

# 在复合核 $^{30}\text{P}$ 中与同位旋有关的能级衰变宽度的计算

李君清 朱介鼎

(中国科学院近代物理研究所, 兰州) (兰州大学)

## 摘 要

在高激发复合核中同位旋自由度是否守恒给出复合核中库仑相互作用信息及其对复合核衰变的影响。用 H. A. Weidenmüller 的统计理论可以算出复合核  $^{30}\text{P}$  中与同位旋有关的能级衰变宽度。它与 Hauser-Feshbach 公式的主要不同之处在于对穿透因子和总衰变道数的处理中加进了同位旋耦合, 并考虑了与同位旋有关的能级密度。

## 一、导 言

处于高激发态的复合核, 其能级宽度大于其平均能级间隔, 能级状态可能非常复杂。H. A. Weidenmüller 在他的关于复合核的统计理论里<sup>[1]</sup>, 把复合核的能级状态分成类别。如以同位旋量子数来分类, 复合核状态一般仅存在有限的几类, 使我们有可能用理论来研究原子核中的库仑相互作用及与电荷有关的复合核衰变规律。

文献[2]中测量了核反应  $^{29}\text{Si}(p, \alpha_0)^{26}\text{Al}$ ,  $^{29}\text{Si}(p, \alpha_1)^{26}\text{Al}$  和  $^{29}\text{Si}(p, \alpha_2)^{26}\text{Al}$  的激发函数, 从实验上确定了复合核  $^{30}\text{P}(19.6\text{MeV})$  的与同位旋有关的能级宽度。得到同位旋态  $T_{<} = 0$  及  $T_{>} = 1$  的能级宽度分别为  $81 \pm 17\text{keV}$  和  $104 \pm 35\text{keV}$ , 两者之比是 0.78。

上述反应的入射道:  $^{29}\text{Si}$ , 质子 P 的同位旋第三分量  $T_z$  分别是  $\frac{1}{2}$  和  $-\frac{1}{2}$ , 系统的同位旋可是 1 和零, 所以复合核的同位旋可以是 1 和 0。对出射道, 剩余核  $^{26}\text{Al}$  的从基态起的前三个同位旋态是  $T = 0, 1, 0$ , 而  $\alpha$  粒子的  $T_z = 0$ , 这样在复合核  $^{30}\text{P}$  的形成和衰变过程中可共考虑  $T_{<} = 0, T_{>} = 1$  的两个同位旋态。

反应中不同同位旋态间可能存在相互作用而产生混杂。混杂的原因可以是复合核的不同同位旋态间的库仑相互作用, 或由于某些出射道是两个或更多同位旋态的线性组合, 而间接地使不同同位旋状态相耦合<sup>[3,4]</sup>。考虑到上述两类同位旋态可能存在混杂, 本文拟计算与同位旋有关的复合核  $^{30}\text{P}$  的能级衰变宽度。

0)  
 $\tau_\alpha$   
 $N_i$   
因  
对  
对  
平  
只  
以  
Z白

## 二、与同位旋混杂系数 $Z$ 有关的复合核形成截面

由文献[3]的[2,4]式: 从  $\alpha$  道入射形成复合核后经  $\beta$  道出射, 共考虑  $m = 1 (T_< = 0)$  或  $2 (T_> = 1)$  两种同位旋状态时,  $S$  矩阵元  $S_{\alpha\beta}$  的关联函数是:

$$\begin{aligned} & \langle S_{\alpha\beta}(E)S_{\alpha\beta}^*(E + \varepsilon) \rangle \\ & = (\tau_{\alpha_1}, \tau_{\alpha_2}) \begin{pmatrix} N_1 + Z + 2\pi i\varepsilon/D_1 & -Z \\ -Z & N_2 + Z + 2\pi i\varepsilon/D_2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \tau_{\beta_1} \\ \tau_{\beta_2} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (2.1)$$

$\tau_{\alpha m}, \tau_{\beta m}$  是  $\alpha, \beta$  道同位旋为  $m$  的复合核形成或衰变的穿透因子。平均对能量  $E$  进行。 $N_m, D_m$  分别为对  $m$  类能级开放的总衰变道数和能级间隔。 $\tau_{\alpha m}$  与用光学模型计算的穿透因子  $\tau_\alpha$  之间由同位旋耦合的 C-G 系数相联系。假定  $\alpha$  道的两个核是  $a$  和  $A$

$$\tau_{\alpha m} = \langle T_A, T_A^{(Z)}, T_a, T_a^{(Z)} | T_m, T_A^{(Z)} + T_a^{(Z)} \rangle^2 \tau_\alpha \quad (2.2)$$

对 Si + P 道: 
$$\tau_{\alpha_1} = \frac{1}{2} \tau_\alpha, \quad \tau_{\alpha_2} = \frac{1}{2} \tau_\alpha$$

对 Al +  $\alpha$  道: 
$$\tau_{\beta_1} = \tau_\beta, \quad \tau_{\beta_2} = \tau_\beta$$

平均复合核截面可推导出为:

$$\sigma_{\alpha\beta} \equiv \langle \sigma_{\alpha\beta}(E) \rangle = \langle S_{\alpha\beta}(E)S_{\alpha\beta}^*(E) \rangle = \frac{1}{2} \tau_\alpha \tau_\beta \frac{N_1 + N_2 + 4Z}{N_1 N_2 + (N_1 + N_2)Z} \quad (2.3)$$

只用普通的穿透因子表达。加上几何因子  $g_{\alpha\beta}$

$$\sigma_{\alpha\beta} = \frac{1}{2} \sum_{\alpha\beta} g_{\alpha\beta}^2 \tau_\alpha \tau_\beta \frac{N_1 + N_2 + 4Z}{N_1 N_2 + (N_1 + N_2)Z} \quad (2.4)$$

## 三、与同位旋有关的能级宽度

对  $J$  角动量分波, 第  $m$  类能级的平均衰变宽度为:

$$\Gamma_m(J) = \frac{N_m(J) \cdot D_m(J)}{2\pi}, \quad m = 1, 2. \quad (3.1)$$

以  $J$  分波的截面为权重, 对角动量  $J$  求和后得:

$$\frac{1}{\Gamma_m} = \sum_J \frac{\sigma_{\alpha\beta}^J}{\sigma_{\alpha\beta}} \frac{1}{\Gamma_m(S)}. \quad (3.2)$$

## 四、有关量的计算及结果

穿透因子  $\tau_\alpha, \tau_\beta$  是用光学模型计算的。还需说明  $N_m(J), D_m(J)$  及同位旋混杂系数  $Z$  的计算。

### 1. 角动量为 $J$ 的复合核第 $m$ 类能级的衰变道数 $N_m(J)$ 的计算

对  $N$  的计算用了文献[5]中的解析公式(3.1)

复杂。  
成类  
理论

发函  
旋态  
8.

的同  
态起  
衰变

核的  
组合,  
文拟

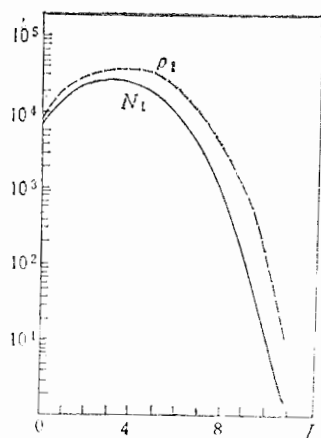


图1 在激发能为 19.6MeV 的复合核  $^{30}\text{P}$  中相应于同位旋  $T=0$  的能级总衰变道数  $N_t$  (实线) 和能级密度  $\rho_t$  (虚线) 与复合核角动量  $J$  的关系曲线

$$N(J) = 2(2i + 1)T(E_j)\rho_0(E_j) \left( \frac{T(E_j)}{f} \right)^{\frac{1}{2}} \operatorname{erf} \left[ h \left( \frac{f}{T(E_j)} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (4.1)$$

式中  $i$  是发射粒子的自旋,  $T$  是核温度参量,  $f$  是与核惯量有关的参量,  $h$  是与角动量有关的量,  $E_j$  是能量(详见文献[5])。

对  $^{30}\text{P}(19.6\text{MeV})$  的衰变考虑了以下六个发射较轻粒子的衰变道, 因为发射更重粒子的几率较小。所计算的  $N(J)$  是角动量为  $J$  时对这六种粒子衰变道数的总和, 下表 1 中列出了这六个道所用的同位旋耦合系数

表 1

同位旋 耦合系数	衰变道					
	$^{29}\text{Si} + p$	$^{29}\text{P} + n$	$^{28}\text{Si} + d$	$^{26}\text{Al} + \alpha$	$^{27}\text{Si} + t$	$^{27}\text{Al} + ^3\text{He}$
$\beta_1(T_< = 0)$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	1	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
$\beta_2(T_> = 1)$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	1	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$

与同位旋有关的总衰变道数:

$$N_m(J) = \beta_m N(J) \quad (4.2)$$

图 1 中实线给出了相应于同位旋  $T_< = 0$  的  $^{30}\text{P}$  的总衰变道数  $N_t$  与复合核角动量  $J$  的关系。

## 2. 与同位旋有关的能级密度 $\rho_m(J) = i/D_m(J)$ 的计算

根据 A. S. Jensen 给出的公式<sup>[6]</sup>, 能量为  $E$ , 同位旋为  $T$  的能级密度公式可写为:

$$\rho(E, T, T_z) = \rho(E + E_2, T_z = T) - \rho[E + E_2 + E(T, T) - E(T + 1, T), T_z = T + 1] \quad (4.3)$$

等式右边只与核的同位旋第三分量有关, 因此实际上就是普通只与激发能有关的能级密度. 式中:

$$E_2 \approx -110\text{MeV}(T^2 - T_z^2)/A \quad (4.4)$$

$$E(T, T) - E(T + 1, T) \approx -110\text{MeV}(2T + 1)/A \quad (4.5)$$

在我们所考虑的情况下:

$$\left. \begin{aligned} \rho_1(E, T = T_< = 0, T_z = 0) &= \rho[E + E'_2, T_z = 0(^{30}\text{P})] \\ &\quad - \rho[E + E'_2 + f_1(E), T_z = 1(^{30}\text{Si})] \\ \rho_2(E, T = T_> = 0, T_z = 0) &= \rho[E + E'_2, T_z = 1(^{30}\text{Si})] \\ &\quad - \rho[E + E'_2 + f_2(E), T_z = 2(^{30}\text{Al})] \\ E'_2 = 0, f_1(E) &= -110\text{MeV}/30 \\ E'_2 = -110\text{MeV}/30, f_2(E) &= -330\text{MeV}/30 \end{aligned} \right\} \quad (4.6)$$

图 1 中的虚线给出复合核  $^{30}\text{P}$  中相应于同位旋  $T = 0$  的能级密度与角动量  $J$  的关系.

(4.1)

### 3. 同位旋混杂系数 $Z$ 的估计

量有

根据复合核衰变理论<sup>[3]</sup>, 第  $m$  类能级平均衰变宽度:

$$\Gamma_m^\dagger = N_m D_m / 2\pi \quad (4.7)$$

粒子  
1 中

第  $m$  类能级的总传播宽度:

$$\Gamma_m^\dagger = \Gamma_{m,\text{int}}^\dagger + \Gamma_{m,\text{ext}}^\dagger \quad (4.8)$$

其中等式右端第一项表示复合核的第  $m$  类能级与第  $n$  类 ( $n \neq m$ ) 能级之间由于相互作用而产生混杂的传播宽度, 它因此正比于不同同位旋态之间的相互作用矩阵元  $\overline{V_{mn}^2}$ . 第二项表示复合核第  $m$  类能级与第  $n$  类能级都与出射道之间有耦合而产生外部混杂的传播宽度, 它正比于复合核同位旋态与道之间的相互作用矩阵元  $(\overline{V_m^a})^2$ . 同位旋混杂系数  $Z$  则定义为:

+  $^3\text{He}$ 

$$\frac{Z}{N_m} = \frac{\Gamma_m^\dagger}{\Gamma_m^\dagger} \quad (4.9)$$

这种不同同位旋态之间的直接地或间接地相互作用将决定态之间的跃迁. 每个反应道都有确定的同位旋, 与之有关的这种相互作用可确定  $\alpha \rightarrow \beta$  道之间的跃迁是否可能, 其不可能程度用一个抑止因子  $f$  表示:

(4.2)

$$f = \frac{\Gamma_2^\dagger}{\Gamma_1^\dagger + \Gamma_2^\dagger} \quad (4.10)$$

的关

因为:

$$f = \frac{Z}{Z + N_2} \quad Z/N_2 = \frac{f}{1 - f} \quad (4.11)$$

写出

P. G. Bizzeti 等<sup>[7]</sup>在测定反应  $^{28}\text{Si}(d, \alpha)^{26}\text{Al}$  的同位旋选择定则时得到对  $\alpha_1$  跃迁的抑止因子  $f = 0.25 \pm 0.05$ , 代入(4.11)则得到同位旋混杂系数  $Z$  值.

最后由(3.2)式可确定与同位旋有关的能级宽度  $\Gamma_1, \Gamma_2$ . 它们随  $J$  的增大是减小的.

由于能级密度参数  $\alpha$  对宽度是个很灵敏的量, 我们更关心这两个宽度的比值, 计算得到  $\Gamma_1/\Gamma_2 = 0.84$ , 实验测到  $\Gamma_1/\Gamma_2 = 0.78$ , 符合得很好.

## 五、结 论

实验得到  $\Gamma_2(T_> = 1)$  比  $\Gamma_1(T_< = 0)$  约大 30%, 用通常的 Hauser-Feshbach 公式计算<sup>[2]</sup> 得到  $\Gamma_2$  比  $\Gamma_1$  约大 10%, 用考虑了同位旋混杂的截面公式计算  $\Gamma_2$  比  $\Gamma_1$  约大 20%, 更接近实验值. 复合核  $^{30}\text{P}$  的两种同位旋态的混杂虽然很小, 理论计算仍然给出了这种混杂对能级宽度的影响.

## 参 考 文 献

- [ 1 ] D. Agassi, H. A. Weidenmuller, G. Mantzouranis, *Phys. Reports*, **22C**(1975), 145.
- [ 2 ] Mehmet Kildir, *Nucl. Phys.*, **A340**(1980), 117—124.
- [ 3 ] H. L. Harney, H. A. Weidenmuller, A. Richter, *Phys. Rev.*, **C16**(1977), 1774.
- [ 4 ] H. A. Weidenmuller, A. Richter, H. L. Harney, *Phys. Rev.*, **C18**(1978), 1953.
- [ 5 ] Li Junqing, H. L. Harney, *Nucl. Phys.*, **A391**(1982), 205—220.
- [ 6 ] A. S. Jensen, *Phys. Lett.*, **68B**(1977), 105.
- [ 7 ] P. G. Bizzeti, A. M. Bizzeti-Sona, *Nucl. Phys.*, **A108**(1968), 274.

## A CALCULATION OF ISOSPIN DEPENDENT LEVEL WIDTH IN COMPOUND NUCLEUS $^{30}\text{P}$

LI JUNQING

(*Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Langhou*)

ZHU JIEDING

(*Lanzhou University*)

### ABSTRACT

Whether the degree of freedom of isospin states in highly excited compound nucleus is conservative or not gives the information of Coulomb interaction which affects the decay property of compound nucleus. The isospin dependent level decay widths of  $^{30}\text{P}$  are calculated by means of H. A. Weidenmuller's statistical theory. It takes the isospin coupling coefficients into account for transmission coefficients as well as for the total number of decay channels. This is the difference from that of Hauser-Feshbach formula.