测结果相符，于是氦的丰度又成为大爆炸宇宙学的另一重要证据。

观测宇宙学的另一个重要课题就是宇宙暗物质的研究。这一课题的提出很早，但至今仍无结果。早在本世纪 30 年代，德国天文学家魏茨泽克（1912~）通过观察发现，在星系团中，星系的绕行速度极大，若使它们稳定在星系团中，必须假定宇宙中存在某种不可见的巨大质量物质。像他在 1944 年提出太阳系星云起源假说一样，他的这一预言再一次引起天文界的轰动，它使许多人的注意力转向了星系速度观测之上。在 70 年代，有人发现，银河系边缘处恒星的运动速度比理论的估计值要大得多，这个迹象表明，银河系内可能弥散有大量的不可见的暗物质。以后，射电与天文观测旋涡星系旋转中也发现，它们很可能被暗物质所包围。近 30 年来，一系列观测事实和天体现象的理论分析都表明，宇宙中普遍存在有暗物质，它们的数量远远超出人们的预想，可见物质质量大约只是暗物质质量的百分之七。

人们很关心，数量如此巨大的暗物质究竟是什么？最初，很自然地把它设想为一些暗星，如不发光的行星、小恒星、冷却了的白矮星、中子星、黑洞以及弥散气体或宇宙尘等。这些暗物质都是由重子组成的。然而，根据大爆炸宇宙学关于轻元素原子的合成理论，可以通过对氦核观测的下限，推断出重子数与光子数之比为 $< 7 \times 10^{-10}$ 。这表明，所有的重子对宇宙平均密度的贡献，不到整个宇宙物质的百分之十，宇宙中如果存在有暗物质，它们不可能是重子物质。它们是什么？只能从粒子物理中寻求答案。在众多候选的基本粒子之中，中微子是呼声较高的一个。中微子是本世纪 30 年代由泡利提出，后经费密从理论上完善的一个基本粒子，它的存在已被实验所证实。由于中微子的发现，成功地解释了 N-14 反常、能谱疑难、克莱因佯谬等一系列原子核物理领域的问题。70 年代中期，企图测出中微子质量的一切努力落空以后，人们普遍认为它没有质量。在众多已发现的基本粒子中，能在宇宙演化的一百多亿年后，仍大量存活的稳定粒子之中，中微子确实最引人注目。首先，宇宙中中微子的浓度比原子浓度大 50 亿倍，即使一个中微子的质量小到电子质量的 10^{-5} 倍，整个宇宙 90% 的质量将集中在中微子之上。过去普遍认为它的质量为零并没有经过严格的理论或实验上的证明。然而，如果中微子若真能对宇宙物质做出决定性的贡献，它必须具备 10~30eV 的能量，这也必须从观测上获得证实。然而尽管近几十年来，人们多方致力于这方面的观测，目前仍无确切结果。除了中微子外，人们还从目前尚未发现的未知粒子中寻找候选者，论及较多的是轴子。为确保强相互作用的 CP 对称，曾引入这个称为轴子的标量粒子，光微子是光子超对称的对应粒子。它们共同的特点是相互作用极弱，如果它们确实对宇宙绝大部分质量有贡献，就应大量存在宇宙中，也应能有较多的机会发现它们。然而，近 20 年来，人们通过各种途径与观测手段，都未能得到确切的结果。

尚未观测到的暗物质存在与否，对大爆炸宇宙学是一个至关重要的问题。根据大爆炸模型，从宇宙早期高温、高密、无结构的弥散状态，演化到现今形成这种从星系、星系团到超星系团的层次结构，是通过重子结合

成中性分子后，介质又在自引力下碎裂完成的。假若宇宙物质主要由重子组成，很难使宇宙有足够的时间完成各层次结构的形成过程；然而，如果宇宙主要由非重子的暗物质组成，非重子物质较早地与其它物质退耦，在重子物质开始碎裂之前，较早地碎裂，在引力作用下，较早地结团，这样会更加速了重子的碎裂，有层次结构宇宙的形成时间问题就能得到解决。

非重子物质者的候选者可以分成两大类，一类在退耦时，粒子的速度接近光速，称为热暗物质，中微子若具有几十电子伏，即属于此类；另一类在退耦时，速度很慢，称为冷暗物质，轴子、光微子若存在，即属此类。宇宙暗物质不仅冷热不同，由于凝聚的途径不同，对星系形成进程的影响也不相同。在热暗物质模型中，非重子物质先以超星系团的质量尺度碎裂，塌缩成盘饼状团块或纤维状结构以后，再逐渐分裂，形成星系团和星系。这种先大后小的图景，虽然与观测到的可能存在巨大纤维状结构的空洞迹象相符，却与定量研究的结果相违。根据计算机模拟结果，超星系团必须在较晚时期形成。80年代初，人们已经发现，单纯的热暗物质模型已难以解释大尺度宇宙成团层次结构的形成。与之相比，冷暗物质模型却取得了一定的成功。根据这一模型，冷暗物质先形成小尺度的团块，由它们作为星系的胚胎，然后在引力作用下形成星系，再凝聚成星系团和超星系团。这一模型不仅成功地预言了星系凝聚的平均概率，而且计算机理论模拟的结果又与实际取得了较好的一致，冷暗物质研究已上升为人们较热衷的课题。

暗物质的存在，除与宇宙大尺度成团结构的形成有密切关系外，它还决定了当前宇宙演化的进程。暴胀宇宙论预言，宇宙物质密度十分接近于临界值。然而，把星系的全部质量，包括附近暗物质晕加上，也远远低于这个临界值，所差的 95% 的质量应为暗物质所贡献。这一临界值对宇宙演化的进程起着至关重要的作用，因为如果宇宙密度高于这一临界值，引力最终将遏止膨胀，继而走向塌缩的结果，宇宙将回归到创生时期的“原点”；若低于这一临界值，宇宙将永远膨胀下去。

近二三十年来，暗物质的探测已成为观测宇宙学、粒子物理学共同的热门课题，因为对暗物质的研究不仅决定了宇宙大尺度层次结构形成的机制，也决定着对宇宙整体演化图象的认识。此外，如果暗物质的组分如果是一种尚未发现的粒子，无疑粒子物理学也将能从暗物质的研究中获得有益的进展。1983年，美、英、荷兰联合投资开发了第一颗红外天文卫星 IRAS，它将为大范围的宇宙物质分布提供可靠数据。1987年，英国天体物理学家鲁滨逊等人，研究分析了 IRAS 对 2400 个星系的观测数据，首次得到了用光学手段无法取得的银河系附近 5 亿光年范围内的三维物质分布图。该图显示，银河系被以室女、长蛇和人马为主的 10 多个星系团所吸引，它们合力作用恰与银河现今运动情况相一致，而与微波背景辐射方向相反，因而对所观测到的各向同性微波背景辐射的微小不均匀性成功地做出了解释。根据 IRAS 图所提供的数据，加上对银河系所受合引力的分析，可以得出宇宙具有近临界密度值，因而为起码有 90% 或更多的宇宙暗物质存在做出了断言。但是这些暗物质是什么，至今仍无一致结论，宇宙学的研究，仍然没有摆脱暗物质的困境。

7. 非标准宇宙模型

在近代宇宙学的研究中，除了称为大爆炸模型的标准宇宙模型之外，

还有许多非标准模型，其中最具有影响的是稳恒态宇宙模型，它由英国天文学家霍伊尔(Hoyle ,Sir Fred 1915 ~)、美国天文学家邦迪(Bondi ,Hermann 1919 ~)以及在奥地利出生的美国天文学家戈尔德(Gold ,Thomas 1920 ~)提出的。在大爆炸宇宙模型提出的初期，人们曾根据哈勃常数推算宇宙的年龄，然而由于哈勃常数在测定远距离星系的视星等与红移关系时，采用了造夫变星决定距离的偏差太大，以致得到的哈勃常数太大，由此估算出的宇宙年龄只有 20 亿年，比地球的生命还短，这给当时的大爆炸宇宙学说带来不小的困境，为了摆脱困难，稳态宇宙学说应运而生。

稳态宇宙学说认为，既然时空是统一的，宇宙物质在空间分布是均匀且各向同性的，宇宙在时间上也应是均匀不变的，这就是所谓的“完全宇宙学原理”。根据这一原理，哈勃常数应是一个不随时间变化的常数，宇宙既然不断地在膨胀，同时又要求保持宇宙物质分布上的均衡，且不随时间改变，必然要求物质在不断地产生，又随宇宙的膨胀不断脱离视界而去，从而保持宇宙物质的密度始终不变。稳态宇宙学预言的物质相对产生率为哈勃常数的 3 倍，即 $3H_0$ 。虽然这是一个极微小的量，但是稳态宇宙学尚不能清楚地说明，物质在哪里、以何种方式产生，以什么形态出现，只是有人猜测，这些创生的物质在活动猛烈的星系核中产生。

稳态宇宙学提出以后，曾得到了几方面的支持，其一是大爆炸宇宙学难以解释的星系产生问题，在这里可以顺理成章地得到说明。因为只要在稳态宇宙方程中，物质的产生和宇宙的膨胀不是正好地得到补偿，就可能出现稳恒态附近的起伏解，解中恰好呈现了物质分布的局域不均匀性。其次在应用电动力学或其它场论研究粒子间相互作用时，推迟势与超前势都是方程的解，然而只有推迟势才得到了观测上的验证，通常只用因果律解释其原因，这种解释带有人为性，常不能令人满意。1945 年，惠勒和费因曼曾指出，如果计入一个加速运动的电荷与宇宙中所有其它电荷的作用，就可以证明，在推迟势与超前势中，只有推迟势在起作用。他们的这一讨论正是在稳态宇宙的基础上进行的。这似乎是在理论上对稳态宇宙学的一种间接支持。此外，在稳态宇宙学中，不出现高温、高密度的初态，避开了难以摆脱的“奇点”困扰。

像一切其它宇宙模型一样，稳态宇宙模型也有一些先天不利的因素。它引出了一个物质不断创生的假设，这是现今物理学无法解释与理解的。此外，近年来的一些观测结果也给它增加了诸多不利的因素，例如对河外射电源计数结果与它的预言数不一致。更重要的是 3K 宇宙微波背景辐射的发现表明，宇宙的早期确实呈高热状态，稳态宇宙学对 3K 的解释却是牵强和不自然的。此外，它还不能对现今宇宙中元素的形成与丰度做出解释。面对如此多的难题，这一宇宙模型不如大爆炸宇宙那样得到较多的公认。

60 年代以来，霍伊尔和纳里卡(Narlikar ,J.)又发展了另一宇宙模型，它的出发点是马赫原理。根据马赫原理，物质的惯性并非自身的属性，它是宇宙中其它物质对该物质作用的总效应，脱离其它物质，物质的惯性将失去意义。马赫原理对爱因斯坦广义相对论的建立产生了重要的影响，然而，广义相对论却并不完全符合马赫原理，因为在广义相对论中，只保留了马赫思想，却把惯性质量当作物质的内禀属性，即与其它物质无关。50 年代以来，一些物理学家一直致力于建立一个符合马赫原理的引力理论，并由此建立相应的宇宙模型。

1964年，霍伊尔和纳里卡根据马赫原理提出了一个引力理论和宇宙模型，这一模型给远距离星系谱线红移一种完全不同的解释。该理论认为，物质间作用的传递速度有限，对某一粒子产生影响的又是宇宙间的总物质，而这些物质与受作用粒子间的距离应小于光速与宇宙年龄的乘积。随着时间的推移，作用距离将越来越大，能影响该粒子的物质也越来越多，一个“老年的”粒子与一个“年轻的”粒子相比，质量前者大，后者小，因此年轻粒子辐射波长较长，而所接收到发自遥远星系的辐射光，是很早以前，当时“年轻粒子”发射出来的，波长比现今同一原子辐射的波长就要长些，这就产生了红移现象。

这一模型对所观测到的宇宙膨胀也给出了一个极有趣的解释。它认为，原子的大小与组成原子粒子的总质量有关。质量增大，原子的相对体积变小。在宇宙中，所有物体也将会随组成原子变小而变小，正是因为物体在变小，才会观测到宇宙在膨胀。

虽然这一模型也摆脱了奇点的困难，却又招来了一个无限大的难题。因为随着时间趋于无限，宇宙中任何一个粒子质量也会趋于无限。1971年，霍伊尔企图用一个正负质量区设想，来摆脱无限大困境。他设想，整个时空中，存在有不同的区域。在各个区域中，物质分别呈正或负质量状态。他还假定，这些区域远大于目前所观测的宇宙，因而不可能在观测正质量时，又有负质量出现。物质从负质量区进入正质量区时，必然经过零质量的边界，因而避开了无限大问题。1975年，霍伊尔利用这一模型解释3K背景辐射时，他证明，当粒子质量趋于零时，将对电磁辐射完全散射，所散射的电磁辐射不仅各向同性，而且具有黑体辐射谱。

尽管霍伊尔-纳里卡宇宙模型解释了某些观测宇宙学得到的现象，如宇宙膨胀、红移、背景辐射等，但是它既没有像大爆炸宇宙模型那样，做出任何决定性的预言以提供实验验证，又没能对所提供的解释，如正负质量做出任何机制上的说明，尽管有人提出它们与白洞、黑洞有关，那也只是用一种未知取代另一种未知而已。因此，这个模型不仅有待观测上的验证，更有待理论上的深化。

针对膨胀的宇宙，还有一种称为正反物质的宇宙模型，它出自于瑞典物理学家克莱因(Klein, O.)。克莱因认为，大爆炸宇宙学所要求的正反粒子对称性上的微小不对称，与粒子物理学正、反粒子的对称性相矛盾。克莱因假设，宇宙初期，正反物质是完全对称与等量的，它由稀薄的气云和等离子体组成。在引力作用下，气云收缩，密度增高，正反粒子越来越容易发生碰撞、湮灭并产生电磁辐射。当密度高到一定时，湮灭产生的辐射压超过引力作用，使宇宙转而膨胀，形成现今的宇宙。为了解释现今宇宙完全由正物质组成，克莱因假设，宇宙初期存在有电磁场，由于引力和电磁作用，等离子体中正反物质分开，并分别聚集形成由正、负物质为主组成的物质团，由正负物质湮灭产生巨大的辐射压，维持两种物质在界面两侧分开，当今宇宙恰好处于以正物质为主的宇宙区域之中。

正反物质宇宙学在理论上尚未形成系统而完整的体系，在观测上也未得到进一步的证实。它未能对3K背景辐射做出解释，在原始宇宙线中，既未找到理论所说的反物质粒子，也未发现正反粒子湮灭产生的大量射线光子，因而这一模型未能产生较大的影响。

除前述模型外，还有布兰斯(Brans, C.)和迪克根据狄拉克大数假说

提出的，引力常数随时间减小的宇宙模型，伏库勒（Vaucouleur，G.de）等人提出的等级式模型以及相对论等级式模型等。尽管各种模型各自都具有一些独到之处，但是彼此间却差异很大，互相无借鉴的可能，更不能相互包容。鉴于目前观测宇宙学提供的观测结果尚不丰富，对模型取舍的判断为时过早，这一切，还有待观测宇宙学的进一步发展，也有赖于理论研究的进一步深化。

8. 暴胀宇宙学问世

在众多宇宙模型中，大爆炸宇宙模型取得了相当大的成功，得到了普遍的公认。尽管如此，它却仍对许多宇宙特征做不出解释，例如宇宙在大爆炸奇点之前又是什么？为什么在宇宙中各时空点毫无因果联系的情况下，却能在同一时刻爆炸，并能按同一速率向外膨胀？在宇宙的平直性上也使人感到疑惑。目前的观测结果表明，宇宙在可观测的范围内，即 10^{28} cm 尺度内，几乎是平直的，几何性质几乎属于欧几里德式的，这对大爆炸模型而言，几乎是一个灾难。因为在这个模型之中，随着时间的推移，宇宙应该变得十分弯曲，只有假设宇宙初始就十分平坦（偏差小于 10^{-60} ），才能说明现今宇宙的平直程度。对初始条件需要做出调整，这本身就说明了这一模型存在缺陷。在解释星系的形成上，这一模型也不尽人意。按大爆炸模型，大爆炸发生之后，辐射和粒子就达到了热平衡，如果没有特殊事件发生，辐射场应将一直保持黑体谱，并随宇宙的膨胀，温度不断下降。当宇宙温度降到 4000K 时，以等离子状态存在的物质开始结合成稳定的中性原子，主要是氢和氦等轻元素原子，这一过程称为复合。复合后，宇宙变得透明，辐射场和物质粒子沿各自经历演化，互不影响。按这一理论，现今观测到的微波背景辐射就应是由 4000K 逐渐冷却下来的辐射场，它应携带着复合时期物质分布的信息。目前，人们所观测到的星系、星系团等超大尺度结构应该是早期等离子体的不均匀性增长演化而成，而这种早期等离子体的不均匀性，应该在微波背景辐射的小角度（ $1' \sim 1^\circ$ ）各向异性上有所反映，而宇宙整体的不均匀性应表现在微波背景大角度上的各向异性。多年来，不少观测宇宙学家和天文学家都在致力于探测这种各向异性，迄今为止，还没有得到所期望的结果。对大角度各向异性的测量是由麻省理工学院的宇宙背景探索者卫星（COBE）研究小组进行的，负责人是著名天文学家外斯（Weiss，Reiner）。截止到 1995 年，他们在大角度各向异性分辨率达到 7° 的情况下，仍未测到微波背景辐射大角度各向异性。因此，各向同性的观测结果虽然支持了标准模型关于早期宇宙各向同性的结果，却又与现今观测到的星系等大尺度结构产生了矛盾。道尔哥夫和泽尔多维奇称这一尚未解决的问题为“现代宇宙学中的一朵乌云”。磁单极子问题是大爆炸宇宙学所遇到的“另一朵乌云”。根据标准模型关于相变的讨论，宇宙在膨胀中不断降温的过程中，原来较高的物理对称性消失，代之以对称性较低的状态。从高温相向低温相的演变，会使几何结构带来一系列拓扑性的缺陷。这些缺陷结构有面结构畴壁、线性弦以及点状的单极子。根据标准模型理论，在每一个视界上，至少能产生一个具有磁性的单极子，由此，可以估算出磁单极子的丰度。根据大统一理论，此时磁单极子的质量应为宇宙当时的能量标度，因此不难估计出磁单极子的能量密度。然而，令人惊异的是，仅只磁单极的能量密度就是宇宙临界能量密度的 10^{12} 倍，这样一来，目前磁单极子应该具有与质子一样的丰度，

宇宙的平均质量密度应比目前的估计值 10^{-29}g/cm^3 大十几个数量级，这一结果同样使大爆炸学说陷入了困境。

为解决大爆炸宇宙学在均匀性、奇点等方面存在的问题，早在 60 年代，列宁格勒理工学院的天文学教授恩斯特·格林纳 (Ernst Gliner) 就曾提出极早期宇宙有一个暴胀阶段的设想。1980 年，麻省理工学院的古斯 (Guth, A.) 和温伯格等人，在发展暴胀宇宙学上又迈出了关键的一步。他们明确提出，应把对真空态的讨论用于按指数膨胀的暴胀阶段，以解决原始的磁单极子问题、平直性问题及视界等问题。依这个方案，宇宙在暴胀后，将变得极不均匀。1981 年，林德 (Linde, Andrei) 又提出一个称之为混沌暴胀理论的新的暴胀方案，它解决了古斯等人原始表述中出现的一些困难。以后，在 1983 年，林德又将这一方案发展，充分吸收了基本粒子理论，目的在于建立一个与粒子物理协调一致的宇宙学。根据量子场论，真空充满着各种类型物理场的量子涨落，在按指数暴胀的宇宙中，真空的构造就更复杂得多。在 10^{-35} 秒以后，宇宙的演化过程与公认的热宇宙标准模型一致，但在 10^{-35} 秒以前，情况却大不相同，在这一阶段的暴胀中，宇宙尺度的增长要比以前认为的大 10^{56} 倍。根据弱电统一理论，在这一阶段占主导地位的是物质的标量场。宇宙所需的能量来自真空态。随着温度的下降，宇宙从最初的能量最低的真空态过渡到亚稳态，即假真空态，此时，原有的对称性遭到破坏。通过隧道效应，宇宙还可能从假真空态跃迁到一个新的真空态，此时伴随大量能量的释放，宇宙将像“泡”一样，由于从真空获得额外能量急剧膨胀，形成所谓的暴胀，这是一个原来极小的量子涨落扩大为密度的宏观涨落过程。根据这一理论，宇宙的比熵将比原来大爆炸学说的预言值增大一个因子 Z^3 ，如果这一过程持续时间超过 $6.5 \times 10^{-33}\text{s}$ ，增大的熵将使宇宙视界的尺度超越可观察的尺度，这将使原来那些彼此毫无关联的区域具有了一致性的因果关系，从而解决了原有标准模型的视界问题。此外，宇宙尺度的剧暴胀，还使早期时空的任何弯曲之处一扫而光，成为近乎平直空间，平直性的困难也就迎刃而解了。

深入研究发现，暴胀宇宙模型还有一系列更深层次的问题，例如根据隧道效应，宇宙能从假真空态跃迁到新的真空态，但这只是在一定的几率下进行的。这表明，宇宙只有一部分机会获得这样的跃迁，全部宇宙完成这种跃迁则需要一个相当长的时间，宇宙的各个部分，分别像“泡”一样相继胀大，这种机制是一个新的不均匀性代替原有的不均匀性，此外，暴胀后的空间平直性还以暴胀前的平直性作为前提，否则暴胀不可能发生。林德所提出的混沌暴胀理论对于构建克莱因超弦理论具有重要意义。近年来，有些学者提出，在暴胀瞬间，物质高能状态存在有统一场，并推测在大爆炸后 10^{-35} 秒，统一场中的“冻结碎片”会形成纤细而重的 (10^4kg/cm) 的“宇宙弦”，由于其引力场，周围可能形成星系，较大的弦圈可能形成星系团，这一理论较好地解释了现今所观测到的空洞、星系链和星系的片状结构。暴胀宇宙学的建立与发展表明，现代宇宙学已涉及到基本粒子物理、理论物理、大统一理论等多方面学科，这一扩展使人们面临许多根据现有知识体系所不能预见的问题，现代宇宙学的发展还有待于观测宇宙学及相关理论的进展。

9. 宇宙学与粒子物理

粒子物理以基本粒子为研究对象，研究尺度范围小于 10^{-13}cm ，质量范围小于 10^{-23}g ；而宇宙学的最小研究对象是星系，尺度范围大于 10^{19}cm ，质量大于 10^{39}g 。随着现代宇宙学的发展，在这个从任何角度相比，都异乎寻常的悬殊的两个学科之间，人们发现了它们的联系。如果说热大爆炸宇宙学使这两个学科相遇，那么暴胀宇宙学又使它们紧密地结合起来。近十几年来，随着粒子物理学的发展，随着宇宙学日臻成熟，两个学科间的联系也日益频繁与深化起来。

在过去几年里，两门学科分别建立了自己的标准模型。在粒子物理学中，标准模型是各种夸克和轻子之间，强、弱和电磁相互作用统一的规范理论。它把量子色动力学(QCD)和格拉肖-萨拉姆-温伯格模型结合到一起，成功地解释了基本粒子实验得出的全部结果。然而，这一模型也有许多尚未解决的问题，例如，为什么夸克与轻子有三代的划分，三代间的质量为什么如此悬殊，有没有第四代？标准模型预言的顶夸克(t)至今还没有得到肯定，此外，弱电作用的破缺机制是什么？有无新一类的强作用？超对称的伴随粒子、基础费密子的内部结构如何？等等。在众多的悬而未解问题之中，最重要的当属标准模型所预言，并赖以生存的中性、大质量标量粒子——黑格斯(Higgs)子尚未找到。标准模型需要这个耦合强度正比于耦合粒子质量的标量粒子，因为这样可以克服高能发散问题，使标准模型成为可重正化的理论。然而，解决上述问题难以依靠人工加速器完成。原计划1995年建成的美国超导质子-质子对撞机(SSC)，周长80km，质心系能量为40TeV，亮度为 $10^{33}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ，在这样高能量、高亮度条件下，肯定能对弱电作用的破缺机制做出肯定或否定的回答，还有可能发现新一类强相互作用、超对称伴随粒子，甚至有可能发现有关基础费密子的内部结构的线索，因此，SSC对撞机的建成肯定会对标准模型的各种问题给出解决的途径，因而受到全世界粒子物理学家的关注。然而，尽管SSC对撞机本身的技术条件已十分成熟，尽管历年来，已调集了美国及全球各地的研究力量，并投入了可观的预研费与建筑经费，最后，仍然囿于资金的困难而被迫停建。即使没有资金的限制，人类所居住的地球线度也是有限的。SSC这一计划中，能量最大的超导对撞机周长是80km，能把粒子加速到 10^4GeV ，而在地球上，充其量能制造的加速环周长为40000km，充其量也只能把粒子加速到 10^8GeV ，这与解决标准模型的问题、验证大统一理论的需要，还差有12个数量级。在这种情况下，人们很自然地把目光转向了宇宙。看来，能不断地产生能量高到足以检验四种基本作用统一的理论，唯一的加速器就是宇宙自身。

根据热爆炸宇宙学的推算，宇宙大约在150亿年前，温度极高， KT/c^2 大于普朗克质量 M_p (M_p 约为 10^{-5}g)，密度超过 M_p/l_p^3 ， l_p 为康普顿长度，等于史瓦西半径(约为 10^{-33}cm)，普朗克质量所对应的能量 $M_p c^2$ 大约为 10^{19}GeV ，因此，在粒子平均质量超过普朗克质量时，四种基本作用才能统一。虽然 10^{10} 年前所发生的过程不可能重现，但是从人们对极早期宇宙的研究和考察中，过去所发生的过程会在现今宇宙中留下遗迹。因此，从中抽取有用和可靠的信息，以对粒子物理中的有关理论做出制约和鉴别，仍是极有价值的。

问题的另一方面来自于宇宙学中的标准模型。由于引力的量子效应，

宇宙标准模型只能追溯到 $t=10^{-40}\text{s}$, $T=10^{30}\text{T}$, 即能量 10^{17}GeV 的范围。在给出的这个标准模型的初始条件时, 却发现了一系列的疑难, 其中比较有名的就是前述的平直性问题、视界问题、重子不对称及磁单极子问题。暴胀宇宙论、新暴胀宇宙论以及混沌暴胀宇宙论等一系列学说, 实际上就是粒子物理学中弱电统一理论成就上建立起来的。此种条件下, 通常的广义相对论已不再适用, 取而代之的应为量子化的引力场理论。宇宙学必须借助于粒子物理理论解释宇宙图象, 而粒子物理理论则把宇宙作为检验自己的天然实验室。显然, 如果这两大学科不相互结合, 都不可能获得完整的理论。

六、非线性物理学与复杂性研究

(一) 线性科学向非线性科学的转变

线性是指量与量之间的正比关系；在直角坐标系里，这是用一根直线表征的关系。近代自然科学正是从研究线性系统这种简单对象开始的。由于人的认识的发展总是从简单事物开始的，所以在科学发展的早期，首先从线性关系来认识自然事物，较多地研究了事物间的线性相互作用，这是很自然的。因而在经典物理学中，首先考察的是没有摩擦的理想摆，没有粘滞性的理想流体，温度梯度很小的热流等；数学家们首先研究的是线性函数、线性方程等。理论家们在对大自然中的许多现象进行探索时，总是力求在忽略非线性因素的前提下建立起线性模型，至少是力求对非线性模型做线性化处理，用线性模型近似或局部地代替非线性原型，或者借助于对线性过程的微小扰动来讨论非线性效应。经过长期的发展，在经典科学中就铸造出一套处理线性问题的行之有效的方法，例如傅立叶变换、拉普拉斯变换、传递函数、回归技术等；就是设计物理实验，也主要是做那些可以做线性分析的实验。从这个特点看来，经典科学实质上是线性科学。线性科学在理论研究和实际应用上都有十分光辉的进展，在自然科学和工程技术领域，对线性系统的研究都取得了很大的成绩。

线性科学的长期发展，也形成了一种扭曲的认识或“科学思想”，认为线性系统才是客观世界中的常规现象和本质特征，才有普遍规律，才能建立一般原理和普适方法；而非线性系统只是例外的病态现象和非本质特征，没有普遍的规律，只能作为对线性系统的扰动或采取特殊的方法做个别处理。由此得出结论说，线性系统才是科学探索的基本对象，线性问题才存在理论体系；所以经典科学的长期发展，都是封闭在线性现象的圈子里进行的。线性与非线性物理现象有着质的差异和不同的特征。从结构上看，线性系统的基本特征是可叠加性或可还原性，部分之和等于整体，几个因素对系统联合作用的总效应，等于各个因素单独作用效应的加和；因而描述线性系统的方程遵从叠加原理，即方程的不同解加起来仍然是方程的解；分割、求和、取极限等数学操作，都是处理线性问题的有效方法；非线性则指整体不等于部分之和，叠加原理失效。从运动形式上看，线性现象一般表现为时空中的平滑运动，可以用性能良好的函数表示，是连续的，可微的。而非线性现象则表现为从规则运动向不规则运动的转化和跃变，带有明显的间断性、突变性。从系统对扰动和参量变化的响应来看，线性系统的响应是平缓光滑的，成比例变化；而非线性系统在一些关节点上，参量的微小变化往往导致运动形式质的变化，出现与外界激励有本质区别的行为，发生空间规整性有序结构的形成和维持。正是非线性作用，才形成了物质世界的无限多样性、丰富性、曲折性、奇异性、复杂性、多变性和演化性。

在科学还处在主要以简单关系为研究对象的阶段，线性方法曾经是十分有效的。线性关系容易思考，容易解决，可以把它一块块地分割开进行考察，然后再一块块地拼合起来。所以线性关系让人喜爱。而非线性问题、非线性方程往往是桀骜不驯、个性很强的，很难找到普遍的解决方法，只能对具体问题做具体分析，针对个别问题的特点采取特殊的处理方法。所

以历史上虽然有过一些解非线性方程的巧妙方法，但与大量存在的非线性问题相比，只算是凤毛麟角；甚至人们一遇到非线性系统或发现方程中的非线性项时，就想尽办法回避，或加以舍弃，使之“线性化”。

流体动力学中描述粘性不可压缩流体动量守恒的运动方程、即著名的“纳维-斯托克斯方程”，把流体的速度、压力、密度和粘滞性全部联系起来，概括了流体运动的全部规律；只是由于它比欧拉方程多了一个二阶导数项，因而是非线性的，除了在一些特殊条件下的情况外，很难求出方程的精确解。分析这个方程的性态，“仿佛是在迷宫里行走，而迷宫墙的隔板随你每走一步而更换位置”。计算机之父冯·诺意曼(Neumann, Joha von 1903 ~ 1957)说：“这些方程的特性……在所有有关的方面同时变化，既改变它的次，又改变它的阶。因此数学上的艰辛可想而知了。”

所以，非线性系统长期以来被冷落在科研领域的视野以外。当遇到非线性系统时，科学家们就代之以线性近似。甚至在教科书中，也充满了线性分析成功的内容，“非线性”一词大都只在书末一带而过地提一下。除了几个可解的非线性范例之外，那里讲的不过是如何把一些非线性方程约化成线性方程。这种训练的结果，把人们的思想禁锢在线性的陷阱里，致使到了20世纪40年代和50年代，许多科学家和工程师除此之外竟一无所知。一位著名的工程师甚至说过：“上帝不会不仁得使自然界的方程成为非线性的”。伊恩·斯图尔特感叹地说：“如果你断定，只有线性方程才值得研究，那无异于自我禁锢。你的课本充满了线性分析的成功，它的失败埋藏得如此之深，以致连坟墓都看不见，坟墓的存在也没人注意。如同18世纪笃信钟表世界一样，20世纪中叶则恪守线性世界。”伊恩·斯图尔特非常诙谐地揶揄说：“称一般微分方程为‘非线性’方程，好比把动物学叫做‘非象类动物学’。但是你明白，我们生活在这样一个世界里，多少世纪以来它以为现存的唯一动物就是大象，它设想壁脚板上的洞是幼象凿的，它把翱翔的雄鹰当作耳朵变翼的呆宝，把猛虎当做身披花纹的短鼻子大象。它的分类学家们则施行矫正手术，使得博物馆的动物标本清一色地由笨重的灰色象类动物组成。‘非线性’就是如此。”到20世纪60年代以后，情况才有了改变。由于电子计算机的广泛应用和由此发展起来的“计算物理”和“实验数学”的方法的利用，人们从研究可积系统的无穷多自由度的非线性偏微分方程中，在浅水波方程中发现了“孤子”，并得出了一套一些类型非线性方程的解法；从一些看起来不甚复杂的不可积系统的研究中，发现了确定性动力系统中存在着对初值极为敏感的混沌运动。人们越来越明白地认识到，“大自然无情地是非线性的。”在现实世界中，能解的、有序的线性系统才是少见的例外，非线性才是大自然的普遍特性；线性系统其实只是对少数简单非线性系统的一种理论近似，非线性才是世界的魂魄。恩里科·费米(Fermi, Enrico 1901 ~ 1954)说：“圣经中并没有说过一切大自然的定律都可以用线性方式来表示”。而且正是非线性才造成了现实世界的无限多样性、曲折性、突变性和演化性。这样，就逐渐形成了贯穿物理学、数学、天文学、生物学、生命科学、空间科学、气象科学、环境科学等广泛领域，揭示非线性系统的共性，探讨复杂性现象的新的科学领域“非线性科学”。生态学和混沌学家罗伯特·梅(Robert, May)认为，目前全世界标准的科学教育，向人们灌输的是关于世界图景的偏见和歪曲的印象。不管线性的数学获得了多大的成功，都只

能给学生一个关于实际大自然的普遍存在的非线性事实的失真形象。“如果像这样发展起来的数学直觉，会使学生即使看到离散非线性系统里最简单的古怪行为也会手足失措”。所以他向一切有文化的人呼吁，不仅在研究工作中，而且在日常生活中，包括政治、经济生活中，“如果更多的人了解到这最简单的非线性系统也未必有简单的动力性质，会大有裨益。”

如果能早日向中学生们讲一些非线性知识，那将使一切变得更好。

（二）复杂世界中的规整性的发现

1. 孤波和孤子的发现

水面受到激扰后会出现四散的水波，但波纹很快就会消失，不可能传到很远的地方。但在 1834 年 8 月，英国科学家、造船工程师约翰·罗素（Russell, John Scott 1808~1882）却观察到一个奇怪的现象。他在勘察爱丁堡到格拉斯哥的运河河道时，看到一只运行的木船摇荡的船头挤出高约 0.3 米到 0.5 米、长约 10 米的一堆水来；当船突然停下时，这堆水竟保持着它的形状，以每小时大约 13 千米的速度往前传播。10 年后，在英国科学促进协会第 14 届会议上，他发表了一篇题为《论水波》的论文，生动地描述了这个现象：

1834 年秋，我看到两匹骏马正沿运河拉着一只船迅速前进。突然，船停了下来，然而被船所推动的一大团水却不停止。它们堆积在船头周围激烈地扰动着，随后形成一个滚圆、光滑又轮廓分明的大水包，其高度约有 1~1.5 英尺，长约 30 英尺，以每小时大约 8~9 英里的速度，沿着水面向前滚动。我骑在马上一直跟随着它，发现它的大小、形状和速度变化很缓慢，直到 1~2 英里后，它才在蜿蜒的河道上消失。

罗素认识到，这决不是普通的水波。因为普通的水波是由水面的振动形成的，水波的一半高于水面，一半低于水面，而且在扩展一小段距离后即行消失；而他所看到的这个水团，却具有光滑规整的形状，完全在水面上移动，衰减得也很缓慢。他把这团奇特的运动着的水堆称为“孤立波”或“孤波”。罗素还仿照运河的状况建造了一个狭长的大水槽，模拟当时的条件给水以适当的推动，果然从实验上再现了在运河上观察到的孤波。他认为这应当是流体力学方程的一个解。他批评数学家们未能从流体力学基本规律预言孤波的存在。他的这些观点在科学促进协会会议上报告后，未能说服他的同事们，争论一直持续了几十年。1895 年，两位年轻的荷兰数学家科特维格（Korteweg, D.J.）和德弗里斯（devries, G.）在研究浅水中小振幅长波运动时，考虑到可把水简化为弹性体，具有弹性特征之外，还注意到水具有非线性特征与色散作用，这些次要特性在一定条件下会形成相干结构。他们由此导出了单向运动浅水波 Kdv 方程，由方程得出的波的表面形状与孤波的表面形状十分相似，从而给出了一个类似于罗素孤波的解析解，孤波的存在才得到了公认。此后这件事又被渐渐淡忘了。

20 世纪 60 年代，电子计算机被广泛应用之后，孤波才被重新记起并被命名为“孤立子”或“孤子”。电子计算机的应用，使得科学家们敢于去探索过去用解析方法难以处理的复杂问题。首先进行这方面探索的是物理学家费米和他的两个同事。他们于 1952 年开始利用当时美国用于设计氢弹的 Maniac 计算机，对由 64 个谐振子组成、振子间存在微弱非线性相互作用的系统进行计算，试图证明统计物理学中的“能量均分定理”。但 1955 年完成的研究结果表明，开始时集中在某一振子上的能量，随着时间的进展并不均匀地分配到其它振子上，而是每经过一段“复归时间”后，能量又回到原来的振子上，这就是奇异的“复归”现象。这个现象引起了一批科学家的兴趣。

当时由于空间物理学和受控热核技术研究的发展，促使了人们对等离子体物理特性的研究。这涉及到等离子体中波的问题，推进了求解非线性

方程孤波解的研究。丕林、斯克姆等人经过一系列近似处理，发现费米等人的谐振子系统可以看做是 Kdv 方程的极限情况，可以用这个方程的孤波解来解释初始能量的“复归”现象。1965 年，美国科学家扎布斯基（Zabusky, N.）和克鲁斯卡尔（Kruskal, M.D.）等在电子计算机做数值试验后意外地发现，以不同速度运动的两个孤波在相互碰撞后，仍然保持各自原有的能量、动量的集中形态，其波形和速度具有极大的稳定性，就像弹性粒子的碰撞过程一样，所以完全可以把孤波当作刚性粒子看待。于是他们将这种具有粒子性的孤波，即非线性方程的孤波解称为“孤子”。1965 年以后，人们进一步发现，除水波外，其它一些物质中也会出现孤波。在固体物理、等离子体物理、光学实验中，都发现了孤子。并且发现，除 Kdv 方程外，其它一些非线性方程，如正弦-戈登方程、非线性薛定谔方程等，也有孤子解。1967 年，美国的一个研究小组 GGKM 在解 Kdv 方程时，首次发明了著名的解析方法——“逆散射变换”，并得出了 Kdv 方程 N 个孤波相互作用的精确解。这个方法经拉克斯（Lax, P.D.）和 AKNS 等人推广到一大批非线性演化方程中去，完善为一个较普遍的解析方法，大大推进了孤子的研究。上述这些研究成果，已经开始推向实际应用。例如在光纤通讯中，由于色散变形，传输信息的低强度光脉冲，不仅传输的信息量小，质量差，而且每经一段传输距离后，都要做波形整复。70 年代从理论上发现的“光学孤子”，由于在传输中具有波形不损失，不改变速度等特性，为消除前述缺点找到了有效的方法。物理学中的一些基本方程，如规范场论中的自对偶杨-米尔斯方程，引力场理论中的轴对称稳态爱因斯坦方程，以及一系列在流体力学、非线性光学、等离子物体中有重要应用的方程，都已应用孤子理论中的方法得到了许多有趣的精确解。另外，由于孤子同时具有波和粒子两重性质，引起了理论物理学家们的极大关注。他们尝试用它来描述基本粒子。但在应用中，上述的孤子定义有所扩展。但到目前为止，还有很多理论上的困难未能解决。

2. 复杂系统相干结构的研究

自然界存在着大量复杂系统。如由大量原子结合成的固体，奔腾的河流，湍动的大气，大小不一的涡旋等。这些系统除了具有变化不定的运动形态外，还具有空间上局域、时间上长寿的规整结构。这就是由于系统中存在的色散与非线性两种作用相互平衡而形成的“相干结构”。孤子就是一种特殊的一维相干结构。相干结构存在于用连续介质或流体力学方程描述的具有无穷多自由度的复杂系统中。相干结构的稳定性与非线性系统具有无穷多守恒律密切相关。很多具有孤子解的非线性演化方程，就有无穷多个守恒律，因而也有无穷多个守恒的物理量。对相干结构的形成机制和相互作用的探索，是非线性科学研究的前沿。

除孤子之外，各种尺度的涡旋是自然界一大类相干结构。大者如直径达四万千米的木星大红斑，小者如晶体中只有几纳米大小的电荷密度波，都是涡旋现象。通过计算机模拟和实验室实验，对木星大红斑的形成机理的研究，已取得了重大进展。天文学上观察到木星的大红斑，是在伽利略用他的望远镜观察木星之后不久的事情。罗伯特·胡克（Hooke, Robert 1635 ~ 1703）也观察过它。这个大红斑还被画在梵蒂冈的画廊里。它是一个巨大的、涡旋状的卵圆形，就像一个不运动、不消退的巨型风暴一直处在木星上。长期以来，它引起了人们的各种猜测。19 世纪末期，天

文学家们认为木星红斑是由火山熔岩形成的一个卵圆形的熔岩湖；也许是一颗小星体撞击木星薄壳造成的一个大洞。一位德国科学家认为红斑是木星表面正在分化出的一个卫星的雏型。后来人们发现，红斑在木星表面上有些浮动，所以在1959年有人提出，红斑是一个漂浮在木星外大气中的一个实体，就如一枚蛋浮在水中一样。有人认为这可能是一个很大的氢或氦的气泡。但是，由于红斑的漂移距离很小，所以60年代科学家们又提出它是巨大火山口上形成的气柱的顶端。1978年，宇宙飞船旅行者二号在太空中拍到的照片显示，木星并不是一个固态的星球，而是一个运动的流体，表面是沸腾的湍流，有东西向的水平带。木星大红斑是一个巨大旋流中的飓风系统，旋动在流体木星的上空。它把木星上空的云层推向外边，嵌入在东西风带之内，形成了这行星上一条水平的带状构造。照片显示，红斑中存在着大量小尺度的、非组织性的迅速流动，在一天或不到一天的时间内，涡流出现又消失，但大红斑依然存在，而且长期不变。这真是一个宇宙奇迹。80年代初期，美国年青的天文学家、数学家菲利浦·马尔卡斯（Marcus, Philip），根据致密的氢或氦的运动规律，建立了一组模拟木星气候的流体力学方程组，并编制了计算机程序，试图揭示大红斑的秘密。木星的自转很快，大约每10小时自转一周。这种自旋使其上的一切物体都受到科里奥利力的作用，这个力正比于运动物体的速率，垂直于物体运动的方向，正是这个力驱动了红斑。马尔卡斯用蓝色表示顺时针方向流体的转动，用红色表示逆时针方向流体的转动，中间夹杂有黄色，用计算机绘制美丽的色彩图象。意想不到的事情发生了，不论从哪一种构型开始，由不同颜色间杂组成的棋盘式的花样，在旋转之后蓝色块都要分解成碎片，红色块则越聚越拢，最后汇成一个其中包含着大量小尺度混沌流的卵圆形大红斑，在四周混乱的湍流海洋背景中稳定而相容地存在着。这就是大尺度的红斑！马尔卡斯得出结论说：大红斑是一个非线性作用的产物；一个复杂系统既可以造成湍流，同时也可以相互协调形成一种空间上局域、时间上长寿、相对稳定的相干结构。

（三）确定性系统中的混沌现象的研究

1. 古代“浑沌”思想和牛顿的决定论

不论中国还是西方，“混沌”（chaos，又称“浑沌”）概念古已有之。面对浩瀚无垠的宇宙和繁纷多变的自然现象，古人只能凭借直觉对它进行模糊、整体的想象和猜测，逐步产生了混沌的概念。中国古代所说的“混沌”，一般是指天地合一、阴阳未分、氤氲渺蒙、万物相混的那种整体状态。它既含有错综复杂、混乱无序、模糊不清的意思，又有内在地蕴涵着同一和差异、规则和杂乱、通过演化从“元气未分”的状态产生出五光十色、多姿多彩的现实世界的丰富内涵。《老子》中所说“有物混成，先天地生”，其实就是混沌。汉代王充的《论衡·谈天篇》说：“元气未分，浑沌为一”；汉代《易纬·乾凿度》云：“混沌者，言万物相混成而未相离”；又云：“太易者，未见气也；太初者，气之始也；太始者，形之始也；太素者，质之始也；气、形、质具而未相离，谓之混沌”。这些论述都强调了混沌是宇宙初始物质未被分化的一种无序的元气统一体。战国时期的伟大诗人屈原在他的《天问》中精彩地描绘了这种混沌状态：

曰遂古之初，谁传道之？上下未形，何由考之？冥昭瞢暗，谁能极之？冯翼惟象，何以识之？明明暗暗，惟时何功？阴阳三合，何本何化？……

这也把宇宙的初始状态描绘为天地未形、浑浑沌沌、动荡不定、明暗不分、阴阳渗合的形象。

但是，在古人看来，浑沌并不简单地等同于混乱和无序，它是万物混成尚未分离的状态，它是统一的整体，它本身就包含着差异和多样性，是秩序和无秩序、和谐与不和谐的统一体。浑沌先于宇宙，浑沌孕育着宇宙，浑沌产生出宇宙。按照《易纬·乾凿度》的说法，这个演化过程就是

太易 太初 太始 太素 混沌 天地……

“天地”才是现实的宇宙。

在古埃及和巴比伦的传说里，都提出了世界起源于混沌的思想。古希腊称“原始混沌”为“卡俄斯”，说卡俄斯生于万物之先，它生下大地（“该亚”）、地狱（“塔尔塔洛斯”）和爱情（“厄洛斯”），大地又生出天（“乌兰诺斯”）和海（“蓬托斯”）。这也是说世界万物都是从混沌中分离出来的。在《圣经》“创世纪”中说，起初神创造了天地，大地是空虚混沌，神灵运行于黑暗的深渊中，神说“要有光”，于是就有了光；神把光暗分开，于是就有了晨昏昼夜。这就是“创世”的第一天。这里借“神”的外衣所编织的动人神话，都反映了古人关于世界起源的共同思想：世界产生之前的自然状态是混沌，万物借分离之力从混沌中演化出来。但是，即使古人，也力图揭开浩阔苍茫的宇宙的奥秘，寻找变幻莫测的大自然背后的秩序，从混沌中发现规则性。世界各地的古文明中，都产生了计算季节的精奥历法，都出现了预测日月食的天文律条。

伟大的文艺复兴运动和哥白尼日心说的提出，激发起人们探索大自然的勇气和信心，近代自然科学诞生了。1687年，伟大的牛顿（Newton, Isaac 1642~1727）出版了他的巨著《自然哲学的数学原理》，以机械运动的三个基本定律和万有引力定律为公理基础，确立了一个揭示“万物的至理”、结构“世界的体系”的严整的经典力学理论体系。这个理论简单而精确，普适而优美，对地面物体的各种复杂运动和太阳系内各个天体的长短周期

运动做出了统一的解释，包括落体运动，弹道曲线，波的传播，光的折射，海洋潮汐，流体涡旋，行星轨道，月球岁差，彗星的行踪，双星的光变等等。牛顿的理论获得了意想不到的成功，世界一下子变得秩序井然。

以牛顿力学为旗帜的科学革命，导致了把宇宙看作是一个巨大的精密机械，或者说就像一架精确运行的“钟表机构”。因为牛顿力学的核心是牛顿第二定律，它是一个二级微分方程；这个方程的解，即物体的运动轨道，完全由两个初始条件唯一地决定。就是说，只要知道了物体在某一时刻的运动状态以及作用于这个物体的外部的力，就可以准确地确定这个物体以往和未来的全部运动状态。

这样，牛顿力学必然导致一个机械决定论的结构，即认为所有的自然现象和自然过程，都只能按照机械的必然性发生和进行。根据物体间的相互作用和力学的基本定律，从运动的初始条件出发，就可以巨细不遗地得出宇宙中一切物体的全部运动状态。这是一个数量的世界，一个可以利用数学方法进行计算的世界。

对牛顿理论的最辉煌的证实，是由 18 世纪天体力学做出的。1705 年，牛顿的挚友哈雷 (Halley, Edmund 1656 ~ 1742) 根据他对 1682 年一颗彗星轨道的观测数据，运用牛顿的天体运动理论进行了计算，预言它将在 1758 年末再次出现。1743 年，法国科学家克雷洛 (Clairault, A.C. 1713 ~ 1765) 同样用牛顿的理论，计算了遥远的木星和土星的摄动作用，指出这颗彗星的出现要稍作推迟，它经过近日点的时间在 1759 年 4 月。果然，这颗彗星在 1759 年的春天又映辉于夜空。这就是著名的哈雷彗星。这是人类历史上第一次在 54 年前就准确预言了的一次天体运动现象，极大地增强了对以牛顿理论为代表的确定性因果规律的信心。

对这个经典确定论的信心，充分体现在 1812 年法国科学家拉普拉斯 (Laplace, P.S.M. 1749 ~ 1827) 关于一个高超“智者”的设想上。他写道：

假设有一位智者，它能知道在任一给定时刻作用于自然界的所有的力以及构成世界的一切物体的位置。假定这位智者的智慧高超到有能力对所有这些数据做出分析处理，那么它就能将宇宙中最大的天体和最小的原子的运动包容到一个公式中。对于这个智者来说，再没有什么事物是不确定的了，过去和未来都历历在目地呈现在它的面前。

拉普拉斯的设想实际上是提出了一个令人敬畏的命题：整个宇宙中物质的每一个粒子在任一时刻的位置和速度，完全决定了它未来的演化；宇宙沿着唯一一条预定的轨道演变，混沌是不存在的；随机性只是人类智力不敷使用时的搪塞之语。

2. 庞加莱关于三体问题的开创性研究

科学认识的步伐，走出一条“之”字形路线：“混沌”让位于“规则”——这是牛顿所建立的伟大功绩；而“规则”又产生出新形式的“混沌”。迈出这一步伐的第一人，是伟大的法国科学家庞加莱 (1854 ~ 1912)。

庞加莱被誉为是“一只脚站在 19 世纪，一只脚站在 20 世纪”的跨世纪天才学者，“是最后一位传统科学家，也是第一位现代科学家”。这位蓄胡须、戴眼镜、和蔼可亲、不修边幅、带着心不在焉的糊涂外表的沉思者，却是一位科学上的集大成者，在数学、天体力学、物理学和科学哲学等领域，都做出了杰出的贡献。他通晓他的时代的全部数学，在每一个重

要分支里都做出了富有创造性的工作。这使他成为世界数学界无可争辩的领袖。正是这位科学巨擘，在确定论思想浓重笼罩着全部科学界的时候，却把智慧的眼光投向早被驱赶出科学园地的混沌深渊。他是在研究天体力学，特别是“三体问题”时发现混沌的。1887年，瑞典国王奥斯卡二世（1829~1907）悬赏2500克朗，征求天文学中一个重要问题的答案。这个问题就是“太阳系是稳定的吗？”其实这是牛顿本人早就提出来的一个老问题了。牛顿以当时已观测到的木星和土星运动的不规则性以及彗星以极扁的轨道横穿所有行星的公转轨道所可能带来的干扰作用为依据，提出了太阳系的运动可能会陷入紊乱的担心。此后不少科学家都对这个问题进行过探索。直到1784年，拉普拉斯根据万有引力理论证明，太阳系是一个完善的自行调节的机械机构，行星之间的相互影响和彗星等外来天体所造成的摄动，最终都会自行得到改正。所以，太阳系作为一个整体是稳定的，它将无限期地继续做着目前的周期运动。但是看来，拉普拉斯的答案并没有消除科学界的这个疑虑，没有阻止100年后瑞典国王的悬赏征文。

庞加莱自然向奥斯卡国王的难题发起了进攻。但是这个问题是太困难了，它涉及到了怎样研究复杂动力系统的稳定性这个深刻的问题。连庞加莱这样的天才学者，也未能彻底攻克它。但是，他却为了做这一工作而创立了一个新的数学分支——拓扑学，并大大推进了人们对这个历史难题的认识。他因此获得了这项奖金。

在太阳系中，包含着十多个比月球大的巨大天体，这是造成解题困难的根本原因。如果太阳系仅仅由太阳和地球组成，这就是一个“二体系统”，问题则很简单，牛顿早已完全解决了它们的运动问题。它们的运动是简单而规则的周期运动，太阳和地球将围绕一个公共质心、以一年为周期永远运转下去；或者稍做简化地说，地球将以太阳为一个焦点，周而复始地沿椭圆轨道绕转。然而，当增加一个相当大的天体后，这就成了一个“三体系统”，它们的运动问题就大大复杂化了，要彻底解决这个问题，几乎是不可能的。对短时间内的运动状态，可以用数值计算的方法来确定；但是由于根据牛顿力学所列出的方程组不能解析地求解，所以系统长时间的运动状态是无法确定的。为了减少解决“三体问题”的难度，庞加莱着眼于美国数学家希尔（Hill, George William 1838~1914）提出的一个极为简化的三体系统，即“希尔约化模型”。三体中有一个物体的质量非常小，它对其它两个天体不产生引力作用，就像由海王星、冥王星和一粒星际尘埃组成的一个宇宙体系一样。这两颗行星就像一个“二体系统”一样绕着它们的公共质心做周期运动；但这粒尘埃却受到两颗行星万有引力的作用，在两颗行星共同形成的旋转着的引力场中做复杂的轨道运动。这种运动不可能是周期的，也不可能是简单的，看上去简直是乱糟糟一团（图2）。

图2 一粒尘埃绕两颗质量相等的固定行星的复杂运行轨道

为了用几何方法直观地描绘运动的情况，可以以描述系统状态的状态参量为坐标张成的“相空间”来描绘运动过程。某一时刻系统的状态在相空间里用一个点表示；系统状态随时间的变化，即系统运动方程的解，对应于相空间的一条曲线，称为“相轨道”；如果物体做周期运动，它的相轨道就是一条闭合曲线；如果曲线不闭合，则表示物体的运动是非周期的。但是，为了确定系统的运动是不是周期性的，与其自始至终地跟踪系统运动的全过程，不如只观察系统的相轨道是否总会通过同一相点。设想通过

相空间中一点 A (初始状态) 作一个横截面 (图 3), 如果系统的相轨道总在同一点 A 穿过截面, 那么系统的运动就是周期性图 3 用庞加莱截面考察运动情况: 的; 相反, 如果系统的相曲线 1 表示周期运动轨道每次都在不同点穿曲线 2 为非周期运动过这个截面, 它的运动就是非周期的。这个截面现被称为“庞加莱截面”, 它把对连续曲线 (相轨道) 的研究简化为对点的集合的研究, 相当于对系统的全部运动过程进行不连续的抽样检验, 从而简化了检测工作。

图 3 用庞加莱截面考察运动情况:

曲线 1 表示周期运动

曲线 2 为非周期运动

庞加莱把他的截面方法应用于“希尔约化模型”的研究, 以观察尘埃粒子的运动。庞加莱震惊了, 他发现尘粒的运动如此复杂而且违反直觉。它的轨线多次穿过截面所形成的交点竟连缀成无穷多交点的“栅栏” (图 4, 现称为“同宿栅栏”)。他写道:

图 4 尘粒运动的“同宿栅栏”

当人们试图描画由这两条曲线和它们的无穷次相交 (每一次相交都对应于一个双渐近解) 构成的图形时, 这些相交形成一种格子、丝网或无限密集的网栅结构; 这两条曲线从不会自相交叉, 但为了无穷多次穿过丝网的网节, 它们必须以一种很复杂的方式折叠回自身之上。这一图形的复杂性令人震惊, 我甚至不想把它画出来。没有什么能给我们一个三体问题复杂性的更好的概念了。

从截面上一点出发的系统, 经过一个过程后, 当它再穿过截面时, 却在另一点交于庞加莱截面, 简直无法预言它下一次将从哪一点穿过截面; 实际上系统是以无规的点的序列频频穿过庞加莱截面的。这就是混沌, 庞加莱在“三体问题”中发现了混沌! 这一发现表明, 即使在“三体系统”, 甚至是极为简化的“希尔约化模型”中, 牛顿力学的确定性原则也受到了挑战, 动力系统可能出现极其惊人的复杂行为。并不像人们原来认为的那样, 动力系统从确定性的条件出发都可以得出确定的、可预见的结果; 确定性动力学方程的某些解, 出现了不可预见性, 即走向混沌。

其实, 在庞加莱动手解决奥斯卡国王的难题的同一年, 即 1887 年, 数学家布伦斯 (Bruns, H.) 就已证明, 三体问题的 9 个自由度 18 个二阶微分方程, 只有 10 个运动积分, 即 3 个动量积分, 3 个角动量积分, 3 个关于质心运动的积分和 1 个能量积分。1890 年, 庞加莱将布伦斯的结论推广到有摄动参数的情况; 1892 年在他的三卷本《天体力学新方法》的第一卷第四章中, 他对这个定理做出了一般表述: 在通常的保守问题中, 经典力学正则方程除了满足能量积分外, 不满足其它任何解析、一致的积分。庞加莱的一般性结论, 实质上是指出, 可积系统是极少的; 许多行为很规则的系统, 当受到扰动后, 可能出现不连续性, 其参数或初始条件的微小变化, 就可能引起复杂的、甚至是性质上的变化。

庞加莱的工作提出了经典力学的确定性原则的适用限度的重大问题, 留下了极富启发性的论断和猜想。不过, 混沌问题是太复杂了, 庞加莱的时代还不具备揭示和描述混沌现象的足够的知识储备和数学工具。虽然凭着他超人的几何直觉对混沌的复杂性有所洞察, 但是他并不真的是“不想”画出他所发现的“同宿栅栏”, 而是“无法”把它画出来。这是只有用电

子计算机技术才能处理的复杂几何图象。庞加莱的思想是太超前于他的时代了，所以他的发现在半个多世纪里并未受到科学界的重视；牛顿力学确定性的帷幕，仍然厚厚地遮蔽着混沌广阔富饶的研究领域。

3. 伯克霍夫的工作与 KAM 定理

美国数学家伯克霍夫 (Birkhoff, George 1884 ~ 1944) 是 20 世纪初少数几个认识到庞加莱动力系统研究工作的重要性的人物之一，他继承和发展了庞加莱的工作。

伯克霍夫把庞加莱截面方法用于探索哈密顿系统的一般行为。他发现微分方程的性质取决于正则级数的收敛性。如果正则级数是收敛的，则微分方程的解位于 N 维不变环面上。但实际上级数的收敛、发散与否取决于振幅的大小。当考虑非线性作用时，椭圆不动点周围的不变环面有些遭到破坏，有些继续存在但有点变形。

1932 年，伯克霍夫证明，对应于不变环面的消失，存在不稳定区域，它可以被一条扭曲映射下的不变曲线所包拢，而区域内并无环绕原点的不变曲线。他实际上已经证明，任意接近外边界的点，在映射作用下可以任意接近内边界，反之亦然。在研究不稳定区的结构时，伯克霍夫让一个收缩性的扭曲映射作用于两条不变曲线之间的不稳定区域，结果不稳定区域被映射到一个更小的子区域中；映射的迭代最终把原区域变成了一个面积为零、结构极其复杂的极限集合，位于原区域中的点的轨迹都收敛到这个集合中去了。

伯克霍夫实际上已经发现了“混沌行为”和现在所说的“奇怪吸引子”的实例，他当时称之为“奇特曲线”。更值得提出的是，他已经意识到这种行为是动力系统的通有行为。除伯克霍夫等极少数人之外，几乎没有人沿着庞加莱的道路前进。直到 20 世纪 60 年代以后，对动力系统的研究才有了长足的进展。

1960 年前后，前苏联数学家柯尔莫果洛夫 (Kolmogorov, A.N.)、阿诺德 (Arnold, V.I.) 和莫塞尔 (Moser, J.) 提出并证明了以他们的姓氏的字头命名的 KAM 定理。这个定理的基本思想是 1954 年柯尔莫果洛夫在阿姆斯特丹举行的国际数学会议上宣读的《在具有小改变量的哈密顿函数中条件周期运动的保持性》短文中提出的。后来他的学生阿诺德做出了严格的证明，莫塞尔又推广了这些结果。

按照分析力学方法，N 个自由度系统的哈密顿函数是 $H = H(p_1, p_2, \dots, p_N; q_1, q_2, \dots, q_N)$ ，系统的运动由哈密顿正则方程

$$\dot{q}_i = \frac{\partial H}{\partial p_i}, \quad \dot{p}_i = -\frac{\partial H}{\partial q_i}$$

确定。如果能够找到一系列正则变换，从广义动量 p_1, p_2, \dots, p_N 和广义坐标 q_1, q_2, \dots, q_N 变到另一套作用-角度变量 J_1, J_2, \dots, J_N 和 $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_N$ ，使得利用新变量表示的哈密顿函数只依赖于前一半变量 J_1, J_2, \dots, J_N ，而与 $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_N$ 无关，则这个力学系统就是完全可解的，即为一可积系统。因为这意味着这个系统的行为可化简，归约为 N 维环面上的条件周期运动。相反，如果找不到一种变换，使得哈密顿方程只包含作用变量，则系统是不可积的。实际上，对于多数保守系统，是无法找到这种正则变换的。

KAM 定理是关于近可积系统的一个重要的、一般性结论，有十分重要的意义。假定系统的哈密顿函数分为两部分

$$H = H_0(J_i) + V(J_i, \theta_i)$$

其中 H_0 部分是可积的， V 是使 H 变得不可积的扰动，只要 V 很小，这就是一个弱不可积系统。KAM 定理断言，在扰动较小， V 足够光滑，离开共振条件一定距离三个条件共同成立下，对于系统的大多数初始条件，弱不可积系统的运动图象与可积系统基本相同。可积系统的运动限制在由 N 个运动不变量决定的 N 维环面上，而弱不可积系统的绝大多数轨道仍然限制在稍有变形的 N 维环面上，这些环面并不消失，只有轻微的变形，称为不变环面。不过，只要有非零的扰动，总会有一些轨道逃离不变环面，出现不稳定、随机性的特征；但只要满足 KAM 定理的条件，这些迷走轨线是零测度的，不代表系统的典型行为。

大量的计算机数值实验表明，破坏 KAM 定理的任何一个条件，都会促使迷走轨线增多，使运动的不规则性和随机性增大，最终导致混沌运动。当然，这运动所遵循的仍然是决定性的牛顿力学方程式。所以，KAM 定理以一个限制性原理的形式，从反面泄露了有关牛顿力学面目的真实信息。它暴露出，确定性的动力系统，只要精确地从同一点出发，其运动就是一条确定的轨道；但是只要初始条件有无论多么微小的变化，其后的运动就会变得无序和混乱，就如同掷骰子一样，是随机和不可预测的。这就是牛顿力学的内禀随机性。

4. 洛仑兹关于气象预报的研究

混沌研究上的一个重大突破，是在天气预报问题的探索中取得的。

1922 年，英国物理学家和心理学家理查德孙（Richardson, Lewis Fry 1881 ~ 1953）发表了一篇题为《用数值方法进行天气预报》的文章。在文章的末尾，他提出了一个异想天开的幻想：在一个大建筑内，集聚一大批长于计算的工作者，在统一指挥下相互协调地对影响天气变化的各种数据进行计算。他估计，为了使天气预报和实际的天气变化达到同步，大约需要 64000 个熟练的计算者。他设想，在遥远的将来，有朝一日或许有可能发展出比天气变化还要快的计算手段，从而使天气预报梦想成真。真是先知之见，不到 30 年，电子计算机就出现了，并且成功地用于天气预报。在牛顿力学确定论思想的影响下，当时科学家们对天气预报普遍持有这样乐观的看法：气象系统虽然复杂异常，但仍然是遵循牛顿定律的确定性过程。在有了电子计算机这种强有力的工具之后，只要充分利用遍布全球的气象站、气象船、探空气球和气象卫星，把观测的气象数据（气压、温度、湿度、风力等）都及时准确地收集起来，根据大气的运动方程进行计算，天气变化是可以做出精确预报的。既然天文学家能够根据牛顿定律，用铅笔和计算尺计算出了太阳系的未来，预见了哈雷彗星的出没以及海王星和冥王星的存在，勾划出了人造卫星和洲际导弹的准确轨迹，那么为什么对于风和云就做不到呢？只要有一台功能高超的计算机来充任拉普拉斯设想的“智者”，天气的变化就会在人们精确的预言中。计算机之父约翰·冯·诺意曼就认为气象模拟是计算机的理想的用武之地。他甚至认为，天气状况不仅可以预报，而且是可以人工控制和改变的。美国气象学家、麻省理工学院的洛仑兹（Lorenz, Edward）最初也接受了这种观点。1960 年前后，他开始用计算机模拟天气变化。

洛仑兹有良好的数学修养，他本想成为一个数学家，只是由于第二次世界大战的爆发，他成了空军气象预报员，使他成了一位气象学家。比起庞加莱来，洛仑兹的条件是太优越了。他拥有一台“皇家马可比”计算机，它是用真空管组成的，虽然运算速度还不算快，但在当时已经是很了不起的了。洛仑兹把气候问题简化又简化，提炼出影响气候变化的少而又少的一些主要因素；然后运用牛顿的运动定律，列出了12个方程。这些方程分别表示着温度与压力、压力与风速之间的关系等等。他相信，运动定律为数学确定性架起了桥梁，12个联立方程可以用数值计算方法对气象的变化做出模拟。开始时，洛仑兹让机器每分钟在打印机上打出一串数字，表示出一天的气象，包括气压的升降，风向的变化，气温的起伏等。洛仑兹把这些数据与他心目中的预测相对比，感觉到某种熟悉的东西一次又一次地重复出现。气温上升又下降，风向向北又向南，气压升高又降低；如果一条曲线由高向低变化而中间没有隆起的部分，随后就会出现两个隆起部分。但是他又发现，这种重复决不是精确的，一次与一次绝不完全吻合。这个结果已经开始向洛仑兹透露着某种奥秘了。

1961年冬季的一天，洛仑兹用他的计算机算出了一长段数据，并得出一个天气变化的系列。为了对运算结果进行核对，又为了节省点时间，他把前一次计算的一半处得到的数据作为新的初始值输入计算机。然后他出去喝了杯咖啡。一个小时后当他又回到计算机旁的时候，一个意想不到的事情使他目瞪口呆了，新一轮计算数据与上一轮的数据相差如此之大，仅仅表示几个月的两组气候数据逐渐分道扬镳，最后竟变得毫无相近之处，简直就是两种类型的气候了。开始时洛仑兹曾经想到可能是他的计算机出了故障，但很快他就悟出了真相：机器没有毛病，问题出在他输入的数字中。他的计算机的存储器里存有6位小数，0.506127。他为了在打印时省些地方只打出了3位0.506。洛仑兹原本认为舍弃这只有千分之一大小的后几位数无关紧要；但结果却表明，小小的误差却带来了巨大的“灾难”。为了仔细看一下初始状态原本十分相同的气候流程，如何越来越相差越大，洛仑兹把两次输出的变化曲线打印在两张透明片上，然后把它们重叠在一起（图5）。一下子就清楚地看出来，开始时的两个隆峰还很好地相重叠，但到第三个和第四个隆峰时，就完全乱套了。这个结果从传统观点看来是不可理解的。

图5 初始情况十分相近，却导致后果的巨大差异

因为按照经典决定性原则，初始数据中的小小差异只能导致结果的微小变化；一阵微风不会造成大范围的气象变化。但是洛仑兹是从事天气预报的，他对长期天气预报的失败是有深切感受的。这个离奇古怪的计算结果与他的经验和直觉是完全相符的。所以他深信他的这些方程组和计算结果揭露了气象变化的真实性质。他终于做出断言：长期天气预报是根本不可能的！他甚至有些庆幸地说：“当然，我们实在也不曾做准过气象的长期预报，而现在好了，我们找到了开脱！”“对于普通人来说，看到我们可以在几个月前就很准地预报了潮汐，便会问：为什么对大气就不能准确预报呢？确实，大气虽然是一个与潮汐不同的系统，但支配它们的定律的复杂程度却是差不多的。但我认为，任何表现出非周期性态的物理系统，都是不可预测的。”事实正是这样，即使在今天，世界上最好的天气预报也只能一天可靠，超过两三天，就只是猜测。

洛仑兹是个穿着气象学家外衣的数学家，他很快看出了气候变化不能精确重演与长期天气预报的不可能二者之间存在着一种必然的联系。用数学语言来说，就是“非周期性”与“不可预见性”之间的联系。气象系统是不断重复但又从未真正重复的，这叫做“非周期系统”。如果气候的变化是严格的周期性的，即某一时刻各个地方的压力、温度、湿度、每一片云、每一股风都和此前某一时刻的情况完全一样，那么这一时刻以后的天气变化也将和此前那一时刻以后的天气变化完全相同，于是天气就会循环往复地永远按照这个变化顺序反复重现，精确的天气预报也就成了平淡无奇的事情了。

基于这种认识，洛仑兹就把气候问题丢在一边，专心致力于在更简单的系统中去寻找产生复杂行为的模式。他抓住了影响气候变化的重要过程，即大气的对流。受热的气体或液体会上升，这种运动就是对流。烈日烘烤着大地，使地面附近的空气受热而上升；升到高空的空气放热变冷后，又会从侧面下降。雷雨云就是通过空气的对流形成的。如果对流是平稳的，气流就以恒定的方式渐渐上升；如果对流是不平稳的，大气的运动就复杂化了，出现某种非周期性态。这与天气变化有某种类似。于是，洛仑兹就从表征着流体运动过程的纳维-斯托克斯方程组出发，经过无量纲化处理并做傅立叶展开，取头一、二项，得到傅立叶系数满足的一组常微分方程。与大气的实际对流运动相比，这组方程是大大简化了，它只是抽象地刻划了大气真实运动的基本特点，既考虑了流动的速度，又考虑了热的传输，与真实的大气运动是大体类似的。他建立的三个方程是 $dx/dt=10(y-x)$

$$dy/dt=28x - y - xz$$

$$dz/dt=(8/3)z+xy$$

x 、 y 、 z 是三个主要变量， t 是时间， d/dt 是对时间的变化率；常数 28 对应于不平稳对流刚开始后系统的状态。这就是 1963 年洛仑兹发表在《气象科学杂志》20 卷第 2 期上的题为《确定性非周期流》中所列出的方程组。由于其中出现了 xz 、 xy 这些项，因而是非线性的，这意味着它们表示的关系不是简单的比例关系。一般地说，非线性方程组是不可解的，洛仑兹的方程组也是不能用解析方法求解的，唯一可靠的方法就是用数值方法计算解。用初始时刻 x 、 y 、 z 的一组数值，计算出下一个时刻它们的数值，如此不断地进行下去，直到得出某一组“最后”的数值。这个方法叫做“迭代”，即反复做同样方法的计算。用计算机进行这种“迭代”运算是很容易的。洛仑兹把 x 、 y 、 z 作为坐标画出了一个坐标空间，描绘了系统行为的相轨道，他吃惊地发现，画出的图显示出奇妙而无穷的复杂性（图 6）。这是三维空间里的双重绕图，就像是有两翼翅膀的一只蝴蝶；它意味着一种新的序，轨线被限制在某个边界之内，决不会超出这个边界；但轨线决不与自身相交，在两翼上转来转去地环绕着。这表示系统的性态永远不会重复，是非周期性的，从这一点来说，它又纯粹是无序的。

图 6 洛仑兹吸引子：轨线不重复地绕两叶回转

正如这篇论文的标题所表示的，从确定性的方程和确定的初始状态（ x 、 y 、 z 的初始值）出发，经过多次迭代后，却得出了非周期性态的结果。这就是混沌！一切有关混沌的丰富内容，都包含在这幅奇妙的画图中了。

现在就可以说明什么是现代科学意义上的“混沌”概念了。1986 年在

伦敦召开的一个关于混沌问题的国际会议上，提出了下述的定义：“数学上指在确定性系统中出现的随机性态”。传统观点认为，确定性系统的性态受精确的规则支配，其行为是确定的，可以预言的；随机系统的性态是不规则的，由偶然性支配，“随机”就是“无规”。这样看来，“混沌”就是“完全由定律支配的无定律性态”，这真是一个大自然的“悖论”。

5. “蝴蝶效应”和“斯梅尔马蹄”

无规性的源泉在于初始条件的选择。一个动力系统的行为或运动轨道决定于两个因素。一个是系统的运动演化所遵从的规律，如牛顿定律；一个是系统的初始状态，即初始条件。经典力学指出，一个确定性系统在给定了运动方程后，它的轨道就唯一地取决于初始条件，一组初始值只有一条轨道，这就是系统行为对初值的依赖性。

但是，任何测量都是有误差的，所以任何时候都不可能绝对精确地测定初始值。实验上给出的初值都只能是近似的。这个误差对系统的行为会不会有严重影响呢？经典力学断言，系统的行为或运动轨道对初值的依赖是不敏感的，知道了一个系统近似的初始条件，系统的行为就能够近似地计算出来。这就是说，从两组相接近的初值描绘出的两条轨道，会始终相互接近地在相空间里偕游并行，永远不会分道扬镳，泛泛的小影响不会积累起来形成一种大的效应。

混沌研究却粉碎了传统科学中这种对近似性和运动的收敛性的信仰。处在混沌状态的系统，或者更一般地说对于一个非线性系统，运动轨道将敏感地依赖于初始条件。洛仑兹已经发现，从两组极相邻近的初始值出发的两条轨道，开始时似乎没有明显的偏离，但经过足够长的时间后，就会呈现出显著的差异来（图 5）。这就是说，初值的微小差异，在运动过程中会逐渐被放大，终会导致运动轨道的巨大偏差，以至于这种偏差要多大就有多大。在科学实验中，一种变化过程可能有一个临界点，在这一点上，一个微小的扰动可能被放大成一个重大的变化。而在混沌中，这种点无处不在，确定性系统初值的微小差异导致了系统整体的混沌后果。

小的误差竟能带来巨大的灾难性后果，这一点早在 1908 年就被目光敏锐的庞加莱洞察到了。他在他的名著《科学与方法》中写道：

我们觉察不到的极其轻微的原因决定着我们不能不看到的显著结果，于是我们说这个结果是由于偶然性。如果我们正确地了解自然定律以及宇宙在初始时刻的状态，那么我们就能够正确地预言这个宇宙在后继时刻的状态。不过，即使自然定律对我们已无秘密可言，我们也只能近似地知道初始状态。如果情况容许我们以同样的近似度预见后继的状态，这就是我们所要求的一切，那我们便说该现象被预言到了，它受规律支配。但是，情况并非总是如此；可以发生这样的情况：初始条件的微小差别在最后的现象中产生了极大的差别；前者的微小误差促成了后者的巨大误差。预言变得不可能了，我们有的是偶然发生的现象。这一段几乎是百年前的话，不正是我们近几十年才揭开的混沌来源之谜吗？

洛仑兹从他关于长期天气预报的研究中悟出的正是这个道理。对于任何小块地区气候变化的误测，都会导致全球天气预报的迅速失真。不论气象观测站的网点如何密集，都不可能覆盖整个地球和从地面到高空的每一高度。在一尺之遥的空间范围内的一点气象涨落，都可能迅速波及到一尺之外、十尺之外、百尺之外的空间，小误差通过一系列湍流式的链锁反应，

集结起来而成十倍、百倍、千倍地膨胀扩大，终于使天气预报变成一派胡言，在跨洋隔洲的地区形成山雨欲来风满楼的景象。洛仑兹非常形象地比喻说：巴西亚马孙河丛林里一只蝴蝶扇动了几下翅膀，三个月后在美国的得克萨斯州引起了一场龙卷风。人们把洛仑兹的比喻戏称为“蝴蝶效应”。这个看法当时并不为气象学家们所接受。据说洛仑兹把“蝴蝶效应”说给他的一个朋友以说明长期天气预报不可能时，他的朋友回答说“预报不会成为问题”，“现在是要搞气象控制”。洛仑兹却不这样看，他认为，人工改变气候当然是可能的；但是当你这样做时，你就无法预测它会产生什么后果。简单的确定性系统如何会导致长期行为对初值的敏感依赖性呢？理解这一点的关键是要理解混沌的几何特性，即由系统内在的非线性相互作用在系统演化过程中所造成的“伸缩”与“折叠”变换。美国拓扑学家斯梅尔（Smale, Stephen 1930~）对此做出了重要贡献。

斯梅尔是一个杰出的拓扑学家，本来在多维拓扑学的一些最奇特的问题上已经卓有成就。1958年，他开始对动力系统的微分方程进行深入研究，并发表了一篇过于乐观的论文。他在这篇论文里提出了一个错误的猜想。他用极为严谨的数学语言论证说，一切动力系统最终都将进入一个并不十分奇异的行为；或者说，典型的动力学行为是定态的或周期的。虽然，一个动力系统可能会出现离奇古怪的性态，但斯梅尔认为这种性态不会是稳定的。后来斯梅尔曾回忆说：“我的过分乐观引导我在那篇论文里认为，几乎所有常微分方程系统都是这样一些（结构稳定的）系统！”他说如果他多少了解些庞加莱、伯克霍夫等人的文献，他就不会有那种愚蠢的思想。

1959年圣诞节后，斯梅尔一家正在巴西首都里约热内卢暂住，他接到了他的朋友莱文松（Levinson, N.）的一封信，指出他的猜想是错误的，并告诉他自已关于受迫范德坡方程的研究已经提供了一个反例。早在本世纪20年代，德国物理学家范德坡（Van der Pol, B.）就已开始研究非线性电路的弛豫振荡问题，并得出了以他的名字命名的范德坡方程和受迫范德坡方程。1927年，范德坡又和范德马克（Van der Mark, J.）发现了著名的“分频”现象。莱文松用这个反例说明，一个系统既有混沌又有稳定性，混沌与稳定性共存；系统的这种奇特性质并不为小的扰动所破坏。

当斯梅尔仔细研究了莱文松的文章，最后确信莱文松是对的时，他就把自己的猜想换成了另一个问题：典型的动力行为是什么？斯梅尔多年来是在拓扑学中进行探索的，他利用相空间对范德坡振子的全程可能性进行探索。他注意的并不只是单条的轨线，而是全空间的性态；他的直觉由这系统的物理本质跃进到一种新型的几何本质。他思考的是形状在相空间中的拓扑变换，例如拉伸或压缩变换。这些变换有明确的物理意义。如系统中的耗散，由于摩擦而丧失能量，意味着系统在相空间中的形状将会收缩，甚至可能最终完全静止下来收缩到一点。为了反映范德坡振子的全部复杂运动性态，他想到相空间必须经历一种新的变换组合。这使他从观察振子的总体行为提出了一种几何模型——“斯梅尔马蹄”。

斯梅尔马蹄的道理很简单。取一个正方形，把它拉伸为瘦长的矩形，再把它对折弯叠成马蹄形（图7）。然后想象把这马蹄嵌入一个新的矩形中，再重复相同的变换：挤压、折曲、拉伸……

这实际上就像厨师揉面团的操作过程：首先是伸缩变换，使面团在一

个方向擀平压薄，同时在另一个方向上伸长；然后是折叠变换，将拉长的两块面对折叠置。这种操作反复进行下去。可以设想，开始时先在面团上擦一层红颜色，那么在厨师揉面过程中，红色层将被拉长、变薄、交叠起来。经过多次反复操作后，原来相邻近的两个红色粒子会越来越远地分离开去，原来不相邻近的两个红色粒子却可能越来越靠近了。

图 7 斯梅尔马蹄映射模拟混沌折叠

动力系统正是通过这两种变换而形成混沌轨道几何图象的复杂性的。伸缩变换使相邻状态不断分离而造成轨道发散。但仅有伸缩变换还不足以扰乱相空间造成复杂性，还必须通过折叠变换。折叠是一种最强烈的非线性作用。伸缩和折叠的混合并不断反复，才可能产生动力系统相轨道的分离、汇合，产生无可预见的不规则运动。在混沌区内，相空间中的伸缩与折叠变换以不同的方式永不停息又永不重复地进行，从而造成了相轨道永不自交叉永不相交的穿插盘绕、分离汇聚，完全“忘掉了”初始状态的一切信息，“丢弃了”未来与过去之间的一切联系，呈现出混沌运动。这就是系统长期行为对初值的敏感依赖性的源由。

本来，斯梅尔企图只用拉伸与挤压去解释一切动力系统的行为，而不用会大大损害系统稳定性的折叠变换。但是折叠是必要的，因为折叠使动力系统的行为有动力性态上的根本变化，是导致混沌的一种重要作用。斯梅尔马蹄给数学家和物理学家提供了一个对动力系统运动的可能性的直观理解的几何图象。

6. “周期倍化分叉”的发现

在动力系统演化过程中的某些关节点上，系统的定态行为可能发生性质的改变，原来的稳定定态变为不稳定定态，同时出现新的更多的定态，这种现象叫作“分叉”(bifurcation)。分叉是由运动方程中参数的变化引起的，所以往往要用“参数空间”来描绘分叉现象。随着参数的变化，分叉可以一次接一次地相继出现，而这种分叉序列又往往是出现混沌的先兆，最终会导致混沌。

生物群体数量(“虫口”)变化的研究以及涉及到的一类典型一维映射的分叉现象的研究，在 20 世纪 70 年代混沌学的创立和发展中曾经起到过特殊的作用。

澳大利亚昆虫学家尼科尔森(Nicholson, A. J.) 曾经在一个大瓶子里用有限的蛋白质食物喂养了一瓶子绿头苍蝇，研究受到空间和食物限制的苍蝇群体数目(“蝇口”)的变化。他观察到有时绿头苍蝇可繁殖到将近一万只；过些时候又会降至几百只。蝇口繁殖过快超过容器的空间限制后数目就急剧减少，而活动空间的扩大又使蝇口快速增长；蝇口决不会单调增大或单调减少，呈现一种周期性的涨落。尼科尔森发现，这个循环周期大约是 38 天。但每个周期内蝇口数却可能出现两个峰值，而且到约 450 天后，蝇口的变化(振荡)变得极不规则。在这个实验中，蝇口数的变化包括了周期性、拟周期性和混沌。

看来，生物群体应被看做是一个动力系统，是受着某种动力驱使的。在食物受限制的地域单种生物在起起落落地繁殖着；几种生物共存的区域，各种生物在生存竞争中此长彼消；在捕食者与被食者之间，存在着双向抑制作用；在宿主群体内部，流行病在传播。……这一切因素，都对生物群体起到约束作用，把群体限制在更合理的数目上。

生态学家们一直试图为生物群体增减寻找一个数学模型。一个合理的简化就是用离散的时间间隔去模拟虫口的变化。因为许多生物群体的数目基本上都是按照一年的时间间隔变化的，而不是连续时间的变化。更有一些昆虫，它们只在一年中的特定季节里繁殖，所以它们的一代一代之间决不会重叠。一年一年的变化，正是生态学家所要了解的全部信息。因此，描写生物群体的方程不是连续的微分方程，而是比较简单的差分方程，这是一种迭代模型，即逐年逐年地反复用同一个函数进行数值运算，它可以反映由一个状态（数目）到另一个状态（数目）的跳跃变化。

这个差分方程应该反映出以下影响虫口增减的因素：第一，虫口的增长必定与前一年的虫口数目成正比，这是一个线性关系，比例系数 k 即群体的增长率；第二，虫口的增长又受到空间、食物、流行病等许多因素的限制，不可能无限增长。实际情况是，群体小时稳定增长，群体适中时增殖量近于零，群体暴涨时急剧下降。

一个较好的方程是由迭代逻辑斯蒂映射所得到的非线性逻辑斯蒂 (Logistic) 差分方程

$$x_{t+1} = kx_t(1-x_t)$$

x 表示虫口的相对数，它被定义为介于 0 和 1 之间的数，0 代表灭绝，1 代表群体的最大虫口数； t 表示时间，它只能以整数 0, 1, 2, 3, …… 跳跃；生殖增长率 k 代表了这一模型的一个十分重要的特征，表示拉伸或压缩的程度，也即非线性程度。从几何学上讲，逻辑斯蒂映射表示以不均匀的方式拉伸或压缩一个线段，然后再加以折叠。对于一个生物群体来说，参数 k 越低，意味着群体最终将在较低的数量水平上灭绝；参数 k 的值提高以后，群体的数量也不会无限增长，这是可以理解的。但是计算表明，在 k 值提高后，群体却不可能收敛于一个定态水平，这是令人费解的。

20 世纪 70 年代，美国普林斯顿大学的生态学家罗伯特·梅 (Robert May) 开始利用计算机对这种单群体生物随时间而变化的最简单的生态学方程进行系统的研究。他对这一非线性参数试用不同的值进行迭代计算。他发现，改变的不仅仅是输出的数量，而且也改变了输出的性质；因为它不仅影响着平衡时群体的数值，而且还影响群体是否能够实现平衡。

梅编制了计算机程序，慢慢增加 k 值，对方程进行数值运算。他发现，当 k 值小于 1 时，在 0 到 1 之间任意取初值 x_0 ，经过若干次迭代，虫口数趋于终态 $x^*=0$ ，表示生物群体将灭绝，这是可以预料的。当 $1 < k < 3$ 时，任取初值 x_0 ，经过一系列迭代（演化过程）后，虫口数越来越趋于一个稳定态 $x^*=1-1/k$ ；如取 $k=2$ ，则虫口数将最终稳定在 $x^*=0.5$ ；若取 $k=2.4$ ，则 $x^*=0.5833$ ；若取 $k=2.7$ ，则 $x^*=0.6292$ ；随着 k 值的增大，稳定平衡值也会增大，但系统的行为没有质的变化，都会达到一个稳定的定态（即虫口数达到一个稳定值）。

为了在全局上对逻辑斯蒂差分方程的解（即最终定态）做出了解，梅以参数 k 值的变化为横坐标，以群体最终虫口数为纵坐标，把二者的变化关系集拢在一张图上（图 8）。

迭代计算发现，当 k 值超过 3 之后，系统的定态失稳了，这条线分裂为两条，虫口交替振荡于两年的两点之间， x^* 值在两个数之间一年一换地交替跃变，这是周期 2 循环。当 k 值增大到 3.5 左右时，周期 2 吸引子也开始失稳，出现周期 4 循环，群体的不同起始值 x^* 都收敛于以 4 年为周期

的循环中，每 4 年返回近原值一次。当 k 值增至 3.56 后，周期又加倍到 8； k 到 3.567 时，周期达到 16。此后将更快地出现 32、64、128……的周期倍化序列。这就是“周期倍化级联”；倍周期就是分叉或双分枝现象。周期分裂再分裂，这种双分枝越来越快地发生，以致到 $k=3.58$ 左右这种分裂突然呈现崩溃之势，周期性态就变成混沌，虫口的涨落再也不会确定下来，虫口的逐年变化完全成为随机的，全部区域染成了墨色。

图 8 倍周期分叉与混沌

这么简单的动力学系统，在非线性的作用下，当 k 从 0 趋向 4 时，其动力学性态的复杂性逐步增加，即从定态变为周期性态，通过周期倍化级联而到达混沌性态。

但这还不是最终的图景。更令人惊奇的是，在这个复杂的区域中又会突然出现一个有正规周期的窗口（图 8 中狭窄的白条部分）；不过周期由偶数变为奇数。如当 $k=3.835$ 时，出现周期 3 循环；轻微地增加 k 值，周期以新的“倍化级联”出现 6、12、24、48……周期。当 $k=3.739$ 时，将得到周期 5 循环，此后又是双分枝的 10、20、40……的周期。愈来愈快的倍周期双分枝再度爆发出现混沌。

这是一个十分奇妙的图景：分叉再分叉，加快更加快，周期性态走向混沌性态，混沌区内又出现周期窗口；窗口内还有更小的窗口，出现更稠密的周期性态；放大任何窗口，都会重现整个图景的微缩复本。

图象特别明显地显示出，周期区内分叉序列中两个相邻分叉点之间的距离越来越快地缩短，而且似乎有某种规则的比例关系。美国物理学家费根鲍姆(Feigenbaum, Mitchell)敏锐地觉察到了这种几何收敛的周期僵化级联现象的规则性，对收敛的速度——标度比的值进行了深入的探讨。1975~1976 年，费根鲍姆在一次会议上听到斯梅尔关于逻辑斯蒂映射及其通过周期倍化级联走向混沌的介绍后，投入到对逻辑斯蒂映射的研究。那个时代，使用计算机是件麻烦冗长的过程，要用穿孔卡分批输入数据，几天后才能出结果。所以费根鲍姆宁肯用惠普 HP65 型可编程计算器，这是一个幸运的选择。因为计算器算得很慢，促使操作者在结果出来以前常去思考它。为了节省时间，费根鲍姆就尝试大致揣测级联中的下一个分叉点可能在哪里。不久他就发现了规律，相继的分叉点之差具有恒定的比率，前一个差值约为后一个差值的 4 倍，更精确地说，这二者的比率约为 4.669。对一个物理学家来说，恒定比率意味着标度率，表明物理学特征必在愈来愈小的标度上再现，这当然是极为重要的。费根鲍姆用这个方法对另一个映射即三角映射 $x_{k+1} = k \sin(x_k)$ 进行了计算，同样发现了周期倍化级联和几何收敛现象，更为惊人的是它的标度比值也是 4.669。

费根鲍姆利用计算机进行了更精确的计算。对于逻辑斯蒂映射，他很快得出一个更精确的标度比值：4.6692016090；对三角映射重复计算，到小数点后 10 位，两数完全相同。看来标度比不依赖于方程，无论逻辑斯蒂映射还是三角映射，没有什么差别。这当然不可能是巧合。费根鲍姆的发现表明，在逻辑斯蒂映射一类的非线性映射中，倍周期分叉遵循一个普适性规律：当 t 时，分叉间距比存在一个极限值（更精确的） $=4.66920160910399097\dots$

同时，分叉也在越来越窄的宽度上出现，这又是一种普适性规律：相邻两个分叉间的宽度按一定比率缩小，缩小因子在 t 时也存在极限值

=2.5029078750958928485.....

这两个常数被称为“费根值”(Feigenvalue)。费根值的普适性也具有相对性，它只适用于具有像抛物线那样的峰的单峰映射；对于多峰或者具有扁平峰和尖峰那样的情况，标度比值将会不同；但每一类的映射，其标度比总是相同的。

费根鲍姆的发现，是一条普遍适用于一切从有序转变到混沌的动力系统在转变点上的自然规律。这种普适性不仅是结构的，而且是测度的。这一发现的意义在于，动力系统中存在着标度变换，它不仅控制着分叉花样，而且延伸到精确数值。事物整体具有与其部分相似的结构，说明在完全确定的系统中不需要引入任何干扰，就可能出现不规则的随机运动，这是一种内禀特性。

费根鲍姆关于普适性的发现，指引人们走上混沌科学的大道，推动了非线性科学的发展。

费根鲍姆写道：“物理学中有一条基本假定，那就是分析分析再分析，把事物的组成分离出来，直到你真正明白基本的东西在单纯的状态以如何简明的规律行事，然后，你就假定那些你还不不懂的事物都是细节。……”但是现在不行了，因为“大量系统底层有一反复运行之规律，需要用另一种思维去认识它。……这要抛弃纯分析的方法，不能分析分析再分析。”他接着写道：“人类要另辟新径，必须捉住标度结构这一环，看看大家伙与小家伙的关系如何。……这产生复杂性的、持续进行的单一过程却与大小尺寸无关，与地点无关，与时间无关，它是普适的标度变换，它存在于大与小的自相似之中，由小到大自相似的放大比率就是一个普适的费根鲍姆常数。”

最后，他感慨万千地写道：“大地充满了美，引人入胜。看你是什么职业你就如何理解”。

7. 湍流研究和奇怪吸引子

湍流现象普遍存在于行星和地球大气、海洋、江河、火箭尾流、锅炉燃烧室、血液流动等自然现象和工程技术中。湍流的出现将使流体中的质量、动量和能量的输运速度大大加快，从而引起各种机械的阻力骤增，效率下降，能耗加大，噪音增强，结构振颤加剧乃至破坏，如使飞机坠落，输油管阻塞。另一方面，湍流又可能加速喷气发动机内油料的混合和充分燃烧，提高燃烧效率和热交换效率，加快化学反应的速度和混合过程。所以湍流的研究对工程技术的进步有重要意义。同时湍流本身也是物理学领域中尚未取得重大突破的基础研究课题之一。因此长期以来湍流的研究一直受到各方面的重视。

湍流是流体中局部速度、压力等力学量在时间和空间中发生不规则脉动的流体运动。其基本特征是流体微团运动具有随机性，它不仅有横向脉动，而且有反向运动，各个微团的运动轨迹极其紊乱，各个部分之间剧烈渗混，流场极不稳定，随时间变化很快。湍流的运动不仅有无穷多个自由度，大、中、小、微各种尺寸的涡旋层层相套，而且运动的能量迅速由大尺度运动分散到小尺度运动，错综复杂地由整化零，是高度耗散的。湍流是经过一次或多次突变形成的，在紊乱无规的背景中又会出现大尺度、相当规则的结构和协调一致的运动，所以给研究工作带来极大的困难，经过一百多年的研究，现在还没有得到令人满意的理论解释。有一个传说，说

量子力学家海森伯在临终前的病榻上向上帝提了两个问题：上帝啊！你为何赐予我们相对论？为何赐予我们湍流？海森伯说：“我相信上帝也只能回答第一个问题”。

早在 1893 年，庞加莱就发现了湍流问题，但又偏离了它。他发现，液体流中的涡旋通常不扩散，而是倾向于集中到单个涡旋之中。他说这一现象还没有恰当的数学解释。实际上他讨论的是二维现象，还不是真正的湍流，但与间歇现象有明显的联系，表明他已很接近湍流的探讨。

1895 年，雷诺(Reynolds, Osborne 1842 ~ 1912)提出湍流瞬时运动可分解为时间平均和脉动两个部分，即

$$f(\vec{x}, t) = \bar{f}(\vec{x}) + f'(\vec{x}, t)$$

其中 \bar{f} 是相应力学量的时间平均量， f' 是脉动值。将这个分解式代到纳维-斯托克斯方程组中，可得到关于平均流动元素满足的雷诺方程组。但方程组不封闭，多出 6 个未知的湍应力分量。只有找到湍应力和平均流动元素之间的相应关系式，才可使方程组封闭，至今这一问题仍未获解决。

法国流体动力学家库埃特(Couette M.M.1858 ~ 1943)为了研究流体被扭曲的“切变流”，曾制造了一个筒里套筒的双圆筒装置，中间装上水，使外筒固定，内筒旋转，有控制地进行切变实验。1923 年，英国应用数学家泰勒(Taylor, Geoffrey Ingram 1886 ~ 1975)利用这种旋转同心柱体进行实验。当内筒转速足够高时，发现流体不再平稳地转动，而是搅乱成成对的涡旋，涡旋会变成波状，波动又此起彼伏，出现麻花涡旋、辫子涡旋等螺旋模式；转速更高时，系统则呈湍流状(图 9)。

图 9 库埃特-泰勒实验中的波状涡旋

由于湍流看起来包含着十分微小的涡旋，而小于原子尺度的涡旋又是不可想象的，所以可以设想湍流是原子结构的宏观效应。1934 年，法国数学家勒雷(Leray)提出，纳维-斯托克斯方程在原子尺度上的不准确度，经过物理流传播后规模变大而形成湍流。他据此解释了湍流的间歇现象。1941 年，前苏联科学家柯尔莫果洛夫对涡旋的性质提出了一些看法。他设想，大涡旋中形成更小的涡旋，而每一次都会消耗流体的能量；当涡旋变得非常小，粘性流体的能量也会减少到一个极限值。他认为，这些涡旋充满流体的整个空间，使得流体处处相同。实际上这个均匀性假设并不正确，他忽视了湍流的间歇现象。40 年前庞加莱就已经看到，在江河的湍流中，涡流总是和平稳流混在一起的，能量仅在空间的一部分中耗散。在湍流区域的各种尺度下，都存在着平静的区域；在从大到小的所有尺度下，汹涌的区域与平静的区域是互相混杂的。这就是间歇现象。

那么，平稳流是如何变成湍流的呢？也就是说湍流开始的时候是通过什么样的步骤形成的呢？1944 年，前苏联物理学家朗道(Landau, Lev 1908 ~ 1968)在一篇论文中提出了湍流肇始的一幅图景：当表征系统中外力与粘滞力竞争的无量纲雷诺数为零时，流体将做光滑的平稳流动；当由于外界的扰动而使雷诺数增大时，层流中分枝出一个周期轨道，对应于流体的周期运动；当更多的能量进入流体，即雷诺数不断增大时，每次都出现一个与上一个频率不和谐频率；当频率数足够大时，拟周期运动即转变为湍流。这就是说，各种不同频率的运动的积累和叠加，相互交错干扰，就会产生非常复杂的湍流。1948 年，德国数学家霍普夫(Hopf, Eberhard 1902 ~ 1983)按照同朗道一致的思路，提出了一个更加详细的理

论，即通过摆振的积累而由平稳层流转变为湍流的具体机制。此后 20 多年，霍普夫-朗道理论曾被广泛接受。

1967 年，Kline 首先利用氢气泡显示技术通过实验发现了近壁湍流的相干结构（拟序结构）。这种大尺度的涡旋运动在将流体的平均运动动能转变为湍流的动能的过程中，起了主要的作用。人们通过进一步的流体动力学实验，还发现了自由剪切流的相干结构。到 80 年代，流体力学家们普遍认识到相干结构是对湍流的生成、维持和演化起主要作用的结构。所以有人认为相干结构的发现是湍流研究上的一个革命性的进展。不过到目前为止，关于相干结构的定义、成因和定量分析还有不少问题有待研究。

关于湍流的形成，即流体的运动是如何从层流转变成湍流的问题，目前流行的看法是认为，在层流中由于各种原因出现的扰动波，经演化、放大、失稳而导致流体运动的不稳定，最终发展为湍流。

70 年代以来，非线性科学关于混沌现象的理论和实验研究的进展，为解决湍流理论的百年难题提供了启示。特别为解决湍流的发生机制、小尺度混乱与大尺度结构共存等问题带来了希望。

1971 年，法国物理学家茹勒(Ruelle, David)和荷兰数学家泰肯斯(Takens, Floris)的《论湍流的本质》一文，对湍流的研究产生了很大的影响。他们的结论否定了霍普夫-朗道关于湍流起始阶段的传统观点。朗道和霍普夫的直觉即一系列不同频率摆振的累积在数学上和物理学上似乎是容易理解的，但他们的理论在某种程度上是源于哈密顿动力学的，不适用于有摩擦的耗散系统。在粘滞流体的流动中充满着摩擦。茹勒和泰肯斯指出，由平稳流向湍流的转变，不需要一系列的频率，只要三个独立的运动就会产生湍流的全部复杂性。他们描绘出如下的图景：第一次转变，即从定态到单个摆振，产生流体中的周期运动。第二次转变，即加上一个不同频率的摆振，开始时像两个独立的周期运动的拟周期叠加，但这种运动不能继续保持下去，微小的扰动就会破坏掉它。两个独立的周期运动将相互作用而变得同步，合成为具有单个合成周期的周期运动，即发生锁频现象。当有三个叠加频率时，不再发生频率的锁定现象，而会出现一个新奇的结果，即运动进入维数不多的“奇怪吸引子”。他们认为，湍流能量的耗散，必定导致相空间的压缩，把运动轨迹向着吸引子的低维相区推进。这个吸引子不会是不动点，因为湍流不会逐渐平息；也不会是周期吸引子，因为湍流是一种不同次序的性态，决不可能产生任何排斥其它节奏的节奏，它具有各种可能循环的整个宽谱。其相轨迹可能是一种继续不断变化、没有明显规则或次序的许多回转曲线，所以称为“奇怪吸引子”。茹勒和泰肯斯论文中的一些推理和证明是模糊的、错误的，但他们提出的“奇怪吸引子”的图象，却是十分吸引人的。因为湍流的产生可能很好地对应于奇怪吸引子的出现。这是对湍流产生机制的一个很好的阐明。

1973 年，美国实验物理学家斯文尼(Swinney, Harry)和戈鲁布(Gollub, Jerry)利用旋转同心柱体产生的库埃特-泰勒流进行实验。外面是一个玻璃圆筒，有空网球筒那么大；内柱体是用平滑的薄钢板做成的；两柱体之间有八分之一英寸的间隙用来装水。他们利用激光多普勒干涉仪技术，即利用激光光束在悬浮于水中的小小铝粉片上的散射，来测定水的速度变化。本来他们是打算验证朗道关于由液体中不同频率摆振的平稳积累而形成湍流的论断。他们不断调节内柱体的旋转速度，反复观察出现的

跃迁。他们观察到了朗道预言的第一个转变的精确数据；他们大胆地寻找着下一个转变。但是，他们未能找到预期的朗道序列，在下一个跃迁处，流一下子进入混乱状态，一点也没有可准确识别的新频率；相反，却逐渐显出宽带频率。“我们的发现是，变成了混沌！”不过，当时他们还不知道茹勒-泰肯斯理论。

1974年，茹勒访问斯文尼和戈鲁布的实验室时，三位物理学家才发现了他们的理论和实验之间的点滴联系。斯文尼和戈鲁布没有用他们的实验观察奇怪吸引子，也没有检测湍流最初阶段的具体步骤，不过他们知道，朗道错了；而且他们猜测茹勒是对的。

1983年，法国数学家曼德尔布罗特(Mandelbrot, Benoit)指出，湍流的耗散区域，即湍流中大大小小不同尺度的涡旋高度集中的区域，是一种间歇状的分形结构，具有局部的自相似性。因此分形理论在湍流的研究中也有重要应用。

由于湍流的瞬时运动服从纳维-斯托克斯方程，而这一方程本身就是封闭的，所以很容易直接用电子计算机数值求解完整的纳维-斯托克斯方程，对湍流的瞬时流动进行直接的数值模拟。不过由于受到计算机速度和容量的限制，目前的数值模拟还只限于很低的雷诺数和很简单的几何边界条件的情况；而实际的湍流运动大多发生在高雷诺数和边界条件很复杂的情况。所以，湍流的完整理论的形成，还需做很多艰巨的工作。茹勒和泰肯斯提出的“奇怪吸引子”理论，并不只对湍流的研究有重要意义，而是对整个混沌理论的发展都有重要作用。利用相空间描述系统的演化要用到“吸引子”概念。一般的动力系统，最终都会趋向于某种稳定态，这种稳定态在相空间里是由点（某一状态）或点的集合（某种状态序列）来表示的。这种点或点的集合对周围的轨道似乎有种吸引作用，从附近出发的任何点都要趋近于它；系统的运动也只有到达这个点或点集上才能稳定下来并保持下去，这种点或点集就是“吸引子”。它表示着系统的稳定定态，是动力系统的最终归宿，即系统行为最终被吸引到的相空间处所。

经典力学指出，有三种类型的吸引子。一种是稳定的不动点，它代表一个稳定定态；第二种是稳定的“极限环”，即相空间中的封闭轨线，在它外边的轨线都向里卷，在它里边的轨线都向外伸，都以这个封闭曲线为其极限状态。极限环代表一种稳定的周期运动；第三类吸引子是稳定的环面，代表系统的准周期运动。

对一个动力系统来说，在长时间后系统的性态只可能是吸引子本身，其它的性态都是短暂的。所以吸引子的一个重要特征是“稳定性”，它表示着运动的最终趋向或“演化目标”，运动一旦进入吸引子，就不会再离开它；当一个小的扰动使系统暂时偏离吸引子后，它也必然会再返回来的。吸引子的另一个重要特征是“低维性”，它作为相空间的点集合，其维数必定小于相空间的维数。

上述几类吸引子，都代表规则的有序运动，所以只能用于描述经典动力系统，而不能描述混沌运动。有耗散的混沌系统的长期行为也要稳定于相空间的一个低维的点集合上，这些点集合也是一种吸引子。但是混沌之所以是混沌，就是它绝不可能最终到达规则的有序运动；因而在它的吸引子内部，运动也是极不稳定的。在这种吸引子上，系统的行为呈现典型的随机性，是活跃易变和不确定的。更为奇特的是，混沌系统的吸引子（点

集合)具有极其复杂的几何图象,如果没有电子计算机这种高效工具,混沌吸引子是无法绘制出来的。所以茹勒和泰肯斯把它们称为“奇怪吸引子”,以区别于前述那几种“平庸吸引子”。奇怪吸引子既具有稳定性和低维性的特点,同时还具有一个突出的新特点,即非周期性——它永远不会自相重复,永远不会自交或相交。因此,奇怪吸引子的轨线将会在有限区域内具有无限长的长度。

洛仑兹所给出的那个绕两叶回转的永不重复的轨线,就是一个奇怪吸引子——“洛仑兹吸引子”。它是在三维空间里的一类双螺旋线;系统的轨道在其中的一叶上由外向内绕到中心附近,然后突然跳到另一叶的外缘由外向内绕行;然后又突然跳回原来的那一叶上。但每一叶都不是一个单层的曲面,而是有多层结构。从中取出任意小的一个部分,从更精细的尺度上看,又是多层的曲面。所以这种螺旋线真是高深莫测、复杂异常。它永远被限制在有限的空间内,却又永不交结,永无止境。1976年,德国的若斯勒考察了一个更为简化的洛仑兹方程

$$dx/dt=-(y+z)$$

$$dy/dt=x+ay$$

$$dz/dt=b+xz-cz$$

这个方程组的特点是只有最后一个方程中含有非线性项 xz 。若斯勒由这个方程组得出了一个洛仑兹吸引子的变种(图10)。

图10 若斯勒奇怪吸引子

它也是由很多层次构成的复杂几何图象。与洛仑兹吸引子不同,若斯勒吸引子只有一片。它似乎是这样形成的:当 z 较小时,系统的轨道在 (x, y) 平面或平行于它的平面内向外旋;当 x 足够大时, z 开始起作用,轨道在 z 轴方向拉长;当 z 变大后, dx/dt 则变小,轨道又被拉回到 x 较小处。三个变量的交互作用,产生了轨线的复杂运动。

除此之外,混沌学家们还得到了一些其它的奇怪吸引子。可以断言,充分认识奇怪吸引子的作用,对许多问题的探索,都会有巨大的作用。不过,奇怪吸引子的数学理论是困难的,目前还处于起始的阶段。正像茹勒所说:“这些曲线的花样,这些点子的影斑,往往使人联想到五彩缤纷的烟火,或宽阔无垠的银河;也往往使人联想到奇怪的、令人烦躁不安的植物繁殖。一个崭新的领域展现在我们面前,其结构需要我们去探索,其协调(和谐)需要我们去发现。”

8. 生理混沌的探索

70年代以来,在生物个体的生理现象中,也广泛地发现了混沌。

生物体全身的每个器官,都有自己的节律。生命的存在,就是一个耦合振子,即各种内在节律振动的巧妙组合。一旦某种节律失调,就会使生命体患上某种疾病。

心脏的搏动,是推动一切生命节律的中心环节。正常的心律是周期性的。人的心搏大约是每分钟50到100次,日复一日、年复一年地进行着;但是它有许多非周期的病,例如对生命危险极大的心室纤维性颤动。不同的心肌彼此不合节律地收缩,不协调地乱动一起,起不到正常泵血的作用,终致使病人死亡。病者心脏的各个部分似乎都是正常的,节律依然是规则的;但心脏的整体运动,却致命地扭曲了,陷入了稳态混沌。这是一种复杂系统疾病。心脏自己不会停止这种纤颤,只有用电击除颤器来消除。这

种电震击是一个巨大的扰动，可以使心脏返回到定态。为什么心脏的节律在人的一生中经历几百亿次的搏动，其中经过多少次的紧张与松弛，加速与减速，从未失误，然而却会突然进入一种无法控制的、致命的疯狂节律——纤颤呢？研究表明，有一类重要的心律失常可能是所谓“模式锁定”引起的，即两种并行收缩心律的相互作用产生的。从物理学上讲，就是外来的迫动频率与物体振荡的固有频率以某种简单的数字比率达到同步，这称为“锁相”。加拿大数学生物学家列昂·格拉斯(Glass, Leon 1943~)和他的同事在1981年进行了一个有趣的实验。他们从鸡胚心脏中取出一团细胞，这团细胞能够自发跳动，相当于固有振荡器，每分钟跳动60次到120次。然后用一根极细的玻璃微电极插入细胞团，打入一个相当于迫振的周期性小电震。改变电脉冲的频率和振幅，结果不仅产生了各种“锁相”，而且产生了混沌。他们观察到了搏动方式一次又一次地出现了分叉，即“倍周期”现象。这个结果表明，模式锁定可以导致混沌，即使鸡胚心脏的细胞团混沌地搏动。

科学家们的研究表明，一个参数的微小变化，可以把一个健康的心脏推进到一个双分枝点而进入混沌态。科学家们希望通过混沌动力学的研究，能够找到一种方法，在危急的纤颤发生之前，辨认出它的来临；并设计出最有效的除颤装置和治疗药物，使这些猜想盲试的方法变得比较科学。

类似的动力系统疾病现在也越来越多地被认识。这类疾病是由于系统的原有振荡停止或振荡方式改变引起的。例如喘息、婴儿窒息、精神分裂症、某种类型的抑郁症，还有由于白细胞、红细胞、血小板、淋巴细胞失衡而导致的某种白血病等。但是，生理学家已开始认识到，生理混沌可以导致疾病，它也可能是健康的保证。一个生命系统固然需要有抗干扰性，如心肌细胞和神经细胞能够很好地抵抗外界的干扰；但生物系统还需要有灵活性，即能够在一个很大的频率范围内适应外界的各种变化而正常工作。环境的变化常常是难以预料的，生物机体必须能够迅速地对各种变化做出反应。如果机体的某种功能锁定在一个严格固定的模式里不可改变，那就会丧失掉对外界变化的适应能力。例如把心脏搏动与呼吸节律都锁入一个严格的周期中，在机体松弛与紧张的不同状态，在空气稀稠不同的各种海拔高度上，都只有同一种节律，这个生物体就不可能存活下去。人体的其他许多节律也都如此，都必须有多种变化的可能。哈佛医学院的戈尔德伯格(Goldberger, Ary L.)断言，健康的动力学标志就是分形物理结构；治疗疾病时应着眼于拓宽一个系统的谱储备，即增加产生不同频率的能力。“广谱的分形过程是‘信息上极为丰富的’。与此相反，周期态只能反映狭窄谱带，它必然是单调的、重复的系列，信息内容贫乏。”圣迭戈的精神病学家阿诺德·曼德尔(Mandel, Arnold)甚至说：“可能是这样，数学上的生理卫生健康其实就是疾病，而数学上的病理才是健康，即混沌态才是健康。”他认为，人体中最混沌的器官就是脑，说人达到了平衡，那就是死亡，生物学平衡即死亡。“如果你被我询问你的头脑是否在平衡态，你的脑是否一个平衡系统，那就是说，要求你在几分钟的时间里不要去胡思乱想，而你这时自己就会知道你的大脑并非平衡系统。”科学家们也已开始用混沌来研究人工智能。例如利用系统动力学在多个吸引流域之间的来回变迁与沟通来模拟符号与记忆。人的精神思想包含着丰富的概

念、决策、情绪和七情六欲，不能把精神和思想描绘成静态的数学模型，它具有一系列尺度的层次，神经元实现着各种微观尺度与宏观尺度的交融联系，这与流体力学中的湍流或其它复杂的动力系统十分相似。量子物理学家薛定谔(1887~1961)在《生命是什么？》这部名著中提出：生命以负熵为食；一个活的生物体有惊人的本领去浓缩“有序性之流”于自身之中，从而使生命避免融入原子混沌的崩溃之路。这正是生命活动的最基本的奥秘，它吮吸有序性于无序的海洋之中！他指出，生命的基本物质是“非周期晶体”，它组成了生物体这个十分动人的、复杂的物质结构。所以，非周期性正是生命奇特性质近于神妙境地的根源！无论人们如何看待混沌，但无论如何也不能把混沌和非周期性从人体、生命、精神思想中排除出去了。

通过混沌探索的历史回顾，我们可以断言，混沌学正在改变着整个科学建筑的结构，改变着整个科学世界图景。混沌学的发展，或者更广义地说，非线性科学的发展，拨正了科学探索的方向盘。未来科学的任务，不是使用经典确定论的手术刀剖析明白宇宙的钟表结构，而是按照确定性与随机性统一的观点，阐明客观世界这个超巨系统的复杂结构和运行方式，揭示它演化发展的机理与途径。J. 格莱克(Gleick, James)在《混沌》一书中写道：“这门新科学的最热情的鼓吹者们竟然宣称：20 世纪的科学只有三件事将被永志不忘，那就是相对论、量子力学和混沌。他们认为混沌是 20 世纪物理学的第三场大革命。与前两场革命相似，混沌与相对论及量子力学一样冲跨了牛顿物理学的基本原则。正如一位物理学家所说：‘相对论消除了绝对空间和时间的牛顿幻觉；量子力学消除了关于可控测量过程的牛顿迷梦；混沌则消除了拉普拉斯决定论关于可预见性的狂想’。而这第三场革命又有一些不同，它直接适用于我们看得见摸得着的世界，是在和人类自身尺度大小差不多的对象中发生的过程。”

(四) 分形与分维研究

1. 分形与“无穷嵌套的自相似结构”

两千多年来，古希腊人创立的几何学，一直是人们认识自然物体形状的有力工具。经典几何学所描绘的都是由直线或曲线、平面或曲面、平直体或曲体所构成的各种几何形状，它们是现实世界中物体形状的高度抽象。天文学家们用这种几何知识构造了多种宇宙理论，建筑师们利用它设计出大量宏伟的建筑；以致于近代物理学的奠基者、伟大的科学家伽利略极其权威地断言：大自然的语言是数学，“它的标志是三角形、圆和其他几何图形”。

然而事实上，传统几何学的功能并不是那么大的，它所描述的只是那些具有光滑性即可微性（可切性），至少是分段分片光滑的规则形体。这类形体在自然界里只占极少数。自然界里普遍存在的几何形体大多数是不规则的、不光滑的、不可微的，甚至是不连续的。如蜿蜒起伏的山脉，曲折凸凹的海岸线，坑坑洼洼的地面，枝干纵横的树枝，团块交叠的浮云，孔穴交错的蛋糕……真是奇形怪状，千姿百态。这些形状和经典几何学所描述的形状，真是大相径庭。对于了解自然界的复杂性来讲，欧几里得几何学是一种不充分、不具有普遍性的抽象。1975年冬天的一天，正在思索着现实世界真实几何形象问题的法国数学家曼德尔布罗特(Mandelbrot, B.B.)随手翻阅他儿子的字典，注意到了拉丁字“fractus”，这个来自动词frangere的形容词含有破裂之意。他由此创立了“分形”(fractal)这个概念，并由此创立了“分形几何理论”，从而把数学研究扩展到了传统几何学无法涉足的那些“病态曲线”和“几何学怪物”的领域。曼德尔布罗特说：“云朵不是球，山峦不是锥，海岸线不是圆，树皮不光滑，闪电也不走直线。”分形几何学所映射出的自然事物不是光滑无瑕、平坦规整的，而是凸凹不平、粗糙丛杂、扭曲断裂、纠结环绕的几何形体。

自然界的现象通常都发生在某种特征标度上，如特征长度、特征时间等特征尺度上。科学家关于事物特征的描述最基本的莫过于问它有多大，持续多久。这都是依赖于标度（尺度）的一些基本性质。每种事物都有其特征尺度，例如天体物理学家描写的宇宙结构，大约在数百万光年的范围上；生物学家认识的微生物的结构大约有微米的长度；物理学家研究的夸克，约在 10^{-13} 厘米的数量级上。每一个具体事物，都与特定的尺度相联系。几厘米长的昆虫与几米、十几米大小的巨兽在形态、结构上必然极不相同，否则它们就无法生存和繁衍。《楚辞·卜居》中说：“夫尺有所短，寸有所长”。这也是说事物都有其自己的特征尺度，要用适宜的尺去测度。用寸来量度细菌，用尺来量度万里长城，前者失之过长，后者又嫌太短。所以，标度是十分重要的。试图对自然现象做定量描写时，就必须从特征尺度入手。一个好的理论模型，往往要涉及三个层次：首先是由特征尺度确定的基本层次；更大尺度的环境就用“平均场”和决定外力的“位势”等描写；更小尺度上的相互作用，则以“摩擦系数”、“扩散系数”等得自于实验的“常数”来表征。如果要从理论上对这些系数做出阐明和推算，那就必须从物质运动的更深入细微的层次上进行探讨。

但是，分形几何学却否定了关于事物大小和久暂的区分的绝对标度性，指出对于大自然的某些现象，去寻求特征尺度是毫无意义的。曼德尔

布罗特研究过电子通讯中的噪音，研究过河水泛滥的数据，还研究过棉花价格的涨落。通过这些研究，他开始形成实际的图象。在他的关于现实的图象里竟然没有二分法的位置，无法把微小的变化与宏大的变化分离开来，而是把它们紧紧地联系在一起。他所寻找的图象，无所谓小尺度和大尺度的差异，而是超越一切尺度；它不是左和右的对称、上和下的对称，而是大尺度与小尺度之间的对称。曼德尔布罗特把 1900 年以来棉花价格的数据通过计算机处理，确实找到了他所追求的惊人的结果。那些从正态的误差分布观点看来产生偏离的数，从尺度观点看却发现了对称。每一天的价格变化曲线与每一个月的价格变化曲线完全匹配。虽然其间经历了两次世界大战和一次经济大萧条，但在 60 年的周期里，竟然有价格的变异度不变的基本规律。在极为无序的大量数据的内部，竟然存在着如此出人预料的序，完全具有任意性的数据竟然被一条规律所支配，这个尺度问题看来具有自己的生命。这使曼德尔布罗特从对实际现象的研究转向探索尺度现象。

曼德尔布罗特关于大自然过程里不规整花样的研究以及他关于无穷复杂形象的探索最终汇流到一个交结点上，这就是自然事物的“自相似”这个特性。“大自然在所有标度上同时起作用”。自然界的许多事物在其内部的各个层次上都具有自相似的结构，在一个花样内部还有更小的同样的花样。自相似物体不具有特征标度，它是跨越尺度的对称性；它在不同测量尺度上看去差不多一样，是一种“无穷嵌套的自相似结构”。“分形”就意味着“自相似”。一个几何图形，如果它的组成部分与图形整体之间有某种相似性，就称为“分形”。“自相似”的思想在人类文化的各个方面都有所反映。中国古代就有“袖里有乾坤，壶中有日月”和“一尘一世界”的说法。曼德尔布罗特曾引颂《格列佛游记》的作者 J.斯韦夫特(J.Swift1667~1745)的一首打油诗：“博物学家看仔细，大蚤身上小蚤栖；更有微蚤叮小蚤，递相啮噬无尽期。”德国哲人莱布尼兹(G.W.F.VonLeibniz1646~1716)也曾设想，在一滴水里包含着多姿多彩的世界，其中又有许多滴水，每滴水又各有新的世界。

海岸线就是天然存在的一个分形。曼德尔布罗特在一篇题为《英国的海岸线有多长》的文章里做出这样的结论：任何海岸线，在某种意义上都是无限长的；在另一种意义上说则决定于你所选用的尺的长度。因为在不同标度上描绘的海岸线图，都显示出相似的湾、岬分布。每一个大湾中都有小湾和小岬，那些小湾和小岬中又有更小的湾和岬；把这些湾和岬放大后和实际的海岸线仍然相似。正如曼德尔布罗特所说：“当你初次在一张比例尺为十万分之一的地图看到的一个海湾或半岛重新在一张比例尺为一万分之一的地图上被观察时，无数更小的海湾和更小的半岛就变得清晰可见了。在一张比例尺为一千分之一的地图上，更小更小的海湾和更小更小的半岛又出现了。”所以，你如果用一米的尺沿海岸测量，可以得出一个近似的长度，因为实际上你已经把小于一米的曲曲弯弯部分忽略掉了。如果改用一厘米的尺去量，一些小的曲折将被计入，得到的海岸线将会增长。随着测度标尺的变小，海岸线的长度会不断加长，永远不会收敛于一个极限数值。其根本原因就在于海岸线是一个无穷嵌套的自相似结构。

分形不仅在所有的标度上都有结构，而且在所有标度上都有相同的结构。1904 年，瑞典数学家科赫(Koch, Helge Von 1870~1924)构造的“雪

花曲线”，严格地显示了分形这种有趣的特征。设想给出一个正三角形，再不断进行如下变换：在每边正中的 $1/3$ 边上再造一个凸出来的正三角形，使原三角形变成六角形；在这个六角形的 12 条边的每条边中间的 $1/3$ 上再凸出一个正三角形，变成一个 $4 \times 12 = 48$ 边形；反复操作这种变换以至无穷（图 11），其边缘愈来愈增添精细结构，得到一个由分形曲线（“科赫曲线”）围成的科赫岛，好似一个雪花。科赫曲线是一条连续的环，绝不自身相交；每次变换都会使“科赫岛”的面积稍有增加，但总面积永远是有限的，并不比原三角形的面积大很多（小于原三角形的外接圆）；但科赫曲线的总和却是无穷长的。这似乎是一个矛盾的结果：岛的面积有限，但周长无穷大；或者说一条无限长又绝不自交的曲线包围成了一个有限的面积。

图 11 科赫曲线的生成

图 12 康托尔灰尘

数学家们还构造了许多类似的一维的、二维的和三维的分形结构。如“康托尔灰尘”（图 12）；在一条线段上去掉中间的 $1/3$ ；然后对所余二段各去掉其中间的 $1/3$ ；反复操作下去，剩下的即康托尔集合。它是一些点非点、线非线的东西，数量为无穷多，但总长度为零。另如“塞尔平斯基地毯”（图 13 甲）和它的三维类似“孟格尔海绵”（图 13 乙）。前者总面积为零而孔线长度无穷大；后者总体积为零而总的表面积无穷大。在当时许多数学家的头脑里，认为这些曲线或形状是“病态的”，似乎大自然不应如此。但曼德尔布罗特却由这些一层比一层精细的相似结构中，窥视到了宇宙的秘密。

图 13 塞尔平斯基地毯和孟格尔海绵

2. 分维概念的提出

对于欧几里得几何所描述的整形来说，可以由长度、面积、体积来测度。但用这种办法对分形的层层细节做出测定是不可能的。曼德尔布罗特放弃了这些测定而转向了维数概念。分形的主要几何特征是它的结构的不规则性和复杂性，主要特征量应该是关于它的不规则性和复杂性程度的度量，这可用“维数”来表征。维数是几何形体的一种重要性质，有其丰富的内涵。整形几何学描述的都是有整数维的对象：点是零维的，线是一维的，面是二维的，体是三维的。这种几何对象即使做拉伸、压缩、折叠、扭曲等变换，它们的维数也是不变的；这种维数称为“拓扑维”，记为 d 。例如当把一张地图卷成筒，它仍然是一个二维信息载体；一根绳子团成团，仍然是一维结构。但曼德尔布罗特认为，在分形世界里，维数却不一定是整数的。特别是由于分形几何对象更为不规则，更为粗糙，更为破碎，所以它的分数维（简称“分维”，记为 D ）不小于它的拓扑维，即 $D \geq d$ 。

维数和测量有密切关系。如为了测一平面图形的面积，就要用一个边长为 l 、面积为 l^2 的标准面元去覆盖它，所得的数目就是所测的面积。如果用长度 l 去测面积，就会得到无穷大；而如果用 l^3 去测这块面积，结果就是零。这就表明，用 n 维的标准体 l^n 去测量一个几何对象，只当 n 与拓扑维数 d 一致时，才能得出有限的数值。如果 $n < d$ ，就会得到无穷大；如果 $n > d$ ，则结果为零。分数维也是按照这个要求来定义的。由于分形的复杂性有多种不同类型，所以可以提出不同定义的分维概念，从不同的角度

表示分形的不规则性。通常用的是“容量维”。简单地说，分维所表示的不规整程度，相当于一个物体占领空间的本领。一条光滑的一维直线，完全不能占领空间；但是“科赫曲线”却有无穷的长度，比光滑的直线有更多的折皱，拥挤在一个有限的面积里，的确占领了空间，它已不同于一条直线，但又小于一个平面。所以它大于一维，又小于二维，它的容量维为1.2618，这看来是理所当然的。海岸线的分维数通常在1.15到1.25之间。曼德尔布罗特指出，对于各种分形来说，即使在不同的尺度上，用分维表示的不规整程度却是一个常量。这真是一个令人惊奇的性质，也表明“分维”概念的客观现实特性。分维所表征的正是大自然的规则的不规则性。一个分形的曲线意味着一种有组织结构，这个结构隐藏在奇特怪异的形状之中。

分形和混沌动力学之间的联系很快就被发现了。混沌的奇怪吸引子都是分形。结构的复杂性使现实世界出现了大量分形几何形体，也使确定性动力学体系出现无规性。奇怪吸引子都有层次的自相似性。无穷相似结构互相套叠起来，就相当于没有规则结构，所以“无穷嵌套的自相似结构”呈现出总体的混沌。非线性动力学系统一旦进入混沌吸引子区域，就会随机地在吸引子内部四处游荡，但又不能充满整个区域，区域内存在着无穷多的随机空隙，从而使整个混沌区出现维数上的“空洞”，呈现分数维数。

洛仑兹吸引子就是三维背景空间中的一张分形曲面，其容量维等于2.06；若斯勒吸引子也是三维背景空间中的一张分形曲面。所以，“分形几何学”和“分维”概念已经成为混沌学研究的重要工具。

(五) 远离平衡态的自组织开放系统的研究

1. “时间之箭”的再发现

“时间”是物理学中最重要的基本概念之一。关于是否存在“时间箭头”，即时间是否确实具有单向性的问题，自古希腊的苏格拉底以来，一直迷惑着各个历史时期的哲学家和科学家。甚至在一些文学作品中，也出现有关于时间倒流的构想。在牛顿力学、相对论和量子力学中，都否定了时间的方向性。决定论和因果论与这些理论的可逆性是紧密联系的。牛顿力学的基本定律，就是机械决定论的最坚实的科学基础；爱因斯坦建造他十分成功的引力的几何理论，其动机就是出于对因果性的根本地位的坚定信仰。在这些决定性的理论中，时间被降到次要的地位，时间 t 只是描述运动的一个参量，不具有演化方向的意义。不管时间朝哪个方向走，整个的未来和整个的过去都包含在现在之中；过去、未来和现在都只不过是同一整体的几个不同方面而已。在这些方程中，没有内在的时间箭头，它们对时间反演是完全对称的；无论时间向前进行还是向后倒退，所发生的运动没有质的差异。在这些物理理论中，时间的变化并不影响运动的性质，“正的时间”和“负的时间”没有本质的差异。而且情况比这还更糟，在这些理论中，时间不仅无向，它还必须循环，历史必须按照“庞加莱回归”无限重复。但是，当我们把思考转向真实的世界和现实生活时，就明明白白地得出结论：时间是不对称的。“时光不会倒流”，“机不可失，时不再来”，“少小不努力，老大徒悲伤”……这些经验和体验，都包含着“时间不可逆转”这个平凡而颠扑不破的真理。19世纪诞生的达尔文的进化论，更令人信服地表明时间是有箭头的。生物进化的过程是不可逆的，生物的进化由低级到高级、从简单到复杂，其结构愈来愈精致，功能愈来愈完善，它从最小、最简单的微生物一直进化到结构高度有序的人体。差不多和达尔文的进化论同时，演化的观点也已经进入到物理学之中。在19世纪50年代所完成的热力学理论中，描述系统热运动的方程不具有时间反演的对称性；当以 $-t$ 去代替 t 时，方程的形式也就不同了，表明“过去”与“未来”是不等同的。例如，一个系统初始时温度不均匀，处于不平衡状态，随着时间的推移，系统将趋于温度均匀的平衡状态；而反方向的过程却不可能自动出现，已达到温度均匀的平衡状态，不可能自行倒转回去形成冷热悬殊的非平衡状态。这种对称性的破坏，表明时间是和系统的演化紧密联系着的；时间只能向前流逝。于是，具有实质内容的“时间箭头”就进入了物理学理论，“存在物理学”的一统天下被“演化物理学”所打破。

这种演化物理学的最基本的定律，就是1865年由德国物理学家克劳修斯(Clausius, R.E. 1822~1888)所提出的“熵增加原理”、“熵”是决定于系统的热力学状态的物理量，用它的变化可以表述自发过程的方向。一个系统经过一个绝热过程由一个态变化到另一个态的时候，它的熵永不减少，这就是熵增加原理。这个原理的最重要的意义是，它显示了“时间箭头”的存在。它体现着能量从集中到耗散，从有效到无效，从高值到低值。我们时时感受到我们周围世界的熵增加：火焰慢慢燃尽，留下一堆灰烬；青草渐渐枯黄，在寒风中破碎飞散；瀑布飞流直下，沿着河川流向大海；山石滚落平川，经水冲刷、风化变成泥浆……而相反的过程却从未自动发

生过。从一件件自然事物的变化中，我们体验着时光的流逝。熵增加原理决定了时间的方向性，人们无法阻止熵的增加，因而也无法逆转时间的推移；这样，“历史”也就具有了实质性的意义。克劳修斯还由此预言了宇宙将走向“热寂”的最终结局。

深为进化论思想所吸引的玻耳兹曼(Boltzmann L.1844~1906)决心要找到熵的力学解释，即找到熵增加原理的微观机制。他使用的方法也与生物进化论的方法相同。因为生物进化中的自然选择是对一个大的生物群体而言的，是一个统计概念；玻耳兹曼也是从分子群体的角度去探讨可逆与不可逆过程的差别。他提出了熵增加原理的统计解释，指出自然界的自发过程是系统从概率较小的有序状态向概率较大的无序状态的过渡，平衡态即具有最大概率的最无序的状态。热力学第二定律（熵增加原理）把时间与有序性和无序性（随机性）这样的概念联系起来，时间的流逝方向就变得显而易见了：任何孤立系统中都有一种不容改变的倾向，使系统的有序度不断降低而无序度不断增加，这就是物理过程不可逆性的实质。

不过，热力学第二定律所确言的演化方向似乎与达尔文生物进化论所言的演化方向正好相反。前者断言自然物质中存在着从有序到无序，终结于最大元序状态的演化趋势；后者指出生命系统中存在着的是一类熵减少的过程。19世纪中叶这两种理论所揭示的“演化悖论”，深深地困扰着科学家们的认识；再加上物理学家们牢固地被牛顿力学决定论思想所束缚，几乎在所有的地方都把单向时间的概念排除在他们的科学之外，坚信自然过程的可逆性是深藏于自然事物的深层原因之中的；因此，他们对玻耳兹曼的理论和观点，展开了猛烈的攻击。玻耳兹曼开始时曾认为他已成功地从动力学角度确定了熵增大的机制，亦即确定了“热力学的时间箭头”；但在强大的反对势力面前，“他放弃了证明有一个客观的时间之矢存在的打算，而引入了另外一种思想，这种思想在某种意义上把熵增大定律约化成一种同义反复。现在他认为时间之矢不过是一种约定，是我们（或许可以说，是所有活着的生物）把它引进到一个在过去与未来之间没有客观差别的世界中来的”。当时其他一些著名的物理学家，对时间的不可逆性也都持否定态度。爱因斯坦就认为“不可逆的时间”只是人类的幻觉。1917年，当他用广义相对论讨论宇宙模型时，就为了维护宇宙在大尺度上的特征不随时间变化的传统科学观点，而引进了一个称为“宇宙斥力”的宇宙项，得到了一个没有时间方向的、静态的宇宙模型。后来当天体物理学家弗里德曼(Friedmann, A. 1888~1925)和勒梅特(LeMaitre, G. 1894~1966)对这个静态宇宙模型提出批评后，爱因斯坦承认自己犯了平生最大的一个错误。但当后来勒梅特希望和爱因斯坦讨论更精确的宇宙初始状态的问题时，爱因斯坦却表示对此没有兴趣。著名物理学家玻恩(Born, Max 1882~1970)甚至提出“不可逆性是无知进入物理学基本定律的结果”。

但是，也有人坚持着熵增加原理的根本重要性。如英国天体物理学家爱丁顿(Eddington, A.S. 1882~1944)就说：“我认为，熵增原则——即热力学第二定律——是自然界所有定律中至高无上的。如果有人指出你所钟爱的宇宙理论与麦克斯韦方程不符——那么麦克斯韦方程就算倒楣。如果发现它与观测相矛盾——那一定是观测的人把事情搞糟了。但是如果发现你的理论违背了热力学第二定律，我就敢说你没有指望了，你的理论只有丢尽脸、垮台。”他同样肯定熵增加原理显示了“时间箭头”的存在；

他说“熵是时光之箭”。

20世纪以来物理学以及相关学科的发展，把存在和演化两种科学观点的冲突推进到一个新的转折点，迎来了一个关于时间的本质的新的综合。1986年7月，耗散结构理论的创始人普里戈金(Prigogine, Ilya 1917~)以《时间的再发现》为题做了一次演讲；他面对倍感惊奇的听众，对这个题目做出解释说：“实际上对时间这个概念的理解，人们在最近10年或20年中已经有了重大的变化；完全可以说，时间是又一次被发现了。”他明确指出：“我们已开始破译著名的热力学第二定律所传达出来的深刻的信息。无处不在的、或称为万有的时间箭头，即时间对称性破缺，正是第二定律的核心；正是从这里再度发现时间。”在普里戈金看来，19世纪提出的热力学第二定律，已经把不可逆的演化和时间之矢的问题提到了显著的地位；而20世纪以来的一系列科学进展，特别是基本粒子不稳定性发现，现代宇宙学演化观念的发展，以及非平衡成为有序之源的发现，都标志着时间之矢的再发现。所谓“时间的再发现”，即关于时间对称破缺、不可逆性作为自然界的一种建设性因素的发现，这标志着一种新的科学观念的产生。普里戈金写道：“时间不仅贯穿到生物学、地质学和社会科学之中，而且贯穿到传统上一直把它排除在外的两个层次，即微观层次和宇观层次之中。不但生命有历史，而且整个宇宙也有一个历史，这一点具有深远的含义。”我们具体来看一看现代科学关于时间对称破缺的三个重大发现。

第一个是关于基本粒子不稳定性发现。“基本粒子”理所当然地被认为是“宇宙之砖”，即构成宇宙万物的最基本的层次；它的“基本性”也包含着永恒不变之意。它们不生不灭，是一种没有历史的“存在”。但近几十年的研究表明，“时间之矢”也深藏于基本粒子的本性之中。大统一理论断言，过去被认为是最稳定的质子，也会发生衰变。理论预测，质子、中子衰变后成为轻子和介子。例如质子在衰变后产生正电子和中性介子；中子在衰变后产生电子和带正电的介子。还可能有其它不同的衰变方式。质子的衰变是极其缓慢的，其寿命大约为 $10^{31} \sim 10^{32}$ 年。这个理论预言正在世界各国许多实验室里经受检验，目前已经发现了几个可能是质子衰变的事例。

第二个是关于宇宙学演化观念的发展。早在1929年，美国天文学家哈勃(Hubble, E.P. 1889~1953)就发现了星系谱线红移的哈勃定律，表明宇宙不是静态的，而是随着时间在膨胀。1965年，美国贝尔电话公司的彭齐亚斯(Penzias, A.A. 1933~)和威耳孙(Wilson, R.W. 1936~)发现了弥漫全部天空的3K微波背景辐射。其它还有星系氦丰度为30%以及星系分子中有出乎意料多的氘等重要发现。这些观测结果，都支持了“大爆炸宇宙学”关于宇宙是从一个非常致密、极端的热的原始火球发生爆炸而产生，并一直膨胀开来的学说。这个学说认为在物质密度无穷大、时空曲率也无穷大的这个“奇点”状态之前，是没有时间和空间的。大爆炸的发生，就是宇宙时间的起始。大爆炸发出的辐射随着宇宙的膨胀而冷却下来，这就是彭齐亚斯和威耳孙所发现的3K宇宙背景辐射。

膨胀的宇宙当然是一个演化着的、有历史的宇宙。可以认为自然界所有过程的不可逆性都来自于宇宙的原始爆炸和随后发生的宇宙膨胀。这样就可以把热力学第二定律所论证了的“时间箭头”和宇宙联系起来。膨胀

的宇宙本身就是一个永不停息的大钟；或者如爱丁顿爵士所说，时间的指针是由星系的退离自行带动的。

这里又涉及到另一个问题，即无处不在的引力的作用，最终会使膨胀停止下来，并且使所有的物质不可抗拒地回聚在一起，成为一个最终的奇点。果真如此，宇宙就是以大爆炸开始，而以大坍缩终结。那么就会产生这样的疑问：在膨胀过程中，时间箭头是从高度有序的大爆炸奇点，指向某种无序性最大的中间态；然后当宇宙开始向大坍缩——它看上去和大爆炸是同样高度有序的——收缩时，时间箭头便反转过来，即出现时间逆转的现象。这个看法受到了牛津大学数学家、第一个从事奇点研究的彭罗塞 (Penrose, R.) 的反驳。彭罗塞认为，即使在大坍缩的过程中，熵也是不断增加的，时间箭头依然不变。因为，“大爆炸”和“大坍缩”这两个宇宙奇点的结构是不等价的，即不对称的。虽然它们都是物质无限密集的火球，但原始火球的时空奇点具有一个限制条件，它不适用于黑洞或大坍缩奇点；大爆炸奇点相对于大坍缩奇点来说，有序程度要高得多，熵也低得多。对于大爆炸和大坍缩，时空在奇点附近的几何结构是完全不同的。观测表明，大爆炸奇点是各向同性的、受到高度约束的、具有高序的低熵状态。但是在走向大坍缩的过程中，却会产生像黑洞那样的时空缺陷，在大坍缩中凝聚成质量巨大的杂乱无序的一团，它必然也具有相应的高熵。当然，彭罗塞的这些看法，还只是一种有价值的猜想。他期望创立一种令人满意的量子引力理论，这个理论“必须含有关于时空几何本质的某种根本性的新思想”，它应当同时对时间演化和初始条件做出解释。普里戈金所看重的第三个事实，是关于非平衡系统中一致性和相干性的发现。在已往的物理学中，主要是研究平衡结构。但 70 年代以来的研究表明，平衡态中的结构是一种静止的“死”结构，非平衡态中的结构才是具有演化潜质的结构。当系统处于远离平衡的状态时，有可能产生自组织现象，自发地产生时空有序结构。这是数以亿计的分子遥相呼应、相互协同合作的结果，这就是所谓的“相干性”。这一发现把人们对不可逆过程和有序、无序问题的认识大大推进一步，认识到不可逆过程在有序的形成中可以起到积极作用。这样，热力学第二定律和达尔文生物进化论这两种演化学说之间的矛盾，也可以得到解决。当代最著名的广义相对论学家和宇宙论学家、英国剑桥大学的霍金 (Hawking, S.W. 1942 ~) 在 1988 年出版的《时间简史》 (A Brief History of Time) 中提出：“时间箭头将过去和将来区别开来，使时间有了方向。至少有三种不同的时间箭头：第一个，是热力学时间箭头，即是在这个时间方向上无序度或熵增加；然后是心理学时间箭头，这就是我们感觉时间流逝的方向，在这个方向上我们可以记忆过去而不是未来；最后，是宇宙学时间箭头，在这个方向上宇宙在膨胀，而不是收缩。”霍金讨论了为什么三种时间箭头指向同一方向。首先他指出，“总存在着比有序状态多得多的无序状态的这一事实，是使热力学第二定律存在的原因”。这也就是热力学时间箭头得以存在的根据。由于我们对大脑工作的细节尚知之不多，所以霍金转而讨论计算机的心理学时间箭头。他指出，为了保证记忆器处于正常的状态，就要消耗一定的能量；这部分能量以热的形式耗散了，从而增加了宇宙的无序度的量，这个量大于记忆器本身有序度的增量。因此，计算机记忆过去的时间方向和无序度增加的方向是一致的。“我们对时间方向的主观感觉或心理学时间箭头，是在我们头脑中

由热力学时间箭头所决定的。正像一个计算机，我们必须在熵增加的顺序上将事物记住。”关于宇宙学时间箭头，霍金指出，根据量子引力理论，必须满足无边界条件的要求去讨论宇宙历史的开始。即宇宙开始时在尺度上有限，但是没有边界或边缘。“在这种情形下，时间的开端就会是规则的、光滑的空间-时间的点，并且宇宙在一个非常光滑和有序的状态下开始它的膨胀。它不可能是完全均匀的，否则就违反了量子理论不确定性原理。必然存在密度和粒子速度的小起伏，然而无边界条件意味着，这些起伏又是在与不确定性原理相一致的条件下尽可能的小。”这样，“宇宙开始时处于一个光滑有序的状态，随时间演化成波浪起伏的无序的状态。这就解释了热力学时间箭头的存在”。霍金也讨论了如果宇宙膨胀停止并开始收缩后的时间箭头问题。他指出，“无边界条件”意味着在收缩相时无序度继续增加；所以当宇宙开始收缩时或在黑洞中热力学和心理学时间箭头不会反向。他还以“弱人择原理”为基础指出，收缩相的条件不适合于智慧人类的存在。“对于智慧生命的行为来说，一个强的热力学箭头是必需的。为了生存下去，人类必须消耗能量的一种有序形式——食物，并将其转化成能量的一种无序形式——热量，所以智慧生命不能在宇宙的收缩相中存在。这就解释了，为何我们观察到热力学和宇宙学的时间箭头指向一致。并不是宇宙的膨胀导致无序度的增加，而是无边界条件引起无序度的增加，并且只有在膨胀相中才有适合智慧生命的条件。”

普里戈金根据耗散结构理论的新成就，也深入地探讨了这一问题。他认为，热力学第二定律表述为一个选择原则表明，时间对称破缺意味着存在着一个熵垒，即存在不允许时间反演不变的态。如同相对论中光垒限制了信号的传播速度一样。无限大的熵垒保证了时间方向的单一性，保证了生命与自然的一致性，使认识成为可能。生命系统是耗散的自组织系统，存在内禀生命节律；生物体借助于这种内禀生命节律机制内在地产生时间的方向性的感觉。耗散自组织系统具有历史和分叉，通过某种滞后返回时表现出某种对历史的“记忆”。从认识论角度来看，这正是主体能够认识客体，主观时间能够反映客观时间的物质基础。“耗散结构理论最使人感兴趣的方面之一就是：我们现在能在物理学和化学的基础上发现这个时间方向性的根源。这个发现反过来又以自洽的方式证明我们认为自己所具有的对时间的感觉是合理的。”虽然在时间之矢的探索中，现在已取得了一些重要进展，但这一问题的最终解决还很遥远。特别是著名哲学家哥德尔在1949年提出的“时间旅行”的观点，直接否定了时间箭头的单向性。哥德尔根据广义相对论得出了旅行回到过去是可能的结论。他发现了一个满足爱因斯坦方程的转动宇宙模型，其中返回到过去的旅行是可以允许的。哥德尔想到这的确包含了一些荒诞的结果，如一个人会在某个地方发现过去某个时候的他自己，并对这个人做某件在自己的记忆中从没发生过的事；甚至会发生“新生儿自谋杀”。如果这是可以实现的，那么这个人就不会活到能干这件事，这当然是个矛盾。所以人们当然可以把它作为爱因斯坦方程的一个没有物理意义的解而加以舍弃。但不久宇宙学家们又从爱因斯坦方程中得到一个被称为“蚯蚓洞”的奇异解。这个“蚯蚓洞”可以把宇宙中相隔很远的不同部分、甚至把分离开的宇宙连接起来。掉进一个适当的蚯蚓洞的人，就可能回到他的“过去”的某个地方。不过按照牛顿力学或爱因斯坦力学，蚯蚓洞不可能支撑很久，所以旅行者可能会在回

到过去的旅途中被挤压得粉碎。然而 1990 年，三个美国理论物理学家莫里斯(Morris, Michael)、托恩(Thorne, Kip)和尤瑟福(Yurtsever, Ulyi)从现代物理学理论的最新成果出发认真研究了蚯蚓洞问题。他们认为，如果考虑了物质的量子性质，蚯蚓洞的坍塌就可以避免，因而逆时运动以及“新生儿自谋杀”等许多怪事依然存在着可能性。这些结论与因果规律当然是不相容的。这一惊人的结论已在物理学界和哲学界引起广泛兴趣和激烈的争论，争论已深入到逆时运动是否一定违反因果律，存在逆时运动时空的稳定性问题以及异常物质的性质等一系列根本问题。这一讨论当然会涉及“时间之矢”的根本性的问题。

2. 从伯纳德花纹到化学振荡的发现

图 14 温度梯度造成了气体分布的浓度梯度

宏观系统的自然倾向是沿着时间箭头走向平衡态。但实验发现，当两种气体的混合体由于加热而离开平衡态后，组织便会以一种简单浓度梯度的形式出现。如图 14 所示盛有氢气和硫化氢气体混合物的容器，使两端产生并保持一个很小的温度差，就会发现两种气体将逐渐分离，较轻的氢气多流向较热的一边，较重的硫化氢气则多聚集于较冷的一边，形成了各自的浓度梯度。这个现象表明，在不可逆的非平衡态过程中，可以产生出有序性。

图 14 温度梯度造成了气体分布的浓度梯度

当系统远离平衡态时，还会出现更加壮丽的有序组织。1900 年，法国的伯纳德(Bernard, Henri)首次发现了蜂巢状的自组织花纹(图 15)。在一个透明的碟子里加入一些液体，在炉子上加热，液体在竖直方向上便产生一个温度差。当液层顶部和底部之间的温度差达到一个阈值后，对流开始，下层较热的液体流入上面较冷的部分。这时由于浮力、热扩散、粘滞力三种作用的耦合而形成液面上大范围规则的蜂巢状花纹(“伯纳德花纹”)。这种蜂巢结构的尺度约为分子间距的一亿倍。为了形成这种蜂巢状的对流单元，无数分子必须遥相呼应、协调行动。这表明，热的耗散把熵从系统中输出，使系统低熵的蜂巢结构得以产生并维持下去。

图 15 伯纳德花纹的全貌(甲)和局部放大(乙)

化学反应会发生振荡。1921 年，伯克利加州大学的布雷(Bray, William)在用碘作催化剂使过氧化氢分解为水和氧气时，第一次发现了振荡式的化学反应。但是当时化学家们错误地确信，热力学定律不允许振荡，因而用实验方法的疵病为借口否定了这个发现。

1952 年，英国数学家图灵(Turing, Alan)在一篇论文中，提出了像化学振荡一类现象的可能性。图灵对形状、结构和功能在生物体中的出现感到兴趣，期望为生物学中所谓的“形态来源论”找到一个化学基础。他提出了这样一个简单问题：一个有机体是如何把一个化学浑汤规整成为一个生物结构，如何使一团完全相同的细胞变成一个有机体？这是生命形成的一个难题。比如，一个哺乳动物的胚胎，本来是一个许多细胞组成的球体，支配它发展的生物化学反应的均匀、不可逆的扩散，本应保持这种球对称性，为何却反而孕育出不具有这种球对称性的动物形体？图灵证明了，受精卵变成生物的复杂形态所必需的这种对称性的破坏，的确可以发生。他已经触及到了问题的底蕴，即在平衡态附近，对称的均匀状态是稳定的；远离平衡态时，均匀状态就会因为无处不在的涨落而变成不稳定的。图灵

还发现，各种颜色的物体具有不同的扩散率，在液体里相互起反应，就会变化其浓度而形成空间不随时间变化的稳态图案，也可以产生彩色波浪的振荡式图案。图灵的这种思想，在将近 20 年的时间里没有受到化学家和生物学家的注意。

比图灵的工作稍早，50 年代初，俄国化学家别洛索夫(Be-lousov, B.P.1893 ~ 1970)做出了化学振荡反应的关键工作。他用柠檬酸、溴酸钾、硫酸作配剂，用铈盐作催化剂进行实验，他惊讶地发现，溶液开始无色和淡黄色两种状态间变来变去（相当于带电铈离子的两种不同的形式），即发生了颜色规则的周期振荡。这样，别洛索夫就首次提供了一个实在的化学反应，支持“反应-扩散”双重不可逆过程可以产生自组织的概念。但不幸的是，这个反应的奇特行为是化学家和生物学家们无法相信的，所以他的论文屡遭拒绝，最后在一个辐射医学学术讨论会的文集中刊登出来。当时人们认为热力学第二定律确言：任何化学反应只能走向退化的平衡态，在两种颜色之间的化学振荡当然是不可能的。

1963 年，从莫斯科大学生物化学系毕业的扎鲍廷斯基(Zhabotinskii, A.M.)对别洛索夫的配方做了一些修改，主要是用铁盐代替了铈盐，使颜色更鲜艳地从蓝变红，出现周期性的红-蓝变化。如果化学混合物在一薄层内扩散，就会形成圆形波和螺旋波纹。这就是“BZ 反应”。这一发现终于取得了承认，众多的化学振荡反应被做了出来。近 20 多年来，自组织化学反应的研究，已经成为很时髦的一门学科。

美国化学家温弗利(Winfrey, Art)对此评论说：“虽然‘BZ 反应’谈不上具有一个可以变异、可以演化的遗传系统，它有不少特点，就是使我们对生物体系感到兴趣的特点：诸如化学的新陈代谢（有机酸氧化为二氧化碳），自我组织的结构，有节奏的活动，在某些极限以内的动态稳定，在这些极限以外的不可逆的解体，一个自然的寿命等等。”

3. 耗散结构与自组织理论的提出

耗散结构理论是在热力学发展的过程中建立起来的。经典的热力学理论只适用于平衡态的过程，无法用以解释像生命这种远离平衡和高度有序化的系统。所以必须把热力学定律向非平衡态、非线性作用的领域推进。就像图 14 所示的热扩散的实验所表明的那样，在非可逆的、非平衡态过程中，可以产生出有序性。

1931 年，非平衡态热力学的创始人之一、美籍挪威化学物理学家昂萨格(Onsager, Lars1903 ~ 1976)证明了不可逆过程热力学的一个基本原理，对动力系数对称性的昂萨格定理。这一定理确立了广义热力学“流”和“势”（或“力”）的线性关系。1932 年，昂萨格又确立了非平衡态热力学的一般关系，即著名的“昂萨格倒易关系”，这个关系在近平衡态的区域里成立。因为在近平衡态区域，作用力比较弱，“势”或“力”（如温度梯度、浓度梯度等）同由它引起的“流”（如热流、扩散流等）之间呈近似的线性关系。如图 14 所示的实验里，温度梯度如同一种热力学力，给系统一个“推动”，引发了热量流和质量流；当温度梯度不很大，即接近平衡的情况下，热流和质量流与造成它们的“力”直接成正比；这种情况下的热力学被称为“线性热力学”。昂萨格的倒易关系表明，在线性系统中有一种美学上很漂亮的对称关系：一个力（如某个温度梯度）可以产生或影响一个流（如某个扩散过程），那么这个流形成的力（如某个浓度梯度）也会

影响与那个力联系着的流（如热流）。这个效应已经在实验上得到证实。倒易关系的提出标志着热力学从平衡态向非平衡态的推进，它本身也是不可逆过程热力学的最早结果之一。昂萨格为此获得了 1963 年的诺贝尔化学奖。

1945 年，普里戈金登上了热力学的舞台。他 1917 年出生于莫斯科，10 年后随同家人迁居西欧。后来师从比利时物理化学家德·顿戴 (deDonder, Thophile 1873 ~ 1957) 投身于化学热力学的研究，并逐渐成为布鲁塞尔学派的领导人。他在时间的可逆与不可逆，物质结构的有序与无序，自然界的简单性与复杂性，运动状态的稳定与不稳定，运动规律的决定论与非决定论等重大问题上，都有深入的研究与独到的见解，并创立了“耗散结构理论”，获得了 1977 年的诺贝尔化学奖。

1945 年，28 岁的普里戈金发现，在线性表现良好的区域，热力学耗散降到它可能的最低点。他假定在近平衡区域里，局域体积元可以看做平衡系统，然后根据热力学第二定律以及昂萨格倒易关系，得到了“最小熵产生原理”。这个原理表明，在近平衡的情况下，熵是递减函数；当达到定态时，耗散处于一个极小值。比如在热扩散的情形下，总熵可能是增加的，但当气体最终的浓度梯度建立起来之后，系统内禀的熵的产生率就达到它的最低值。

1947 年，普里戈金发表了题为《不可逆现象的热力学研究》的博士论文，其中包括了“最小熵产生原理”。这个原理表明，在线性非平衡区，熵产生起着平衡态理论中热力学势的作用，可作为判别线性非平衡区系统稳定性的一个函数；它表明，在这个态上，如果由于干扰和涨落而有所偏离，系统内部的变化都会使它回到原来的态，所以熵产生最小的态是稳定态。但是它同时还表明，在近平衡的非平衡线性区域，不可能发生突变，使系统过渡到新的稳定的有序结构。

普里戈金提出的这个最小耗散概念，比起最大熵的平衡态概念来是更为有用的。因为现实的系统都不是完全处在平衡态的，总会具有进一步演化的趋向。但是只要有一点很小的外部作用，使系统保持在偏离热平衡的状态，系统也将会实现一种稳恒态，而不是塌陷到完全无序的状态。如图 14 所示的实验那样，一个不很大的温度梯度，就会使气体保持一种浓度梯度，不随时间而改变。

最小熵产生原理虽然是一个重要的结果，但它的证明决定于昂萨格所描述的流与力之间的美好线性关系。他希望大胆地跨进一步，探究远离平衡态的非线性系统的情景，以完成更为复杂的现实系统随时间演化的图象，并把他的原理推广到流和力的简单关系被破坏的情况，找到一个关于演化的新的判据。从 1947 年到 1967 年，普里戈金和他的同事格兰斯道夫 (Glansdorff, Paul) 一起，考察了大量不同系统在远离平衡态时的不可逆过程，概括出了它们的演化行为的共同点，提出了“耗散结构”的概念，建立了一种称为“广义热力学”的理论。从本质上讲，他们使用的是一种“局部平衡”的近似方法，即把一个远离平衡态的系统，划解为许多子系统，在局部上表现为平衡态；整个系统由这许许多多的局部连缀而成。这个方法与广义相对论理论把弯曲时空想象为许多局部平直时空连缀在一起的方法是类似的。他们利用这种方法来研究平衡态热力学远不能处理的情形。

1969年，在一个理论物理学和生物学的国际会议上，普里戈金在《结构、耗散和生命》的论文里，正式提出了“耗散结构理论”。1971年，他和格兰斯道夫合著的《结构的热力学理论，稳定性和涨落》，更系统地阐述了他们得出的可能对事物随时间演化的方式做出判别的所谓“普适演化判据”。在第一篇论文的开头，普里戈金就指出：

“生物学与理论物理学之间仍然存在着巨大的鸿沟，这是非常明显的。按照某些著名生物学家的看法，在空间和功能两个方面的有序，乃是生命的基本特征。

生命问题当然是一个‘多体问题’。因为有序的形成和维持包含着大量分子的联合作用。但是，统计物理学在处理这种联合现象上，目前尚处于初期阶段。……

在生命系统中，新陈代谢和能量的耗散，很可能起着本质的作用。”

普里戈金说，他希望在热力学的唯象方法的基础上，去“讨论生物有序之源，还想说明非线性热力学的新近发展能够使生物学和物理学之间的鸿沟缩小。”

普里戈金区分了两种类型的结构，即“平衡结构”和“耗散结构”。平衡结构是一种不与外界进行任何能量和物质交换就可以维持的“死”的有序结构；而耗散结构则只有通过不断与外界交换能量和物质才能维持其有序状态，这是一种“活”的结构。普里戈金-格兰斯道夫的判据指出，对于一个与外界有能量和物质交换的开放系统，在到达远离平衡态的非线性区时，一旦系统的某个参量变化到一定的阈值，稳恒态就变得不稳定了，出现一个“转折点”或称为“分叉点”，系统就可能发生突变，即非平衡相变，演化到某种其它状态。一个重要的新的可能性是，在第一个转折点之后，系统在空间、时间和功能上可能会呈现高度的组织性，即到达一个高度有序的新状态。例如在某些远离平衡的化学反应中，可以出现规则的颜色变化或者漂亮的彩色涡旋。应该指出的是，当系统远离平衡时，整体熵产生以极快的速率增长，这是与热力学第二定律一致的。但是在小的尺度范围内，却可能出现极其有序的结构。这是只有在系统是开放的，通过与外界的能量和物质交换而保持在偏离平衡的状态时才可能出现的。因为这才使得系统所产生的熵可以输送到外界，使系统处于低熵的有序状态。

普里戈金和格兰斯道夫所给出的确实不像他们自己所说的是一个“普适演化判据”，而只是一个“弱”判据。因为它只是指出了热力学转折点存在的可能性，没有给出它的必然性；对于在第一个转折点之后会发生什么情况，他们的非平衡态热力学只给出了一个模糊的图象，系统的演化有多种多样的可能性可供选择。这种极度的复杂性，使得确定性的因果联系描述变为不可能。对于一个化学家来说，这些选择可能意味着反应过程出现颜色的周期性变化或显现出彩色图案；对于一个生态学家来说，这些选择可能是生物种群的交替变化或实现一个稳恒态；对于一个医生来说，这或许是心脏病发作的预兆。但是无论如何，普里戈金-格兰斯道夫的“判据”还是非常有价值的，因为它指出在这种“转折点”之后，我们在有些情况下可以看到有序结构的出现。它表明，热力学定律并不禁止有序结构的自发产生，这就是普里戈金和格兰斯道夫所创立的理論的真正意义。在《结构、耗散和生命》这篇有里程碑意义的论文的“结束语”里，普里戈金写道：“生命看来好像不再作为反对热力学第二定律的一个支撑点，尽

管有某些‘麦克斯韦妖’方面的工作，然而下述物理定律合乎特有的动力学定律和远离平衡的条件。这些特有的动力学定律允许能量和物质流动，以建立和维持功能有序和结构有序。”耗散结构理论就这样把热力学定律和生物进化论协调起来，解决了克劳修斯关于物理过程是从有序到无序发展，而达尔文确言生物世界是从无序到有序发展的“演化悖论”。

七、当代物理学在中国的发展

(一) 20 世纪上半叶中国物理学家的重要成就

本世纪初，一批中国学者到西方国家学习现代物理学知识，开展物理学的研究工作。他们中间一些人学有所成后，回国兴办教育，出版刊物，组织学会和创办研究机构。由于他们的辛勤劳动、不懈努力，在国内培养了一批优秀的青年物理学人才。这些人再次被派遣出国留学深造，并在物理学研究方面做出了许多出色的工作。20 世纪上半叶，中国物理学工作者在国内外进行了大量的研究工作，在物理学的各个领域都做出了一些一流水平的成果，对现代物理学的发展做出了重要贡献。

1. 力学

力学是研究物质在力的作用下运动和变形规律的一门科学。它以研究天然的或人工的宏观对象为主，也涉及宇观或细观甚至微观各层次的对象及有关规律。按照上半世纪我国的科学划分，力学也属于物理学范畴内，在力学领域取得重大成就的学者也都是物理学家，故将其归之于物理学领域加以记述。我国学者在力学领域所取得的重大成就，主要在流体力学和应用力学方面。

流体力学：周培源(1902~1993)1938年在西南联合大学时即开始进行不可压缩粘性流体理论研究，在国际上首先提出了脉动方程（或称涨落方程），建立了普通湍流理论。根据这一理论对一些流动问题做了具体计算，计算结果与当时的实验符合得很好(1940)。他的研究成果曾获当时国家教育部自然科学类一等奖。张国藩(1905~1975)从30年代开始从事湍流理论研究，他认为流体力学传统的 Navier-Stokes 方程不能用于湍流，而必须先把湍流的物理机制搞清楚，按新的物理模型建立基本方程。为此他完成了以下工作：(1)类比分子运动论的方法，建立了湍流“温度”、“压强”和“熵”等物理量，并将它们编入流体力学方程，相当详细地讨论了湍流通过圆管和两个平行面之间的情况，并扼要地讨论了湍流的衰减、湍流结构和关联作用的特性等问题。后来他又发展了上述思想，用量子统计方法求湍流能谱分布式。(2)论证了湍流运动是一种非牛顿流体运动，其内部阻力应改用幂数式表示，并依此建立了他自己的湍流运动方程。1950年，卢鹤绂(1914~1997)提出流体的容变粘滞性理论，从而推出霍尔假定的容变弛豫方程，并在声传播和吸收现象上取得初步成效。1951年，他又在全部频率范围内将容变粘滞弹性理论应用到超声（及声源前川流）的传播和吸收现象上，得出能够描述实践经验的有概括性的公式。庄逢甘1950年也研究了湍流的统计理论。1944年，林家翘(1916~)在美国加州理工学院对二维平行流稳定性的研究取得了突破性进展。他首次运用渐近分析方法求出了完整的中性曲线，从而得出临界雷诺数。他的理论结果被后来的实验和数值计算所证实，并第一个获得美国物理学会颁发的流体力学奖金(1979)。李政道(1926~)于1950~1951年，讨论了湍流。他通过将 Heisenberg 湍流模型与实验结果相结合，而计算了各向同性湍流的涡流粘滞系数，证明在二维空间中不存在湍流。40年代，钱学森(1911~)与 Von Karman 共同提出跨声速流动相似律和高超声速流动概念，为空气动力学的发展奠定了重要理论基础。1946年，钱学森与郭永怀(1909~1968)共同提

出，在跨声速流场中有实际意义的临界马赫数，不是原先被重视的下临界马赫数，而是来流的上临界马赫数。这对航空技术中突破声障碍有重要意义。以后，郭永怀又把该工作推广到包括有曲率流动和绕儒可夫斯基薄翼流动的情况，研究了绕物体跨声流动的稳定性问题。他对于高超声速可压缩粘性流体绕尖劈运动及其离散效应等，也进行了成功的研究。

在应用力学方面，20年代中期，魏嗣銮(1895~1992)在德国研究应用力学课题，以变分法探讨了均匀负荷四边固定的矩形板的挠度和弯矩。30年代，丁西林(1893~1974)创造了一种可逆摆，用以精确地测定g值，从而避免了过去以摆测定g值的许多实验误差。30年代中期，江仁寿以一种带有惯性棒的双线悬挂装置测定了液态碱金属的粘滞性，他所改进的方法后来被广泛用于其他液态金属粘滞性实验之中。1940年，钱伟长(1912~)首先以三维弹性理论为基础，用张量分析微分几何为工具，建立了薄壳和薄板的统一内禀理论，其结果证明可以用板壳的中面拉伸应变和曲率变化六个分量表示全部求解方程；并指出在Kirchhoff-Love的通常假定下，可以根据板壳厚度、曲率张量、拉伸应变和曲率变化等四种物理量相对量级，把薄壳问题分为各种类型，它们的一级近似求解方程都各不相同。国际上有关薄壳 SS_{12} 中的张量方程组，以及从该方程组导出的圆柱浅壳和圆球浅壳方程被称为“钱伟长方程”。

2. 相对论、引力论及宇宙论

20年代后期，周培源就从事广义相对论和宇宙论的研究。为了解决用于表示爱因斯坦引力场的10个二阶非线性偏微分方程组中存在着一组由4个独立的非线性偏微分方程所组成的Bianchi恒等式，致使仅仅用引力方程得不出10个引力函数（即引力张量的10个分量）的确定解这个难题，他主张附加物理条件，并曾引进一个条件，从而获得轴对称引力场的一些解。1936~1937年，周培源在美国普林斯顿高等学术研究院参加爱因斯坦主持的讨论班时，又计算了不同条件下静止场不同类型的严格解，并证明在各向同性条件下，爱因斯坦引力场方程本身即可给出Friedmann宇宙的度规张量，使得该问题的解决大大简化。30年代，束星北(1907~1983)探索引力场与电磁场的统一理论，这在当时是一个超时代的课题。虽然他的研究未取得有实质意义的进展，但他的有关研究对后人还是有启发性的。40年代初，胡宁(1916~)在普林斯顿高等学术研究院从事关于引力辐射阻尼的研究。他采用广义相对论里通常的坐标条件，改进简化了爱因斯坦等人的方法，首先计算出双星系统的反阻尼结果。他的这一工作被普遍认为是该方面理论研究的创造性贡献。胡宁认为由于广义相对论里的力不是协变的，所以反阻尼的结果是可以理解的。他后来的工作指出坐标条件不是必需的，主张使用附合实际的物理条件，可以得到合理的结果。70年代末，正是在双星辐射阻尼的观察上得到引力波存在的第一个证据。

3. 声学

在古代，中国是对声学做出突出贡献的国家之一，到了近代，中国声学比较落后。50年代中期以前只有少数科学家对少数的分支学科进行过一些研究工作。

在空气声学方面，20年代后期，叶企孙(1898~1977)测定了清华大学礼堂的音质，提出了改进该建筑物音质的具体办法，并发表了《清大学礼堂之听音困难及其改正》的论文，开创中国建筑声学研究之先河。马大猷

(1915~)应用求解波动方程并使其满足厅堂边界条件的物理声学方法,建立了房间声学简正波的理论基础。早在1939年,他就突破了声波要远小于房间尺寸和物体大小的限制,首先求得低频范围下矩形空室中的简正波频率分布公式,建议将它推广到任意形态的房屋之中。接着他又与 Hunt、Beranek 合作,利用受壁面声阻抗影响的阻尼声波简正振动方式而分析了均匀壁面矩形室中的声衰变,提出了分析混响的新方法。40年代,他利用波动声学方法探讨了矩形室中非均匀的声边界、颤动回声以及房屋音质的起伏等问题。第二次世界大战期间,汪德昭(1905~)在法国国防部第四研究组承担了反潜声呐的研究,先后在主动声呐加大功率和以气压哨声消除雾滴的研究方面做出优异成绩。魏荣爵(1916~)是中国声学事业创始人之一,1950年,他在美国加利福尼亚大学运用分子的弛豫吸收理论,成功地解决了低频声波在水雾中的反常吸收现象,指出声波导致气液两相转换是声能消散的原因。他还进行过声波消雾的研究。

在超声学方面,40年代初汪德昭在法国用声栅光衍射方法研究了超声波在二硫化碳液体中的声吸收。这一早期的实验结果被称为是该领域最可靠的数据之一。1941~1943年,许宗岳(1911~1974)在美国布朗大学从事水超声吸收的精确测量与理论研究。他用自己提出的力积分天平法,消除各种干扰,提高了灵敏度,在10~50MHz频率范围内,测得室温下自来水的 $2\alpha v^{-2} \times 10^{17}$ 平均值为 $45.4 \text{cm}^{-1} \text{sec}^2$ (2 为声强衰减系数, v 为声频率)。此数值与经典 Stokes 公式计算值有明显的差异。他在解释这一结果时,提出将 Stokes 公式修改为 $2\alpha/v^2 = 4^{-2} (\eta + 2\mu) \rho c^3$, 即除了考虑水的剪切粘滞系数 μ 以外,还应考虑“压缩”粘滞系数 η 。许宗岳的这一研究成果被称为声吸收测量的代表性工作和主要参考资料。40年代末,北京大学杜连耀在美国从事微波超声的产生及应用研究,发表论文10余篇,在1952~1955年间研制成钛酸钡压电陶瓷的加压和极化工艺,可取代昂贵的石英。他回国后继续从事超声学的研究工作。

4. 热学、热力学和统计物理学

20世纪上半叶,中国物理学家在热学、热力学和统计物理学方面曾有过比较出色的研究成果。1936~1937年间,王竹溪(1911~1983)将 H.A. Bethe 于1935年提出的超点阵统计理论推广成为普遍理论,既适用于组元浓度相等,也适用于组元浓度不相等的情形,而且处理的是相当普遍的一类长程相互作用,找到了计算超点阵位形分配函数的近似方法,从而在形式上给出了超点阵问题的普遍解。在随后的多年中,超点阵仍是王竹溪继续研究的课题。1942年他指导杨振宁做硕士论文的题目就是超点阵。杨振宁后来回忆说:“王先生把我引进了物理学这一领域(统计力学),此后,它便一直是我感兴趣的一门科学。”(《读书·教学四十年》,香港三联书店)王竹溪还对多元系的平衡与稳定性的热力学理论做了深入的研究,发展了一极普遍的数学理论,它在整个热力学理论体系中具有基本的重要性。他的长篇论文和在其专著《热力学》(1955年版)中对平衡稳定性的讨论,至今仍然是这方面必须参考的重要文献。张宗燧(1915~1969)于1936~1938年在英国剑桥大学学习期间,便开始从事统计物理学方面的研究,在合作现象,特别是固溶体的统计物理理论研究做出了重要贡献。1937年,张宗燧将 Bethe 提出的超点阵统计理论推广到包括了近邻原子对之间的相互作用。1940年他回国任重庆中央大学物理系教授,与他的学生

一起研究合作现象，建立了求固溶体位形自由能的方法，该方法不仅较为简单、可靠，而且应用面较广。他还讨论了合作现象中的准化学公式的改进问题，对量子系统的各态历经问题也进行了研究。30年代，葛正权(1896~1988)在美国柏克莱加州大学所进行的以分子束测定 Bi_2 分解热和验证 Maxwell 速度分布律的实验，是当时闻名的工作。该实验不仅在测定分解热方面取得了比前人精确得多的结果，更重要的是在验证 Maxwell 速度分布律方面取得了重大成就。他发现：实测的分布曲线与理论曲线相比，在高速端二者极为符合，而在低速端二者存在较大的差异。他分析了这种误差的原因和技术上的困难，从而导至发现了 Bi_8 分子，同时也使以后数十年间不断地有人以各种方法重复验证 Maxwell 分布律。而葛正权的这个实验则被作为经典载入物理学著作之中。40年代在统计物理方面做研究的还有王明贞和王承书。王明贞(1906~)于1942年在美国 Michigan 大学首次独立地从 Fokker-Plank 方程和 Kramers 方程中推导出自由粒子和简单谐振子的布朗运动。1945年，她与 G.E.Uhlenbeck 教授合作的有关布朗运动理论的论文——《布朗运动的理论》，在近四十年的时间内一直作为了解布朗运动的权威性文献。王承书(1912~)40年代在美国从事统计物理学和稀薄气体动力学的研究。她根据 Boltzmann 方程研究稀薄气体并发现了线性化的 Boltzmann 方程积分算符的本征函数及本征值，提出了被称做 WCU 方程(王-Uhlenbeck 方程)的多原子分子气体的修正 Boltzmann 方程。此外，黄子卿 1935年精确测定了水的三相点；陈仁烈 1935~1936年研究了金属线和水银的纵向热电子发射；朱应洗 1939年详细研究了在一些特定条件下通过气体的热传导现象；吴仲华 1947年对四冲程内燃机的输入过程的热力学分析做了研究；杨立铭 1948年研究了液体和气体的扩散理论，在流体的统计理论中，把 Born-Green 液体理论推广到混合液体，并用统计方法导出了分子的扩散系数。

杨振宁(1922~)在昆明西南联合大学学习时，就在王竹溪的指导下研究统计物理。他在 1944~1947年间，至少有四篇关于统计力学方面的论文，论述了相互作用能随晶格常数的变化而变化、临界温度和超格比热的关系、在超格统计理论中准化学法的一般理论问题。Ising 模型是闻名的统计力学中的铁磁学模型，是 E.Ising 为模拟铁磁体在居里点的相变而提出来的。杨振宁于 1925年解决了其中最困难的问题，分析了在正方形点阵下二维 Ising 模型的自发磁化强度的解析表达式，证明在居里点发生的现象确系一种相变。接着他又指导张承修将其方法推广到长方形点阵 Ising 模型之中。1952年，杨振宁与李政道(1926~)合作提出了统计物理学中关于相变的两个定理，以及有关巨配分函数之根的著名的“李-杨单圆定理”。他们的研究，严格定义了气相、液相、固相中任一相的热力学函数，证明热力学函数能区别不同的相，不同相的这些函数一般地彼此不能解析延拓。他们将这个新诞生的广义相变理论应用到点阵气体中，对后来关于惰性气体的实验研究帮助极大。杨振宁与李政道合作还研究了硬球玻色(Bose)气体的分子运动论。他们通过对级数有选择求和，证明可以消除硬球玻色系统的发散性。这些工作在理论物理学的众多领域被广泛采用。他们还分析了硬球玻色系统的低温特点，证明相互作用的玻色系统可显示超流性，从而深入而全新地提供了理解液 He 的异常现象的理论。

5. 电磁学、无线电电子学和微波波谱学

在电学领域，北京大学物理系首届毕业生孙国封(1880~1936)1923年在美国康乃尔大学物理实验室，使用他自己所设计的直接测量小相角的一种灵敏度高而精确的方法，测量电解质电池的电容和电阻，说明了它们随电动势、电池几何结构、溶液浓度、温度、以及半透明铂膜电极厚度的变化情况。在他的研究中，区分了电极电阻与电解质电阻；并从测量的等效电阻和电容的值，推导了计算电池的实际电阻和电容的方法。30年代，萨本栋(1902~1949)创造性地将并矢方法和数学中复矢量应用于解决三相电路问题。1936年，他在美国Trans, AIEE上发表的《应用于三相电路的并矢代数》一文，被美国电气工程师学会当年冬季会议列为讨论课题，并被该会评为1937年度“理论和研究最佳文章荣誉奖”。1939年，萨本栋汇集了他的研究成果写成《并矢电路》一书，是属于“数学、物理、电机三角地带”的新专著和新理论。该书出版不久，便被选入国际电工丛书，并获中国电机工程师学会第一次荣誉奖章。40年代，萨本栋从事交流电机研究，以标么值系统分析交流电机问题，很具特色。他根据在厦门大学和美国讲课的素材编写的《交流电机基础》一书，被英、美各国高等院校作为教本，开创了我国科学家编写的自然科学教科书被外国普遍采用的先例。30年代，马士修(1903~1984)在法国曾研究过扭力对电阻影响和Barkhausen效应。1928~1930年间，严济慈(1900~1996)先后在巴黎大学Fabry物理实验室和法国科学院大电磁铁实验室对水晶压电效应做了深入的研究。他发现在垂直于电轴的晶面上施加电压，晶片形变量与它的厚度无关，但与电压强度有关。电压不大时，晶片厚度的形变符合Curie定律，即形变比例于静电场强度。在垂直于光轴的晶面上施加电压，晶片厚度的形变极为微小，与绝缘体无异。他还观察到水晶由于电压而变形是瞬时的，无滞后现象。他还在沿水晶光轴做成的实心与空心两种水晶圆柱体上施加扭力而产生起电现象，以及其扭转压电振荡方面的研究。在这方面研究中，他发现水晶柱受扭力时产生电荷，这在理论上是有意义的。在无线电电子学和微波方面，也有一批中国学者做出了卓有成效的研究。1920年，北京大学温毓庆(1895~?)在美国哈佛大学对于受各种波长的阻尼和非阻尼激发的天线辐射电阻做了理论分析。20年代中期，倪尚达(1898~1988)在美国匹兹堡Westinghouse电气公司研究并制备了为整流器所用的第一氧化铜，具有优良的整流特性。1929年他著的《无线电学》是我国最早最有影响的无线电专著，被誉为“学习无线电之善本”，在东南亚地区颇有影响。20年代末到40年代初，陈茂康对滤波器、脉冲发生器、微分脉冲发生器、微分指数导纳以及在 I_m 量程内吸收式波长计等的理论、设计和校准等做了多方面的研究。孟昭英(1906~1995)30年代初在美国加州理工学院从事超短电磁波的研究，成功地在世界上第一次用电子管产生1厘米的超短波。同时，他还设计了波导阻抗的精密测量方法，并在美国获得专利。30年代末，他又进行关于三极管直线板极调幅的研究，得到了比一般方法更好的直线性无畸变调制，并具有另一些优点。1941年他在昆明清华大学无线电研究所发表了《三极管射频放大器的直线阳极调幅》论文，受到美国无线电公司(RCA)研究室等单位的重视。后来他在这方面又做了许多研究，并对氧的毫米波吸收谱进行了研究，这是微波波谱学最早的工作之一。朱物华(1902~)在30年代对各波段的滤波器进行了研究。他推导了终端有电阻耗散的型低通滤波器、以及T型和型高通滤波器的瞬变电流解的公式。

从这些公式计算的结果，与阴极射线示波器映出的直流和交流情况下波形图相符。这项成果填补了耗散式电子滤波器瞬流研究上的空白。任之恭(1906~)20年代末到30年代初，在美国对电子振荡器的理论与实验都有过研究。40年代以后，他又从事微波波谱学的研究，尤其是对许多气体分子的微波波谱的Zeeman效应做了实验观测。他在国内外科学杂志上发表了多篇这方面的学术论文。1980年科学出版社(北京)还出版了他的专著《微波量子物理学》。卞彭(1901~1990)1935年在美国麻省理工学院首先采用钨丝圆柱型发射极制作电子放大管，后经多次改进，已得到广泛应用。40年代他在国内以自制的仪器设备，先后与杨约翰、应崇福合作从事氧化物阴极研究。当时普遍认为脉冲发射与直流发射二者机制不同，因为脉冲有衰减。而卞彭经过多次实验检测，终于在1948年最早确定了氧化物阴极的脉冲发射和直流发射的一致性。后来他总结了多年的研究成果，提出了热阴极的微块模型理论。并第一次提出“同平面三极管理论解”，得到了与实验甚为符合的计算结果，对生产有一定指导意义。他在电子学方面的成就，对我国电子学的发展做出了积极贡献。戴振铎(1915~)1937年毕业于清华大学，后赴美深造，先后获哈佛大学硕士、理学博士，40年代任哈佛大学研究员，专长于电磁理论和天线理论，发表论文近60篇。他在1948年关于双锥形天线的理论研究使他获得了小锥角有效负载导纳的严格表达式；1952年他以变分法研究圆柱形金属线的电磁反向散射，确定了反向散射截面数值，并仔细讨论了与导线终端处电流有关的边界条件。冯秉铨(1910~1980)是我国著名的电子学家，对无线电电子学、振荡理论有较深的研究，特别是在无线电发送技术方面有独到的研究。40年代末至50年代初，他从提高强力振荡器阳极效率出发，首先提出了相角补偿理论，分析了多种振荡器电路，得到相角补偿电路参数的计算公式。其结果证明相角补偿条件和提高频率稳定度条件相符，即振荡器经过相角补偿后，阳极效率提高、频率最稳定。该理论在理论和实践上都有重大意义。将它用于高频电热等大功率振荡器可以节省大量电力；用于波段发射机，可起稳定频率的效果。他的这项高效率高频放大器电路的研究，获得1978年全国科学大会奖。叶楷(1911~)在电子学、微波、线性和非线性电路分析等方面，都进行了卓有成效的研究。1945年，他从理论上考察了栅极支柱和不同电子管尺寸对电子发射角的影响，从而证明了H.C.Thompson在1936年的实验分析。1950年，他在对低压充气二极管的理论与实验研究中，推出了一些重要数据，如正离子的过渡时间和寿命，以及它中和空间电荷的效应等。鲍家善(1918~)在微波天线、微波铁氧体器件、磁控扫描天线、微波超导等方面都做过研究。40年代，他在美国获得快速扫描天线、赋形波束天线等四项专利。1953年，他根据物理学衍射理论，对雷达天线进行改进，提出双余割平方波束天线设想，从而提高了辐射能量的利用率，使飞行目标所受照度均匀。根据这一设想制造的天线，在多山地区探测飞行目标获得满意的结果。毕德显(1808~1992)早年曾在电磁场和天线理论等方面做过大量研究工作。40年代曾参加美国斯坦福大学工学院院长F.E.Tomam教授主编的《无线电工程师手册》的编写工作。1944~1947年在美国无线电公司新产品试制部参加脉冲多路通信和微波通信设备的研制工作。50年代以来，有许多专著和论文发表。他是中国雷达工程专业的主要创建人，为我国发展雷达和通信技术做出了重大贡献。磁学是研究静磁和电磁学磁现

象以及物质磁性及其应用的学科。1922~1923年间,叶企孙(1898~1977)在较大的压力范围内($0 \sim 12000\text{kg/cm}^2$)系统而细致地研究了流体静压力对典型的铁磁性金属压力系数、温度系数、剩磁和磁导率的影响,从而观测到前人所未见过的复杂现象。他从唯象理论上推导了铁磁性物质的体积变化与磁化过程和压力系数的关系,定性地解释了铁、镍、钴的不同实验结果。同时,他还在当时铁磁性分子场唯象理论和原子结构模型的基础上对其实验结果做了有益的讨论,提了原子的微观结构对铁磁性的可能影响。叶企孙的这一研究工作,受到当时欧美科学界的重视,被认为是在物质铁磁性方面的一项重要研究工作。施汝为(1901~1983)从30年代起,在顺磁化合物、铁磁性合金及其单晶体、永磁合金的磁性、磁畴粉纹图和磁各向异性等方面进行了长期的研究,特别是他对铁-钴和镍-钴合金单晶体的磁晶各向异性做了开创性的工作。30年代中期,他在中央研究院建立了我国第一个近代磁学实验室。30~40年代,潘孝硕(1910~1988)在关于铁-贵金属合金、铁-稀土金属合金和铁族金属及其合金磁性、磁化机制和热处理效应等方面的研究,做了许多有意义的工作,特别是在磁性合金有序化对磁性的影响和晶界内磁场对多晶体旋转磁化过程的影响等做了深入研究。李庆贤(1902~1987)1931年在美国研究了低温下磁铁矿晶体的磁性。他首先发现磁性物质在冷却到低温(-160°C)相变点时,会引起感生磁的各向异性变化。这一成果受到国际磁学界的重视和多次引用。蔡柏龄(1906~1988)从30年代起在法国贝尔维尤(Bellvue)强电磁体实验室从事磁学和强磁场设计研究。他对气态-氧化氮、氧和氮的磁(致)双折射和磁(致)Faraday旋转,以及液态-氧化氮的磁化率进行了研究。30年代后期他又致力于铁族过渡金属(如锰、铁、钴、镍、铜等)的氧化物、卤化物、碳酸盐等多晶体和一些单晶体的磁化率随温度的变化进行了系统的研究。他从实验上最早发现了多种化合物的磁化率-温度曲线出现最大值的反铁磁性,并把反铁磁性理论用于解释这些化合物磁性的特点,对早期反铁磁性研究做出了重要贡献。在多种强磁体设计方面,他曾参加法国“土星”质子同步加速器中的大型强磁体、大型气泡室电磁体、大型永磁体和高梯度磁场等的设计研究,曾采用磁位计法测量强电流。蔡柏龄的这些研究工作,于1934年获法国国家研究发明局银质奖章,1947年获法国埃梅·贝尔泰(AiméBerthé)奖。马士修(1903~1984)曾对电场和磁场的对称状态进行过研究,并发展了居里对称定理。他还指出,电磁场中的“对称要素与热力学内之熵极为相仿”。

6. 光学、应用光学和光谱学

在光学与应用光学包括光源、光学材料光谱学等在内,上半世纪中国物理学工作者中多数人参与了这一领域的研究,取得了较多的成就。

1925年前后,谢玉铭(1893~1986)在美国芝加哥大学物理系跟随著名物理学家、诺贝尔物理奖获得者A.A.Michelson教授从事光的干涉研究。1928年,严济慈在法国进行水晶压电效应研究时,首次测定了居里压电效应“反现象”的数据。同时,发现了不同于Kerr效应的一种双折射新效应,即在垂直于电轴方向的水晶面上施加正电压则在该方向的双折射增大,而垂直于光轴与电轴的第三轴向的双折射减小;如果施加电压为负,则结果相反。1931年严济慈在钱临照(1906~)的协助下,在北平物理研究所开展压力对照相乳胶感光性能影响的研究,发现压力能减弱乳胶的感光性能,

且压力愈大，效应愈显著。如用 X 射线为光源，效应则相反：压力愈大，效应愈不明显。他们的研究成果于 1932 年发表在《法国科学院周刊》上。30 年代后期，龚祖同(1904 ~ 1986)在德国留学期间从事光学系统高级像差的研究，设计了野外望远镜，为把光学设计和军用光学仪器设计引入中国打下了基础。1938 年，他在昆明试制成功 6 × 30 军用双目望远镜、机枪瞄准镜和 80 厘米倒影测远机等我国第一批军用光学仪器。1952 年，在他的领导下，制造出中国的第一炉光学玻璃。1937 年，钱临照发表了有关玻璃的表面微裂缝的研究成果，40 年代又在昆明以 Hilger 棱镜干涉仪实验地描述了光谱中相邻两光波的干涉图象及其性质，并对此做出了理论解释。特别是通过这个实验，他提出可以以这种简便的方法达到提高光谱线分辨率的途径。这在当时是一个富有创造性的研究工作。40 年代，王大珩(1915 ~)在英国从事光学玻璃研究工作，成功地研制成数种新型稀土光学玻璃的配方，并获得专利。他还研究了不同退火条件下，对光学玻璃的折射率、内应力以及光学均匀性的影响，研制成了 V 型棱镜精密折射仪。这些研究成果获英国仪器制造协会第一届 Bowen 仪器发展奖。同时，他还研究了各级球面像差对最佳焦点位置的影响。这种思想至今仍是小孔径小像差光学系统中像差校正和质量评价的重要依据。日本学者曾给予他的这项研究很高的评价。1946 年，何增禄(1898 ~ 1979)提出了以改变光程的方法改变光波频率的理论，说明多普勒效应“红移”现象是特例情况。

在光谱学方面从事研究的中国学者甚多，其重要成就有：桂质廷(1895 ~ 1961)1925 年在美国普林斯顿大学研究双原子气体的低压弧光的光谱及其特征。饶毓泰(1891 ~ 1968)20 年代末至 30 年代初，在德国研究了 Rb 和 Cs 原子的倒 Stark 效应，观察到这两个元素主线系的分裂和红移。该项成果对当时正在发展的量子力学微扰理论提供了重要的实验数据。1933 ~ 1938 年间，他在北京大学研究了 ClO_3^- 、 BrO_3^- 和 IO_3^- 的 Raman 光谱，测定了光谱的退偏振度，从而定出了这些自由基的结构。1944 ~ 1947 年间，他又在美国与 A.H.Niclson 等合作进行了分子光谱的研究，研究 $\text{C}^{12}\text{O}_2^{16}$ 和 $\text{C}^{13}\text{O}_2^{16}$ 的分子振动-转动光谱，获得了含同位素的气体分子的转动光谱，为研究同位素的气体分子的振-转光谱提供了方法和基础，并且可以获得分子内部的重要信息。1932 ~ 1934 年间，谢玉铭在美国和 W.V.Houston 合作开展氢原子光谱 Balmer 系的精细结构研究，发现了 40 年代后期得以肯定的著名的“Lamb 移位”，并提出了与 40 年代后期有关重整化理论的发展方向相同的大胆建议。但是当时并没有引起物理学界足够的重视。而 1947 ~ 1948 年间，兰姆(W.E.Lamb)等人所做的类似的实验及发现却获得了 1955 年诺贝尔物理学奖。就现在看来，谢玉铭及其合作者当时的工作是杰出的，不仅结果正确，而且提出的建议也是惊人的。谢玉铭的这项工作可以说是中国上半世纪物理学的一项重大成就。吴大猷(1907 ~)对光谱学也做了大量研究，早在 1931 年，他在美国曾设计了一种弯形狭缝以改进红外光谱的弯形影像，提高了光栅的分辨率。在 30 年代，吴大猷研究了多种原子分子光谱，并与郑华炽(1903 ~ 1990)等合作，研究了苯及其衍生物的 Raman 光谱，发现并证明了苯的同位素移动，对此做了正确解释。1939 年，吴大猷完成了《多原子分子振动光谱及其结构》一书(1940 年在上海出版)，这是当时国际上第一本、也是有关课题的唯一专著。它的出版受到

国际学术界的赞扬，在美国连印三版，在今天，它作为一本经典著作仍被国际学术界所重视。严济兹和钟盛标、陈尚义等在 30~40 年代研究氢、氦、铷、铯、硒、碲等元素的原子及其分子光谱，碱金属的紫外线光谱，尤其是对臭氧的紫外线光谱吸收系数的研究，为国际气象学家测定高臭氧层厚度提供了参照数据。赵广增(1902~1987)专长光谱学，对我国实验光谱学的研究起过重要作用。他在美国 Michigan 大学深造期间(1936~1939 年)，曾在 O.S.Duffendack 主持的气体导电光谱学实验室从事电子与原子和分子的碰撞激发、原子和分子的激发和离化的研究。1939 年又在 H.R.Crane 实验室利用直线加速器研究高能电子与原子核的相互作用。1940 年回国后，继续从事研究电子与原子和分子的碰撞及离化问题。50 年代中期，他在中科院应用物理所和北京大学分别研究了 Cds 和 Cu_2O 单晶激子光谱，先后获得了 Cu_2O 在可见光谱区液氮温度下，黄区和绿区吸收的类氢光谱线系、红区的极细吸收谱线系和吸收台阶，分别研究了这些光谱线系和吸收台阶随压力(晶体各向异性压力)移位。同时，他还在红外光谱区域开展了 Cu_2O 的压力效应及价带的压力效应研究。这些研究在国内外都是领先的工作。周誉侃(1908~1976)在光谱学理论和实验方面均有很深的造诣。30 年代后期，他在德国着重研究稀土金属盐的晶体及其溶液的吸收光谱，选择 NdF_3 作样品，拍摄和测量可见光区的 7 个谱线组和红外区的 2 个谱线组，从电子跃迁和外晶格振动激发的复合谱线中成功地分离出纯电子跃迁谱线，发现这类谱线强而尖锐，而晶格振动谱线则在短波方向上弥散。他们的实验精度达到很高的水平。此外，他还测算了一些谱线组，根据单个谱线组的谱线数目算出相应能级的内量子数 J 值，与理论上的可能值相一致。

7. 固体物理学(金属物理学、结晶物理学)

在固体物理学领域，上半世纪我国有陆学善、钱临照、余瑞璜、周如松、葛廷燧等人在金属物理和结晶学方面进行了研究，范绪筠、黄昆等人在半导体、晶格动力学方面进行了研究。陆学善(1905~1981)是中国晶体学研究的主要创始人之一，1934~1936 年他在英国深造期间，与 A.J.Bradley 进行了 Cr-Al 二元合金系的 X 射线研究，首次提出了 Cr-Al 系的完整相图。他创立的利用晶体点阵常数测定相图中固溶线的方法，至今仍为晶体学家广泛应用。钱临照和周如松(1912~)在 30 年代中期，对金属晶体的范性变形和晶缺陷做了极好的研究，他们实验地测定了铝单晶的滑移系统，对其滑移面与钠、钾迥异现象的原因做出了正确的解释。1939 年周如松在英国与 Andrade 共同提出表征形变温度对体心立方晶体滑移面选择影响的参量 $\beta = T(k)/T_m(k)$ ，其中 $T(k)$ 是形变温度， $T_m(k)$ 是该晶体的熔点。她们从实验研究中得到的这条经验规律具有开创性意义，受到人们的重视。直到现在还被有关权威著作征引。余瑞璜(1906~1997)在 X 射线结晶学、X 射线晶体分析法、固体与分子的经验电子论(E.E.T)及其应用方面卓有成就。1930 年，他在清华大学 X 射线实验室研制成盖革计数器，这是我国第一次自己成功制造的有关仪器。1932 年在吴有训指导下，他分析了氢的 X 光吸收和散射，其结果被 A.H.Compton 所著的《X 射线的理论与实验》一书引用，以说明 X 射线的散射系数不同于经典的散射系数。1935~1937 年，他在英国深造期间对 $\text{Zn}(\text{BrO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 的晶体结构进行分析，巧

妙地消除了一般所称的“鬼影”，从而最后确定了它的晶体结构。他还发现，X 射线衍射的晶体摆动谱仪所用的对称形叶状摆动器，所得出的晶体摆动速度不均匀。经过他严格的数学处理后，得到了正确的非对称式叶形摆动器。最有意义的是，他在对 $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{NH}_3$ 所做的晶体结构分析中，对该晶体的 X 射线衍射线强度随衍射角的增加而急剧地下降现象做出了正确的解释。他认为，这是由于 NO_3 中的一个 O 和 N 总是以其它两个 O 的连线为轴，在 NO_3 的平面三角形原子组的平面中做十分反常的大幅度的来回角摆动所致。以这种模型算出的衍射线强度和实验所得的结果完全一致。他还将该晶体放在液氮中做低温 X 射线衍射谱线的观察，果然正常。在后来低温晶体结构分析也得到同样的结果。1938 年底余瑞璜回国到昆明清华大学金属研究所任教授，继续从事有关晶体结构的分析研究，他从数学上寻找消除 Fourier 综合法必然产生“鬼影”的方法，经过努力，终于在 1942 年获得成功，提出了晶体分析 X 射线数据新综合法，受到国际学者的称赞。在劳厄(M. VonLaue)衍射 50 周年纪念的国际性专著 *Fifty years of X-ray diffraction* 中，余瑞璜被 P.P. Ewald 赞誉为世界上第一流的晶体学家。

抗日战争期间，昆明北研物理所钟盛标(1908~)从事晶体物理学研究。他主要研究水晶的腐蚀图样及其应用；电场作用以及紫外线辐射对水晶腐蚀的影响；镭射线对各种水晶的赋色效应以及这些水晶的光学性质；等等。他利用实验得到的水晶的新腐蚀图样，发现了确定水晶轴向的新方法。这对于在抗战时困难条件下通讯器材的研究有很大的帮助。50 年代，钟盛标又从实验上发现了用于检测水晶晶体缺陷的两种新方法，即放电法和碱金属蒸气腐蚀法。用这种方法可以检测水晶内由于亚微观掺杂而产生的缺陷。这种以物理方法检测水晶晶体缺陷的方法，为地质学家和矿物学家所关注。葛庭燧(1913~)是国际知名的金属物理学家，发表论文 160 余篇、著作多种。40 年代后期他创立了金属内耗的整个研究领域。1945~1949 年，葛庭燧在美国芝加哥大学金属研究所任研究员，开展关于晶粒间界的研究工作，其中包括金属弛豫谱（内耗）、金属力学性质和位错理论的基础研究。他首创用于低频内耗测量的扭摆，被国际上称为“葛氏摆”，从而推进了国际内耗研究的迅速发展；他首先发现了晶粒间界的内耗峰，被国际上称为“葛氏峰”；他提出各种滞弹性测量（包括内耗、模量弛豫、在恒压力下的微蠕变、在恒应变下的应力弛豫）的结果可以彼此换算，从而奠定了经典的滞弹性内耗（线性内耗）的理论基础；他提出了晶粒间界无序原子群模型（被称为“葛庭燧晶粒间界模型”）和沿晶界滑动的机制，肯定晶界具有粘滞系数，并首次把扩散概念引入晶界流之中；他关于外来杂质对晶界内耗的影响的研究，为后来应用晶界内耗峰研究和阐明晶界偏析动力学以及对力学性质的影响开辟了广阔的前景。1948 年葛庭燧通过实验首次在 α -铁和镍等面心立方晶体中观测到填隙原子所引起的斯诺克（snock）类型的内耗峰，并进而证明填隙原子在面心立方点阵中引起的内耗峰是一种普遍现象，并提出了产生内耗峰的机制。这项研究引发了国际上随后关于点缺陷弛豫内耗的大量工作，为随后点缺陷弛豫理论的建立提供了重要的启示。1949 年他首先观察到表现反常振幅效应（即内耗由于振幅的增加而减小）的内耗峰，并提出溶质原子气团模型和溶质原子沿位错管道扩散的位错弯结气团模型。这是对经典内耗理论的一项重要发展。葛

庭燧在 1949 年回国后，在国内进行内耗研究，培养了大批人才，对于我国内耗研究工作的发展和领先地位做出了卓越贡献。范绪筠（1912~）从 40 年代起在昆明清华大学无线电研究所从事半导体物理的理论与实验研究，发现了半导体中导电电子密度可能偏离其正常值相当大的现象，并定量地讨论了两个物体接触处附近的势位和电子密度分布；40 年代末，他在当时最为人们重视的锗与硅半导体方面的研究取得了许多成就。他用光学性质证明半导体有禁带，从实验上证明锗和硅有吸收限。他的这些研究成果对于固体电子学的发展和第二次世界大战后半导体的广泛应用起了很重要的作用。黄昆（1919~）在固体物理学理论领域，特别是在晶格动力学方面做出了开拓性研究。1947 年，黄昆在英国 Bristol 大学研究固溶体理论时，发现固体中的杂质缺陷会导致 X 光漫散射，其强度集中在普通 X 光衍射斑点附近。这种漫散射后来被国际上一些科学家所证实和应用，成为直接有效地研究晶体微观缺陷的重要手段。他的这一发现被国际上称为“黄散射”。50 年代，黄昆又做出了一些重要的发现。

8. 原子分子物理学

原子分子物理学是研究有关原子分子结构、原子分子碰撞过程以及它们与光子相互作用规律的学科。在这个领域，中国物理学家在国内外都做过一些颇有成效的研究工作。

1921 年，叶企孙在美国与 W. 杜安、H.H. 帕尔默合作，用 X 射线法重新测定了普朗克常数 h 值，得到 $h = (6.556 \pm 0.009) \times 10^{-27}$ 尔格·秒。这是当时该常数最精确的值，被物理学界沿用达 16 年之久。吴有训（1879~1977）早年在美国以他精湛的实验技术、严密细致的工作和精辟的理论分析对康普顿效应的确证做出了杰出的贡献。1924 年他与康普顿（A.H. Compton）联名发表了《经过轻元素散射后的钨 K 射线的波长》的论文，以实验验证了散射量子理论所预言的光谱位移的真实性。1925 年，他又单独发表了《康普顿效应中变线与不变线间的能量分布》和《在康普顿效应中变线与不变线能量比》两篇论文，以雄辩的事实，无可置疑地证实了康普顿效应，并发展、丰富了康普顿的工作，使康普顿的发现很快得到国际物理学界的公认。1927 年，康普顿则由于他的这一发现荣获诺贝尔物理学奖。Compton 和 S.K. Allison 在他们合著的《X-rays in Theory and Experiment》一书中，对吴有训的工作给予了很高的评价，全书共有 19 处引用了吴有训的成果。王守竞（1904~1984）是中国第一位研究量子力学并卓有成效的学者，1927~1928 年间，他把新诞生的量子力学成功地运用于对原子分子的研究，最早用变分法求二级微扰计算类氢原子间的偶极矩-偶极矩相互作用，从而得到范德瓦耳斯（Van der waals）力作用能量的系数。1928 年他在计算类氢原子型 1S 波函数的基础上，在 H_2^+ 的波函数中引进非线性参量，使其能量的计算值与实验值的差异从 1.58eV 降到 0.96eV。这在当时是个重要贡献。他还计算过氢分子的转动能量谱，研究过钠蒸气和汞原子碰撞的激发态。他以量子力学方法解决不对称陀螺的问题，即讨论了多原子分子非对称转动（三个主转动惯量矩均不相等）的情况，从而得到转动谱能级公式，后来被称之为“王氏公式”。该公式适用于 H_2O 、 C_2H_4 等大量的常见多原子分子的计算。1929~1932 年间，饶毓泰（1891~1968）在德国莱比锡大学进行关于 Rb 和 Cs 原子的倒 Stark 效应的研究，观察到这两个元素主线系的分裂和红移。这一成果对当时正在发

展中的量子力学微扰理论提供了重要实验数据。30 年代初期，吴大猷（1907~）在实验室制造出超铀元素以前，通过计算铀原子的 5f 电子能态，在理论上预言了铀原子可能为一组 14 个元素的起始，这 14 个元素依次把 5f 壳层填满，其情况与稀土元素依次填满 4f 壳层相同。之后，他进行了原子多重激发态的研究，他所预言的一些多重激发态后来都得到实验的证实。40 年代初期，他与苟清泉（1917~）等合作较早地对氦原子双激发能态进行计算，计算了慢电子与原子碰撞的散射截面，对原子碰撞理论提出了自己的理论模型和计算方法。他还对由分子或电子激发的分子振动、分子振动与转动的相互作用、分子简正振动等问题做了研究。1935 年，褚圣麟（1905~）以高频火花产生阳射线的方法对高熔点金属、低熔点金属和矿物的离子进行研究，他获得的几乎所有离子都是原子性的，多数元素产生的离子带多重电荷；他还观察到离子从加速场通向分析场的过程中电荷的变化。他所做的实验表明，高频火花能够对几乎所有的元素产生强的多电荷离子源。卢鹤绂（1914~1997）在原子物理方面造诣较深。1937~1938 年间，他在美国明尼苏达大学用自制的 180 度聚焦质谱仪研究热盐离子源的发射性能，发现了热离子源发射的同位素效应，并准确测定了锂和钾的同位素丰度比。他的测定为国际会议公认，并被选定为国际同位素表上的准确值，沿用达 20 年之久。1939~1941 年间，他提出扇状磁场对入射带电离子聚焦作用的普适原理，并据此设计制造了新型 60 度聚焦高强度质谱仪，用以分离 B^{10} 及 B^{11} 同位素靶。赵广增（1902~1987）30 年代末在美国 Michigan 大学从事电子与原子和分子的碰撞激发、原子和分子的激发和离化研究，做出了有相当水平的工作。洪朝生于 1948 年对在加速场和减速场二者作用下氧化物阴极的离子发射也做了很好的研究。苟清泉在 50 年代对原子结构理论、固体与稀固溶体理论、过渡金属间原子的结合力和能带理论都做过较好的研究。

9. 原子核物理学

原子核物理学是 20 世纪 30 年代新建立的一门物理学分支学科。它研究原子核存在形式的性质、内部结构、运动和转化，从而认识其基本规律；射线束的获得、探测和分析技术；以及同核能、核技术应用有关的物理问题。从 30 年代到 50 年代初，我国许多物理学工作者在这一领域做了卓有成效的研究工作，取得了重要成就和发现，对原子核物理学的建立和发展做出了一定的贡献。

在核衰变和重离子核物理方面，早在 20 年代末赵忠尧（1902~）在美国加利福尼亚理工学院攻读博士学位期间，进行测量硬 γ 射线通过各种物质时的吸收系数的实验，发现用 2.6MeV 的硬 γ 射线在重元素中散射时，测得系数比理论公式所预计的要大得多，这显示存在一种“反常吸收”。为了探索这种反常吸收的机制，他进一步进行硬 γ 射线被铅散射的实验。结果发现除了康普顿散射以外，从铅还放出一种“特殊辐射”。他用铅片吸收法测定这种辐射的波长约 22.5X 射线单位，相当于 50 万电子伏的光子，其角分布是大致各向同性的。通过分析，他断定这种反常吸收是原子核引起的。赵忠尧的实验结果于 1930 年发表。两年以后，安德森（C.D.Anderson）在宇宙线的云室照片中发现正电子的径迹，人们在讨论正电子的性质，寻找正电子产生和湮灭的证据时，才认识到赵忠尧所发现的上述“反常吸收”是由于部分 γ 射线在原子核周围转化为正负电子偶，

而“特殊辐”则是正电子和负电子重新结合并转化为两个光子的湮灭辐射。可以说，赵忠尧才是最早观察到正、负电子偶的产生和湮灭的物理学家。他的这一发现对于人们确立正电子和负电子偶的概念以及关于偶的性质起了重要作用。正电子的发现者 Anderson 于 1932 年在为 *Physies Today* 所写的文章中再次肯定了赵忠尧当年所做出的不可磨灭的贡献。1932 年赵忠尧回国在清华大学任教期间，曾利用盖革-弥勒计数管进行 γ 射线、人工放射性和中子物理等方面的研究工作，测定了反常散射与入射光子能量之间的关系，以及不同元素的反常散射规律，并在中子共振吸收方面提出了一定的实验事实，探讨了原子核的能级间距，特别是计算了银、镉、溴的共振中子能级间隔。这是国内原子核研究方面的开创性工作。1946~1948 年，赵忠尧以观察员身份参观美国在太平洋的原子弹爆炸试验。在此期间，他曾用云室研究宇宙射线，观察到“混合簇射”。这是电子和光子的电磁相互作用所形成的大角度簇射和穿透力很大的贯穿粒子所形成的小角度簇射的混合。1949 年他重返加利福尼亚理工学院，进行一段时间原子核反应研究，如质子轰击 ^{19}F 时所产生的低能 α 粒子的研究等，这些都是当时的前沿工作。王淦昌（1907~）1932 年在德国柏林大学从事 α 衰变能谱的研究。他用盖革计数器测定 RaE 的 α 射线在 Cu 中吸收的连续谱，为 α 衰变理论研究提供了有价值的实验数据。1934 年他又完成了关于 $\text{ThB}+\text{C}+\text{C}$ 的能谱的研究工作，翔实地报告了他在磁场中用盖革计数器所测定的“ $\text{ThB}+\text{C}+\text{C}$ ”的 α 射线谱。这一结果当时是世界领先的。1929~1933 年，施士元（1908~）在法国巴黎大学镭学研究所居里夫人实验室从事铀系和钍系放射性同位素能谱研究。他测定了内转换能谱，定出能量与核能级，肯定了重原子核有能级存在，证明原子核属于量子力学系统。他还对液态钾的 X 射线衍射进行研究，发现液态中残存着体心立方晶体结构。30 年代初霍秉权（1903~1988）对镭系的 α 谱也做了研究。30 年代后期，张文裕（1910~1992）在英国剑桥大学卡文迪什实验室由 E. 卢瑟福指导从事原子核物理研究。他以实验验证了 N.Bohr 的核液滴模型；并与 D.W.B.Lewis 和 W.E.Burcham 合作，首先研究了高压倍加器产生的 ^8Li 衰变机制及其产生的激发态 ^8Be 跃迁为 2α ，并测量了 ^8Be 退回基态时放出的 α 射线谱，发现它是连续的，因而证明 ^8Be 有很宽的激发态。他还与别人合作用高压倍加器产生的 α 射线和快中子轰击多种元素，发现多种放射性同位素，并首次观察到受激放射的 (α, n) 和 $(n, 2n)$ 过程。他又用 $(\text{锂}+\text{氘核})$ 产生的中子轰击 ^{16}O ，形成活性的 ^{16}N ，而发现 $^{16}\text{O}(n, p)^{16}\text{N}$ 效应，可以预防反应堆建造和运行时冷却水中的 ^{16}O 变为 ^{16}N 所引起的辐射危害。这对反应堆的发展有重要意义。张文裕的上述研究成果得到国际学术界的好评。40 年代末，戴运轨（1879~1982）在台湾大学进行核物理方面的研究。他利用 Van de Graaff 静电加速器，以 24 万伏的直流高压电源加速质子，于 1948 年进行了我国第一次（锂）原子核击破实验。随后又制造重水，生产重氢及中子等。50 年代他在美国明尼苏达大学原子核物理研究所研究各种元素的原子核壳层构造，测量了被轰击的 59 种元素和化合物产生的中子数。1946 年，钱三强（1913~1992）在法国国家科学研究中心与 G.布依西爱和 M.巴什莱合作，首次测出镭的 α 射线的精细结构，并与电子内转换的 α 谱线符合很好。1948 年梅镇岳（1915~）在美国印地安纳大学研究核谱学，完成了 ^{33}As 的蜕变等六篇论文。杨澄中（1913~1987）

是世界上最早研究轻核裂变反应的几个人之一。1949~1950年间，他在英国利物浦大学 George Holt 物理实验室，完成了用不同能量的氘核轰击铝-27 的核物理实验研究，首次测量了（氘、质子）反应和质子的角分布。这一研究成果为进行直接反应和非弹性散射过程最早的实验研究工作之一，具有开拓意义，受到当时欧美核物理学家的重视。虞福春（1914~）1949~1951 年在美国斯坦福大学与 W.G. Proctor 合作，通过精确测定各种 N^{14} 化合物的原子核自旋与磁矩，首先发现不同化合物的氮的核磁共振率是不一样的，从而确立了核磁共振“化学位移”的概念；他又与 Proctor 合作在 K_2SbF_6 水溶液中发现了 SbF_6^- 负离子的“核自旋耦合劈裂”现象。这两项重要发现为后来飞速发展的核磁共振应用于物质结构分析做了奠基性贡献。G.Holt 将虞福春等人发现的核磁共振化学位移记入“磁场对分子矩运动的影响”这个 30 年代开始的典型重大物理课题中的一项历史性成果。虞福春和他的合作者还测定了 20 多个稳定核素的磁矩，约占化学周期表上具有磁矩的稳定核素数目的 20%，对原子核基本参数的测定做出了重要贡献。他们所测定的这些数据全都作为精确值被权威性著作搜集并多次引用。虞福春作为核磁共振 F.Bloch 学派的重要成员之一，在核磁共振领域做了许多开创性工作，也是我国第一位涉足该领域并卓有成就的物理学家。他还首先在普通水中发现 0 的核磁共振信号，并与他人合作测定了 0 的自旋为 5/2，从而最早证实 Mayer 提出的原子核中存在自旋与轨道耦合的观点，对核结构的壳层理论是有力的支持。

在核反应和中子物理学方面，王普（1903~1969）是参加中子和裂变物理研究的最早并有所贡献的物理学家。他在 30 年代后期，进行了有关热中子和 Al 核作用的研究，证实了用热中子可以产生半衰期为 2.3 分的 Al 发射体；测定了热中子在 Al 中的吸收系数及相应的截面（ 1.6×10^{-24} cm²），表明 Al 在热中子区不能存在共振能极。为了证实中微子的存在，1941 年王淦昌提出了一个巧妙的方法，即测量轻原子核（如 Be）俘获壳层电子释放中微子时所产生的反冲探测中微子。在这类过程中，所产生的原子核（Li）的反冲能量和动量将仅仅同发射的中微子有关。由于当时他在抗日战争时期的贵州遵义，限于物质条件无法进行这样的实验，只好把自己的设想写成《关于探测中微子的建议》一文，发表在 1942 年 1 月出版的美国《物理学评论》上。几个月后美国物理学家 J.S.Allen 就根据这个建议进行了 Be 的 K 俘获实验，证实了他的预言。这是当时关于中微子存的最有力的证据，被称为是 1942 年世界物理学最重要的成就之一。由于这一贡献，王淦昌于 1947 年获范旭东奖金。1946 年，张文裕在美国普林斯顿大学 palmer 实验室，用自己研制的多路符合和反符合望远镜式计数器，在云室内记录经铅减速并停止在铅、铁和铝箔上的慢介子数，证实了停止在金属箔上的介子不存在引起爆炸的“星裂”径迹，从而证明 μ 介子是非强相互作用粒子，否定了当时关于介子武器的谣传。1947 年他又根据铅、铁和铝箔停止 μ 介子的实验，证明 μ 介子被核俘获后在定态轨道跃迁，同时发射 1~5MeV 低能光子。实验表明， μ 介子可以在一定条件下取代核外电子而在轨道上绕核旋转，从而以实验发现了 μ 子系弱作用粒子和 μ 子原子，国际上称之为“张原子”和“张辐射”。它首先突破卢瑟福-玻尔模型，开拓奇异原子研究的新领域。1950~1955 年他又系统研究海平面宇宙射线大气贯穿簇射 V 粒子的产生、衰变和与核子相互作用。1954 年他发

表了《停止在铅和铝箔上的海平面介子》一文，系统地总结了她的 μ 子原子研究工作。1945年何泽慧(1914~)在德国海德堡皇家学院核物理研究所，用磁场云室首次观察和研究正负电子的弹性碰撞现象。她利用正电子为初级电子，在有磁场的云室中观察正电子与负电子的径迹，并测量了它们碰撞前后各自的能量，从而首次发现正电子与负电子间几乎全部能量交换的弹性碰撞现象。该项工作的初步结果在1945年底于英国Bristol举行的英法宇宙线会议和1946年于剑桥举行的英国物理学会上报告，受到与会者极大的关注，被1946年英国《自然杂志》称为“科学珍品”。北京大学杨立铭1946~1951年在美国根据托马斯-费米(Thoma-Fermi)模型成功地解释了原子中的幻数，并导出了核内的核子数密度。1950年他又通过对核内多次散射的分析，导出了作为核多体理论的重要发展的吕克纳理论。在核裂变和核聚变方面。1938~1939年，钱三强与约里奥-居里合作，用中子轰击铀和钍获得周期为3.5小时的放射性镧的同位素，且它们放射出的能谱是等同的。这对解释当时发现不久的核裂变现象是有力的支持。1944年，钱三强又首先从理论上和实验上确定了50KeV以下的中低能电子的射程与能量关系。1946~1948年间，钱三强与何泽慧合作研究并发现了铀核受慢中子打击后可以分裂为三：两个重裂片和一个轻裂片，轻裂片方向与重裂片方向绝大多数成直角。何泽慧还首先观察到铀的四裂变现象。约里奥-居里认为这是第二次世界大战后他的实验室里的一个最重要的成就。钱三强根据他们实验的数据进行分析研究，得出能量与角分布关系，对三分裂现象从实验和理论两个方面做了全面的论述，提出了三分裂机制图象，预言了第三个碎片应有的质量谱，除 α 粒子外，H与He核由于含较多的中子而可能存在。20年后，美、苏两国七个实验室利用半导体探测技术，证明第三裂片中 α 粒子约占90%，H约占7%，He约占2%，H到He等约占1%~2%。完全证实了钱三强和何泽慧的有关三分裂机制的预言，为裂变物理研究开辟了新方向。1946年，何泽慧与钱三强、Faraggi合作，还研究了钍裂变时放出的动能。他们利用核乳胶技术测量了快中子打击U裂变时放出裂片径迹的长度与快中子打击Th裂变时放出裂片径迹的长度，两者的能量差为 $25 \pm 5\text{MeV}$ ，由此推导出钍裂变时放出的能量为 $135 \pm 10\text{MeV}$ 。这一结果与Bohr和Wheeler的理论推导相符合，它也是1947年前第一次公开发表的有关成果。

10. 粒子物理学

粒子物理学是40年代前后建立的一门新学科，它研究比原子核更深层次的微观世界中物质结构性质和在很高能量下这些物质相互转化的现象，以及产生这些现象的原因和规律。它是当代物理学发展的前沿学科。本世纪50年代末以前，我国一些物理学家在该领域的诸多方面都做过较有成效的研究，为粒子物理学的建立和发展做出了一定的贡献。

30年代后期，郭贻诚(1906~)曾在美国加州理工学院从事宇宙粒子云室研究。他拍摄了1000张以上的粒子径迹照片，测定了宇宙线中高达100MeV的电子的能量损耗，并从理论上讨论了损耗机制，还测定了宇宙线中介子的质量。他是我国早期从事粒子物理研究的先驱者之一。1946年，马士俊(1913~1962)在美国普林斯顿高等学术研究院发现了S矩阵的著名的多余零点，1949年在爱尔兰都柏林高等学术研究院指出E.Fer-mi处理量子电动力学方法的一个困难，从而导致一年后Gupta-Bleuler方法的

产生。除这两个重要贡献外，马士俊对分子理论中氘核的光磁蜕变及其磁矩(1940)、原子核的静电偶极矩(1940)、质子与中子的内受激态(1940)，以矩阵法预测介子的散射(1942)、在辐射阻尼影响下带电介子散射(1944)及其相对论公式(1943)、散射问题积分方程的近似解(1945)等都有过独到的研究，并做出了创造性的贡献。此外，他对于核力介子场论和相互作用表象及束缚态理论也做过有意义的探讨。彭恒武(1915~)于1941~1943年在爱尔兰都柏林高等学术研究院与W.Heitler合作进行介子理论方面的研究工作，先后发表过有关介子散射、质子-质子碰撞产生介子、光子-核子碰撞产生介子、以及宇宙线介子理论等多篇论文。由于他在理论物理研究的贡献，1945年与M.玻恩一起获得了英国爱丁堡皇家学会的麦克杜加尔-布列斯班(MacDougall-Brisbane)奖。1947年他回国后，继续进行核物理研究，同黄祖洽合作研究核子-核子散射问题，他对分子结构提出了以电子键波函数为基础的计算方法，提出了以寿命关联实验探讨量子力学隐参数问题。朱洪元(1917~1992)1947年在英国曼彻斯特大学对高能电子在磁场中运动时放出的电磁辐射的性质在理论上进行了全面研究，得到了这种电磁辐射的频谱、角分布和极化态的具体表达式。在他的论文《关于高速荷电粒子在磁场中发射的电磁辐射》(1947.3)被“Proceedings of the Royal Society”接收后一个月，在美国一台能量为70MeV的电子同步加速器上第一次观察到了这种电磁辐射。因此后来称这种辐射为“同步辐射”。这种辐射由于其频谱很宽，自然准直性非常好，极化态明确，强度很高，而且具有脉冲时间结构，现已被非常广泛地应用。40年代初，胡宁就在美国普林斯顿高等研究院运用介子场论方法对核力理论进行了系统的研究。1948~1950年他在美国威斯康星大学原子核研究所任研究员时，对核理论和介子理论里的S矩阵的性质进行了一系列的研究，深入地讨论了在能量-动量复平面上S矩阵的解析性质及其物理解释，以及怎么样可能消除S矩阵元发散性等。这些工作为50年代中期基本粒子强相互作用理论里的色散关系方法的建立提供了必要的准备。1950年，梅镇岳在加拿大国家实验室研究宇宙射线，观察到粒子径迹成对或成三聚集，而且有些径迹可以肯定为介子留下的。事实上这些是强子衰变后所产生的粒子留下的径迹。故梅镇岳所观察到的粒子正是目前命名为K介子和介子等粒子。他还观察到在宇宙线中出现相对论性重粒子及其在乳胶中碰撞而破裂的现象。这些重粒子的观察和分析对于宇宙线的起源和宇宙论都有重大意义。1948年，杨振宁与F.Fermi共同提出介子是质子与反质子束缚态的可能性，开导了研究粒子内部结构的先河。1949年，他和李政道、M.Rosenbluth合作，提出了普适费米作用和中间玻色子存在。1950年，他又从推导一个粒子湮灭为二个光子的选择定则中提出了决定介子衰变的对称本性的方法。1954年，他和R.L.Mills合作提出“杨-Mills场”理论。该理论将场的概念加以推广，为场论应用到弱相互作用和强相互作用等方面打开了通途。“杨-Mills场”对当代物理学的发展具有深远的影响，它不仅为1979年获诺贝尔物理奖的S.L.Glashow、S.Weinberg、A.Salam三人提出的弱相互作用和电磁相互作用统一理论提供了基本方法，而且开辟了非阿贝尔(N.H.Abel)规范场的新研究领域，为现代规范场理论(包括弱电统一理论、量子色动力学理论、大统一理论、引力场规范理论等)打下了基础，而且近年来被数学家运用于拓扑学而取得了重大突破。杨振宁对粒子物理

学的另一重大贡献是关于对称原理的研究。1956年，他与李政道合作，深入研究了当时令人困惑不解的所谓 θ - τ 之谜，即后来所谓的 K 介子有两种不同的衰变方式，一种衰变成偶宇称态，另一种衰变成奇宇称态。如果弱衰变过程中宇称守恒，那么它们必定是两种宇称态的不同 K 介子。但从其寿命和质量看，它们又是同一种介子。李政道和杨振宁及其合作者起先曾提几种模型说明 K 介子衰变现象，但经过许多观测均不成功。于是他们转向对粒子反应中的各种对称性证据进行研究，经过周密地对奇异粒子 θ 介子和 τ 介子的实验检查发现，在弱作用中宇称守恒事实上并没有得到过实验上的证实。他们便提出，在弱作用中宇称是不守恒的，同时提出了几种检验 θ 衰变、 τ 衰变和介子衰变等弱作用过程中宇称是否守恒的实验方案。1957年，吴健雄（1912~）小组在极化原子核 ^{60}Co 的 β 衰变的实验中证实了宇称不守恒，随后不久，宇称不守恒在其他弱作用过程的实验中也得到了证实。因而，他们的研究成果很快得到学术界的公认，并获得了 1957 年诺贝尔物理学奖。

(二) 20 世纪下半叶中国的物理学研究

1949 年 11 月 1 日,中国科学院成立。1950 年,原中央研究院物理研究所和原北平研究院物理研究所合并,经过调整、组建为以核物理和粒子物理为主要研究方向的中国科学院近代物理研究所和以固体物理、光谱学为主要研究方向的应用物理研究所(后改为物理研究所)。

1956 年“中国十二年科学技术发展远景规划”制定后,半导体研究室与固体发光研究室于 60 年代前期先后改组为研究所,在上海成立了以红外科学为主要研究方向的中国科学院上海技术物理研究所。1977 年中国科学院制定了新学科发展规划后,在合肥筹建了中国科学院固体物理研究所。此外还先后建立了中国科学院长春物理研究所和新疆物理研究所。到 80 年代初,中国科学院的凝聚态物理研究,在研究机构和学科内容方面已达到相当规模。

在光学研究方面,60 年代以后除物理研究所外,中国科学院大连化学物理研究所、上海精密光学机械研究所都展开了激光光谱学、非线性光学、全息学的研究。

中国关于原子分子物理的研究起步较晚,物理所和中国科学院武汉物理研究所在原子分子结构、原子分子的碰撞以及它们与光子的相互作用方面做了不少工作。

中国科学院物理所、化学所、长春应用化学研究所、福建物质结构研究所、大连化物所、上海有机化学研究所、成都有机化学研究所、武汉物理所等,在核磁共振、顺磁共振、核电四极矩共振和量子频标时标等方面奠定了一定的基础。中国的理论物理学研究,1977 年以前分散在物理所、半导体所、中国科学院金属研究所、福建物质结构研究所、武汉物理所和长春物理所进行。1978 年,中国科学院理论物理研究所成立。他们在统计物理、原子分子物理、多体问题、固体能谱、超导和磁性理论、金属、半导体、非线性光学等领域完成了大量理论研究工作。

50 年代初,长春光学机械研究所开始进行超声的应用研究。不久在物理所内成立了声学研究室,1964 年正式组建了中国科学院声学研究所。声学所联合武汉物理所、中国科学院心理研究所、中国科学院上海生理研究所、中国科学院海洋研究所和物理所等,在水声学、超声学和空气声学等方面取得了很高水平的研究成果。

关于原子核物理、宇宙线和放射化学的研究,50 年代初就已经被中国科学院近代物理研究所定为主要研究方向。1958 年,中国科学院原子能研究所正式成立,1984 年改名为中国原子能科学研究院。1972 年,中国科学院成立高能物理研究所。几十年来,中国在粒子物理、核反应和中子物理、宇宙线物理、强子结构、等离子体物理等方面完成了大量理论和实验的研究工作。

1953 年,中国科学院在数学研究所组建了力学研究室,进行固体力学和流体力学的研究。1956 年,正式成立了中国科学院力学研究所。几十年来,在弹性力学、塑性力学、流体力学、爆炸力学、物理力学等方面取得了一系列重要成果。

除中国科学院以外,北京大学、清华大学、中国科技大学、复旦大学、南京大学、四川大学、武汉大学、北京师范大学等许多高等学校,也云集

了一大批物理学研究和教学工作者，建立了一些重点实验室，开展了大量理论和实验方面的研究工作，在物理学的所有分支学科上都取得了一批重大成果，推动了中国当代物理学的发展。

1. 力学

本世纪 50 年代以前，中国现代工业基础薄弱，对于力学研究的需求并不感到特别迫切，当时的中国没有专门的力学研究机构。即便如此，仍有一些物理学、数学及工程技术等不同学科的学者进行了力学专门课题的研究。新中国建立后，工业现代化和国防现代化推动力学这门古老的学科蓬勃发展，取得了一些为世人公认的研究成果。力学横跨理学与工学两类学科，考虑到力学的理学属性，着重记述中国物理学家在流体力学和固体力学方面的研究。

周培源是中国湍流理论研究的领头人。50 年代，在均匀各向同性湍流理论的研究中，周培源从分析湍流的物理本质着手，利用一个比较简单的轴对称涡旋模型作为湍流元的物理图象来说明均匀各向同性的湍流运动。考虑到湍流衰变后期雷诺数比较小的特点，周培源和他的学生蔡树棠引入求解方程的相似条件和涡旋角动量守恒条件，得到了最简单的均匀各向同性湍流的后期衰变运动的二元速度关联函数。在这一思路的基础上，他的学生黄永念用同样的方法，得到了均匀各向同性湍流三元速度关联函数。10 年之后，这个三元速度关联函数被 S. 佩纳特 (Bennett) 与 S. 柯尔辛 (Corsin) 的实验所证实。与此同时，周培源与是勋刚、李松年还得到了与实验符合的均匀各向同性湍流在早期衰变运动的二元和三元速度关联函数。为了统一湍流在早期和后期衰变的模型，周培源于 1975 年提出了“准相似性”概念及与之相适应的条件；并与黄永念把这两个不同的相似性条件统一为一个确定解的物理条件——准相似性条件。这个条件在 1986 年由北京大学湍流实验室魏中磊等的实验所证实，从此国际上第一次由实验确立了从衰变初期到后期的湍流能量衰变规律的泰勒湍流微尺度扩散规律的理论结果。

谈镐生对非均匀各向同性湍流进行了研究。1963 年，他与林松青通过低速水槽实验表明，网格后湍流末期能量按时间的 (-2) 次幂衰减；他们还注意到末期湍流有随机取向、互不相互作用的旋涡条纹图象。据此，他们提出了互相独立、取向随机、只通过粘性耗散进行衰变的末期湍流动力学模型，并由此导出了 (-2) 次幂规律。1964 ~ 1966 年，谈镐生指导博士生 D.A. 李 (Lee) 研究了非均匀各向同性的分层湍流模型，给出了末期速度和压力-速度相关张量谱的表示式，并对末期得出两点重要结论：能谱在波矢量空间的原点，即使初始时解析，以后也变得不解析；对称条件、质量守恒条件和轴对称条件不足以限定能谱在原点的包括解析性质在内的局部性质，从而不能确定分层湍流的末期衰减规律，因此，为弄清湍流的末期性质，应直接从相关函数动力学方程出发做适当近似。这些结论指出了进一步研究末期湍流的方向。在湍流研究方面，还应该提到的研究工作有：1979 ~ 1990 年，中科院力学所贾复等用实验模拟手段，揭示了中尺度涡、分层湍流等复杂现象及其过程的动力学机制。实验模拟利用 Taylor 柱现象进行 Rossby 数影响的考察，证明了旋转流体流动二维性与三维性和 Rossby 数的关系；在分层流体湍能研究中，找到了湍流锋面坍塌开始的特征时间，湍流锋面的坍塌意味着三维湍流动能的衰减和准二维湍流的水平涡场增强

这一重要物理机制。这一结果被国际同行所接受。1989年，中国科学院力学研究所建成小型低湍流度水洞，达到了1.5%的低湍流度，并将热膜测速技术用于水中实验。鄂学全提出了分层流体无平均剪切湍流扩散的理论模型，描述了湍流扩散规律，以及湍流扩散速率与湍流源、湍流速度及外部参数的关系，对两层流体系统提出的模型，不仅适用于纯流体，而且也适用于含微粒的两层流体无平均剪切的湍流扩散。

当计算机的发展尚处于初级阶段时，在流体力学中只有罕见的几个准确解，所以寻求物理问题的近似解析解颇受青睐；摄动理论是求物理问题近似解的一种有效手段。1953年，郭永怀在美国研究激波与边界层的相互作用，得出远场超声速流动与近场边界层相互作用的速度场和压力场的表达式，得到与实验一致的理论结果。在这项研究中，他把H.彭加莱所开创并为M.J.莱特布尔所发展的参数求解方法运用于远场解和近场解的对接中，这个推广后的方法按上述三人的姓氏称为“PLK”方法，现称为奇异摄动法。

运动浸没体与表面波研究是50年代与发展水翼船有关的一项应用基础研究课题。谈镐生对无限深水中平行于自由表面做匀速运动的单频源和涡的二维问题，给出了表面波解，并提供了叠加求振荡水翼表面波问题精确解的基础。他还指出上述单频振荡源激发的表面波解的特性依赖于振荡频率与以同样水平速度运动的恒定强度源所激发的表面波的频率之比： ω/ω_0 ；当 $0 < \omega/\omega_0 < 1$ 和 $\omega/\omega_0 > 1$ 时，各有4个和2个具有不同波长的无衰减的简谐波向下游行进，上游一边则无波列；当 $\omega/\omega_0 = 1/4$ 时，则出现共振现象。这些结果对于认识水翼所受阻力是至关重要的。

钱伟长在润滑流体方面做过奠基性工作。他基于滑板间粘性流体层很薄的实际情况，以流体特征厚度为小参数进行摄动展开，从流体力学的纳维-斯托克斯方程出发，导出了润滑问题的高阶雷诺型方程。这是润滑流体力学早期成功之作。50年代初，谈镐生从二维不可压理想流体的一般运动方程和边界条件出发，应用时空变数分离方法，证明了有限定形分离原理：对于具有确定分离点的任何形状的二维物体，如果存在定形有限死水区，那么其特征弗劳德（Froude）数必定有限，且与时间无关。这一结果解决了当时的难题，并以其定理的简洁性和普适性而成为理想流体力学的一项经典性成果。固体力学中理论研究和实际应用之间存在着极为密切的关系。中国力学家在固体力学的各个分支上都进行了许多研究工作。结构及其稳定性是固体力学中的重要课题，中国力学家在这方面的研究成果相应比较集中。

圆薄板大挠度问题是一个典型的非线性问题，其非线性微分方程由冯·卡门在1910年提出，但长期没有找到好的求解方法。钱伟长从40年代末对此进行研究，他给出的摄动解法是用中心点的挠度与板厚的比值作为参数的参数摄动法。在这种方法中摄动次数越多，结果越准确。与数值解法相比，钱伟长用解析法手算所达到的精度以及方法的巧妙都令同行赞叹而引起国际上的重视。80年代，钱伟长指导研究生对上述研究做了进一步的完善，如用均方根挠角做摄动参数，解决了在均布压力和中心集中力复合作用下，由于中心点挠度可能为零而带来的困难；在合成展开法中用中心点位移替代载荷作展开参数，大大满足了收敛速度，并使所有边界条件都在各级近似中跨级满足。对于圆环壳，有人在轴对称壳的二阶微分方

程组基础上，提出了三种不同的复变量方程，并分别给出了渐近解和非齐次解，但非齐次解又不能满足不同的边界条件。钱伟长给出了齐次解并证明了解的收敛性，与非齐次解结合，给出了圆环壳的一般解而解决了难题。

上海交通大学罗祖道在 50 年代初，研究了关于圆柱薄壳受扭的大挠度稳定性问题。他首次给出了圆柱薄壳扭转失稳的后屈曲大挠度理论曲线，成功地阐明了实验中存在的有关轴压与扭转失稳两者明显不同性态的现象。他还提出了壳体几何缺陷对稳性临界载荷的影响，从而发展了卡门-钱 (T. Von Karman - 钱学森) 的圆柱薄壳非线性稳定理论，成为研究壳体缺陷理论问题的先驱。1955 年，罗祖道在论文《圆柱曲率对平面赫芝接触理论的影响》中，首次提出了一个计算两圆柱中心相对趋近的柔度系数的公式，此公式曾在国际上被称为“罗氏公式”。1984 年，清华大学张维指导研究生完成了任意荷载下环壳、弯管的精确解（在薄壳理论误差范围内）。这个解可以说是最完整的环壳线性解，澄清了各种渐近解、近似解、数值解的精度。在这个意义上，可以说这是线性解的一个总结。这一时期，在张维的指导下，他早年的研究生赵鸿宾等分析了世界上三种主要环壳方程的精度，指出幂级数解只适合于细环壳，渐近解只适合于粗环壳。他们给出了轴对称荷载和风型荷载下环壳的逼近-渐近解，这种解可称为环壳的通用解，它对粗的和细的环壳都适用。80 年代，清华大学黄克智用渐近方法系统地探讨了壳体分析的各种近似方法的理论，确立了各种近似方法的适用范围和误差量级，提出了壳体统一分类理论。他按照沿壳体中面两个坐标方向变化快慢的渐近量级阶次进行分类，导出了实际应用中最重要各种简化理论。对于任意截面形状的柱壳，除了壳的中径 R 和壳厚 h 以外，黄克智引入了第三个特征尺寸，即壳长 L 。他用渐近分析的方法导出，随着 L/R 比值的增加，壳体应力状态逐步从薄膜理论、半无矩理论、薄壁杆件理论而过渡到梁理论。这一方法的广泛性使薄壁杆件弹塑性变形理论达到更加完善的程度。

1930 年提出的薄壳的弯曲边界层理论是薄壳理论的重要组成部分。但它的缺陷是仅能达到 h/R 的精度，而低于薄壳理论的自身精度 h/R 。黄克智和他的学生首次对“简单边界层”提出了完备的二次近似理论及所对应的边界层效应通解，从而使边界层解的精度提高到与薄壳理论的基本精度相协调的量级。

塑性力学中的滑移线理论是求解理想塑性平面应变问题的主要方法。1953 年，北京大学王仁给出了一个从圆形边界出发的滑移线网的精确解析解，可用来检验差分法的精度。他还分析了带 V 形和半圆形缺口的拉伸试件的塑性区域随缺口扩展的发展过程。这是滑移线理论中少数大变形非定常运动的准确解之一，是用理想塑性力学分析断裂扩张的早期工作。王仁指导的研究组从 1981 年开始研究圆柱壳受轴向冲击的塑性屈曲问题。自 60 年代以来对这个问题的分析方法是假设初缺陷有一个波谱，求不同波长分量随时间发展的速率，发展最快的为主导屈曲波长，对应的冲击速度为临界速度。王仁等的实验表明，在超过临界速度后的初始塑性屈曲是轴对称的；而当速度提高约一倍后，屈曲形态为非轴对称的。

断裂力学是本世纪下半叶形成的固体力学新分支。70 年代，中国科学院力学所王自强等提出了等应变能密度线上最大周向应力准则；将周向应力及应变能密度两个参数有机结合起来，准确预示了理想脆性材料复合型

裂纹脆断准则。他们将 Dugdale 模型推广应用于任意弹塑性体，提出了带状颈缩区模型及裂纹颈缩区相对伸长准则。80 年代开始，王自强等对裂纹顶端的弹塑性应力应变场问题做了系统的研究：对非线性裂纹问题建立了高阶渐近场的控制方程；求得纯 II 型平面应变问题的 II 级渐近场数值解，证实了裂纹顶端的应力应变场可以用 J 积分及 II 阶级这两个参数的幅值系数来表征。对异质界面的裂纹顶端弹塑性应力应变场，王自强等求得了分离变量、HRR 型奇异场。他们阐明了异质界面裂纹顶端位移场交叉匹配的特点，并提出了正则级数展开新方法，从而解决异质界面裂纹顶端的高阶渐近场问题。中国科学院力学所柳春图等探讨了含裂纹板壳结构的力学性能，完善了含裂纹板壳的基本理论，给出了含裂纹平板、球壳、柱壳裂纹尖端应力应变场的一般解。白以龙等进行了“材料的变形和断裂行为及其力学理论”的研究，通过对热塑剪切带的精细结构的观察，首次在国际上阐述了剪切带成核演化规律，受到国际同行的高度评价，被称为“白氏模型”或“白氏判据”。这一研究成果成为高速变形下剪切局部化研究的基础。张双寅等进行了复合材料断裂与蠕变性能研究，提出了非均匀有限元，节点间相对位移约束子释放概念。在循环蠕变条件下疲劳损伤与蠕变损伤交互作用规律的研究中，他们提出了单向复合材料断裂韧性与比应变能密度准则，不仅可以预测开裂方向，而且可以预测无缺陷材料的破坏强度。断裂力学中有一观点：在均匀应力场中损伤是均匀的。西南交通大学孙训方的研究指出这一观点不符合真实材料的损伤物理本质。他在研究疲劳问题时发现，疲劳总是从局部开始的，特别是在高周疲劳时，损伤往往出现在表面的某一个局部。他在 1988 年首先明确提出了“损伤局部性”这一崭新概念。孙训方建立了蠕变和疲劳条件下的局部损伤模型，揭示了材料非均匀性对整体损伤水平的影响及损伤对变形耦合的影响。裂纹尖端奇异场和裂纹扩展阻力的研究是弹塑性断裂力学的核心难题。黄克智和他的学生对此进行了系统性研究工作，他们取得的成果有：提出了幂硬化材料扩展裂纹尖端场的新型奇异场理论，并得到了幂硬化材料中裂纹在起裂之后，经过稳定扩展至定常扩展的整个裂纹扩展过程的裂纹尖端场；得到了描述幂硬化材料中整个稳定非定常扩展过程的理论阻力曲线，并为将整个裂纹扩展理论引入结构缺陷评定提供了理论桥梁；还得到了理想弹塑性可压缩材料的扩展裂纹尖端的弹塑性场。对弹性力学广义变分原理的研究，是中国力学家做出有特色工作的领域。1954 年，胡海昌发表了《论弹性体力学和受范性体力学中的一般变分原理》，提出了三类变量的广义变分原理。在这个变分原理中，位移、应变和应力三类变量全都作为自变函数，全部方程都不必精确满足。因此，这是首次建立了与弹性力学基本方程全面等价的变分原理。在胡海昌之前，弹性力学发展史上，已先后建立了三个变分原理：势能原理、余能原理和 Hellinger-Reissner 的二类变量广义变分原理。不过由于它们都只等价于弹性力学基本方程的某些部分而不是全体，所以它们都可以看作是三类变量广义变分原理的特例。1955 年，日本人鹫津久一郎独立地得到了与胡海昌相同的研究结果。他们这一研究成果被称为胡-鹫津 (Hu-Washizu) 原理。

钱伟长对广义变分原理的论证和推广做了许多有意义的工作。他把拉格朗日乘子法应用到壳体理论方面，用变分原理导出壳体非线性方程；把广义变分原理推广到大位移和非线性弹性体；提出以进入泛函而消除掉的

微分方程或以约束条件为依据的分类原则，并由此而确定变分原理间的等价定理；运用高阶拉氏乘子法，解决了在 Hellinger-Reissner 原理中消除应力应变关系的约束时所遇到的临界变分条件的困难；在非协调元中采用识别了的拉格朗日乘子法，从而减少了和待定乘子有关的自由度。

60 年代初，钱令希在关于壳体承载能力的研究中，从能量原理出发提供了一个方法。但他不满足这个虽然简单但不够一般的方法，后又和他的学生钟万勰一起提出了固体力学中极限分析的一个一般变分原理。它以假设的速度场和应力场彼此独立变分，以满足极限分析的全部方程。变分结果可以给出介乎上限与下限极限承载能力的近似解，为塑性力学中的变分原理创出一条新路。20 年后，钟万勰又进一步发展了极限分析中的新上、下限定理，把 60 年代的工作向前推进。他吸取最优控制理论的思想，推出了参变量变分原理，并为参变量变分原理构造了一套有效的二次规划的算法。由于参变量的引入，使变分原理的实用范围得到大大扩展。

2. 声学

中国有组织地进行声学研究工作是从 1956 年国家制订“十二年科学技术远景规划”后开始的。中国物理学家在水声传播理论、超声在固体中的散射、喷注噪声、空气声学和非线性声学等基础研究方面有重要的成就。

在水声学方面，1956 年起，汪德昭领导和组织中国科学院声学所在中国的近海区进行过多次水声物理综合实验，对各种典型水文条件下声音的传播、吸收、混响、散射、起伏、水下噪声等方面取得了大量数据，并总结出一些规律。60 年代初期，声学所尚尔昌、张仁和等发展了“射线-简正波理论”，在直线梯度情况下得到了由海底反射损失及射线跨度表达的简正波指数衰减因子，以后又给出了任意声速分布的简正波指数衰减系数与群速的普遍近似公式，阐明了浅海声速结构与边界条件对声场影响的规律。国外到 1971 年才得到类似结果。70 年代，尚尔昌提出了适应于高声速海底的“三参数”模型，得出过渡距离与环境参数的解析关系，用以分析传播、混响、海洋噪声，得到很好的结果。关定华等对海底反射损失随角度增加而任意单调上升的情况，在传播衰减与距离的关系和反射损失与角度关系之间得到了简单的映射关系；发展了海底声速测量方法；并提出一种海底沉积层声学遥测识别方法，得到较高的成功率。周纪浔等用射线简正波和角度谱法计算出浅海远距离混响衰减规律，改进了国外的结果；系统地提取了海底散射系数，得到对远距离混响有重要意义、而国际文献中还没有发表过的小掠海底散射系数，受到国外的重视和引用。70 年代末，张仁和等在深海研究中发展了平滑平均场理论，解决了现有方法中的发散问题，并在国际上首先提出水下声道中反转点会聚区的概念和计算方法，计算的结果与实验符合较好，证明海底反射声波也能形成会聚区。80 年代初，张仁和、金国亮提出了计算浅海混响强度较完整的理论，解决了射线理论计算远程混响及影区、焦散区的困难。在计算界面散射时，提出了可分解的海底散射模型，即海底散射系数可表示为入射角函数与散射角函数的乘积，并满足互易解。张仁和还用广义相积分近似与简正波振幅函数包络平滑的方法获得浅海平均场积分表示。用这种方法计算的声场不但精度高，而且运算速度比传统的简正波方法与抛物方程法至少提高一个数量级。80 年代初，高天赋、尚尔昌在波动传播理论中，从波动方程边值问题出发，导出了严格的简正波和广义射线表达式，证明了分层介质波导中

简正波生成的函数和广义射线生成函数之间严格满足傅立叶变换关系，并讨论了分支线在变换中的影响。这项有创造性的工作，被国际学术界称赞为是对“混合公式”新传播理论做出的重要贡献之一。80年代中期以来，尚尔昌等还开展了浅海声场简正波过滤的理论和实验研究。他们与山东海洋学院合作，在该校的波浪水槽进行了过滤简正波的模拟实验，使用长圆柱换能器排阵，首次实现了在侧壁不消声的长70米的水槽中简正波的空间过滤，并观测了波浪表面对简正波场的起伏影响。从而对浅海声场起伏的机制做了很好的解释，并建立了被国际上称为“尚-相位比较法”的波动定位新理论。

80年代，中国科学院声学所冯绍松、钱祖文等人在非线性声学方面进行了理论和实验研究。钱祖文研究了非线性声波在边界上的反射，解决了斜射入这一难题，并且发现了一项新波（Q谐波），发展了非线性声学。他们还在小水槽中观察到小振幅声波在水中出现分岔，在扰动水中出现了二分频波，并研究了脉冲参量阵的性质、参量阵辐射近场，提出新的近场处理方法，并得到了脉冲参量阵的最佳设计原则。

在超声学方面，1956年中国科学院声学所应崇福与美国同行合作发表了论文《各向同性弹性体内球形障碍物对平面纵波的散射》，被国际上认为是固体中散射研究的开创工作，并被广泛引用。70年代末应崇福在国内组织该项研究，在理论方面首次给出带状裂缝脉冲散射声场的普遍解；用新方法计算了声波平面界面上的反射及散射问题；在实验方面用“动态光弹显示技术”和首创的样品加工技术能直接观察声波在透明固体中传播和散射过程，首次观察到薄板中的兰姆波及其散射现象和固体内沿空腔的爬波，并相应地进行了理论分析。60年代，汪承灏等在超声空化方面首先发现了空化电磁辐射，通过实验促进了对声发光、空化压力效应的正确了解，并揭示了相分散作用的空化机理。1979年起，应崇福、李明轩等研究了检测用超声压电换能器在脉冲状态和固体负载下的瞬时行为，首次提出了压电换能器的“声电再生”机理；第一次从实验和理论上阐明了固体介质中圆换能器的声场由直达波和边缘纵、横波组成；发现和分析了发射时瞬态波形中的应电压等。这些研究在学术和应用上都有重要意义。80年代，声学所还开展了表面波理论、声表面波在沟槽反射栅散射理论方面的研究。汪承灏等建立了压电晶体表面上广义激发所产生弹性波场的统一普适理论，并给出了压电晶体表面上换能的全面描述和普适的二维面换能器理论。他们还研究了声表面波在表面不均匀结构（包括槽和金属条带）的散射以及在表面栅阵上的衍射，首次提出了纯声学的频谱分析器和声表面波弹性卷积器的原理及其结构，建立了有负载条件下的广义变幅器理论，提出纵向-弯曲复合振动系统和盘形聚能器的设计理论。

在空气声学方面，50年代马大猷在建筑声学基础研究领域曾继续研究了简正振动方式理论，得到其方向分布及其引起室内声场的统计分布，提出了用水平面内的方向性扩散作为厅堂音质第二评价标准，并为此发展了在水平面内的指向声透镜。1976年，马大猷提出的微孔板吸声结构属于国内外首创。利用微孔内空气的摩擦消耗声能，后面不必填充吸声材料，他由此提出了微穿孔板吸声理论，并得到广泛应用。他还和李佩滋等系统地研究了喷注噪声的产生、辐射及其抑制，推广了表示喷注噪声功率与喷注速度关系的Lighthill的理论，扩大了适用范围。他们还建立了用A声级来

定量表示湍流喷注噪声的公式，求得了阻塞喷注中湍流速度继续随驻点压力增加的关系式，可解释阻塞喷注噪声随驻点压力改变的原因；还提出了多孔材料的阻塞出流，可用材料的有效通道面积和驻点压降描述，给出了完整的扩散消声理论曲线；研究了喷注气体分子量和温度对噪声辐射的影响；研究了冲击噪声对总噪声的贡献，提出了湍流噪声与宽带冲出噪声发生干涉的概念。这些研究成果同声学所关于环境噪声的研究成果一起，对认识噪声分布规律，控制噪声起到了重要的作用。

3. 统计物理学

50~70年代，中国在统计物理学方面的研究工作进展不大。在1977年全国自然科学基础学科规划会议之后，统计物理被列为重要研究方向之一。70~80年代以来，中国科学院理论物理研究所和北京师范大学等单位在相变、非平衡统计和耗散结构理论等方面，开展了大量研究工作。

在相变和临界现象理论方面，沈觉连对第二类相变对称理论中里夫施茨(Lifshitz)条件的局限性做了分析。1973年，郝柏林和于淦成功地运用量子场论中骨架图方法，把重正化群理论中计算临界指数的展开，求解到 n 项，实现了临界指数按空间维数差展开到高阶的计算。

在统计模型方面，李荫远首次将原来应用于铁磁性理论的贝特-外斯方法推广到具有磁亚点阵的反铁磁性，证明二维点阵不能出现反铁磁有序，计算出简单立方和体心立方结构的反铁磁转变温度与交换耦合常数的关系。后来又将这方法分别推广应用到含有非磁性原子的铁磁固溶体及面心立方点阵上伊辛自旋 $1/2$ 系统和伊辛自旋 1 系统的反铁磁性，算出了长程和短程有序度、内能、熵、比热、磁化率等随温度的变化曲线，它们都在临界点出现突变。半个多世纪以来，关于铁磁学的伊辛(Ising)模型一直是统计中未能完全解决的问题。其一维解说明系统无相变，二维解说明系统有相变，这一成果突破了平均场理论，成为后来导致重正化群方法的起点。但三维伊辛模型却一直未得出严格解。1975~1986年中国科学院理论物理所郝柏林、石赫、许以超等完成“三维晶格统计模型的封闭近似解”。郝柏林改写了二维模型的各种求解途径，建议对与三维模型密切相关的一个无规行走问题严格求解，试图得到三维伊辛模型的一种封闭的(即不是级数展开的)近似解。他们完成了三维简单立方格子的计算，得到了统计配分函数的封闭表达式。在寻求扩充上述结果的过程中，石赫、郝柏林找到一个形象的反例，说明不存在任何代数 A ，可以给出三维伊辛模型的严格解，从而把问题的提法改变为：寻求恰当的代数改进前面的封闭表达式。沿这一方向得到了一些新结果。他们的工作虽然未能彻底解决这一现在仍悬而未决的问题，但得到了“迄今最好的结果”(王竹溪语)。

1978~1990年，中国科学院理论物理所周光召、苏肇冰、郝柏林等完成了“关于非平衡量子统计的闭路格林函数研究”，对60年代由Schwinger建议的闭路格林函数理论框架做了系统分析，提出了一套有效的理论表述方案，并应用于临界动力学、非线性量子输运、淬火无序系统、激光、等离子体等问题中，得到了一些新的结果。此项结果在理论框架方面，给出了一个定义在闭合时间回路上的路径积分和相应的生成泛函表述，使系统的非平衡态(或平衡态)统计讯息被包含在它的有效拉氏量之中。这样就把经典非平衡统计的动力学演化和统计涨落(关联)两个基本因素明显地推广到量子情形。他们阐明了这类闭路格林函数不仅适用于非平衡或平衡

的非相对论量子多体系统，还适用于相对论场论系。在理论方法上，提出了求解序参量和统计格林函数的自治方程组。对多时空尺度的系统，用闭路格林函数方法系统地分析了低频、长波极限下的行为，对量子系统的流体力学描述和动态临界现象有重要的应用。这个描述既充分体现了系统本身的对称性，又完整地反映了统计涨落的作用。用闭路格林函数分析了非线性量子输运过程，指出这是处理这类现象的有效方法。

80年代，清华大学与河海大学，在王补宣主持下对“固体表面上流动膜沸腾与液滴蒸发的机理”进行研究，首次提出并分析了由于蒸气膜的沿程增厚、因汽液两相密度差悬殊而引起纵向压力梯度及其对层流膜沸腾传热的重要影响，独创地提出了高流速下湍流过冷膜沸腾传热的简化模型，提出了“汽液混相中间层”的设想与相应的半经验理论；探索了极高热流密度下的瞬态测试技术；提供了实用的传热关系式。他们在国际上首次发现了液滴蒸发的滴内存在着伯纳德元胞（Benard Cells）流动现象，首次揭示出微细结构的滴内可出现不同的蒸发形态，发展了实时精确记录和测定液滴蒸发速度的多种光学显示方法。他们的工作为液滴蒸发过程的研究打开了新的领域。

1980~1986年，北京师范大学黄祖洽与丁鄂江完成了“玻耳兹曼方程的奇异扰动解法”。他们用奇异扰动方法消去玻耳兹曼方程求解中的久期项，解决了历史上长期无法讨论的长时间弛豫行为和远离平衡态的气体的弛豫问题，取得了该方程解法的一个实质性进展，其结果可用于反应堆和核武器的研制与实验。

1978~1983年，北京师范大学方福康首先将I. Prigogine的耗散结构理论介绍到国内，对非平衡相变弛豫过程的触发时间、平均寿命做了研究，并对非线性系统随机层次上的Fokker-Planck方程利用李代数算子结构进行讨论，得到了非线性系统随机求近似的一般处理方法。他还运用泛函分析方法、群分析方法对反应扩散方程、F-P方程的求解判别法则做了讨论。从1985年起，方福康又将非平衡系统理论推广到研究复杂系统一般演化机制的领域，并应用于社会经济系统，形成了独特新颖的研究方向。

80年代以来，北京师范大学胡岗等在非线性系统中随机力的作用方面研究了非平衡随机系统的演化，非平衡势函数及随机共振等问题，第一次导出了随机力作用下双稳系统从不稳定态发展到最终定态的全过程弛豫过程的积分表达式，并提出了计算不具有细致平衡的Fokker-Planck系统势函数的双重展开理论，使这类计算形成了具有普遍性的系统的方法。1983年以来，北京师范大学杨展如和他的研究生对80年代刚兴起的分形物理进行研究，对Sierpinski Carpets上相变的普适性判据提出了重要修正。同时对多种分形晶格上统计模型的相变做了研究，求出了一类特殊分形结构的精确配分函数、自由能和关联函数，发现了在等级晶格上反铁磁Botts模型可能存在低温代数衰减相，获得了自旋为1的系统的较具一般意义的解。杨展如还根据伊辛模型求出了多种系统的动力学临界指数。从80年代初开始，中国科学院理论物理所的郝柏林坚持进行混沌动力学的研究，为中国在国际学术界争得一席之地，并且推动了中国非线性科学的发展。1982~1991年，郝柏林、郑伟谋等完成了“实用符号动力学及其在耗散系统混沌研究中的应用”课题。该项成果简洁地给出一维映象分岔图中混沌带边界和暗线的方程，给出确定一维映象超稳定周期轨道和混沌边界揉序

列参数的“字提升法”，还给出了基于符号序列排序的更一般的二分定参数法，提出了符号序列的周期窗口定理和“广义合成法则”。证明了揉平面中“两次相交意味着混沌”，并且具体应用于确定 Lorenz 型映象和裂峰映象的拓扑混沌边界。还用符号动力学解释了反称立方映象中对称破缺和对称恢复的机制，给出对称破缺周期字的选择法则及数目；给出了圆映象的直接符号动力学描述，构造了圆映象的揉平面。此成果发现了用两个字母的符号动力学可以给出周期驱动布鲁塞尔振子周期轨道的排列方式和自洽的 Lorenz 方程中大多数周期轨道的排列方式。该成果还给出了计算混沌边界揉行列式主要部分即决定拓扑熵部分的方法，指出转移矩阵与构造形式语言自动机的传递函数间的关系。这是对二维映象符号动力学这个艰难而重要的研究领域的突破，它系统地开辟了实用符号动力学的新领域，把符号动力学发展成研究混沌动力学的具体工具，并用于周期驱动和自洽微分方程的数值研究。使对于各种实际动力系统的数值研究和实验研究更为深入和整体化，并提出了刻划混沌和复杂行为的严格手段。

4. 光学

中华人民共和国成立前，中国的基础光学研究已有一定的基础。新中国成立后，中国物理学家在光学领域的研究，同光学的各分支学科的发展同步进行，在光谱学、激光、非线性光学、光学信息处理等方面都取得一定成就。

新中国成立不久，应用物理所的赵广增和张志三便从事激子光谱和分子光谱的研究，同时建立起在当时比较先进的原子光谱分析和研究红外线吸收光谱及喇曼光谱的实验设备。1957年，赵广增在前苏联莫斯科大学从事高分辨光谱和晶体光谱研究。他回国后，在氧化亚铜吸收、黄系激子、蓝系激子的光谱以及压力效应和空间色散方面进行了深入研究。

60~70年代，中国科学院物理所李荫远从事非线性光学和相关固体介质的研究。1964年，他从理论上进行分析，证明介质可以从强激光束中同时吸收两个频率为 ω_1 的光子而产生频率为 $2\omega_1$ 的散射光子，同时在介质中出现能量为 $2\hbar\omega_1$ 的元激发。他应用对称分析指出，利用这种过程有可能发展一种新的光谱学方法去观测红外吸收与喇曼散射光谱中的分子振动的“哑模”。次年，这一研究成果被美国特休恩 (Terhune) 等人所引用。尔后，这一非线性光学效应被命名为超喇曼散射。不久，在此基础上又观测到受激超喇曼散射。到80年代中期，这一研究领域已发展成为激光光谱学中的一个分支。

1976年，中国科学院物理所叶佩弦和傅盘铭等人研究了液晶的简并四波频混频及其弛豫过程，首先观测到混频讯号的弛豫过程。随后，他们又分析了产生混频讯号的两种可能机理，即热效应和分子取向，并建立起能成功地区分这两种机理的实验方法，获得了单纯来源于分子取向的混频讯号而排除了热效应。同时，沈元壤和叶佩弦利用拓扑图方法分析了二、三与四能级系统的瞬态混频的相干效应，把四波混频的方法同光子回声的分析方法在一定近似下统一起来，并使光子回声现象更易于分析和理解。傅盘铭还从理论上讨论了 $J=0 \rightarrow J=1$ 跃迁现象，其处理方法具有普遍性。1985年以后，他又利用微扰法计算简并二能级系统的三阶非线性极化率，研究了简并四波混频的能级交叉现象，证明可以利用这种现象测出有关能级的弛豫速率。上海光机所吴存恺等在简并四波混频的研究中，首先报导了在

叶绿素甲醇溶液及其他有机染料溶液中，观测到相位复共轭的后向散射波，表明所研究的介质具有较高的非线性反射率。他们还用共振吸收方法对铍玻璃的简并四波混频进行分析，以获得较高的非线性反射率。当把这种方法用于叶绿素 A 的甲醇溶液时，得到了 22% 的非线性反射率；当用于 9740 有机染料二氯乙烷溶液时，物光束转换为像光速的转换效率可达 25%。吴存恺等还研究了某些透明介质的简并四波混频现象，通过测量后向反射波与入射波的强度比，得以确定介质的三阶极化率。1985 年以后，在非线光学领域，吴存恺和刘颂豪等利用皮秒激光技术研究铷原子高激发态的瞬态相干效应和铯原子蒸气的受激喇曼散射现象，并在碘酸锂晶体中，在可见光光谱区域获得了相干喇曼混频效应。清华大学张培林，赵朔嫣、郭延生等首次系统地研究了六波混频过程，并于 1991 年发表了论文《原子的多波混频与多光子激发感生荧光检测》。1980~1986 年，北京大学孙陶享等在相干瞬态光谱方面的研究中，利用 Stak 开关技术发现了一种瞬态相干效应——红外光学旋转四波。他们利用它精确地测量了重要光谱参数（偶极跃迁矩阵元），这是当时非线性光学的一个重要进展。

在激光光谱学方面，张存浩等利用调频二极管激光光谱仪，在 3657~3708 厘米⁻¹ 光谱区域测量了二氧化碳分子的高分辨吸收光谱，这项研究工作具有一定的实用意义。刘颂豪等观测了方解石的六阶相干反斯托克斯喇曼散射（CARS）和二阶相干受激喇曼散射（CSRS），测量结果与计算结果十分一致。张绮香等在近共振散射研究中，用不同频率的入射光激发钠原子蒸气，测量散射光的积分强度，发现有关能级的激发截面随入射光频率的不同而有所变化，并利用碰撞体的相互作用势，定性地解释了所观测到的变化规律。

70 年代后期，中国科学院物理所张洪钧以液晶为非线性介质，在光电混合装置中观测到光学双稳现象，并在非线性标准具中也观测到了光学双稳现象。这是前人所未能观测到的现象。在研究中，他测量了临界慢化过程，用图解法解释了所观测到的现象。张洪钧还在研究光电方法产生光学振荡的机理时，通过具有双反馈回路的法布里-珀罗（Fabry-Perot）标准具观测到连续光的输入转变为强度交变的光输出，并证明这种输出是以反馈时间为周期的自脉冲。1982 年，张洪钧等通过改变脉冲宽度，在国内首次观测到混沌现象。进而，他们研究了走向混沌的道路、混沌中的滞后现象、光学双稳态与混沌运动的临界现象之间的相似性等。通过上述研究，他们还证明，在双延迟反馈光学双稳系统中，随着输入光强的增加，该系统经过锁频、准周期运动、锁相而走向混沌。这一系列研究工作，不仅揭示了液晶光学双稳系统中发生分叉和混沌现象，而且也为混沌理论研究提供了一个能够进行实验验证的非线性系统的模型。在短波段光学方面，北京师范大学颜以鸣领导的 X 光学实验室，于 1990 年成功地研制了强 X 光学聚束系统——库马霍夫 X 光透镜。这是由空心 X 光导管组合成的大功率白光 X 光聚束系统。他们研究了 X 光导管的传输特性；研制成功会聚 X 光透镜和平行束 X 光透镜；并在国际上首次将会聚透镜应用于 X 射线荧光分析，使 X 光功率密度比常规谱仪增强了 3 个数量级，中、重元素的探测极限提高了 3 个数量级，实现了使用 X 光透镜的微束分析。在国内首家研制成功具有国际先进水平的大功率金属等离子体 Prnch 软 X 射线源，将它与平行束 X 光透镜结合制成研究亚微束光刻用的平行束软 X 射线源，开创了

国际上第一家亚微束光刻实验研究。

在光学信息处理方面，中国科学院霍裕平和杨国桢试图利用全息透镜组来实现任一给定的线性变化，以突破当时的光学信息处理只能实现傅立叶变换而用途有限的局限性。为了给实验工作者指出可行的工作条件，霍裕平利用迭代法来确定实验中所需的全息透镜及其排列顺序，继而又用优化法对一些问题进行分析，把计算方法向前推进了一步。他们还把投影算子引入图象识别中，便利了实验工作的进行。杨国桢等分析了沃尔什（Walsh）变换的实验条件，并给出了为实现二维空间 8×8 复数沃尔什变换所需全息透镜系统的光学设计。陈岩松等对沃尔什变换的理论结果做了实验验证。其后，杨国桢从理论上证明，在离散条件下，利用单个全息透镜所组成的光学系统能够实现任意给定的线性变换，并为实现这种变换计算出全息透镜的振幅和相位分布，从而为实验工作指出了具体实验条件。

5. 固体物理学

中国科学院建立以后，组建了以固体物理为主要研究方向的应用物理研究所，他们和一些高等院校一起，推动了晶体学、低温技术、磁学、固体强度与范性学的研究工作的发展。1958年，在新建的中国科学技术大学内设置了以凝聚态物理为专业的技术物理系。1977年中国科学院召开的新学科规划会议上，把表面物理、非晶态物理、固体缺陷、相变和高临界温度超导体确定为凝聚态物理的发展重点。这一时期，在北京、上海、昆明、长春、合肥等地建立了相应的研究机构。各地的高等院校也取得了一些重要研究成果。到1990年，中国的凝聚态物理研究的分支学科，已发展成为包括晶体学、晶体生长、磁学、半导体物理、电介质、非晶态物理、表面物理、低温物理、高压物理、固体缺陷、内耗以及固体离子学等十多个分支的大领域；研究机构已发展到十多个研究所和高校研究室，研究人员已达两千多人。

(1) 固体理论

晶体中发生电子跃迁时，常常会伴随着发生晶格能量的改变，表现为晶体中电子跃迁的光吸收和光发射具有复杂的与温度有关的谱线形状。这个问题对认识晶体的光学和光电性质、认识晶体中激发出来的载流子的运动和寿命等都有重要意义。1950年，黄昆和里斯（A. Rhys）在“F心的光吸收和非辐射跃迁的理论”中首次对这个问题给出了完整的理论处理。他们把围绕F心的晶格原子的平衡位移位形用晶格振动的正则坐标来展开，跃迁前后的平衡位移位形的变化便表现为晶格振动能量的变化。这样便清楚地得到了电子跃迁时同时会发射或吸收一个或多个晶格振动量子-声子的物理图象，得到了复杂的谱线形状以及它对温度的依赖关系的物理本质。国际物理学界公认这一理论的开拓意义，并把它称为“黄-里斯理论”，对以后发展起来的“极化子”理论的形成有重要影响。从1980年到1985年，黄昆和他的学生比较严格地分析了这类理论处理的基础——把电子运动和晶格运动分开处理的所谓绝热近似，提出一个有多个不同频率的声子模式参加的多声子复合过程的理论模型和计算这个模型的理论方法。

1950年，黄昆综合介质的电磁理论和晶格动力学理论对极性晶体提出了一对唯象方程。它提供了处理极性晶体光学振动的基础，被称为“黄方程”。1951年黄昆从黄方程出发，又推导出晶体中的声子与电磁波的耦合振荡模式。他所预见的声子与电磁波的耦合振动模式于1963年首先被半导

体磷化镓的 Ra-man 散射实验所证实，被命名为极化激元。后来发现其他物质振动也有类似的与电磁波的耦合模式，也被称为极化激元。现在极化激元成为分析固体光学性质的基础，黄昆的工作在国际上被看作是极化激元领域的里程碑式的工作。70 年代后期和 80 年代初期，黄昆探讨了多声子复合理论中绝热近似是否失效的问题和无辐射跃迁的绝热近似及静态耦合理论，指出康登 (Condon) 近似实际上包含有微扰处理上的错误，并提出了选择非康登近似波函数的理论判据。在此基础上，他证明了在晶格弛豫只限于电子-声子相互作用的对角部分以及非对角部分只限于一级微扰处理的范围内，绝热近似和静态耦合理论是完全等价的。这一结论，从理论上肯定和统一了无辐射跃迁理论的主要成果，并对其后无辐射跃迁几率的实际计算工作具有重大的指导意义。1982 年，黄昆等又把多声子跃迁理论中广泛采用的单频模型推广为多频模型，提出了声子模型统计分布，揭示了多声子理论的一个新的方面，阐明在多声子跃迁中发射了哪些声子。1983 年，他又对多频模型中最陡下降法的理论基础做进一步探讨，证明了当声子数足够多时，由最陡下降法得到的跃迁几率与由严格理论得到的结果是一致的。80 年代，中科院理论物理所于 苏肇冰等对电子-晶格畸变高度非线性耦合的跃迁过程进行了系统的研究，在黄-里斯理论的基础上，提出了一个多电子系统局域型非线性元激发的量子跃迁理论，给出了局域型非线性元激发辐射跃迁和无辐射跃迁量子跃迁几率的普遍表达式。在上述理论框架内，对于 Trans-聚乙炔引入了空间反演算符和电荷共轭算符，求得了系统哈密顿量，系统地导出了这种局域型元激发在辐射跃迁和无辐射跃迁过程中必须遵守的一些选择定则，并解释了实验上观察到的 Trans-聚乙炔系统光生中性孤立子对被禁戒的现象。在双极化子模型的基础上，应用上述理论到 Cis-聚乙炔的共振 Raman 谱上，理论计算与实验结果基本相符。

(2) 晶体学

晶体学是研究晶体中的原子 (或离子) 排列的结构形态以及结构形态变化规律的学科。50 年代以来，中国物理工作者运用 X 射线、电子、中子等衍射和散射手段研究单晶和多晶的晶体结构，取得了多种结果。

中华人民共和国成立初期，中国的 X 射线衍射研究，只有应用物理所陆学善等在合金的粉末衍射分析方面有过一些工作。不久，刘益焕开展了合金加工和热处理后结构、结构变化以及休姆-罗塞莱 (Hume-Rothery) 电子化合物中的有序无序相变及超结构的研究。吴乾章利用 X 射线多晶衍射物相分析方法，对耐火材料的耐用性进行研究。他们这些工作，对中国的 X 射线衍射分析研究起到了奠基作用。在建立和发展 X 射线多晶衍射的技术和方法方面，物理所、上海硅酸盐所、化学所研制了精密型德拜-谢乐 (Debye-Scherrer) 照相机以及纪尼叶 (Guinier) 单色聚焦照相机和单色器。他们使用大直径德拜-谢乐照相机，通过修正偏心与吸收流移常数的方法，使测量晶体点阵常数的精确度达到五十万分之一，属于当时世界先进水平。同时，他们还推导出适用于低对称性的联立方程组来求解点阵常数；提出了适用于四方、六角、正交、单斜晶系的 X 射线粉末衍射图谱指标化的一种新图解法。陆学善和章综在利用 X 射线粉末衍射技术研究金属合金体系的有关晶体结构和超结构的工作中，发现了合金相中一类以氯化铯型为基本结构单位，空位做有序分布而形成的超结构相，指出决定其结构的

主要因素是基本结构单位内所含的平均价电子数。这其中，最突出的成果是发现铝-铜-镍三元素的相内存在着8种结构。这8种结构都是以氯化铯型为基本结构单位，经畸变和空位沿六角晶系的z轴做有序分布而形成的10~17层的属于不同结构类型的超结构。用X射线衍射法对物质多型性进行的研究也曾取得良好成绩。上海硅酸盐所郭常霖等发现84种碳化硅新多型体，占到世界上所发现的150多种多型体的一半以上。他们还测定过10多个属于特殊结构系列的新多型体的晶体结构。物理所在对碘酸锂的相变研究中，发现碘酸锂相变过程存在着一系列中间相。这些工作，使人们对重建型相变有新的认识。物理所用多晶粉末衍射的方法测定过一系列金属间化合物和无机盐的晶体结构，如FeGa, CoGa……测定的精确度达到了世界上公认的高水平。

1955年，唐有祺在应用物理所组建了中国第一个单晶体结构分析的研究组。同年，在中国首次用X射线方法测定出一个单晶体结构。次年，吴乾章在应用物理所指导单晶体结构分析方法的研究，稍后，又倡导和组织了对结构分析“直接法”的研究，并最先组织了单晶体结构分析电子计算机程序的编写工作。1963年以来，范福海等对直接法进行大量研究，他们突破了晶体学中直接法只能应用于小分子单晶体的X射线衍射分析的狭小领域的局限，开展了将直接法应用于测定蛋白质结构的研究，在将直接法与传统的蛋白质结构分析方法-同晶型置换法和异常散射法相结合的研究中，取得了国际上迄今最佳的试验结果，从而把直接法的应用从小分子推广到大分子。范福海、郑启泰等就直接法处理晶体结构分析中关于由赝对称引起的衍射周相不确定性问题，即用直接法测定特殊的“超结构”问题进行了系统研究，阐明了这一问题的原因、表现形式及解决这一问题的方法理论；建立了一套系统的实用算法，并将这种算法纳入了直接法电子计算机程序系统SAPI。这是目前国际上唯一能够自动处理晶体结构中赝对称性问题的程序。

中国的电子显微术研究始于1951年，当时钱临照和何寿安等在物理所装备的中国第一台电子显微镜上对金属单晶体初期范性形变进行电镜研究，在考察铝单晶滑移形变后的表面特征中发现许多新的物理现象。60年代，金属所郭可信和物理所李方华开展了电子衍射的研究。郭可信等研究了单晶电子衍射图的几何并对不同类型电子衍射图进行了分析；李方华等用透射和反射式电子衍射方法研究了薄膜结构与薄膜性能及其制造工艺之间的关系，并提出了一个从动力学电子衍射强度出发，寻求结构振幅的经验方法，以此测定了23烷醇晶体结构中的氢原子位置。70年代后期，物理所和金属所都开展了高分辨电子显微术方面的工作，用点阵象技术直接观察了晶体的结构和缺陷；随后，又开展了结构象的应用研究，建立了高分辨电子显微象的模拟计算技术。半导体所、上海硅酸盐所、固体物理所等单位也先后开展了这方面的工作，在研究各种氧化物、金属、半导体等材料的晶体结构、缺陷、界面时观察到许多新的结构现象。80年代，物理所在高分辨电子显微术方面的研究，提出了赝弱相位物体近似的象衬理论，并在此理论的指导下，首次在高分辨电子显微象上观察到轻原子锂。1991年中科院物理所的李方华、范福海、胡建军等把直接法推广到高分辨电子显微像。建立了一种新的高分辨电子显微像图象处理方法。它综合了电子显微术和衍射分析的优点，并把最大熵原理应用于高分辨电子显微学

中，借助像的解卷处理，找到了一种适用于微小晶体试样结构分析的新方法，接近衍射分辨极限，成功地测定了未知晶体结构。物理所冯国光用会聚束电子衍射方法研究了晶体的对称性和晶体缺陷，并首先指出可以用豪威(Howie)和徽伦(Whelan)发展的晶体缺陷理论来解释畸变场的会聚束电子衍射结果，提出了实现大角度会聚束电子衍射的一种新方法，还开展了电荷密度波的研究。1984年，国外首次报道用电子衍射方法在急冷铝-锰合金中发现了具有5次对称性的20面体准晶。这种准晶无平移周期，但仍属长程有序，具有准平移周期。1984年，在郭可信、叶恒强的指导下，中国科学院金属研究所的王大能发现，过渡族金属合金中的四面体密堆相的电子衍射图中衍射斑点是非周期性的五次旋转对称分布，认为这是各种纳米微畴中的20面体柱具有相同取向引起的。受此启发决定用快速凝固(10度/秒)方法制备20面体原子簇。1985年初张泽在Ti-Vi合金中发现20面体对称准晶。这一独立发现得到了国内外的肯定。物理所冯国光等于1986年在铝铁合金中发现了有10次对称性的准晶。1987年，在郭可信指导下，北京科技大学研究生王宁和中科院北京电子显微镜实验室陈焕，首先在急冷CrNiSi合金中发现了过去认为“不允许”的8次旋转对称准晶，他们还在急冷VNi合金中找到12次旋转对称准晶。上述几个研究单位在一系列合金中找到20多种准晶，占1987年前后国际上已知的准晶数目的一半以上。1987年前后，中科院物理所李方华、麦振洪、陈熙琛、潘广兆等在“准晶体结构和相位子缺陷”研究中，发现了介于准晶体与晶体之间的中间状态，观察到从准晶体到晶体的连续转变；阐明了20面体准晶、10次准晶以及8次准晶与某一特定的相关晶体在结构上有密切联系，指出它们之间联系的媒介是线性相位子应变。在这些工作基础上，提出了从相关晶体结构来求定一个与准晶结构有关的高维晶体的结构，从而发展了测定准晶体结构的新方法，并测定了Al-Cu-Li和Al-Mn-Si准晶体的结构。

1958年，应用物理所吴乾章与原子能所共同开展了用中子衍射方法研究晶体结构的工作，并组织了把X射线、电子和中子三大衍射技术结合起来互相补充的研究工作。1980年起，中国和法国的科学家合作成功地研制成具有国际水平的中子散射三轴谱仪和四圆衍射仪。利用这两台仪器开展了一系列工作。林泉等利用中子非弹性散射研究了晶体的旋声性，观察到在某些旋声晶体中，左旋的和右旋的圆偏振声子可能具有不同寿命的现象。

1960年，原子能研究所杨桢、张焕乔等和中科院物理所李荫远开展了中子外场衍射这一课题的研究，发现当石英单晶做超声压电振荡时，衍射的中子束强度成倍增强。他们测定了增长倍数与振荡频率、中子波长的关系，以及摇动曲线宽度变化、中子的单色等性能，并对其机制做了初步分析。这一现象的研究导致了对在运动的或具有晶格梯度的单晶对中子衍射机制方面的广泛探讨，阐明了中子动态衍射和单晶形变对衍射的各种影响，成为目前利用运动的晶体做衍射及利用形变晶体做衍射等衍射新技术的理论基础。1974年，他们又发现不大的直流电场，能导致-碘酸锂某些晶面的中子衍射强度显著增大，以及与这一现象有关的弛豫现象、各向异性、温度和低温“冻结”效应、交变电场效应等。对此现象的探讨，导致1977年发现了直流场作用下TGS单晶在临界点附近的中子衍射增强现象。

象，并引起国内外对 Li-I 碘酸锂在静电场下物理特性的广泛研究。此后，课题组又发现了 TGS 单晶在临界温度附近呈现的、外加静电场引起的中子衍射增强现象。

(3) 非晶态物理和液晶理论

自 1974 年以来，中科院物理所、金属所、上海冶金所、固体物理所和中国科技大学等分别在潘孝硕、李林、王景唐、何怡贞等主持下，先后用射频溅射、真空蒸镀、急冷工艺和离子注入等方法制备成各种非晶态稀土-过渡族合金薄膜和多层膜，以及各种铁基、钴基、镍基和铝基非晶合金薄带，并较深入地研究了它们的结构、电子态、弛豫过程、形成和相变、均匀流变、蠕变和断裂、内耗、磁共振、穆斯堡尔效应、光散射、电性、磁性、超导电性、高压下的物性和理论模型。王荫君等研制成具有垂直膜面各向异性的钐钴薄膜。潘孝硕、詹文山等系统地研究了过渡族元素对铁硼系非晶态合金的磁性和电性影响的规律，并观察到非晶态合金中感生各向异性的可逆和不可逆结构弛豫。赵见高等用核磁共振研究了非晶态铁硼合金的短程序结构和硼原子的配位规律。邬钦崇和何怡贞等从晶化动力学理论与实验两方面研究了非晶合金的晶化过程，区分出晶核形成和长大的两个阶段。王景唐等在非晶态镍磷合金的晶化过程中，观察到有 4 种不同取向的六角亚稳相和两种新的六角亚稳相晶体。王震西等在非晶态钕铁合金中观察到氢致交换增强效应。韩大星等观察到非晶硅光电导的热淬灭及红外淬灭现象。陈立泉和俞文海等还研究非晶固体的离子电导，在非晶态硼酸锂中观察到晶化前期的离子导电反常增高。赵忠贤等对非晶态铜镍钴合金的研究，指出它们的超导电性主要取决于费米面上的态密度。中科院半导体所根据研究硅反型层中的安德逊 (Anderson) 定域化的实验结果，提出了一个非均匀无序系统的模型，并由此解释了最小金属电导实验与理论预期的差异。他们利用红外光谱和喇曼光谱研究了氢化和氯化非晶硅材料的振动谱，提出了识别硅-氯键的新见解，证实硅-氯键的形成可以提高薄膜的热稳定性。他们还把表面分析技术用于研究氢化和氯化非晶硅的化学键形成和金属绝缘体半导体多晶硅太阳能电池，通过对氢化非晶硅中氢原子间非键互作用的研究，指出它是导致氢原子局域振动模紫移和展宽的可能原因。

1979 年以来，清华大学柳百新等对“载能离子束与金属作用下合金相形成及分形生长现象”进行研究，在固体薄膜中首次观察到多种分形凝聚行为和形态，提出了尖端-尖端模型和形核-凝聚模型，丰富了分形研究的实验结果；在非晶态薄膜中发现了旋错，证实了非晶态固体中不可能存在稳定的位错，而只能产生旋错；实现了原位研究薄膜的分形生长，论证了化合物合成中“结构适应性”原则。

1969 年，中国开始开展对液晶的研究。80 年代初中科院物理所张洪钧、戴建华、王鹏业等在“液晶光学双稳态中混沌运动”的研究中，观察到双稳区内存在新型周期为 t 的暂态振荡，做出理论解释；计算了液晶光学双稳态的分岔图。此项工作还为混沌理论的研究提供了一个进行实验验证的非线性系统模型。80 年代中期，清华大学诸国桢在液晶中发现了一种新的机械波，被命名为“指向波”，是分子排列状态扰动的传播。这一发现对非线性动力学和生物物理学研究有重要意义。从 1989 年起，中科院理论物理所欧阳钟灿等利用液晶理论研究人工生物膜形状，成功地解释

了人工生物膜泡形状、人工膜螺旋结构，并预言了半径比为 的环形膜泡，得到了法国的实验证实。

(4) 内耗研究

中华人民共和国成立初期，应用物理所和清华大学就开始针对碳、氮在铁中的扩散、脱溶和沉淀以及铁的高温蠕变和含碳的影响，合作进行内耗研究。1952 年以后，中科院金属所也大量开展了内耗研究。这一时期，葛庭燧等首次在 α -铁和镍等面心立方晶体中观测到填隙原子所引起的斯诺克 (Snoek) 类型的内耗峰。最初是在含碳的几种面心立方系合金钢中发现，这种内耗峰的高度与含碳量成正比。随后，又发现含微量锰的 α -铁中因含碳而出现内耗峰，这种内耗峰的高度与含碳量的平方成正比。这类现象在含碳的镍铝合金和纯镍中也观测到，而且内耗峰的高度也是分别与碳含量的一次方和二次方成正比。这说明填隙原子能够在面心立方点阵中引起内耗峰是一种普遍现象。

中科院金属所在内耗研究上，取得了重要成果。他们总结了关于铁、铜、铝、镍等金属及镍碳、铝铜和铝镁合金在范性形变过程中内耗的实验结果，提出了金属范性形变低频内耗的位错动力学模型；开展了用能量消耗的方法研究铝及铝合金在疲劳载荷作用下所发生的基本过程的工作，并根据点缺陷（定位和溶质原子）与位错的交互作用的观点对实验结果做出解释，比较系统地继续进行了葛庭燧在 1949 年首先发现的表现反常振幅效应的内耗峰实验，明确地提出了位错弯结气团模型。80 年代以来，中国科学院内耗与固体缺陷开放实验室在葛庭燧领导下，对晶粒间界的非线性内耗进行了系统而深入的研究，发现了正常和反常振幅效应的温度内耗峰等非线性弛豫现象。近年来他们又发现了位错与点缺陷交互作用所引起的一系列非线性的滞弹性内耗弛豫谱。因此，葛庭燧开创了新的非线性滞弹性领域。

(5) 表面物理学

现代表面科学是从原子尺度上来研究固体表面的结构、物性和表面上的反应过程，同各国科学界一样，中国物理学家对这一研究领域极为重视。

1975 年，中科院物理所、半导体所等单位合作研制出了分子束外延设备。物理所周均铭等和半导体所孔梅影等都利用自己研制的分子束外延设备，成功地生长出高迁移率的砷化镓/镓铝砷调制掺杂材料，并对其进行了一系列电学和光学实验，观察到量子霍尔效应。物理所还制成高电子迁移率场效应晶体管和开始研制超晶格。中国科学院通过分子束外延设备和俄歇谱仪的研制，建立和发展了中国超高真空和弱信号检测技术以及表面分析技术。1987 年建立表面物理国家重点实验室，进一步加强了表面研究工作。物理所林彰达和伍乃娟等深入研究了过渡金属及其化合物的表面结构和电子能谱，通过对钨系统（碳/钨，硅/钨，铯/钨，氧/钨；各种形态氧化钨等）、钼、钨、铂、铁和镍等系列的表面研究，解释了催化活性、表面中毒、表面氧化腐蚀、薄膜磁性和电子发射等机理。他们还紧密围绕能源的开发和利用，研究了光分解水制氢电池的电极表面，提出用双层电极膜作电极材料的思想，实现了提高分解水的效率和增加稳定性的要求。物理所的研究人员通过研究稀土和钛铁系材料的贮氢特性，提出了常见杂质气体与硫化物表面中毒及再生的机理，总结出分凝状况与活化孕育期的一般关系，为贮氢材料的应用提供了重要科学依据。金属所郭可信和李日升

等研究了断口的表面分凝和偏析在金-铜合金择优溅射中所起的作用,讨论了合金溅射中的基本物理问题。半导体所许振嘉和钟战天等以及物理所和中国科技大学的一些研究组进行了金属/半导体、硅/硅化物、氧化物/砷化镓的界面研究,对半导体器件的研制起到很好的推动作用。物理所和金属所等单位利用低能电子衍射技术对石墨插层材料和过渡金属材料的表面结构、有序-无序、公度-非公度表面结构相变等进行了基础表面物理研究。这些工作都推动了金属硅化物形成规律、金属/半导体界面及肖特基势垒、半导体异质结等的研究。同时发现并解释了金属半导体界面形成过程中成分的表面偏析现象,在国际上得到好评。

1980~1988年,北京师范大学王忠烈等进行了“离子注入形成浅结和离子束感生界面混合机理研究”,提出了离子束混合机制的新模型,认为离子束感生界面原子混合特性不仅与系统的碰撞特性有关,还与系统的化学特性、热力学性质、冶金特性有关;开展了用离子束混合方法形成硅化物规律的研究;研究了W-Si、Ti-Si、Pt-Si的生长动力学和退火特性。此后,张荟星研究小组制成我国第一台金属蒸气真空弧离子源(MEVVA源),并用于金属离子注入材料表面改性。

(6) 半导体物理学

50年代初,中科院物理所电学研究组在王守武和汤定元领导下对氧化亚铜的震耳效应和电阻率、硫化铝的光电导、电子生伏特效应等开展了研究工作。以后,他们又对锗中少子寿命以及P-N合金结中少子注入理论进行了研究。

60年代初,北京大学甘子钊对半导体中隧道过程进行了研究,发展了一种描述半导体中高阶隧道过程的理论形式,提出了锗中隧道过程主要是杂质散射产生的二阶隧道过程的论述。80年代中期以来,北京大学在黄昆的领导下,发展了量子阱中四分量空穴波函数的理论,指明各分量代表不同轨道角动量,对涉及复杂带的电子态研究具有重要意义。在超晶格中光学声子模的研究中,他们发展了一种微观模型,正确地解决了先前国际上沿用的连续介电模型中存在的矛盾和困难。在这一理论指导下,他们在超晶格实验研究上也取得一系列有特色的成果。

1984~1989年,清华大学朱嘉麟、顾秉林、熊家炯在超晶格量子阱电子结构的研究中,把数值计算和解析方法结合起来,利用“分区级数解法”,得到了球形方位阱中类氢施主态的精确解和二维磁杂质的精确解;在无序系统电子关联研究中,提出无序效应与维数密切相关的观点,发现了“硬”库仑能隙;在半导体合金研究中,用原子团变分方法研究了合金的热力学行为及其原子间的长程序和短程序、电子结构反常等。

80年代,清华大学何豫生对 δ -族窄禁带半导体Pb_{1-x}Sn_xTe合金的电子结构进行了系统的研究。首创的“双窗函数方法”使得国际上停顿十多年的畸变相费米面取得了突破,而且对一般复杂的傅立叶频谱分析有普遍的启发作用。第一次得出 δ -族化合物畸变相下完整的SdH振荡谱,从而证实了双层费米面结构,并确定了有关能带参数。用量子振荡方法对结构相变过程中费米面变化及电子-声子相互作用做了实验和理论研究,在国际上首次观察到散射因子 T (Dingle温度)随温度的反常变化,提出了铁电畴壁附加散射理论解释。

80年代中期以来,中科院半导体所的研究人员用赝原子轨道组合法、

量子化学中的 X-SW 法以及半经验自洽算法和自洽势法等不同方法，对半导体以及半导体中的空位和杂质的电子态、半导体表面的弛豫效应和化学吸附等做过很多理论研究工作。在原子轨道法中，他们把杂化键作为基函数，建立了一套将原子键函数按照晶格对称性分类和组成对称化函数的系统方法。在把量子化学计算方法用于半导体研究中，他们对集团模型的边界问题和半经验参数做了探讨和改进。

上海技术物理所在汤定元领导下，对窄禁带半导体材料的电子、声子结构做过许多工作。沈学础等比较系统地研究过掺杂、无序和混晶半导体的晶格振动行为，尤其是低频晶格振动行为。他们发现，在横声学声子带上声态密度陡峭下降的位置附近，有一个轻杂质诱发的局域化振动模。这一现象对所有被研究的半导体具有普遍性，被判定为与横声学声子带相联系的声学局域模，但在典型离子晶体中却不存在。半导体所的科研人员用玻恩-黄昆方程和等位移模型研究了混晶中长光学声子谱，并进行了相应的实验研究。他们还探讨了混晶半导体中无序对本征吸收光谱的影响和对能隙的影响。

1975 ~ 1976 年，北京大学王阳元等研究开发成功我国第一块大规模集成电路硅栅 MOS1024 位随机存储器，并开发成功了集成电路的硅栅技术和 N 沟道技术。王阳元还进行了大规模集成电路中多晶硅薄膜氧化物动力学和电学性质的研究，他提出的“应力增强氧化”模型和统一的迁移率模型，引起国际学术界的重视。

中国科学院半导体所赵学恕、李国华、杨桂林、王炳 等人在物理所有关人员协助下，在磷化镓（掺氮、碲、锌）的静压光致荧光研究中，首次观察到磷化镓中自由激子的零声子发射，在 0 ~ 100 千巴下研究磷化镓中氮和砷化镓中氮的束缚激子压力光谱时，发现在此压力范围内砷化镓中氮的束缚态会在禁带中出现；在测量磷化镓中氮和氮氮对束缚激子线的压力系数时，发现深的能级压力系数较大，并且有非线性。在理论上，他们提出有效质量的变化（即能谷曲率的变化）对深中心压力行为有决定性影响的观点，全面定量地解释了磷化镓中氮和氮氮对束缚激子的压力行为。

1969 ~ 1970 年，北京师范大学韩主恩、张荟星等与有色金属研究院余怀志等研制成功 200kV 离子注入机，并制成我国第一个用离子注入法得到的 P-N 结。后来又将该机改制成 400kV 离子注入机。随后，张通和、来永春、李国辉等首先开展离子注入半导体掺杂、GaAs 氧隔离工艺；协助机电部 13 所和北京市半导体研究所研制生产了高频低噪声微波管、氧注入隔离 GaAs 微波管和线性电路。1978 年后，张通和、来永春等对“大规模集成电路离子注入浅结工艺和电参数控制”进行研究。他们测定了浅结参数、电学参数，掌握了高浓度浅结制备的基本规律；同时首次在我国开展了离子注入白光快速退火技术的研究，研究了注入层缺陷和控制技术；建立了一套计算机模拟和分析方法。林振全研究组采用离子注入工艺制备磷化镓-氮化镓固溶体，并对其光电性质进行了研究，在化合物半导体发光材料中深能级等方面的研究中取得不少成果。

(7) 电介质物理学

50 年代后期，中国科学院开始进行电介质物理及其应用的研究。物理所曾开展二元系光敏驻极体静电成像研究。他们将光敏半导体氧化锌和有机电介质复合形成高暗阻光导体系，使光电响应的谱区由紫外扩展至整个

可见光，这种体系还存在显著的界面极化现象。他们还研制出一种带电的、可维持半年以上处于悬浮状态的能使上述体系潜相显示的静电显示液，并用电泳原理对这种悬浮机理做了解释。物理所、电子学所开展过以钛酸钡为基础或与钛酸钡类似的、用于贮能和换能的铁电体的研究。

60年代初期，中科院声学所、物理所几乎同时研制出当时国际上尚未公开的不同类型的锆钛酸铅（PZT）铁电压电体，分别用作水声、超声的换能器、传感器，或用于滤波器。

80年代初期，中科院物理所与冶金部北京地质研究所合作，用介电谱研究各地的赤铁矿（富铁矿，分子式为 Fe_2O_3 ），提出了凡富铁矿都具大介电常数这一概念。他们还对赤铁矿的极化和弛豫做了定性解释，为富铁矿的有效探测提供了理论和实验根据。声学所在对几种压电材料（如PZT-5，PZT-4，钛酸铅-741，钛酸铅-831）进行极化处理时，发现有超声发射现象，声发射与压电材料的种类及掺杂性质有关；还发现不易老化的压电材料声发射强度也大。他们把声发射现象归于电畴的转动。声学所还采用迭代法，从严格的理论公式出发，编制出计算压电陶瓷的弹性复系数矩阵的计算机程序，可算出压电陶瓷的全部机电性能系数的实部和虚部。

(8) 低温物理学

中国的低温物理事业，是中华人民共和国成立初期在钱三强、陆学善、彭桓武等大力支持下依靠自建的低温实验条件发展起来的。中科院物理所是我国低温技术与低温物理研究的发源地。1953年，在洪朝生领导下，在中科院应用物理所筹建低温实验室。1956年建成氢液化系统，1959年氢液化的实现为低温物理实验提供了重要的条件。50年代末60年代初，中国的低温物理实验基本上是在中科院物理所进行的。60年代初期，中科院物理所组建了低温技术研究组，它的一个新目标就是研制氦膨胀机。1960年，他们研制成功采用活塞膨胀机预冷的氢液化器，去掉了液氢预冷。1962年，周远对这种氦膨胀机的活塞-气缸密封结构做了根本改进，变传统的窄缝隙气体润滑低温密封为室温密封，大大降低了对加工精度的要求，解决了设备制造与保养的技术难题。1965年以来，这种新型氦膨胀机型液化器一直在进行小批量生产，使液氢的使用在中国达到一定程度的普及。1964年，物理所应用绝热去磁方法获得了10毫K的温度。

1957~1960年，中科院物理所管惟炎在苏联发现“反向卡皮查热阻”。他系统地研究了多种固体与超流氦的传热后，提出了固体表面非晶态层对声子失匹配有重要影响的新物理模型，受到国际学术界的重视。1960年他回国后从事超导强磁体材料和第二类超导体机制的研究。他和张其瑞、曹效文合作，用实验的方法研究了铅-铋合金的脱溶过程对超导体临界特性的影响。结果表明，强磁场超导体的高临界场与大电流密度有完全不同的起源，临界场主要取决于合金材料中电子的平均自由程，而较高的临界电流则来源于脱溶产生的第二相和位错等缺陷。这一结果对我国随后进行的实用超导材料的研制，在工艺上有着重要的指导意义。1980年，管惟炎在法国研究急冷铝-硅合金的超导电性时，发现了反常的磁阻效应，即在某一磁场区间的超导转变中，与正常情况相反，超导体的电阻会随着磁场的增大而减小。

1966年以前，中科院物理所主要的研究工作是，超导薄膜的物理研究及超导计算机元件的开发。该项研究推动了真空镀膜技术的发展，并为开

展超导量子干涉器件的研究提供了一定的技术储备。在管惟炎带领下，物理所与高等院校及冶金部合作，在上临界场值与合金化、磁通钉扎、磁通冻结、分凝的关联以及 NbTi/Nb-Sn 材料工艺等方面获得若干研究成果。在理论上，对于含有顺磁杂质超导体的能隙结构（束缚态）问题的研究，当时在国际上是领先的。

从 1976 年底起，中科院物理所低温物理研究工作的内容除超导薄膜物理、超导材料物理、磁体物理外，发展了超导器件物理、高临界参数超导电性非平衡超导电性在一维系统物理、非晶态物理、自旋玻璃等方面的研究，并取得了较好的成绩，如通过高温高压下非晶合金的结构变态研究，获得的 A 型 Nb-Si 的超导转变温度 19K 领先于国际上其它实验室，较早地研制成功超导转变温度为 23K 的 A 型 Nb-Ge 薄膜。约瑟夫逊效应器件及其物理的研究也是物理所重点开展的一项研究工作。早在 70 年代，物理所就率先开展了铌微桥约瑟夫逊器件的制备和物理研究，并于 1974 年利用这种器件制成直流超导量子干涉器件。后来，他们又制成铌超导隧道结，它既可以用来制造超导量子干涉器件，又可以用于电压基准计量。80 年代以来，物理所研制成的全铌隧道结超导量子器件已经达到实用水平。北京大学孟小凡、李嘉璋、吴修文等研制成功超导微桥射频超导量子干涉器件，与中国计量科学院乔蔚川等研制的射频超导量子干涉仪电子线路相配合。

1977 年，根据自然科学发展规划，中国科学院将物理所低温技术研究部分与中国科学院气体厂合并，组建成一个低温技术专门研究机构。经洪朝生等积极策划，于 1980 年正式组建成中国科学院低温技术实验中心。这个中心为北京等地区的 20 多个单位提供液氮，并为其他地区的单位提供液氮实验条件。他们配合国内准备中子散射实验条件的任务，研制成功冷中子源使用的氦-液氢系统。此外，他们还一直在研究制冷方法，研制新的低温设备，建立了作为国家临时低温温度标准的 0.5~30K 标准点系统，进行低温材料性能的测试工作，进行有关低温物理的研究。

经管惟炎、赵忠贤的倡议，中国的高临界温度超导体的研究从 1976 年开始启动，物理所在非常规超导体和亚稳相方面都取得了研究成果。

瑞士科学家贝诺兹 (J.G. Bednorz) 和米勒 (K.A. Miller) 曾指出，钡、镧、铜和氧四元氧化物超导体，可能是一种超导转变温度高于 30K 的新型超导材料。物理所赵忠贤等受此启发，于 1986 年 9 月开始了高温多相氧化物超导体的研究。他们通过对贝诺兹-米勒论文的分析，推断出在铜三价和铜二价 (Cu^{3+} 和 Cu^{2+}) 的离子之间巡游电子的运动有可能使两种离子交替变化。由于 Cu^{2+} 具有扬-泰勒效应，这将导致交替的晶格畸变，造成很强的点阵不稳定性而又不会发生结构相变，从而有可能导致某些氧化物超导体转变温度的提高。在日本、美国宣布获得转变温度约 40K 的超导体后，同年 12 月下旬，他们在钡(镧)镧铜氧系统中首次获得 48.3K 和 48.6K 转变温度、40K 零电阻温度的超导体，并观察到 70K 的超导迹象。物理所李林领导的小组用磁控溅射法制备出 T_c 为 25K 到 27K 的 LaSrBaO 薄膜，并有明显的 Meissner 效应。

1987 年 2 月 16 日，美国科学家朱经武宣布发现了转变温度为 98K 的氧化物超导体。2 月 19 日，物理所赵忠贤和陈立泉等又独立地在钇钡铜氧多相氧化物体系中发现了起始转变温度在 100K 以上，超导中点转变温度为 92.8K，零电阻温度为 78.2K，在 93K 时出现抗磁性的超导样品，且重复性

能很好。2月24日,在美国之前,中国科学院物理所首先公布了钇钡铜氧(YBaCuO)超导体材料的组成。此后,国内外很多实验室,包括中国科学院的许多单位,如中国科技大学、化学所、冶金所、金属所、中国科技大学研究生院、上海硅酸盐所、长春应用化学所、合肥等离子体物理所、固体物理所、电子学所等都制成了这种材料。赵忠贤等又用多种稀土元素替代Y获得十几种液氮温区超导体,最早的一批结果在1987年3月27日发表。该小组在国际上最早用持续电流方法确定YBaCuO超导态电阻率上限为 2×10^{-4} Ω/cm;在国际上首先确定(123)相YBaCuO在实验误差 ± 0.2 K范围内无铜的同位素效应;用Hall效应确定YBaCuO超导体载流子为空穴型;用点接触隧道证明YBaCuO超导体存在能隙;确定了通常工艺制备的YBaCuO晶粒超导性存在壳层结构;烧结材料存在合作弱连行为;证明在微波场中YBaCuO的约瑟夫结感应台阶高度服从贝塞尔函数,与通常超导体相同;确定了YBaCuO超导相的结构为正交(123)结构;用半满哈伯特模型得出在某些参数范围对反铁磁-超导共存能量有利。此项研究成果为我国高温超导研究争得了世界上的领先地位。1988年1月下旬至2月底,继日本、美国之后,物理所又先后制出了无稀土氧化物铋锶钙铜氧和铈钡钙铜氧超导体。这两个体系超导体的转变温度均突破了液氮温度,其中铈系氧化物的零电阻温度已达到120K。他们还最早在铋系氧化物中确定了无公度结构。1987~1989年,北京大学甘子钊、尹道乐等也以Y替换La,独立得到 $T_c=91$ K的YBaCuO高温超导体。

1988年,中科院物理所李林、李宏成、赵伯儒等随之采用直流磁控溅射原位外延法制备ReBaCuO(Re=Y、Gd,可简称为YBCO和GBCO)高温超导薄膜。他们采用单个化合物靶,在Ar气中溅射,使薄膜中含有所需的4种元素的原子。他们制备的YBCO、GBCO高温超导薄膜零电阻临界温度 T_{co} 达到90K以上;1988年底获得的77K临界电流密度达到 1.34×10^6 A/cm²。以 $T_{co} > 90$ K为标准时,小批量连续生产制备薄膜的优质品率接近100%,所制备的薄膜为方向性很好的外延薄膜。此后Y(Gd)BaCuO薄膜的超导性能一直处于世界领先地位,临界电流密度达 7.2×10^6 A/cm²,并且重复性很好。1988年盛正直等在TlBaCuO体系中发现 T_c 达125K的超导体。中国科技大学通过Bi系掺Rb和Sb观察到了 $T_c=130$ K的超导性。清华大学何豫生等用超声衰减为手段测量了高 T_c 超导体晶格不稳定性,最先发表了现有几种超导体随温度变化的德拜温度曲线。

(9) 高压物理学

1949年以前,中国仅有叶企孙与汤定元先后在国外从事过高压研究。1956年,高压物理被列入中国十二年科技发展远景规划。按照这个规划,中科院物理所何寿安于1958年首先着手建立在进行人造金刚石合成实验所需的高温高压技术和高压物性研究中比较通用的高压装置,并领导组建了国内第一个高压物理实验室。接着,中科院地质所在章元龙领导下也着手准备高压生长单晶金刚石所必需的高压条件。此后,地球物理所、地球化学所、力学所、中国科技大学、半导体所等单位结合各自专业,也相继开展了高压研究工作。上海硅酸盐所在并入章元龙领导的高压生长金刚石研究组后,也开始了高压研究工作。从1958年到60年代初,是中国高压物理研究的首创时期。这一时期,中国科学院的高压研究活动主要是建立高压实验技术。1962年前后,物理所和地质所为建立人造金刚石的高压合

成实验条件，分别独立设计出单向加载四对 45° 斜滑面式立方体高温高压装置。70 年代后期，中科院地球化学所与第六砂轮厂协作，研制成功单压力源三千吨级同类型装置。中科院物理所也根据他们独立设计的高压容器原理，建成了同一吨位的钢丝缠绕式大型高温高压装置。

60 年代初期，结合核武器研制的需要，中科院物理所进行了高压下凝聚态体积变化规律的测试和高压下凝聚态等温状态方程的研究，不仅发展了活塞型 5 万大气压静压高压测试装置和 p (压力) - V (体积) 关系测定技术，还于 1967 年为高压下的 p - V 测定建成了中国第一台发射体的膛速度为每秒 4.2 千米的双级轻气炮。此外，该所的研究人员还提出了一个新的改进型的状态方程，在较宽的压力范围内弥补了穆奈亨 (Mumaghan) 状态方程的不足。凝聚态状态方程研究的另一个方面是超声研究，为了开展这一方向的研究，物理所建立了中国的第一个高压超声实验室，并提供了凝聚态格临乃森常数的测量数据。1979 年，物理所在高压下固体相平衡的研究方面，开展了有关金属氢与固态分子氢相平衡的理论研究，指出了金属氢存在的压力下限，以及它的可能的超导转变温度 (约 83K)；在碘酸锂的高压相变研究中，发现了两个新的高压相，并定出了它的 p - T 相图。1983 年，物理所首先建成高压下 X 射线衍射实验室和喇曼散射实验室。1980 年以后，物理所还新开展了高压下非晶合金的结构变态、结构弛豫和亚稳相形成规律的研究，已得到若干很有意义的新结果，这方面的研究很可能会进一步发展成为探索新材料的另一个重要的应用基础研究新领域。中科院力学所用电子计算机模拟法从理论上研究动态高压固体状态方程，计算出简单金属和贵金属的状态方程与雨贡纽 (Hugoniot) 曲线，得到了与实验符合得较好的结果。

1963 年，中科院物理所用静态高压法合成了磨料级人造金刚石。1965 年又合成了立方氮化硼，随后实现了动态高压法合成。中科院力学所和物理所在 1970 年以后研制成功多晶金刚石块，推动了人造金刚石在地质勘探、矿山开采、石油钻头上的应用。80 年代，中科院物理所在高温高压下直接由石墨生长的多晶金刚石和大颗粒烧结多晶金刚石研究方面，均达到国内最高水平，并应用于人造金刚石拉丝模工业生产。上海硅酸盐所章元龙等在 1970 ~ 1983 年期间，开展了单晶金刚石的生长及其生长机制的研究，于 1980 年研制成 2 ~ 4 毫米大小的人造金刚石单晶体。地球化学所也进行了人造金刚石合成研究。上海硅酸盐所和地球化学所还研制了 α 型金刚石分选仪。自 70 年代以来，中科院地质所、地球物理所等，根据各自领域的高压研究的需要，分别建立起以金刚石平面对顶钻高压装置、大型高压三轴仪和三千吨六压钻型高压装置为主要设备的地学高温高压实验室，并利用这些设备分别进行地球构造、构造运动、构造应力场的模拟实验，研究了地球演化过程中的成岩成矿、矿物物理及其稳定性、相变和其他物性问题。在地幔矿物的合成、滑石-辉石的相平衡曲线、合成硼铁矿的穆斯堡尔谱，以及玄武岩、榴辉岩和橄辉岩的高压熔化等课题的研究中，已发表了一些结果。

1989 年，中科院物理所、中国科技大学等单位先后建立了 100GPa 以上的金刚石对顶砧高压实验技术装置。1991 ~ 1992 年，中科院物理所建立了我国第一套高压下同步辐射能量色散 X 射线衍射实验系统。90 年代开始开展的工作有：兆巴高压下绝缘体、半导体金属化转变，压致非晶化相变，

同步辐射高压 X 射线衍射，高压喇曼散射，光吸收和反射等的研究。此外，从液态合金高压淬火直接制取三维块状非晶和纳米晶，把高压条件和技术应用到氧化物高温超导体的研究中，都取得了进展。

(10) 磁性物理学

50 年代以来，磁学研究获得了很大的进展。中科院物理所、电子学所、金属所、中国科技大学，以及北京大学、北京科技大学、钢铁研究总院、电子工业部等研究单位在研究、发展方面都做出了重要的贡献。

物理所磁学研究室是施汝为和潘孝硕共同创建的。他们共同对 AlNiCo 的磁性开展了研究。潘孝硕主持了电子计算机磁膜存储器研究，对 Fe-Ni 合金和坡莫合金磁膜的磁性、热处理和磁化机制等进行了系统的研究；并且指导了对非晶态、磁性合金、自旋玻璃的磁性及相关物理问题的研究，提出了许多有创新性的见解。

50 年代后期，李荫远在中科院物理所首次提出了静磁模和磁声模耦合产生参量振荡的理论，并系统地研究了铁磁体中杂质对自旋波的影响和形成自旋波的局域模问题。

钢铁研究总院戴礼智是工业界磁性材料研究的先驱者，早期在美国研究汞合金的磁性。50 年代他为建立重工业部钢铁研究所（今钢铁研究总院）做出了贡献。他的主要研究工作是关于钨钢永磁体和铁钴软磁体等工业用磁性材料。

70 年代末以来，北京大学杨应昌、何文望、陈海英等关于稀土过渡金属间化合物的结构与磁性的研究取得重要进展。杨应昌、程本培、孔麟成等对新型稀土永磁材料（ $\text{RC}_2\text{Fe}_2\text{B}$ ，R 表示稀土元素）的结构和内禀磁性进行了系统的探索研究。他们最早合成富铁三元稀土铁化合物，首先把氮（或碳）加入不同类型的稀土-铁金属化合物，为开辟稀土-铁-氮（或碳）间隙材料做了开创工作。在理论方面，钟文定等对稀土-过渡族永磁合金的反磁化机制做了系统研究和总结，他们在研究低温特异磁性时，发现 $\text{R}(\text{Fe}, \text{Ga})_2$ 类化合物中存在磁性的量子宏观效应。

1984 年，中科院物理所王震西和电子学所曹永景、姚宇良等在国内首先研制成功“低纯度钕稀土铁硼永磁材料”。他们在多年从事稀土合金及非晶材料的磁性和钕钴类第一、第二代稀土永磁合金的研究基础上，自 1983 年底共同研究国际上当年首次宣布的第三代稀土永磁材料。他们改进了部分工艺，探索出一套工艺简便、具有自己特色的生产新路子，获得了优异的磁性能。为了降低成本，提高永磁合金的实用价值，他们选用了低纯度钕稀土-铁合金为原料，研制成功了低纯度钕稀土铁硼永磁合金，磁性能和其他物理性能均达到用高纯度金属钕研制的钕铁硼永磁合金的先进水平。他们还进一步完善了有特色的工艺技术，找到了一条用国产廉价低纯度钕稀土铁合金取代高纯度钕生产第三代稀土永磁材料的新途径。

非晶磁性材料是 1970 年前后发展起来的新型磁性材料。中科院物理所率先对 FeB 基做了系统的元素替代，找出内禀磁性、电型和热稳定的变化规律，对非晶态结构的近程序等做了有效的研究。接着又对 FeZr 系也做了基础研究，并对 Fe_2B 低钕亚稳相的永磁性做了开创性的探索。钢铁研究总院研制成功可规模生产的大型非晶态金属制备设备。北京大学的戴道生、童莉泰、方瑞宜等在“非晶态磁性合金的磁性研究”中，对非晶态 Fe、Co 和稀土元素的合金磁性、结构和稳定性进行了系统的探索，为其薄膜生

产提供了物理依据，戴道生、方瑞宜、彭初兵等对非晶态稀土-过渡金属合金薄膜的磁性和电性的研究，为非共线磁结构、低温磁性反常以及变价的影响等方面的研究提供了理论依据。

在磁学理论方面，中科院物理所蒲富恪、王鼎盛利用分歧理论方法处理非均匀磁体，由平均场近似得到非线性微分方程，计算出居里点和略低于居里点的磁化强度空间分布，提出了描写非均匀磁体的余弦模型。蒲富恪等还运用量子力学中角动量的代数方法，导出了稀土金属的 s-f 电子间相互作用哈密顿量和 f 电子间 f-f 间接作用的有效哈密顿量的一般形式，并据此讨论了稀土金属铁磁相的磁晶各向异性。他们还从理论上研究了具有 4 次幂交换作用的海森堡 (Heisenberg) 铁磁体，得到了包括动力学和运动学相互作用下的自旋波谱与自发磁化强度的依赖关系，严格证明了各向同性高次幂海森堡模型在一维和二维情况下不出现长程序。蒲富恪等发展了一种讨论磁原胞与化学原胞不一致的磁性晶体自旋位形的热力学方法，并分析了钛酸盐型、二氯化铬、金红石型和二氟化物型结构的自旋位形，所得结果与中子衍射实验结果相一致。他们还求得了经典铁磁链的朗道-里弗施茨 (Landau-Lifshitz) 的多孤子解和其渐近行为以及相位和质心移位的公式；研究了交换作用耦合的有限长铁磁和反铁磁链系统的自旋波谱及其在微波场中的激发强度；讨论了具有反铁磁氧化膜的铁磁薄膜的自旋波共振，所得结果与实验值相符。物理所沈觉连利用空间群表示论和热力学势极小条件，建立了一个讨论磁结构的新方法，并分析了镧系 (稀土) 金属的磁结构，所得结果与中子衍射实验相符。

物理所李荫远等研究了简单立方铁磁体中由于磁性杂质的存在而形成的局域自旋波，指出其空间对称有 3 种模式；指出铁氧体微波激发参量振荡的耦合关系存在磁场驱动和磁化驱动两种激发机制，并求出了这两种激发的静磁函数完全解，以及空间均匀和不均匀磁场激发对静磁模的选择定则。李荫远还采用磁弹耦合运动方程和经典场论方法，求得弹性振荡和磁振荡的耦合方程，推导出磁声参量振荡的选择定则。

6. 相对论、引力理论和量子场论

在本世纪 50 年代，中国的理论物理研究主要集中于对国防建设有直接意义的原子核理论以及基本粒子理论等方面。1978 年，中国科学院建立了理论物理研究所，从此开始有计划地开展理论物理各个方面的研究工作。

1981 ~ 1983 年，中国科学院理论物理所郭汉英、陆启铿等对 70 年代中由 H.D. Wahlquist 和 F.B. Estabrook (W.E) 建立的“非线性演化方程的延拓结构”进行考察和研究，抓住 W.E 方法中所缺乏的协变性问题，运用联络论的非线性实现的理论工具，提出了协变延拓结构理论，从而把 W.E 的方法协变化。在此基础上讨论了一系列非线性系统如：kdv 方程、Mkdv 方程、S-G 方程、Emst 方程等的协变延拓结构，并且得到了 Ernst 方程的 N 重多孤子解和带电的 Emst 方程的 N 重多孤子解。

80 年代后期，北京师范大学梁灿彬等在奇异性的边界理论方面做了较全面的研究，发现了这一理论的缺陷。刘辽研究小组在课题“黑洞奇点及宇宙论”的研究中，提出了研究黑洞反作用的新的热力学方法。

1979 年，周培源从他一直认为在广义相对论引力论中的坐标是有物理意义的思想出发，把严格的谐和条件作为一个物理条件引入引力论中。他与同事一起研究了无限平面、无限长杆、回绕着无限长杆轴做匀速转动的

稳态解和严格的平面波解。80年代后期，周培源的学生李永贵进行与地面平行和与地面垂直的两种光速的比较实验。对于静态球对称引力场，根据史瓦西解，与地面成垂直和与地面平行的两种光速的一级近似之差与光速 c 的比值 ($\Delta c/c$) 为 7×10^{-10} ；而根据郎曲斯解，在同一级近似下，这一比值为零。李永贵的初步实验结果是，在准确度达到 10^{-10} 时，这两种光速是相等的，证明了郎曲斯解符合静态球对称引力场的客观实际。这个实验仍在继续，旨在取得更高一级的精确度的实验结果。

1987年，周培源和他的博士研究生黄超光合作，把谐和条件引用到宇宙论中。这与用坐标变换法解得的结果有所不同。对于静态的、有物质的爱因斯坦宇宙和无物质的德·席特宇宙，用坐标变换法解的结果都是有限的；而在引进了谐和条件之后，爱因斯坦宇宙仍是有限的，但德·席特宇宙则是无限的。他们还用引力场中的电磁理论来计算宇宙中后移的星系所辐射出的光的强度，以此来定出离我们的银河系的距离。由此推导出新的红移关系是与该星系的质量有关。

量子场论作为研究微观物质世界的基本理论，它的研究进展将对物理学所有分支学科的发展起到重要的推动作用。因此，量子场论成为中国理论物理学家的重要研究课题。40年代末，国际上出现了克服量子场论研究中发散困难的重整化方法，张宗燧正致力于理论的数学形式方面的研究。他扩充了外斯(Weiss)理论中的场方程，使之成为决定空间性曲面上的波函数随曲面的任意变化而变化的方程；并且利用与哈密顿-雅可比方程的比较，证明了这一方程即使在含有高阶微商时也是可积的。这就在实际上证明了对易关系的相对论不变性，从而使相互作用表象理论得到更为普遍的基础。1958年，张宗燧发表了《含有高次微商的量子理论》的论文。他将两种含有高阶微商的量子场论进行了比较，其中一种是将场方程正则化，再进行量子化；另一种是将场方程分为许多满足二次方程的场的线性组合。研究结果表明，无论就对易关系或就总能量来说，这两种理论是相同的，这就证明了含有高阶微商的量子场论的各种理论形式将遇到同样的困难。

洗鼎昌从70年代开始对经典规范场理论进行了系统研究，引进了曲面上的标架、联络与规范势对应的方法及同步变换的概念，得到了一系列已知的以及未曾得到过的非阿贝尔磁单极解和类粒子解。80年代，他提出并发展了一种在格点规范理论中能有效地逐步提高近似精度的解析方法，指出了规范不变是Wilson圈图所遵从的动力学方程在解析分析中的重要作用。这种方法的有效性已为国际上许多大型计算机进行的数值计算结果所证实，并至今被广泛引用和进一步发展。

戴元本、吴咏时等研究了电磁形状因子以及QCD的红外行为。何祚麻和黄涛进一步推广了哈格(Haag)-西岛(Nishijima)-钦末曼(Zimmermann)所发展的束缚态场论，建立了一个新的束缚态场论的体系，并系统地研究了这一束缚态场论的微扰展开理论的规范不变问题及红外和紫外发散的重整问题等。1976~1986年，中国科学院理论物理所郭汉英、陈时等进行了“规范场的主纤维丛表达与Kaluza-Klein理论”的研究。他们证明了主丛 $P(S, U)$ ($D=2eg$ 为整数) 在适当度规后成为 $H^1(S/Z)$ 丛，并以SU规范场为例推广非阿贝尔规范场的拓扑分类和规范势；指出第二阵类可用来表征 S 的SU整体规范场的拓扑分类，并证明适当

度规可使主丛 $P(S, SU)$ 成为 H 丛 S 相应的规范势；还指出 H 丛 S/Z 具有保持丛结构的 $U(SU) \times U$ 不变性，其中 SU 生成元给出磁单极周围空间转动的角动量算子，它自然地包含了磁单极场中带电粒子角动量算子的附加项。郭汉英等用纤维丛理论处理了破缺规范理论中子群的磁单极问题，导出了存在磁单极时电磁势的一般表达式。陈时、安琪讨论了五维 Kaluza-Klein 真空的稳定性问题，首次得到了五维 K-K 真空不稳定的结果。

中国原子能科学院马中骥求得了 $SU(N)$ 球对称势的一般形式，得到了 $SU(S)$ 大统一理论中的全空间解析的磁单极解，并研究拓扑背景场中费米子的运动，解出费米子在磁单极场中和在双子场中的散射态和束缚态。

1982~1988年，周光召、侯伯宇等进行了“量子场论大范围性质的研究”。他们深入分析了有效作用“反常”项的形式、性质和拓扑起源，在国际上首先得到规范不变有效作用“反常”项的正确形式，探讨了它的存在条件，独立地发现了 $2n$ 维空间的非阿贝尔反常、 $2n+1$ 维上 Coch-Simons (C-S) 示性类与 $2n+2$ 维阿贝尔反常之间的深刻联系，提供了 $2n$ 维非阿贝尔反常的整体形式；进而推广了 C-S 第二示类的概念和著名的示性类超度公式，首先提出了广义 C-S 示性类，得到了超度公式的一般形式；并据此进行了规范群的上同调分析，指出了规范群上同调与 Cech-deRham 上同调的关系；分析了各级上闭链的性质及其物理意义，发现了第三上闭链的物理应用，讨论了广义 C-S 特征类与指标定理的关系。

1986~1990年，中国科学院理论物理所黄朝商、朱重远等从事“弦理论若干特征的研究”，证明了对含标量场的玻色弦系统，从可重整化性、重参数化不变性、庞加莱不变性及负模态与物理态退耦的合理要求出发，不需用共形反常消除条件，即可自然地导致刘维型作用量，同时导出有边界时作用量的一般形式；用引进新的矢量-矢量场的方法构造了几种在经典意义上与普通弦作用量等价的玻色及超弦协变作用量，为建立协变弦量子化理论提供了新的可能性。他们首先提出研究有扭边界条件的费米弦即扭超弦模型，发现此时对于某些非阿贝尔群可以有零质量费米子，为现实弦理论提供了一种新的可能性；并用扭仿射代数证明了扭玻色弦的单图模不变性。Bowick 和 Rajeev 在用几何方法研究玻色弦理论及其量子化时说明了利用 Diffs/s 流形讨论曲率可以得到玻色弦的临界维数。黄朝商、朱重远等将其推广到超对称及有相互作用时的情形，讨论了 $\text{Super Diffs}/s$ 及 $\text{SuperDiffs}/\text{Supers}$ ，得到了超弦的临界维数；在讨论与标量场的作用时，除得到临界维数外，还首先得到了快子满足的条件。他们还进一步讨论了 Grassmannian 的曲率，把 Diffs/s 、 $\text{SuperDiffs}/s$ 及玻色弦都嵌到 Grassmannian 中，得到了一系列弦理论的临界维数条件。

7. 原子核物理学

中华人民共和国建立以前，尽管有不少中国物理学工作者在国外从事原子核物理学的研究工作，取得了许多有价值的成果，对原子核物理学的发展做出了出色的贡献。但是在国内，由于当时的社会条件，无法形成国内的研究队伍，只有少数人在极端艰难的条件下，利用少量放射源开展了一些零星的研究课题。新中国成立后，由于国家领导人的重视，老一辈物

理学家吴有训、钱三强、赵忠尧、王淦昌、彭桓武、何泽慧等人的积极努力,于1950年在北京成立了中国第一个原子核物理研究机构——近代物理研究所。从此,中国的原子核物理研究走上了蓬勃发展 391 的道路。

1956~1957年,在彭桓武领导下,邓稼先与何祚麻、徐建铭、于敏等合作,先后发表了《衰变的角关联》、《辐射损失对加速器中自由振动的影响》、《轻原子核的变形》等论文;邓稼先推导出氦核光致蜕变的截面及角分布公式,朱洪元探讨了跃迁以及内转换的理论等,为中国核物理研究做了开拓性的工作。1960年,中国决心自力更生制造原子弹,并进行爆炸试验,以打破美、苏等国的核垄断。中国核物理学家参与了原子弹和氢弹以及核武器的研制工作,在这过程中解决了许多理论问题和一系列关键技术问题。

60年代中期,中国科学院近代物理研究所在杨澄中组织、指导下,开展了有关低能氦-氦、氦-氦反应截面测量等重要实验,给出测量中性化束流所用量热器的基本热力学方程,引入平衡时间、弛豫时间等基本概念;给出用小回旋型质谱计测量工作气体动态纯度的数据处理公式,指导了纯度的测量。在阈能至14兆电子伏特 $\text{Li}(n,d)\alpha$ 和 $\text{Li}(n,t)\alpha$ 反应中,杨澄中推导了活化法和球壳法的理论公式,给出了适用于轻同位素的球壳透射实验的理论公式,扩展了球壳透射法的应用范围。70年代以来,杨澄中主持进行了大量的重离子核反应研究,取得了一批研究成果;对实验结果进行综合分析,肯定了重离子反应中的 Be 转移反应机制和复合核蒸发 α 粒子过程。

在核反应机制研究方面,中国科学院原子能所开展了中间共振、预平衡发射、准自由散射、大角反常散射、三核子转移反应、在束谱学和核裂变动力学等研究。孙汉城等在14~18兆电子伏中子与 Li 、 Li 的三体反应研究中,观察到在低入射能条件下也存在准自由反应现象;随后在氦核、 α 粒子与 Li 、 Li 、 Be 、 C 核的反应研究中,孙祖训、孙汉城等肯定了在较低能量下氦和 α 粒子与 Li 、 Li 、 Be 、 C 核作用时,存在准自由散射与准自由反应现象,并对动量分布宽度、结团几率峰位移动及 α - α 离壳效应等问题做了系统研究,在三核子转移反应和大角反常散射研究中,孙祖训等弄清了只用角动量相关势就可同时解释 α 大角反常散射和 (α,p) 反应;用有限程微观 DWBA 分析表明,转移中有双中子对角动量耦合为2的贡献;在奇 A 核 (α,p) 反应中,转移角动量往往只取单值,肯定了其作为核谱学工具的价值;用角动量和宇称相关势解释了 α 对 ^{24}Mg 的大角反常散射的同位素效应,将 Regge 极点模型对 $1p$ 壳核的 α 大角反常散射的解释推广到了更轻的核—— Be 。姜承烈等在低能氦引起的轻核反应研究中,系统地研究了中间结构现象,对 $d+^{12}\text{C}$ 、 $d+^{20}\text{Mg}$ 、 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 等系统,分别找到了一些新的中间共振,指出 $d+^{27}\text{Al}$ 、 $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$ 、 $^{12}\text{C}+^{19}\text{F}$ 在此区域中间结构对反应贡献很小;并把这些现象与激发能等联系起来,找出了规律性。他们还在 (α,p) 反应预平衡发射研究中,看到低至18兆电子伏的 α 入射情况下,仍有预平衡发射,发现了预平衡发射中存在对效应、奇偶效应,预言还存在壳效应,并看到跃迁矩阵元参数 K 值中也有这些效应。

中子和质子都是费密子,通常称它们为核子。处理多核子组成的原子

核的理论，被称之为核多体理论。吉林大学吴式枢在核多体理论方面进行了系统的研究。核内核子在平均场下的独立运动与由剩余作用引起的核子间的关联是相互依存的一对矛盾。1962~1966年，吴式枢提出可由一变分法推导出处理核基态关联效应的无规和高阶无规位相近似（RPA-HRPA）方程，并可自然地给出一种使RPA和HRPA方程具有厄米性的途径；首次应用格林函数方法导出了HRPA的久期方程，对它进行了费曼图解分析；还提出了“推广的组态混合法”，给出了用它求解实际问题的途径。由于核力的短程强排斥特性，应用现实核力处理核问题时需要采用G矩阵。70年代，吴式枢提出了一种整体计算无穷G矩阵费曼图级数中所含全部G矩阵元的偏离能壳性的方法；随后又提出了一种计算单粒传播子重整化的新途径，给出了在重整化Brueckner-Hartree-Fock理论中对G矩阵进行自洽处理的方法。与以往同类工作相比，吴式枢等考虑的因素更全面，处理方法更简洁。

格林函数方法是处理量子多体问题的有力工具，吴式枢从格林函数的运动方程出发，提出了一个推导零温和有限温双时格林函数的不可约顶角算符的系统方法，并给出了它的严格表达式。吴式枢等还提出了推导在模型空间的格林函数的等效积分方程方法，并给出了计算等效顶角算符的公式。通过求解格林函数所满足的线性积分方程可自动实现对由不可约顶角算符产生的各级费曼图的求和，而吴式枢还证明了若引进非线性积分方程，由它的迭代解不仅可以自动产生一个由不重复的不可约顶角构成的无穷级数，而且还可以同时求得由该无穷多个不可约顶角产生的各级费曼图之和。吴式枢利用格林函数方法导出了能严格顾及推迟效应的Bethe-Salpeter（BS）方程的三维约化形式，给出了易于用费曼图规则进行计算的严格表达式，为相对论方程的实际应用提供了一个好的理论框架。在三维相对论性两体波动方程的基础上，吴式枢进一步导出了能同时顾及直接项、交换项以及推迟效应的相对论RPA方程以及新的基态能量计算公式。由这些理论框架出发，吴式枢等在核物质的饱和性质、轻核低激发态以及强子结构的研究上都取得了一些有意义的结果。

在中子和质子多体体系的层次上研究核的结构及运动规律是原子核物理学的前沿领域之一，其中一个基本的研究方向是研究原子核在激发能-角动量相图上不同区域核内的运动规律。70年代后期以来，中国原子能科学研究院丁大钊及其研究小组在这个方向上取得了一些极有价值的结果。他们在核的低激发、低角动量区用高分辨率Q3D磁谱仪测量质子非弹性散射；测量并分析了22MeV质子在Gd小角区非弹性散射的微分截面，显示了低能质子非弹性散射作为核结构研究的可能性。在核的高激发、低角动量区，丁大钊小组利用全吸收谱仪测量了若干核的快中子俘获谱，其定量结果可以与前人对重核俘获研究中间接分析的结果相印证，说明矮共振存在的普遍性。利用低能重离子熔合反应可产生高温转动核。在80年代中期，国外已发现高温转动核的形状与基态核的形状区别很大，进一步的研究希望了解形变随温度及角动量的演化。丁大钊小组利用多重性与GDR参数的关联分析，观察Ce这个天然不存在的缺中子同位素，实验结果表明：随着角动量的增加，变形参数在逐渐减小，明显地看到形状的演化。类似的实验及分析尚在进行中。

70年代末到80年代中期，北京大学杨立铭等开展了关于原子核集体

运动形态与核内新自由度的研究，建立了描述原子核集体运动与低激发态的微观理论。他们还开展了相互作用玻色子模型的微观理论研究，建立了原子核相互作用玻色子模型的微观理论基础。这一系列研究成果具有多方面的特色：直接在费米子空间构成具有玻色子行为的费米子集团，使泡利原理得以严格遵守，避免了伪态的出现；提出了广义的算符化的 Bogoliubov 变换，保持了粒子数守恒，避免了假态的出现；在非简并多 j 壳空间，导出了关联对在多体态中的平均场，可自洽地求出这些关联对的结构，用于求任意多集团系的单个集团的平均场；提出了复合粒子母分数系数 (f.p.c)，由此将关联对混合成正交归一基矢，并定义模型空间；用模型空间中的矩阵元定义具有费米子结构的“玻色子”，显示了它与唯象理论中使用的理想玻色子的区别；将模型空间内的观察量玻色化，使微观理论比唯象理论给出更多的物理内容；微观理论既可玻色化，也可不进行玻色

395

化，因而此理论框架适用于原子核一切低激发集体态。中国原子能科学院陈永寿在原子核高自旋态的研究中，取得了突出的成就。当转动频率增加到一个临界值 ω_c 时，科里奥利力使一对处于高 j 轨道上的核子拆对，发生顺排，总顺排 I 因此突然增加。传统的以观察 I 跃增为基础的方法，在判断顺排核子的属性上常遇到困难。陈永寿等阐述了另一种方法，他们做了系统的推转壳模型 (CSM) 理论计算研究。结果表明，高自旋态 g 因子 ($g = \mu / I$ ， μ 为高自旋态磁矩) 随转动频率 ω 增加而变化，不仅取决于拆对核子顺排角动量的大小，而且更敏感地依赖于中子顺排与质子顺排的相互竞争。在 g 因子系统研究的基础上，陈永寿等发展了推广的推转模型磁偶极跃迁理论，从而为极高自旋和有限温度核态间磁偶极跃迁的微观描述建立了理论框架。陈永寿等还系统地研究了高 j 转动准粒子轨道的形变驱动效应。他认为，单粒子运动同集体运动的强烈相干，是原子核这类强相互作用微观多体体系的基本特点之一。在 80 年代初，陈永寿等提出了转动顺排高 j 轨道的几何形状的形象，用以说明“单粒子”、“准粒子”和“空穴”轨道的不同的三轴形变驱动效应。

连续谱学是新兴的学科，它以高速转动热核为研究对象。在这一领域，陈永寿等针对“连续区核态性质的统计性质”的传统观念，提出了转动核连续谱几率谱理论。该理论预言，转动热核谱中，在过去认为能量高于 1MeV 后的强度随 E 增加而指数下降的所谓“统计尾巴”的地方，实际上存在着高能磁偶极宽峰。不久，这一理论预言被几家实验所证实。高能磁偶极宽峰的形成机制中，转动热核中的壳效应并未消失，且有着重要作用；展示了发射高能磁偶极跃迁射线的非统计冷却过程的重要性，打破了认为转动热核退激过程是发射电偶极跃迁统计射线的统计冷却过程的旧观念；核子在转动热核中是进行一种有序轨道运动同无序统计运动相竞争的新型运动模式，而不是只做无序统计运动；由于磁偶极宽峰的中心能量同核形变相关，中心能量越高，形变越大，因此，高能磁偶极宽峰可以作为转动热核形变的探针。1986 年，实验上发现了第一例超形变核 Dy 。陈永寿等在深入分析超形变形成机制的基础上，及时地提出了最可几超形变核定性判据：满足费米能级处于单粒子能级分布的一个能穴处，并且处于一个高 j 壳层的底部条件的原子核为最可几超形变核。根据这一定性判据，他们得出了有几百个超形变核，

以及它们在元素周期表中的分布的理论结果。这一结果与国际上大规模数值计算结果相一致。他们还进一步提出了超形变核按同位素链形式存在的推论，与迄今实验结果一致。

80年代后期，北京大学曾谨言等也开展了“高自旋和超形变核态”项目的研究。这一研究从唯象和微观两方面深入研究了高自旋和超形变核态，从 Bohr 哈密顿量出发，导出了新的转动谱公式，远优于流行的 Harris 公式和 Bohr-Mottelson 公式；提出了确定超形变带自旋值的可靠方法，成功地确定了 $A \sim 190$ 区全部和 $A \sim 150$ 区大部分超形变带的自旋值；提出了处理对力和科里奥利力的粒子数守恒方法和组截断概念，克服了 BCS 方法不能处理堵塞效应的缺陷，解决了 30 多年来 BCS 理论的一大难题（即计算出的原子核转动惯量系统地比实验值大 10%~30%）；按照上述方法，再配合唯象分析，搞清楚了“全同带”的物理本质；应用上述方法还证明了在单 j 模型中不存在回弯的振荡现象，否定了 Mottelson 等的一个著名论断。

1988~1991 年，中国科学院理论物理所庆承瑞等完成了“双 β 衰变与双电荷交换反应的理论机制”研究项目。他们指出 2^-2^- 衰变与 $^-$ 核双电荷变换反应 (DCX) 这两个不同领域的核过程之间存在着内在联系，并严格地证明了双 β 衰变矩阵元和 DCX397 散射振幅之间具有一一对应的关系。这表明它们有相同的机制，但有不同的行为。他们还发展一种计算双 β 衰变的新方法——算子展开法，论证了在数学上欧拉求和是具有确定意义的，解决了前人在计算中所遇到的困难和问题，改善了实验与理论的符合趋向，并能比较完善地解释低能 DCX ($\sim 50\text{heV}$) 朝前的激发曲线的“反常”行为。

中国物理学家围绕如何实现受控热核聚变而开展了等离子体物理学的研究，并取得了一些进展。

1958 年，在王承书和孙湘等的带领下，中国科学院物理所和原子能所先后建造了能量为 10 焦耳级的小型直线 Z 收缩及角向收缩装置。用磁探针、高速转镜及光谱分析等手段，观测了等离子体收缩过程，并测量了相应的某些参数。1960 年，原子能所建造了一个小型 Pyrotron 型压缩磁镜装置，得到等离子体温度为 300 万度；并用微波干涉法测量了密度，观察到单极弧现象。

1964 年，王淦昌了解到有关激光研究的进展后，提出了用高功率激光打靶实现惯性约束核聚变的设想。这与前苏联科学家 . . 巴索夫的类似设想几乎是同时提出的。1969 年 10 月，物理所叶茂福等建成了 10 万焦耳级的角向收缩装置。在此装置上配置了多种诊断系统，包括磁探针、高速转镜、光谱仪、软 X 射线吸收比较测量装置及激光汤姆逊散射装置等。利用上述装置，全面测量了等离子体参数，并观测到了反向捕集磁场，及径向压缩速度，还观测到了 $m=2$ 的槽纹不稳定性。

1974 年，当时在北京物理所工作的霍裕平针对传统磁场设计中杂散场要求过苛的情况，分析了各种类型弱磁场对平衡的影响，并与扭曲模的分析相联系，提出了静态稳定性的概念，为同期出现的托卡马克实验结果所证实。所得结果，大大放宽了大部分磁场系统的设计精度要求。

1979 年以后，物理所蔡诗东等人与美国普林斯顿大学陈骝合作，将回旋动力论方程由低频推广到任意有限频率和相对论情况，为研究非均匀等离子体的性质提供了有力的工具。从 1982 年开始，他们又与美国得克萨斯

电荷共轭联合变核守恒下的正粒子和反粒子的总寿命相等，但在时间反演破坏时分枝比可以不相等的严格证明。1958年，朱洪元领导的研究小组从普适弱相互作用中的V-A理论出发，讨论了介子和超子的衰变过程，并探讨了 μ 介子在质子上的辐射俘获过程。他们发现了一个严格的选择定则，即当始态的 μ 介子和质子组成自旋为零的S态时， μ 的辐射俘获不会发生，只有当强作用的重整化效应存在时，才会发生 μ 的辐射俘获。1960年，朱洪元阐明了 μ 的辐射俘获不会发生的原因。他认为，在这个过程中，V-A理论经变换后起作用的是标量及赝标量，它们禁戒了辐射俘获过程在自旋为零的S态中发生。朱洪元于1959~1961年，也在联合所工作。他利用色散关系对介子之间及介子与核子之间的低能强相互作用进行了深入的研究，并与其合作者发现当时流行的角动量分波展开引入了很大的误差，指出其中隐含有发散困难。从而否定了1959年国际高能物理会议上提出的关于这个问题的研究方案，并推导出不含发散积分的 π - π 及 π -N低能散射方程。1965年，朱洪元首先将强子内部运动波函数及在动力学过程中强子内部运动波函数由于质心运动而引起的相对论性变换，以及相应于不同终态强子的波函数的重叠积分概念引入粒子物理的对称性研究中，并与胡宁、何祚庥、戴元本等合作建立了关于强子结构及强子过程的“层子模型”。参与这一研究工作的中国物理学家有30多人，“层子模型”理论的重要思想发表在题为《强相互作用粒子结构的相对论性模型》的论文中。这一理论突破了通常对称性理论中局限于静态力学量的研究，通过强子内部结构波函数及波函数的重叠积分，对一系列强子的电磁性质、电磁过程和弱作用过程做出统一的解释。这一批研究成果与当时国际上刚刚提出的夸克模型等研究工作一起，开辟了粒子物理理论中强子结构的研究领域。

1978~1988年，中国科学院理论物理研究所张肇西、黄朝商等进行了微扰QCD应用的研究，主要是应用微扰QCD研究以下几个方面的问题：(1)强子碰撞直接产生重夸克偶素，这是世界上第一次提出一种强子直接产生重夸克偶素的机制；(2)计算喷注行为从而理解强子化的粒子多重数；(3)利用非常普遍的归一化条件首先从理论上得到EMC效应小 x 区域行为的趋势，并为实验所证实；(4)应用重整化群和算子乘积展开方法，计算微扰QCD对 $m > m_c$ 非轻子衰变有效拉氏量的修正，计算形状因子、 J/ψ

和 I 介子衰变到光子加 I 介子等遍举过程；(5)计算高扭曲算子的反常量纲矩阵，并使之对角化。1982~1990年，张肇西、周邦融等进行了“关于夸克、轻子复合模型”的研究，讨论了把引力排除在外、但包含可能的全部不破缺的规范相互作用 $G \times SU(3) \times U(1)$ 的大统一，分析了 $G \times SU(4)$ 最小 $SU(7)$ 的统一方案，结果表明复合大统一方案在排除引力的情况下是难以实现的。这项研究还论证了夸克-轻子族间的规范成分主对称性可以存在，可以起源于夸克-轻子的复合性。基于超色 $G \times SU(4)$ 相互作用，显示构造了一个具有族规范 $SU(2)$ 对称的复合模型；还尝试构造具有族分立 Z 对称，但基于超色 $SU(3)$ 的超对称复合模型。首次提出利用复合模型中出现的高维色费米子的凝聚来替代Higgs机制的思想，取得一定的成功。

从1983年开始，朱伟、沈建国、邱锡钧、张肇西等研究核子内的夸克分布，指出EMC效应涉及到两个不同层次的夸克概念：当人们论述束缚态

核子内的夸克时，指的是组份夸克；而论述深度非弹性散射过程中的夸克则是指海夸克。他们提出核内组份夸克模型的初步理论，预言核内海夸克不可能增强。1986年，BCDMS国际协作组在第24届国际高能物理会议上公布的实验结果，支持了朱伟等人所提出的组份夸克模型。1990年5月，美国费米实验室E⁻国际协作组公布的实验结果证实，朱伟等人提出的核内组份夸克模型中所做出的预言是正确的，即核内海夸克没有增强。他们还进一步发展了胶子聚变机制和阴影-反阴影理论，提出了核内阴影与反阴影共存的观点。80年代中期，程开甲将他在40年代的研究工作进行延伸。他曾于1946年在《对自由粒子的狄拉克方程推导》一文中指出，仅在量子力学和相对论基础上，就可用正则运动方程推导狄拉克方程。通过进一步的研究，程开甲严格证明了只有自旋为零或(1/2)的粒子才能满足正则运动方程。据此认为只有质子和轻子、介子系统才是上述意义上的、真正的基本粒子，并形成八重态。上述理论研究成果可能对于基本粒子分类会产生影响，但进一步的证实还需要更长时间的检验。在1992年第26届高能物理大会上，北京谱仪(BES)的代表宣布了找到粒子的证据。粒子是1983年发现的，由于这是一个新粒子，国际高能物理学界都希望BES来确认它是否存在。经过一年多的认真分析，他们从900万个J/ψ衰变事例中找到了几十个粒子的证据；不但在衰变到K⁺K⁻、K⁺K⁰中看到，而且在道中也第一次看到信号。这表明BES是一个较好的探测器，有较好的动量分辨和时间分辨，同时也说明了BES的数据分析水平是很高的。

自本世纪初发现宇宙射线以来，许多新的粒子都是首先在宇宙射线研究中发现的。宇宙线以它具有高能量、低强度的特点，成为粒子物理学家竞相研究的对象。

50年代初，何泽慧研制作为宇宙射线测量器的核乳胶，使中国成为世界上少数几个能生产核乳胶的国家之一。1954年，在王淦昌、肖健的领导下，中国近代物理研究所在云南落雪山建造了中国第一个高山宇宙线实验室。到1957年，已搜集了700多个奇异粒子事例，并进行了全面分析。其中N⁺/N⁻()的比值随能量上升而有明显的变化，反映K⁺对粒子产生截面在刚过阈能时随能量上升而显著增大；给出了在铅核和铝核中产生衰变事例的P值(P为产生时的极化程度，为衰变时的不对称系数)，在两种核中产生粒子的P值的差别，说明衰变时宇称不守恒的存在。

1958~1965年，在张文裕的指导下，云南高山宇宙线实验室新设计制造了大云雾室。1972年，就在这套装置上发现了一个质量约为质子质量10倍的可能是重粒子的事例。1977年在西藏甘巴拉山5500米高度处建立了世界上最高的高山乳胶室。1980年，日本东京大学等7个单位与中国科学院高能物理研究所组成中日合作的甘巴拉山研究组，开展了10¹¹~10¹²V超高能核作用的研究，获得了3个高度(3200米、5500米、6500米)上的超高能特性、能谱、流强和衰减长度，得到在10¹¹V以上非弹性截面随能量E上升的规律，平均横动量值缓慢发生，并有横动量喷流现象发生；找到了国际上唯一的中心结构低空超大型族事例以及高多重数的同心双环族现象。

