

反核子物理的一些进展

张宗焯

一、一个新兴的、活跃的领域

大家知道,质子和中子统称为核子(N),反质子和反中子统称为反核子(\bar{N}),具有反核子参与的物理称为反核子物理。反核子物理现在已成为中能核物理中一个重要的领域。这不仅在于反核子物理联系着整个反物质世界,而且还在于当 $N\bar{N}$ 作用发生湮灭时,放出各种介子和大量的能量,由此可以发现许多有趣的现象。自从1983年夏天西欧中心的低能反质子环(LEAR)运转以来,反核子物理的研究十分活跃。这个低能反质子环可以提供性能很好的低能反质子的强束流。LEAR提供的 \bar{p} 束流强度在低能端比原来西欧中心的 \bar{p} 束流强度提高了四至五个数量级。因此LEAR一开始运转,就显示出了它的巨大优越性,许多原来要积累几个月数据的实验,现在很快就可以得到验证。另一方面,近几年来核力介子交换理论的成功以及用夸克模型来描述核子-核子相互作用短程部分取得的一些进展直接促进了 $N\bar{N}$ 相互作用的研究,人们感到研究反核子物理理论的时机比较成熟了。目前这个领域的研究非常活跃,取得了一些鼓舞人心的成果。

反核子物理研究的几个主要课题有:1. $p\bar{p}$ 的弹性及非弹散射以及电荷交换反应 $p\bar{p}\rightarrow n\bar{n}$ 。2. $N\bar{N}$ 束缚态。3. \bar{p} -核的散射及反应。4. 其它的基本过程。在这几部分中,第一部分已积累了一些数据,为研究 $N\bar{N}$ 相互作用提供了初步的资料。第二及第三部分的工作都刚刚开始。自从LEAR运转以来,已经得到了一些有趣的结果。第四部分尚处于畅想阶段。

二、如何描述核子-反核子相互作用

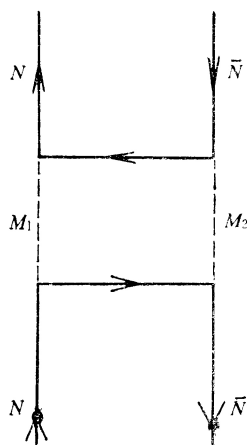
核子-反核子相互作用($N\bar{N}$)与核子-核子相互作用(NN)的情况不同。对 NN 的情况,在产生 π 介子阈(300MeV)以下,散射相移为实数,因此通过各种分波的散射相移 δ_l 得到唯象的相互作用是比较方便的。而 $N\bar{N}$ 的情况则不同了,由于核子和反核子会发生湮灭,所以对于所有的能量、相移都是复的,尤其是对于 $l\leq 3$ 的情况,相移的虚部很大,这给确定 $N\bar{N}$ 唯象势带来了极大的困难。尽管如此,相移仍然是分析 $N\bar{N}$ 相互作用的一个有用的途径。

人们从反核子与核子之间存在对称性关系中通过 C 变换可以把 $N\bar{N}$ 相互作用与 NN 相互作用联系起

来。对于 NN 相互作用,它的中、长程部分可以由介子交换理论给出,它的短程部分是唯象的。所以由此得到的 $N\bar{N}$ 相互作用也只能适用于中、长程的范围,它不能描述 $N\bar{N}$ 的湮灭效应,而这个效应是 $N\bar{N}$ 碰撞过程中最主要的特点。以前对湮灭位势一般是由唯象的方法给出的。最早给出的唯象势是纯虚的,自从有了核力的巴黎势以后,又重新确定了唯象势部分。这个唯象势不仅有一个很强的虚部,而且还有一个强吸引的实部。把中、长程部分的巴黎势与 V (唯象, $N\bar{N}$)合在一起就是巴黎 $N\bar{N}$ 相互作用势。虽然这样定出的 $N\bar{N}$ 相互作用可以符合 $p\bar{p}$ 碰撞的一些实验,但是它是太粗糙了,不能很好地解释实验上一些其它的现象。例如,它不能反映出位势随着不同自旋同位旋状态的变化,不能反映它随能量的变化关系。

三、如何描述核子-反核子的湮灭

A. 两个介子的机制 最早提出的是湮灭到两个介子的机制,如图1所示,它表示中间过程是核子-



反核子湮灭为两个介子的过程,这是一个十分短程的位势,因为这个机制中交换的是一个核子(或一个Isobar),所以它的力程约为 $1/2M\sim 0.1\text{fm}$ 。这个模型能够解释非弹截面的20%。这与实验上表现出 $p\bar{p}$ 湮灭只有10%在两个介子区域内这一事实定性是一致的。其余的至少通过放出三个介子。因此,看来要从理论上得到 $N\bar{N}$ 湮灭势,

需要深入到下一个层次,即:深入到核子的夸克结构来进行研究。

B. 三个介子的机制从夸克层次来看,湮灭到三个介子的过程是一个重排列的过程,所谓重排列的意思就是说核子和反核子中的夸克 q 和反夸克 \bar{q} 经过重新组合, q 和 \bar{q} 结合在一起形成中间态为三个介子的过程。通过求解耦合道方程可以求得由这种机制提供

的湮灭位势，当然这样得到的位势都是与核子、反核子和介子内部夸克的结构有关的，在夸克的重排列模型中还可以把湮灭到两个介子的情况包括进来实际上这是重排列的一个特例，在此特例中有一对正反夸克湮灭到真空，然后再由真空中产生一对正反夸克，这里的 M_1 和 M_2 代表各种可能的介子，所以这实际上是由湮灭而产生两个介子的机制的微观描述，然而湮灭到二个介子的过程与湮灭到三个介子的情况相比，只占 15% 左右。

由此模型得到的 $N\bar{N}$ 湮灭位势不仅成功地解释了目前已有的 $p\bar{p}$ 散射实验结果，并且与自旋和同位旋的状态有关，与能量也有关，尤其是湮灭位的虚部随能量的变化关系与实验的要求符合，看来它比唯象势更为合理。

四、核子-反核子束缚态

反核子与核子在一起能否形成束缚态这是一个很感兴趣的问题，这关系到是否有包含反核子的物质存在的问题，早在七十年代后期，就有人认为从反质子原子的 X 射线与 γ 射线的级联中发现了 $N\bar{N}$ 的束缚态，然而在前几年的实验中对 $N\bar{N}$ 束缚态是持否定意见的，但是最新的实验又有迹象支持这种窄共振的束缚态，它们的结合能为： $105 \pm 1\text{MeV}$ ， $132 \pm 2\text{MeV}$ ， $236 \pm 3\text{MeV}$ 和 $666 \pm 5\text{MeV}$ ，总之，对这个问题目前还是一个有争议的问题，有关这方面的实验正在 LEAR 上重复。

在理论上，对 $N\bar{N}$ 束缚态有二种解释，从基本粒子物理的角度，认为它是一种特殊的四个夸克态，即双夸克反夸克结构，由于在这种无色的四个夸克态中，把双夸克 (qq) 看做为一个组成单元 Q ，双反夸克 ($\bar{q}\bar{q}$) 看做为一个组成单元 \bar{Q} ，双夸克和双反夸克态表示为 $Q\bar{Q}$ ，它很难衰变为介子，这样就可以自然地解释窄宽度的现象，但是它在解释 \bar{p} 原子衰变为束缚态的衰变率上比实验值小一个数量级，另一种解释是从核物理角度出发，认为它是“类氦”核，这种解释虽然可以符合 \bar{p} 原子衰变为束缚态的衰变率，但是如果采用几年前得到的唯象的湮灭势来计算束缚态的结构，由于湮灭势的虚部很大，所以无法解释束缚态的窄宽度的特性，然而，由夸克模型的重排列理论得到的湮灭位势与能量有很强的依赖关系，它是随能量指数下降的，对于阈能以下的区域，它的虚部已有相当明显地下降，这对从核物理角度来解释束缚态的窄宽度是十分有利的，预计采用重排列模型的湮灭势，有可能可以把这个问题解决，这是重排模型的一个重要的成功之处。

五、反质子与原子核的相互作用

\bar{p} -核的研究是一个崭新的领域，为了研究 \bar{p} -核，

首先需要描述 \bar{p} -核的光学位势，通过 $N\bar{N}$ 的相互作用可以把光学位势计算出来，不论是用微观的 $N\bar{N}$ 相互作用还是用唯象的 $N\bar{N}$ 相互作用所得到的光学位势有一个共同的特点，就是光学位势都出现一个排斥的实部，由于这个位势的实部是排斥的， \bar{p} 不容易进入原子核，所以可以使 \bar{p} 原子的 $1s$ 轨道态有相当窄的宽度，例如对于 ^{16}O ， $\Gamma = 80\text{keV}$ ；对于 ^{40}Ca ， $\Gamma = 250\text{keV}$ ，然而由唯象 $N\bar{N}$ 势及微观 $N\bar{N}$ 势所给出的 \bar{p} -核光学势的细节是很不同的，尤其是在计算 \bar{p} 与核的束缚态问题上相差较多，唯象势给出的能级宽度可达 100 多 MeV，这预示着这种束缚态不可能观察到，而在微观势给出的能级宽度可减小一些，从现有的理论分析来看，除非存在着有一种特殊的排斥相干的结构，使得 \bar{p} 与核保持一定的距离，以减小湮灭的几率，才有可能得到 \bar{p} 与核的窄宽度的复合态，显然这些结果与如何描述湮灭的机制是十分有关的，大家都期待着在 LEAR 上得到新的可靠的实验结果，以进一步考验现有理论的可靠性，去年在 LEAR 上完成了第一个 \bar{p} -核的实验—— \bar{p} - ^{12}C 的弹性散射，它表明与 p - ^{12}C 的散射特点很不相同，用现有的 \bar{p} -核光学位势进行的初步分析，可能得到较好的符合，当然这方面的工作尚处于起步的阶段，有待于进一步深入研究。

六、几点展望

反核子物理是一门核物理与粒子物理的交叉学科，它涉及的范围很广，通过反核子与核子(或原子核)的作用，可以导致许多新现象，近期的主要课题是认真研究 $N\bar{N}$ 相互作用的机制，这方面的研究除了通过 $N\bar{N}$ 碰撞过程以外，尚需借助于 \bar{N} -核的碰撞，这是由于 \bar{N} 与 N 湮灭后放出各种介子，这些介子在原子核中将表现出不同的作用，这样原子核就成了探测这些介子(尤其是短寿命介子)的重要场所，这方面的工作不论从实验上还是从理论上都已经取得了一些可喜的进展，长远一些的设计就更丰富了，例子：1. 通过 $N\bar{N}$ 在原子核内湮灭时，可以在 $r < 1\text{fm}$ 的范围内放出大约 2GeV 的能量，由此产生一些奇特的核物质，例如夸克-胶子等离子体，2. 通过电荷交换反应 $\bar{p}p \rightarrow \bar{n}n$ ，可以产生反氦核 d ，有了反氦 d 的束流以后，还可以进一步产生反 ^3He 及反氩等等，由此可以创造整个反物质世界，3. 通过 $\bar{p}p$ 的湮灭，可以研究 $\pi^+\pi^-$ 原子， K^+K^- 原子以及 πK 原子等等，4. 由以下两个过程

$$\bar{p}p \rightarrow \bar{A}A \rightarrow \bar{p}n\pi^+\pi^0$$

$$\bar{p}p \rightarrow \bar{A}A \rightarrow \bar{p}p\pi^0\pi^-$$

的分支比，可以研究 $c\bar{p}$ 破坏，总之，反核子物理是一个有着广阔发展前景的研究领域。