

漫谈高能原子核物理

何 阻

本世纪初,人们用天然放射性物质放出的 α 粒子去轰击原子,证实了原子核的存在。这以后的十几年,人们又用各种人工加速的粒子作为探针深入原子核内部,特别是六十年代以后,高能粒子与原子核相互作用的科学实验已经可以大量地进行,这就大大地扩展了我们关于原子核的知识。

人们最早着眼于高能粒子的波长短,可以用来研究原子核的更精细的结构。但是不久发现的另一些现象却更有意义,即在能量超过几百兆电子伏以后,原子核内的中子和质子(统称为核子)可能变成超子或其他极短寿命的重子——重子共振态(核子、超子以及它们的激发态统称为重子。重子共振态就是核子、超子的激发态)。这样就证实了超子以及重子共振态也可以和核子一起组成原子核,打破了以为原子核只由中子和质子组成的旧观念。尽管超子和重子共振态参与组成的原子核寿命极短,它们要衰变,但对于研究原子核内部的结构和运动,仍为我们开辟了新的途径。

**在高能时,原子核内的核子可以有内部激发;
在低能时,原子核也不是理想的中子与质子体系。**

人们也许以为,在几百兆电子伏能量的激发下,已经谈不上什么确定的原子核形态,因为核子很可能都飞走了。但事实并不如此,因为核子是有内部结构的,几百兆电子伏的能量完全可以使一个核子处于激发状态,成为重子共振态,并仍留在原子核内。这时候,这个原子核就变成由重子共振态和其他核子组成的原子核。

以前,在 π 介子轰击核子的散射实验中,发现质心系能量为1236兆电子伏时,被散射的介子最多。为什么?因为在质心系能量为1236兆电子伏时, π 介子被核子吸收,形成核子的激发态,这种激发态叫做 $\Delta(1236)$ 。它很快地又衰变成 π 介子和核子,衰变出来的 π 介子向各个方向散开。

现在,用 π 介子轰击原子核,例如轰击碳12的原子核。在 π 介子与原子核内某一核子所组成的体系的质心系能量略低于1236兆电子伏时,被散射的介子也最多,和上面的情况完全类似。为什么?原因也是相同的,就是 π 介子被原子核内某一个核子所吸收,形成了 $\Delta(1236)$ 。那末为什么质心系能量略低于1236兆电子伏呢?这是因为 $\Delta(1236)$ 是处于束缚状态,必须减去束缚能的原故。所以这一类实验不但证实了在原子核内可以形成 $\Delta(1236)$,而且证实了这个 $\Delta(1236)$

是束缚在原子核内的,换句话说,它可以与其他的核子一起,组成不稳定的原子核。

不只是中子和质子可以组成原子核的最早的证据是 Δ 超核。人们发现锂7原子核吸收一个 K^- 介子后,其中的一个核子就可以变成 Δ 超子。含有 Δ 超子的原子核叫做 Δ 超核。碳12原子核在吸收一个 Ξ^- 超子后,就分裂成为锂7和氦6。而氦6中有两个中子激发成为 Δ 超子。换句话说,这个氦6是包含两个 Δ 超子的 Δ 超核。

这一类有意义的科学实验一下子就把原子核能级的研究扩展到几百兆电子伏以上的能区。特别是由于超子以及重子共振态也都参与组成原子核,所以原子核内部的运动状态和性质也就更丰富多彩了。

那末,在低能的情况下,是不是原子核照旧只由中子和质子组成呢?也不是。最著名的是氦核基态问题。大家知道,氦核是由中子和质子组成的,但是在实验中测定的氦核的磁矩并不等于中子和质子的磁矩之和。这是怎么回事?答案是氦核中并不永远是中子和质子,氦核中的中子和质子常常在很短暂的时间里同时激发成为两个电荷不相同的 $\Delta(1236)$ 。 $\Delta(1236)$ 的磁矩和中子、质子的磁矩不相同,这就可以解释为什么氦核的磁矩不等于中子和质子磁矩之和了。

还有一个有趣的例子,就是用1000兆电子伏的质子轰击原子核并产生一个氦核的实验中,发现了数量可观的氦核是向后跑的(和入射质子方向相反)。这又是什么?这说明氦核包含具有较大角动量的成分,如果假定氦核中的核子在短暂的时间里激发成为自旋为 $5/2\hbar$ 的核子激发态 $N(1688)$,产生出来的氦核向后跑的现象就可得到说明。

这些事实都说明,即使在低能的情况,原子核也不见得是纯的中子质子体系。

核力可能是“基本”粒子内部相互作用的外部表现,因而它与超强相互作用可能紧密相关。同时核物理正在寻找非平常原子核状态,以创造研究核力的新条件。

核力在小于 10^{-13} 厘米的距离时是斥力,在 10^{-13} — 5×10^{-13} 厘米的距离时是吸力,在更远的距离时,吸力很快地趋于零。它的细节十分复杂,并依赖于两个核子之间的相对自旋和其他对称性。

核力的介子理论假定核力是由所有的物理介子($\pi, \rho, \omega, \phi, \dots$)传递的,在1000兆电子伏以下的能区,最多只须考虑交换两个介子。这个理论可以解释1000兆电子伏以下能区的核力的各种定性图象,例如短程性、交换性,……等等。

今天,在确认“基本”粒子有内部结构,是一个复合粒子以后,再回过头来审视一下核力的特点是很有意思的。刚才说,核力在近距离时是斥力,稍远距离时是吸

力,并依赖于起作用的两个核子的相对自旋和对称性,这和分子力(即组成分子的原子与原子之间的力)非常相似(分子中的原子与原子太靠近时互相有斥力,稍离开些则有吸力)。然而,我们知道,分子力是原子内部的静电力的外部表现(这内部、外部是对于原子而说的),那末,核力是不是也是“基本”粒子内部的某种作用力的外部表现呢?(这内部、外部是对于“基本”粒子而说的)这个问题还远远没有解决。

为了研究核力,人们还在寻找其他的途径。例如,天文学上的中子星,对于研究核力就可能是有意义的。我们知道,核子是费米子,费米子有一个特性,就是占据同一能级的相同费米子的数目是有限的。随着费米子数的增加,它们就必须依次占据越来越高的能级(因为较低能级都已占满)。在中子星里,如果处于较高能级的中子的能量超过产生 π 介子所需的能量,那末,这个中子就是不稳定的,它会放出一个 π^- 介子,自己变成质子,质子和中子并非相同粒子,所以它可以放出能量,并降到较低的能级。这种过程是必定会发生的,问题在于中子星的密度是不是足够大,因为密度越大,中子占据的能级也越高。如果密度更大的话,不但中子星里会含有 π^- 介子和质子,而且还可能有 $\Delta(1236)$ 。人们正在寻找的这些变化,将使我们在十分不同于目前常规的原子核状态的另一种条件下来认识核子之间的相互作用。

高能粒子提供了研究原子核内部结构的新工具。

用各种高能粒子作炮弹轰击原子核,可以产生传统的低能方法所不能产生的效果。以下举一些例子:

1. 比较容易分别探测原子核中质子的情况和中子的情况。例如用 K^- 介子打原子核,它与质子作用可产生 Σ^0 超子,与中子作用则产生 Σ^- 超子,从而就可能探测原子核的外层中子和质子的聚集情况。这是用传统方法做不到的。

2. 原子核可以吸收一个 π^+ ,放出一个 π^- ,或吸收一个 π^- ,放出一个 π^+ 。在这种过程中,原子核改变两个单位的电荷。也就是说,有两个中子都变成质子,或两个质子都变成中子。这方面的实验资料对于研究原子核里面的中子、质子的对关联(成对现象)是极重要的,但是用传统的方法得不到这种实验资料。

3. 一个高能粒子能够与原子核中的好几个核子发生相互作用,例如原子核吸收 π^- 介子的过程,往往和两个、三个、四个核子同时有关。这十分有利于研究原子核内的多粒子关联。而用传统的方法只能察觉某些特殊的关联。

4. 可以通过让原子核俘获 μ 子来研究传统方法所不能研究的一些弱相互作用现象。

5. 高能粒子轰击原子核,可以把原子核内层的核子打出来,从而出现深位空穴态,也可以给核子以很大的动量,从而出现高阶的多极共振态。这些都是系统

研究原子核的结构所必不可少的,也是传统方法做不到的。

6. 一个很重要的领域是高能重离子作为炮弹的科学实验。高能重离子不但有很大能量可以射穿靶原子核,而且它的来去是如此之快,以致碰撞后剩余的原子核来不及作出反应,而留在一个高度变形和高度激发的状态。这自然是低能反应所无法实现的。这个领域的现象极为丰富,值得我们以后用专文来介绍。