

# 预平衡核反应激子模型简介

高良俊 马中玉 王书暖

我们知道,当一种入射粒子与原子核发生碰撞时,由于它们之间的相互作用,将引起种种变化.其结果可能仅改变入射粒子的运动轨道,而原子核的内能没有变化,这种过程叫做弹性散射;也可能在改变入射粒子运动轨道的同时,原子核吸收一部分入射粒子的能量因而成为受激发的原子核,这种过程叫做非弹性散射;在一定的条件下,还可能使原子核本身发生质的变化,形成新的产物,沿着不同的方向飞出,这种过程叫做原子核反应.通常认为原子核反应有以下三种类型,即直接反应,预平衡发射和复合核反应.直接反应过程是指入射粒子只和靶核中一两个核子发生碰撞,其反应时间是比较短的,大约在  $10^{-21}$ — $10^{-23}$  秒左右,反应截面具有巨共振峰的特征.在角分布中出现朝前峰.在复合核反应过程中,入射粒子与靶核中的核子多次碰撞,能量得到充分交换,最后达到统计平衡,形成复合核,然后衰变.复合核衰变经历的时间较长,大约为  $10^{-18}$ — $10^{-14}$  秒左右,随能量变化的反应截面会给出尖锐的共振峰,其宽度约为  $0.1\text{eV}$ — $1\text{keV}$  左右.在复合核反应中出射粒子能谱的形状为麦克斯威分布,角分布是各向同性或  $90^\circ$  对称的.直接反应和复合核反应是核反应的二个极端过程,这是早期研究核反应的两个主要机制.六十年代中由于等时性迴旋加速器投入运行,使实验工作者得以在更高的能区( $20$ — $200\text{MeV}$ )研究新的核反应现象,从而揭示了预平衡发射机制.

实验上发现在十几  $\text{MeV}$  到几十  $\text{MeV}$  能区,出射粒子能谱的高能成分明显地比复合核发射的大,出现了高能端“硬尾”.发射粒子的角分布与复合核机制所预言的  $90^\circ$  对称有明显的偏离.另外按蒸发模型理论,由于库仑位垒的存在使  $(n, p)$  反应截面低于  $(n, n')$  反应截面,尤其对重核应更为显著.然而实验结果  $\sigma(n, p)$  值却可以和  $\sigma(n, n')$  相比较,这说明反应中发射出了一定数量的高能质子,因而库仑位垒的影响并不显著.这些事实都说明了存在着一种新的发射机制称为预平衡发射.这种机制的反应时间介于时间很短的直接反应和时间很长的复合核反应之间,约为  $10^{-21}$ — $10^{-18}$  秒.一般讲,当入射粒子能量较低时复合核反应占主要地位;当入射粒子能量较高时,三种机制都存在,但按能谱来分析,各种机制大致是可分开的,图 1 为入射质子能量为  $62\text{MeV}$  的  $^{56}\text{Fe}(p, p')$  反应能谱,在低能处有一宽峰,这是通过复合核衰变的粒子谱,或叫蒸发谱.在发射粒子能量为  $50$ — $60\text{MeV}$  之间有

一些尖锐的峰,这是直接反应机制的发射谱.在  $10\text{MeV}$ — $50\text{MeV}$  之间有一段平坦曲线,这是预平衡机制的发射谱.随入射能量增高,中间区域越大,表明这时预平衡机制占重要地位.

预平衡发射理论的研究是在六十年代开始的.格瑞芬首先提出了激子模型理论.此理论可对上述实验给以较好的解释:一个偶偶核(质子数和中子数都为偶数)的基态为费密能  $E_f$  以下的所有能级都被核子填满的态.当一个动能为  $\epsilon_i$  的核子打入靶核时,靶核就获得一个激发能  $E = \epsilon_i + B$  ( $B$  为入射粒子的结合能),于是,核子之间的剩余二体相互作用引起核子的激发,使它由费密面以下的能级跳到费密面以上的能级.对此我们可以认为是在费密面上产生了一个粒子,而在费密面下产生了一个空穴.用  $p$  表示激发核子(能量高些费密能  $E_f$  的核子)数,  $h$  表示空穴数,  $n$  为激子数,则  $n = p + h$ . 激子数  $n$  和激发能  $E$  可用来表征趋向平衡过程中的各个核态(图 2).二体相互作用的结果使激子数的改变为  $\pm 2$

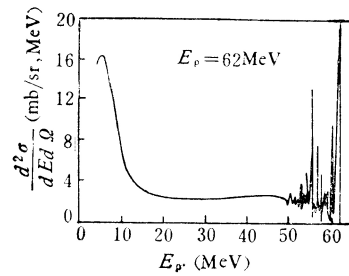


图 1  $^{56}\text{Fe}(p, p')$  在  $35^\circ$  非弹性散射谱

或  $0$ , 如可以使  $n = 3$  的态跃迁为  $n = 5$  或  $n = 1$  的态;或激子数不变只是使粒子和空穴的能量改变.这些相互作用的过程可以由图 3 来表示.(a)—(c) 表示激子数不改变的过程,它可以是粒子-粒子,空穴-空穴,粒子-空穴的相互作用,作用的结果不改变激子数,只改变粒子或空穴的能量.(d)、(e) 为激子数减少的

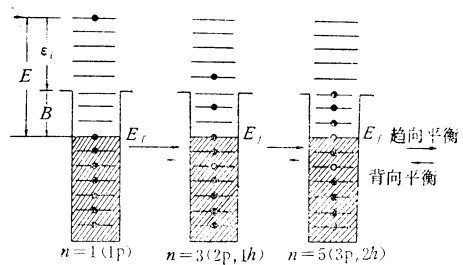


图 2 激子态趋向于平衡过程示意图

或  $0$ , 如可以使  $n = 3$  的态跃迁为  $n = 5$  或  $n = 1$  的态;或激子数不变只是使粒子和空穴的能量改变.这些相互作用的过程可以由图 3 来表示.(a)—(c) 表示激子数不改变的过程,它可以是粒子-粒子,空穴-空穴,粒子-空穴的相互作用,作用的结果不改变激子数,只改变粒子或空穴的能量.(d)、(e) 为激子数减少的

过程, 一个粒子填入一个空穴, 即消灭了一个粒子-空穴对而使另一个粒子或另一个空穴跳到更高的能级上。(f)、(g) 为激子数增加的过程, 由于粒子或空穴的作用, 费米面下的核子跳到费米面上, 产生了一个粒子-空穴对, 当然上面所有的过程都是核子-核子的作用, 核子与空穴的作用实际上仍是与费米面下核子的作用, 这七类过程都必须遵从能量守恒律。

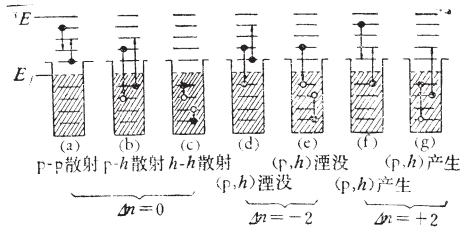


图3 激子跃迁种类图

当激子数很少时激子数增加的几率比激子数减少的几率大得多; 然而随着激子数的增多, 激子数减少的几率就逐步增大, 当激子数增多到一定值  $\bar{n}$  时, 增加激子的几率与减少激子的几率相等, 系统就达到平衡。  $\bar{n}$  随着系统总激发能的增加而增大。

在系统趋向平衡过程中每个核态都有一定的发射粒子的几率, 这种发射为预平衡发射。 激子数为  $n$ , 总激发能为  $E$  的态发射一个能量为  $\epsilon$  的粒子后变为激子数为  $n-1$ , 总激发能为  $E-\epsilon-B$  的态, 即跃迁到另一条激子链上。 若系统的激发能  $E-\epsilon-B$  大于粒子的结合能, 它仍存在着发射粒子的几率, 这就是二次预平衡发射过程。

在系统趋向平衡过程的每个阶段, 趋向平衡与粒子发射要竞争。 系统的发展可以由一组主方程来描述。 令激子数为  $n$  的核态在  $t$  时刻的占有几率为  $P(n, t)$ , 激子态分布随时间的变化满足主方程:

$$\frac{dP(n, t)}{dt} = [\lambda_-(n+2)P(n+2, t)$$

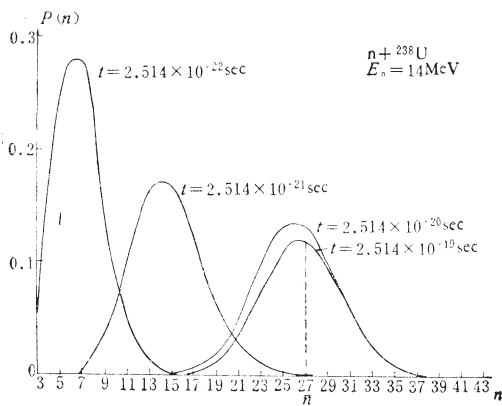


图4 激子态分布随时间变化

$$+ \lambda_+(n-2)P(n-2, t)] - [\lambda_+(n) + \lambda_-(n) + W(n)] \times P(n, t)$$

其中  $\lambda_+(n)$ ,  $\lambda_-(n)$  分别为激子数为  $n$  的核态增加激子和减少激子的跃迁率,  $W(n)$  为激子数为  $n$  的核态总的发射粒子的速率。 这个公式的物理意义是明显的, 即激子数为  $n$  的核态的占有几率随时间的改变, 等于从  $n+2$  和  $n-2$  的核态跃迁来的几率 (第一个方括号项) 减去  $n$  核态跃迁到  $n+2$  和  $n-2$  的核态的几率及发射粒子的几率 (第二个方括号项)。 解这一组主方程可以得到激子态的分布随时间的变化 (见图4)。 计算表明从形成复合系统到平衡态所需要的时间约为  $10^{-21} - 10^{-18}$  秒。

由激子态发射粒子几率  $W(n)$  的讨论知道, 发射粒子的几率随平衡过程中激子数增加而很快下降, 因此预平衡发射的高能粒子主要发生在激子数少的时候, 也就是激子态平衡过程的初期, 为了简化计算, 通常假定单核子的能级是均匀分布的, 粒子的填充不考虑泡利原理, 这种简化对讨论预平衡过程的影响是很小的。

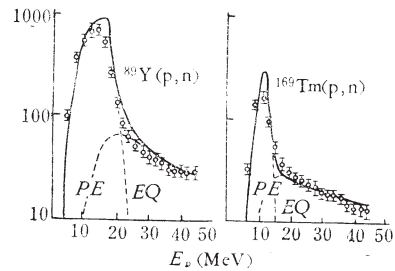


图5  $^{89}\text{Y}(p, n)$  和  $^{169}\text{Tm}(p, n)$  反应实验和计算的激发函数 PE 表示计算的预平衡成分, EQ 表示计算的平衡成分,  $\Phi$  为实验值

激子模型讨论了从形成复合系统到趋于平衡的整个过程, 图象清楚, 计算简单, 可以很好地解释实验结果。 图5 给出了用激子模型及复合核模型计算的  $^{89}\text{Y}(p, n)$  和  $^{169}\text{Tm}(p, n)$  反

激子模型讨论了从形成复合系统到趋于平衡的整个过程, 图象清楚, 计算简单, 可以很好地解释实验结果。 图5 给出了用激子模型及复合核模型计算的  $^{89}\text{Y}(p, n)$  和  $^{169}\text{Tm}(p, n)$  反

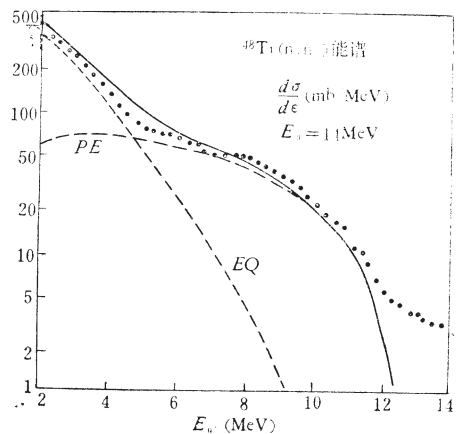


图6  $^{48}\text{Ti}(n, n')$  出射粒子能谱, PE 表示预平衡理论计算结果, EQ 表示平衡理论计算结果, ● 为实验值

应截面随入射质子能量的变化。我们可以看到在几十 MeV 能区，对截面的主要贡献来自预平衡发射机制。图 6 给出了  $^{48}\text{Ti}(n, n')$  反应的出射粒子能谱。复合核理论对能谱的“硬尾”是无法解释的，考虑了预平衡发射机制后，出射高能粒子的几率增大，能谱的“硬尾”可得到较好的解释。计算表明，对中子核反应，当入射中子能量  $E_n \sim 10\text{MeV}$  时，预平衡贡献占 20% 以上；当  $E_n \sim 20\text{MeV}$  时，预平衡贡献占 40% 左右。二次预平衡发射所占的几率很小，在  $(n, 2n)$ 、 $(n, 3n)$  等反应截面中所占几率不到 1%。

现在核反应激子模型正广泛地用来分析各种实验现象。人们用不同的参数，在各种简化下描述了复合系统趋向平衡的过程。近几年来激子模型成功地描述了轻粒子炮弹（质量数  $A \leq 4$ ）在十几 MeV 到二百 MeV 能区引起核反应发射出中子和其它轻粒子的能谱、角分布、截面等等。这个模型很好地解释了复合核理论与实验观测的偏离，并且已作为一种核反应模型用于微观核数据的理论计算和编评工作上。当然，模型本身还有许多物理因素有待考虑和进一步改进。