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-Henri1852～1908）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α射线轰击各种原子，观察到了α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α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（Chardwick，JamesSir1891～1974）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，HansAlbrecht1906～）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。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

（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γ衰变、β衰变和α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，π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π介子交换产生核子间的长程吸引作用（≥3×10^{-13}cm），双π介子交换产生饱和中程吸引作用（1～3×10^{-13}cm），而ρ、ω分子交换产生短程排斥作用（＜1×10^{-13}cm），π介子的自旋为零，称为标量介子，ρ、ω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：①原子核是这些幻数的化学元素相对丰度较大；②幻核的快中子和热中子的截面特别小；③幻核的电四极矩特别小；④裂变产物主要是幻核附近的原子核；⑤原子的结合能在幻核附近发生突变；⑥幻核相对α衰变特别稳定；⑦β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、β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 Niels1922～）与他的助手莫特森（Mottelson，BenRoy 1926～）及雷恩沃特（Rainwater，LeoJames1917～）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：①没有考虑核子的自身结构；②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；③认为核物质是无限的；④应用的是非相对论的量子力学；⑤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.lachllo）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。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，EugenePaul1902～）。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，Johnvon1903～1957）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，①U（6）⊃U（5）⊃SO（5）⊃SU（3），简称 U（5）极限。②U（6）⊃SU（3）⊃SO（3），简称 SU（3）极限。③U（6）⊃SO（6）⊃SO（5）⊃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。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

（二）核内非核子自由度的研究

1.π介子自由度

在建立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π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△、σ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 $E_r\leq 50MeV$ 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 $E_r>50MeV$ 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，分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△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）×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，它的德市洛意波长越短，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①。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($0.003 \leq x \leq 0.2$)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 $0 \leq x < 0.1$ 时，结构函数比值小于 1，有明显的遮蔽现象；而在 $0.1 \leq x \leq 0.2$ 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①。伯格(E.L.Berger)等人对这一现象做出了解释②。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)①及克洛斯(F.E. Close)②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①，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的认识；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②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 1μs 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β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β衰变、β延迟粒子发射、β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β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β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β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、氘核、质子、中子、电子和γ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钔元素的主要手段。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，美国劳仑斯-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。

用类氦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，可是对于类氦铀原子，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。在高能重离子实验中，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

需要全本请访问 www.ertongbook.com

(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度（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)×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π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 100GeV/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，△粒子的质量是 1236MeV，π^0介子质量是 135MeV，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.Welson)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，而夸克费密场则定义在格点上。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，即蒙特卡罗数值计算法，计算了这些群积分，不仅首次得到了π介子、质子、△粒子等强子的质量，而且还得到了π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，α-α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π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、Ζ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π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Σ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。奇异核伴随有奇异的现象。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β半衰期，故常把这种放射性称为β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，RobertWilliams1868～1955)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α粒子中，混有少量具有较高能量的长射程α粒子，这实际上就是β衰变缓发α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，George1904～1968)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α粒子，这部分激发态能量转化为α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α粒子。^{212}Bi 就是缓发α粒子的先驱核，而末态核发射α粒子后变为 ^{218}Po，就是缓发α粒子的子核。卢瑟福、伽莫夫等人所观测到的β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β延迟α发射的先驱核 ^{8}Li。1939 年，罗伯茨又在中子轰击铀的实验中，首次探测到了β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β延迟的质子发射先驱核。此后，被发现的先驱核数量增加很快。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β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β延迟的二中子发射，以后又观测到三中子发射。1984 年，劳仑斯-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β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 β延迟 ^{3}He 和 ^{3}H 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 β 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。β 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。β 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 β 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，Pierrede1601～1665)。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，Blaise 1623～1662)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

需要全本请访问 www.ertongbook.com