

中、高能核物理的一些进展

张宗焯

(中国科学院高能物理研究所)

自从1932年发现中子之后,人们确信原子核是由中子和质子组成的.在此基础上发展了一系列的模型理论.首先,尼尔斯·玻尔用液滴模型成功地解释了核密度的饱和性,随后发现了原子核的幻数现象,并由此建立了原子核的壳层结构模型.五十年代初期,奥格·玻尔又提出了描述原子核集体运动的综合模型,解释了一系列原子核的低激发态性质.六十年代以来,又发展了核多体方法的微观理论,在解释低能核物理现象方面,取得了相当的成功.

七十年代以后,随着实验精度的提高以及用高能粒子(或由此得到的次级粒子)轰击原子核的实验增多,这些新的高能核物理现象,给原子核的研究工作提出了具有一定深度和广度的新课题.目前,最吸引人的领域主要是:探索核内的非核子自由度所起的作用以及如何产生一些核物质的新形态.下面就目前研究的情况作一些介绍.

一、核内的非核子自由度

近十多年来,开展了一系列关于核内非核子自由度的研究.主要研究了 π 介子、核子的共振态 Δ 以及夸克自由度在核内的作用.

存在 π 介子交换流效应的较有说服力的例子,是氘核光分裂 $\gamma + D \rightarrow n + p$ 过程的研究.图1给出了此过程随入射光子的能量 E_γ 变化的反应截面 σ .图中虚线是由纯核子自由度理论得出的计算结果,实线是包括了 π 介子交换流及核子共振态 Δ 效应的计算结果.从图1可以看到,在 $E_\gamma \leq 50\text{MeV}$ 的情况下,纯核子自由度的理论计算结果与实验结果符合得相当

好,偏差仅为10%左右.然而当 $E_\gamma > 50\text{MeV}$ 时,纯核子自由度的理论计算结果与实验的偏离明显加大.考虑了 π 介子交换流效应之后,才能得到与实验相符合的结果.

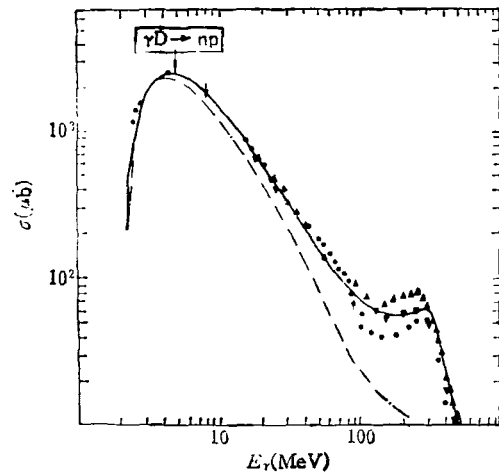


图1 氘核光分裂反应

另一个有趣的例子是通过电子散射研究 ^3He 的形状因子.图2给出的是 ^3He 的磁形状因子 $F_M^3(q)$, (q 是电子散射的动量转移)它反映了原子核内动量分布的情况.由图2可以看到,在低动量转移区,纯核子自由度的理论(由虚线表示)基本上与实验符合.但是对于高动量转移区,也就是原子核的中心区,必须考虑 π 介子及 Δ 自由度的影响(由实线表示)才能与实验符合.这表示原子核的核心区域中非核子自由度是重要的,因此人们期望获得更高动量转移区的形状因子的实验结果,以探索在核中心区域中是否存在夸克自由度的影响.

在多体系统中,由于不确定的因素比较多,所以很难确定非核子自由度的影响.前几年,人们对磁偶极M1跃迁中表现出来的衰竭(que-

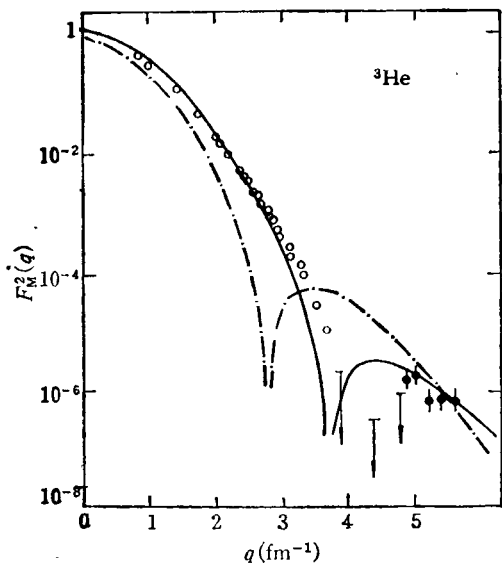


图2 ${}^3\text{He}$ 的形状因子

nching) 现象,很感兴趣。例如实验上测得 ${}^{48}\text{Ca}$ 的 M1 约化跃迁几率 $B(\text{M1})$ 仅仅是单粒子 $f_{7/2} \rightarrow f_{5/2}$ 跃迁的 0.4 倍。一个最容易想到的解释途径,就是引入 Δ -空穴 (Δ -h) 态与粒子-空穴 (p -h) 态的混合。这样做,不仅能够得到符合实验的结果,并且使得一些人认为,这是一个表明在原子核低激发态中存在 Δ 自由度的例证。然而进一步的研究发现,两个粒子-两个空穴 ($2p$ - $2h$) 态的作用不可忽视。计算中包含了 ($2p$ - $2h$) 态以后,也可以解释实验。因而在这个问题上尚存在争议,这是与多体问题的复杂性分不开的,有待进行深入的研究。

关于核内夸克自由度的研究,一直是大家关心的问题。尤其是 1983 年,欧洲 μ 子实验组用 μ 子在 D 及 Fe 靶上作深度非弹性散射的实验。他们发现,原子核内的核子的有效夸克分布函数与自由核子的情况不同。图 3 给出了这个实验的结果。 $F(x)$ 是结构函数,它代表核内核子的夸克动量分布。横坐标 $x = q^2/2M_p\nu$, q 是四动量转移, ν 是能量转移, M_p 是核子质量。如果核内核子的夸克动量分布与自由核子的一样,那么除了在 x 大的地方表现出的核子费米运动的影响,以及在 x 小的地方表现出的核子遮蔽效应以外,在 $0.2 < x < 0.7$ 区间

物理

内, $F(\text{Fe})/F(\text{D})$ 应该等于 1, 是一条平线。然而实验上得到的却是一条斜线,低动量区, $F(\text{Fe})/F(\text{D})$ 比 1 大,高动量区, $F(\text{Fe})/F(\text{D})$ 比 1 小。这就是大家通称的 EMC 效应。这一现象的出现,立即引起了许多人的兴趣,纷纷猜想这可能是核内夸克自由度的表现。一种解释是认为在原子核内,当两个核子靠近并重叠在一起时,可以形成半径稍大的六个夸克系统。由于这部分结构可以增加夸克的低动量成份,所以由此可以解释实验。图 3 中的实线就是用这种模型计算的结果。然而最近有人指出,只要把核子在核内的结合能考虑进来,也同样可以给出实验的特点,如图 3 中的虚线所示。因此,从目前的研究状况来看,对于 EMC 效应是否表现出了核内的夸克自由度尚有不同的看法。

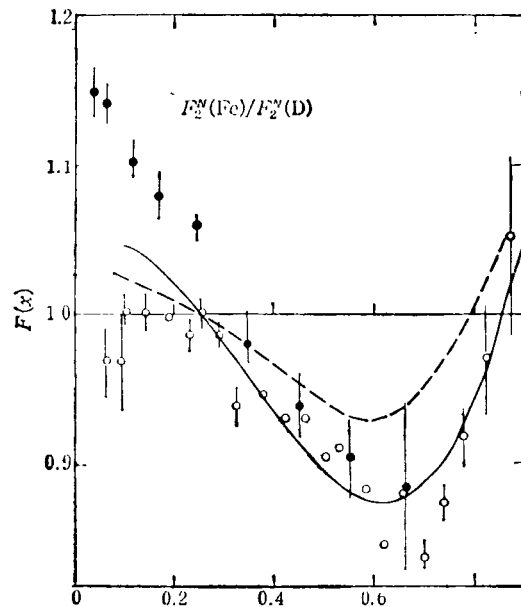


图3 EMC 效应

除了 EMC 效应以外,在对质子-质子散射过程的极化进行测量时,还发现了一个明显的双重子共振峰,如图 4 所示。有人猜测这可能是六夸克系统的共振结构。这一点如果得到证实,那将是十分有趣的。目前用 $N\Delta$ 道和 $NN\pi$ 道与核子-核子散射道进行耦合,进行了理论计算,结果基本上可以解释实验。没有表现出必须考虑六夸克系统的效应。当然这个问题是相

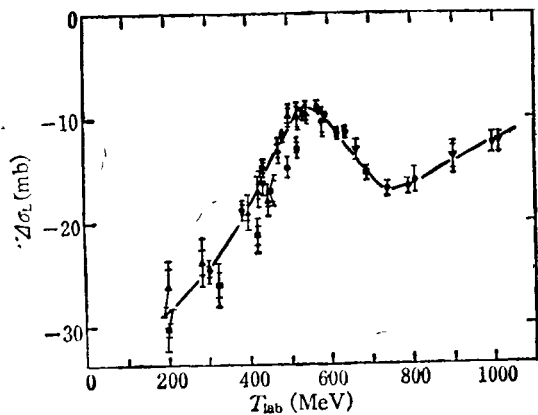


图4 双重子共振

当复杂的，不论从实验上还是从理论上都要进一步的研究。

综合上面的介绍，我们看到目前可以得到的比较确定的结果是在少体问题中。对于高动量区域， π 介子及 Δ 的自由度是有明显影响的。而对于其它的情况，则尚有许多不确定的因素。核内夸克自由度的问题虽然很引人注目，但到目前为止，还是一个没有研究清楚的课题。

二、核物质的新形态

在正常温度和密度下，由核子组成的核多体系称为平常的核物质。若设法将温度升高，或形成高密度的条件，核物质将有可能发生相变。包括出现 π 凝聚现象以及解除夸克禁闭产生夸克胶子等离子体，这些都是核物质的新形态。图 5 是核相变的理论分析示意图。横坐标是密度 ρ ，纵坐标是温度 T ， ρ_N 代表正常核密度。当 ρ 加大到 $2\rho_N$ 时，可能出现 π 凝聚。若进一步压缩核物质，使得 ρ 达到 $5-10\rho_N$ 时，则有可能由强子态发生相变，解除夸克的禁闭，而形成夸克胶子等离子体，并恢复手征对称性。除了提高密度以外，增加温度也可以导致相变的发生。图 5 中曲线 1 给出了解除夸克禁闭的相变区域，曲线 2 给出了恢复手征对称性的区域。这一理论分析，尽管尚有许多不够确定的因素，但却引起了许多人的兴趣。大家纷纷考虑如何获得发生相变的条件，高能重离子反应是最有

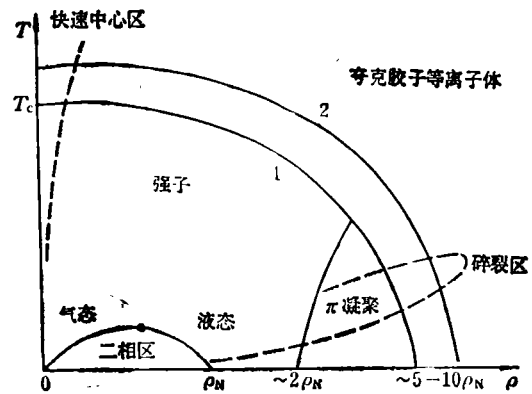


图5 核相变示意图

希望的一种途径。人们预言高能重离子反应的快速中心区将可以获得很高的高温条件，而高能重离子反应的碎裂区将可能得到高密度的条件。这方面的研究工作正在广泛地展开。

另一种新的核物质形态是包含其它强子的核多体系，又称奇特核。现在已经形成的奇特核有： Λ 超核、双 Λ 超核和 Σ 超核。正在探索的有： \bar{p} 核、 Δ 核共振态以及味道核等。目前对 Λ 超核的研究进行得比较多。图 6 给出了已经生成的 Λ 超核。在实验上不仅得到了 Λ 超核的基态，而且通过 (K^-, π^-) 奇异交换反应获得了一些 Λ 超核的激发态。图 7 给出了 ^{13}C 的激发谱，有五个明显的峰，这是目前对 Λ 超核激发谱的一个较精确的测量结果。然而目前的 K

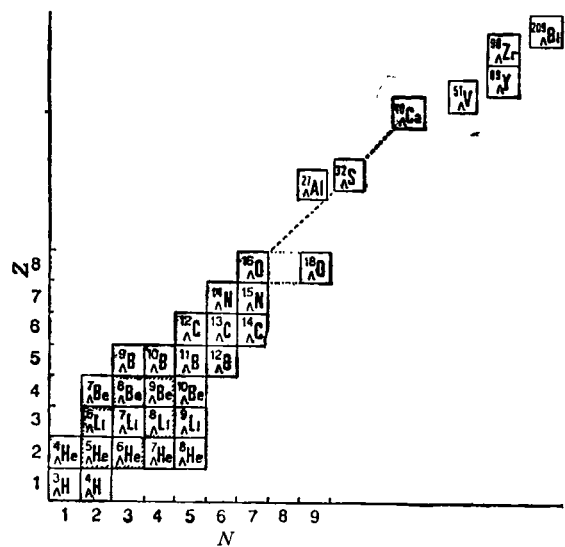


图6 Λ 超核

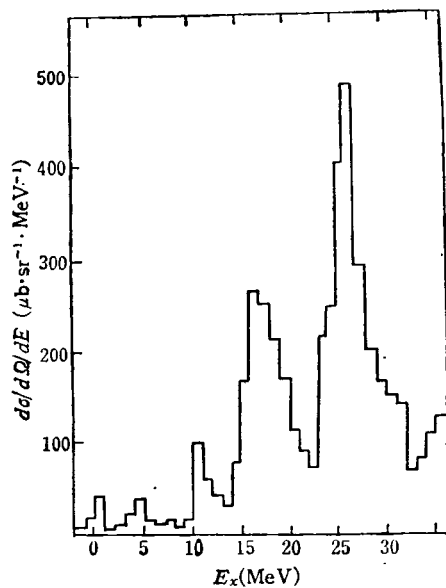


图7 $^{13}\text{C}(\text{K}^-, \pi^-)^{13}\text{C}$ 激发谱 ($800\text{MeV}/c, \theta_{\text{lab}} = 4^\circ$)

介子的束流强度较弱,探测超核核谱的分辨率也不够高,实验资料仍然极不完整。尽管如此,这些年的研究,已经取得了一些有兴趣的结果。一个是 Λ 超子的自旋轨道耦合比核子的小许多,几乎差一个数量级。另一个是 Λ 超子与核子有形成更高的空间对称性的趋向。人们深信,随着实验手段的提高,将会形成更多的新的奇特核,对这些新的核物质形态的研究必将极大地开扩核物理的研究领域。

三、展 望

回顾近十年来的进展,可以明显地看到核物理的研究与粒子物理的研究结合得越来越紧密。今后在中高能核物理方面可能有以下几个

方面将是比较活跃的领域。

(1) 从强子结构的角度研究强子之间的相互作用,尤其是核子-核子相互作用的短程部分。这是核物理研究中的一个基本问题,很长一段时间,一直是采用唯象或半唯象的理论。强子结构研究的进展,为从基本理论出发认识核力开辟了一条途径。这个问题的另一个侧面是强子的结构在核内的表现,也就是核内夸克自由度的影响问题。夸克自由度对原子核结构有多少影响?它的影响在什么情况下表现出来?这些都是既基本而又有兴趣的课题。用高能电子散射实验测量核的形状因子,对此项研究课题的工作有直接的促进。若能精确地测量形状因子的高动量分布,将有助于人们分析核中心区域内是否存在夸克自由度的影响。

(2) 各种奇特核的研究。从理论上讲,这是新的多种粒子的多体系统。它的结构问题具有新的特点,并且会伴随着出现其它强子与核子的相互作用问题,这些都是很有意义的研究课题。从实验前景来看,目前西欧中心的低能反质子环,可提供更多的 \bar{p} 与核作用的实验资料。几年之后,K介子工厂的建成,将对超核的研究有明显的促进。

(3) 核相变的研究。通过高能重离子反应来实现核相变的研究是一个十分吸引人的领域。人们期望从平常的核物质形态,通过相变,获得新的核物质形态。然而重离子反应是两个多体体系的碰撞问题,当然是十分复杂的。不论从实验上还是从理论上都还处于起步的阶段。随着实验的进展,这方面的研究工作必将越来越活跃。