

# 中能核物理和粒子物理的 一些有趣的问题

林春灿

马维兴

(中国科学院高能物理研究所)

陈崇光

(中国科学院研究生院)

约在三十年前，粒子物理脱离核物理作为独立的领域兴起了。当时核物理的研究对象被认为是通过二核子相互作用而组成的多核子系统。那时，核物理学家正在阐明壳层结构，发现了集体运动模式，并基于有效的核子-核子相互作用力而发展一种微观的核理论，粒子物理学家也发现并把粒子分为重子、介子、轻子三大类，建立了强、电磁和弱的三种基本相互作用的理论。

目前关于思考基本相互作用的主要倾向也分成三个范畴。首先是关于弱、电磁相互作用的统一理论，它把轻子和夸克家族密切联系起来，并把它们划分为不同的“代”，每一“代”内的成员之间的联系媒介是规范粒子也或许还有 Higgs 粒子。其次是强相互作用的 QCD 理论（量子色动力学），它把胶子看成是在带颜色的夸克之间传递强相互作用的矢量介子。最后企图统一这些理论，即大一理论。

在60年代和70年代里，随着介子工厂的建造和使用，中能核物理的发展主流是把各种强子纳入核物理的描述。当粒子物理学家在证明核子本身以及其它强子不是基本的同时，着手发展夸克模型，将强子物理学变成一个多体问题。核物理学家表明了研究奇异重子( $\Lambda$ 和 $\Sigma$ )动力学、重子共振和核子作为核物质中的基本粒子是很有好处的。于是，核

物理学家就直接卷入到粒子物理之中。夸克多体问题最困难的方面或许是带色的胶子和夸克约束成无色的强子。中能核物理和粒子物理的中心问题是处理禁闭以及了解夸克系统的相互作用和结构。所以核物理学家和粒子物理学家的兴趣有很大的重迭。

## 一、关于强子问题

QCD所提出的关于夸克相互作用模型虽然在符合实验数据方面取得了很大的成功，但是所用的参数并不是相应于最简单的QCD微扰所期望的。这就表明还需要进行大量的实验和理论工作。为了符合介子衰变的宽度，必须包含多夸克相互作用。换言之，不能使用介子直接耦合到夸克线上的图象。这就避开了近年来核物理中所进行的许多介子流计算在定量上的疑难。目前重子共振的状况很像被仔细研究的仅仅具有1S和1P壳态的核物理情况。我们可以得到这样的结论：核可以近似地按SU(4)超多重态来描述。只有在重核系统数据足够充分时，才能发现核结构物理作为一个丰富的多体系统的集体效应和其他现象。这就提示必须对中能非奇异和奇异共振以及各种强子过程进行仔细的探索。

## 二、关于结构函数

在很高的动量转移下，QCD相互作用才能是弱的，我们可以安全地应用微扰论去处理夸克-胶子相互作用。然而，在中能区域，我们面临强相互作用的问题。这个问题至少像早期时髦的介子交换处理那样的挑战性问题。事实上，由于禁闭的缘故，似乎使问题变得更加困难。在中能范围测定强子结构就成为“软”QCD的基本问题。用强子的夸克模型观点来阐述，它很像核的核子模型。穿衣的夸克(称为valons)是处理低能和中能重子、介子谱和性质的袋模型的组成夸克，它是通过在拉格朗日中具有裸(流)夸克的QCD拉格朗日而得到的。我们可以从夸克-胶子微扰论得到相当的启发，至少可以导出valons结构函数的唯象形式。因此可以得到这样的表述：电子在强子靶上进行的非弹性散射类似于我们在核物理问题中用了核子的结构函数。于是从实验中取出强子的valon结构函数可以作为表示非微扰QCD过程的中间步骤。电子在质子上的深度非弹实验所观察的标度定律对建立夸克/部分子模型的普遍正确性是最有意义的。极化高能电子在极化质子上的散射已在深度非弹区域内进行了研究。在这高动量转移区域内利用了夸克/部分子模型的夸克分布函数来表示核子结构函数，采用这个方法，能够得到截面，通过测量散射的对称性，新的实验已证实：对于自旋有关的结构函数，Bjorken标度与夸克/部分子模型的预言一致，并且它能够在标度变量 $x$ 的很宽的范围抽出这些结构函数与 $x$ 的依赖关系。这些函数关系的实验测定可用来作为特殊的夸克模型的检验。例如，发现袋模型的预言不能与新的数据自洽。这个实验将是检验动力学的理论最有价值的工作。

## 三、关于两重子和重子-反重子系统

虽然从夸克/QCD的观点来看，两个重子构成了一个十分复杂的多体系统，对它们的研究能提供关于强相互作用的新信息。不过，在尚未更好地处理重子-重子问题之前，无望深入了解核和超核的性质。

在过去的二十年中，着重试图利用介子交换机制导出核子-核子、核子- $\Lambda$ 、核子-反核子和其它重子-重子或重子-反重子相互作用。虽然在这方面作过很大的努力，也取得了符合实验结果的好成绩，不过仍然有些基本问题待解决。对 $BB$ 和 $B\bar{B}$ 系统的夸克/胶子描述，许多人试图导出这些系统玻色子交换描述的参数。这些模型如果失败，也会引出一些很有趣的问题。 $BB$ 和 $B\bar{B}$ 系统作为介子和重子的耦合集的描述是没有明显引入色自由度的，由于在强子系统中最有兴趣之一是色动力学的探究，色个体的明显证据是要急切寻找的。

## 四、双重子问题

由于上述理由，双重子的存在是当前最重要的问题之一。它可归结为是否能观察到双重子系统的态，而这些态按相互作用的色单态(普通的介子和重子)是不能解释的。这既是双重子谱又是强子反应的课题。因为这些个体(如果它们存在)将在某些道出现。实验上必须找到这个证据，理论上必须证明这些数据不能由传统的(色单态)模型来解释，并且证明夸克模型能提供合理的解释。

在一些实验中看到了有兴趣的鼓包，Argonne ZGS上所作的与自旋有关的总PP截面中看到了最突出的结构，这已被SIN、LAMPF、TRIUMF的实验所确认。有证据

表明在质心能量为2.15GeV和2.25GeV处出现了类共振结构。分析指出,这些由于D和F分波所产生。开始,倾向于是双重子,但传统的模型也能给出这样的结构。有人认为存在双重子的明显证据是:在光致分解实验中,质子极化能量分布在2.23GeV(质心能量)附近的鼓包,这个鼓包用传统方法无法解释,因而试图说明它是一个 $\Delta$ - $\Delta$ 束缚态。但这仅是一个 $I=0$ 的现象,而且在P-P实验中没有看到它。双重子共振对 $\pi$ 吸收的可能影响一直是非常有趣的问题。因为光致分解过程 $\gamma D \rightarrow pn$ 与 $\pi$ 吸收 $\pi D \rightarrow NN$ 密切相关,自然会期望:如果上述双重子存在的数据是由一个或多个双重子引起的,应当在一些 $\pi$ 吸收道中表现出来。可是在 $^{12}\text{C}(\pi^+, \pi^+d)^{10}\text{B}$ 实验中,并没有双重子迹象。因此,对于双重子问题,不论理论还是实验都有许多工作要做。

## 五、夸克和核子-核子相互作用

过去的五年中,在试图用夸克/QCD模型导出核子-核子相互作用方面做了许多努力。大部分着重于导出短程排斥力。因为在导出无色重子之间中程和长程相互作用之前,禁闭问题必须解决。重子-重子相互作用在夸克模型和传统模型里是不同的。在夸克/QCD系统中最惊人的预言之一是范德瓦尔斯力,即最长程的强相互作用不是具有单 $\pi$ 力程的汤川相互作用,而是由于多胶子交换而产生的具有以多项式的形式衰减的相互作用。这样一种相互作用的证据在符合核子-核子散射和强子原子数据中找到了。这一力的出现是有深远意义的。

夸克的禁闭区域约为一费米,重子-重子力的非定域性可能来源于此,这一非定域力对核结构可能有更重要的影响。同非定域区域相联系非常可能有带色个体的明显效应,还可能在重子-重子谱以及在反应中存

在可观察的效应。夸克模型描述的一个非常有趣的方面是联系所有重子-重子相互作用的可能性。奇异重子系统有一个紧密束缚态,这一结论非常重要。它是直接从三种不同味(u,d,s)夸克的单态相互作用得出的结果。一些人试图从实验来证实它。

MIT袋模型是一相对论性的强子边界条件模型,与Feshbach-Lowman的N-N相互作用的边界条件模型具有密切的联系。核物理的R矩阵理论可用来直接地使袋态与N-N相互作用发生联系。

## 六、反质子-核子相互作用,重子素

正像在B-B相互作用中双重子起特殊作用那样,与 $B\bar{B}$ 系统相联系的可能新结构(重子素)的存在是过去几年中研究中能反质子的动机。

一重子素态是很强地耦合到NN道上的介子态。它们可期望近似地描述成两夸克和两个反夸克态或准束缚 $N\bar{N}$ 态。测定它们的性质能够给出关于 $q\bar{q}$ 相互作用的重要信息,并且是整个夸克/QCD动力学研究的重要组成部分。同具有 $q\bar{q}$ 价性质的介子相比,重子素态能够具有奇异量子数,这有助于对它们的探测。在势模型方面,有人提出了窄重子数态,不过,目前对短程吸引的处理就不很精确,所以我们不能相信所预言的这些态的宽度。但是即使没有窄的重子素态,这个研究计划内容也是很丰富的。它包括了各种弹性的和PP总截面的测量,还有极化实验。这将大大改进对重子素态的了解,并且给出关于NN有价值的信息。因此对了解 $q\bar{q}$ 相互作用有帮助。它既可探索PP原子,又可用np实验设备进行质子素实验。

## 七、核的相互作用和结构

核物理研究的主要目的在于了解原子核

的性质和结构。由于近十年来加强了中能核物理的研究,在这个领域取得了进展。如

1.  $\pi$ 介子和K介子与核子的相互作用不同于质子、电子或其它传统的探针。弹性、非弹性和电荷交换散射给出了核密度和态的新信息。这是核结构物理的一个重要课题。

2. 中能介子-核子相互作用主要是形成核子激发态 $\Delta$ ,这类相互作用完全不同于N-N相互作用。介子被吸收形成一个新的个体 $\Delta$ 。所以像薛定谔方程的那种传统方法不再适用。Isobar-壳模型被发展用来处理这类问题。的确,根据Isobar-核相互作用了解介子-核相互作用方面已获得显著的进展。

3. 微观的计算不仅决定了有效的 $\Delta$ -核势的深度,甚至给出了自旋-轨道相互作用的估计。在此基础上可以探索 $\Delta$ -核有效的相互作用与由夸克模型预言的 $\Delta$ -N相互作用的一致性。

4. 在核内的介子吸收方面,在中能区,可以很明确地说: Isobar 作为引起吸收的媒介。因此介子吸收和产生能够推广上述的动力学研究到运动学的范围。理论上处理( $\pi, p$ )反应机制和其它有关的吸收过程包含了动力学机制和非常困难的相对论考虑。这是个相当活跃的领域。如上述的双重子共振的出现,在物理学领域内具有重要的影响。

5. 光 $\pi$ 产生和介子辐射俘获是个有兴趣的课题。例如,按( $\gamma, \pi$ )反应机制使 $\pi$ 极点项分离的可能性,是许多人积极研究的问题。如果核物质接近跃迁到 $\pi$ 凝聚态,则核内的 $\pi$ 介子流将大大改变。显然,介子-核相互作用的研究仍处于早期阶段,只有 $\pi$ 介子的 $\Delta$ 区域才做了全面的检验。进行了几个K-核实验,从K原子和K-核弹性散射得到的 $\Lambda(1405)$ 和 $\Lambda(1520)$ 奇异共振还远未得到详细

结果。

6. 由于核子是复合的个体,因而原子核更是复杂的核。从MIT的袋模型出发,除了前述的强的非定域性外,由于色自由度的存在可能改变整个能级密度的系统性。最奇妙的是,在重离子碰撞或稠密星体中可能形成夸克物质。即使还没有这种相,但也会出现新的核反应。

7. 在 $\bar{p}$ -核研究中,至少了解了 $\bar{p}$ 的有效相互使用。当 $\bar{p}$ 穿过核物质时,将会发生一些启发性的事件。

## 八、超核物理

一个核具有一个或多个 $\lambda, \Sigma$ 或其它奇异(几乎是稳定的)重子构成了超核。超核的研究主要在CERN和Brookhaven进行,在确定 $\lambda$ 壳模型势方面做了较多工作,它的深度约为核子壳模型势深度的60%,而自旋轨道相互作用大约为强度的 $\frac{1}{5}$ ,  $\Sigma$ 壳模型势的深度

大约和 $\lambda$ 的相同。 $\Sigma$ 超核态的宽度是当前很重要的一个问题。虽然在自由空间 $\Sigma$ 通过弱相互作用衰变成一个核子和一个 $\pi$ 介子,在核中,强的无介子的变换 $\Sigma N \rightarrow \Lambda N$ 可能发生。最近发现了几个窄的 $\Sigma$ -超核态,至少有两种不同的解释,包括估计短排斥力对减少这些宽度起到重要的作用。从基本相互作用观点来看,这是一个有趣的问题。从 $\Sigma$ 超核对多体物理提供各种前景的可能性来考虑,这是一个重要的问题。但 $\Lambda$ 超核的壳模型远非完整的,只发现很少的几个态。中重和较重的超核也有待解释。对于 $\Sigma$ 超核的研究才开始不久。 $\Xi, \Omega, \Lambda-\Lambda$ 等超核仅是一种猜测。