

(n, 2n), (n, 3n) 反应激发函数的系统学研究

姚立山

(兰州大学)

蔡敦九

(中国原子能科学研究院)

摘 要

本文用包括平衡前发射在内的蒸发模型理论研究了 (n, 2n), (n, 3n) 反应的激发函数系统学。在对实验数据分析、拟合的基础上,得到一组较好的经验参数。利用这组参数计算得到的截面和实验结果符合较好。

一、引 言

(n, 2n), (n, 3n) 反应数据对聚变堆的设计具有很重要的意义。但是,由于实验条件和技术的限制,一些核的数据长期缺乏。严格的理论计算工作量大,有时受模型适用范围的限制,结果与实验偏离较大。而系统学研究为核数据的预言提供了较为可靠而简便的方法。以前的研究工作多集中于 14MeV 附近,对于 $E_n \leq 14$ MeV, 蒸发模型理论是适用的^[1,2]。随着入射中子能量的增加, (n, 3n) 反应发生,平衡前发射的贡献就不可忽略。

本文在包括平衡前发射在内的蒸发模型工作^[3]的基础上,进一步研究了 (n, 2n), (n, 3n) 反应激发函数的系统学行为,得到了预期的结果。

二、中子反应约化截面 $R_{mn}(E_n)$

我们定义中子反应的约化截面 $R_{mn}(E_n)$

$$\sigma_{n,mn}(E_n) = \sigma_{n,M} \cdot R_{mn}(E_n), \quad (m = 2, 3). \quad (1)$$

在蒸发模型中,中等和重质量核具有较大的过剩中子数和较高的库仑势垒,带电粒子的发射几率很小,快中子引起的反应主要是中子发射。当状态达到平衡 (EQ) 时,蒸发两个、三个中子的约化截面 $R_{2n}^{EQ}(E_n)$ 和 $R_{3n}^{EQ}(E_n)$ 的解析表达式已在文献[4]中给出。

当入射中子能量增高时,必须考虑 (n, 3n) 反应和平衡前发射的贡献。一般情况下,认为只有第一个中子具有平衡前发射的特性,其余中子都属于蒸发过程。同样,平衡前发射 (PE) 一个、两个、三个中子的约化截面可分别写为

$$\left. \begin{aligned} R_n^{PE}(E_n) &= \int_{W_2}^{E_n} P_1^{PE}(W_1, E_n \rightarrow E_1) dE_1, \quad (E_n < B_3) \\ R_{3n}^{PE}(E_n) &= \int_0^{W_3} P_1^{PE}(W_1, E_n \rightarrow E_1) \cdot \left[\int_0^{W_3-E_1} P_2^{EQ}(W_2, E_n \rightarrow E_2) dE_2 \right] dE_1, \quad (E < B_3) \end{aligned} \right\} (2)$$
$$R_{2n}^{PE}(E_n) = 1 - [R_n^{PE}(E_n) + R_{3n}^{PE}(E_n)], \quad (E_n < B_3).$$

析

其

W
别
前

正

5

从激子模型理论, 可以导出平衡前发射第一个中子的能量分布

$$P_1^{\text{PE}}(E_n \rightarrow E_1) = E_1 \frac{E_n + B_1}{(E_n - E_1)^2} \sum_{n \geq 3}^n \left(\frac{E_n - E_1}{E_n + B_1} \right)^n (n^2 - n) \quad (3)$$

一般取平均激子数 $\bar{n} = 3$. 将(3)式代入(2)式, 进行积分, 整理可得到约化截面的解析表达式

$$\left. \begin{aligned} R_{2n}^{\text{PE}}(E_n) &= 3Y_2^2 - 2Y_2^3 - 3Y_3^2 + 2Y_3^3 + 12 \left(\frac{Y_3^2}{X_{32}} \right) \\ &\quad - 18 \left(\frac{Y_3}{X_{32}} \right)^2 + \left[18 \left(\frac{Y_3}{X_{32}} \right)^2 + 6 \left(\frac{Y_3^2}{X_{32}} \right) \right] e^{-X_{32}}, \\ R_{3n}^{\text{PE}}(E_n) &= 3Y_2^2 - 2Y_2^3 - 12 \left(\frac{Y_3^2}{X_{32}} \right) + 18 \left(\frac{Y_3}{X_{32}} \right)^2 \\ &\quad - \left[18 \left(\frac{Y_3}{X_{32}} \right)^2 + 6 \left(\frac{Y_3^2}{X_{32}} \right) \right] e^{-X_{32}}, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中 $X_{ij} = W_i/\theta_j$, $Y_i = W_i/E_n$, ($i = 2, 3$ $j = 1, 2$) (5)

$$\theta_1 = (E_n/a_A)^{1/2}, \quad \theta_2 = \left(\frac{E_n - B_1 - 2\theta_1}{a_{A-1}} \right)^{1/2} \quad (6)$$

W_i 表示出射中子的最大能量, B_1 表示靶核发射最外层一个中子的分离能, a_A, a_{A-1} 分别为 A 核和 $(A-1)$ 核的能级密度参数, 上脚标 EQ, PE 分别表示复合核过程和平衡前发射过程.

三、数据拟合公式

包括平衡前发射在内的蒸发模型预言的截面应是两种不同机制的截面和.

令 δ 表示平衡前发射在去弹性散射截面中所占的份额. 由公式(1), 我们有

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{n,2n}(E_n) &= \sigma_{nc} \left(\frac{\sigma_{n,M}}{\sigma_{nc}} \right) [(1 - \delta)R_{2n}^{\text{EQ}}(E_n) + \delta R_{2n}^{\text{PE}}(E_n)], \\ \sigma_{n,3n}(E_n) &= \sigma_{nc} \left(\frac{\sigma_{n,M}}{\sigma_{nc}} \right) [(1 - \delta)R_{3n}^{\text{EQ}}(E_n) + \delta R_{3n}^{\text{PE}}(E_n)], \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中 R_{2n}^{EQ} , R_{3n}^{EQ} 和 R_{2n}^{PE} , R_{3n}^{PE} 分别由文献[4]和公式(4), (5), (6)给出.

去弹性散射截面 σ_{nc} 有下述经验公式^[5]

$$\sigma_{nc} = \pi(0.12A^{1/3} + 0.21)^2. \quad (8)$$

归一因子 $\sigma_{n,M}/\sigma_{nc}$ 已经知道很好地服从指数关系^[2]

$$\sigma_{n,M}/\sigma_{nc} = 1 - k \exp[-m(N - Z)/A]. \quad (9)$$

平衡前发射份额 δ 具有如下形式^[6]

$$\delta = 1 - \exp\{-G[A(x) + A(y)]\}, \quad (10)$$

式中 $A(x)$, $A(y)$ 是 N , Z , E_n 和 B_0 ($A+1$ 核的分离能) 的函数, $G = 81.4/(g \cdot A^{1/3})$. g 为平衡前发射份额的可调因子.

我们尽可能齐全地收集了 $A = 78-209$ 的 98 个核素的 $(n, 2n)$ 反应截面实验数据, 并进行了分析和评价. 利用最小二乘法对(7)式进行实验数据拟合得到系统学参数

k, m . 通过反复调试和与实验比较,我们取 $g = 325$ 时, $k = 2.105$ 和 $m = 21.676$.

利用这组参数 g, k, m 就可计算 $A = 78-209$ 范围内,从阈能 ~ 24 MeV 的所有核素的 $(n,2n), (n,3n)$ 反应截面.

四、结果和讨论

$(n,2n)$ 和 $(n,3n)$ 反应截面的部分计算结果示于图(1—6),图中还划出了部分实验结果^[7-9]. 由图可以看出:

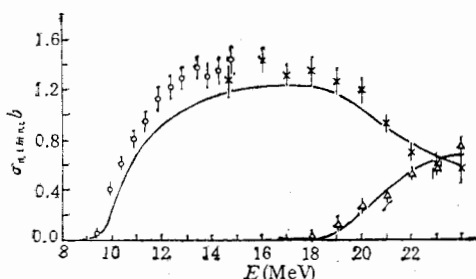


图 1 $^{93}\text{Nb}(n,2n), (n,3n)$ 激发函数曲线
× △ Veesper 1977 ○ Frehaut 1975

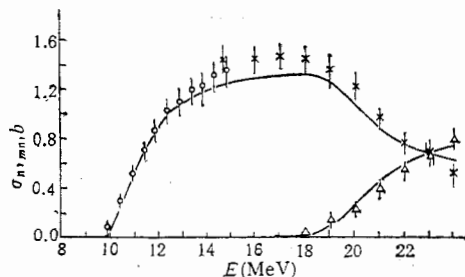


图 2 $^{103}\text{Rh}(n,2n), (n,3n)$ 激发函数曲线
× △ Veesper 1977 ○ Frehaut 1980

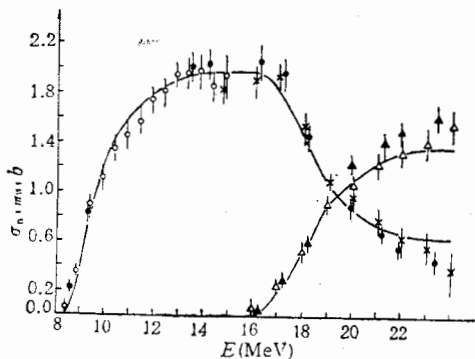


图 3 $^{169}\text{Tm}(n,2n), (n,3n)$ 激发函数曲线
● ▲ Bayhurst 1975 × △ Veesper 1977
○ Frehaut 1980

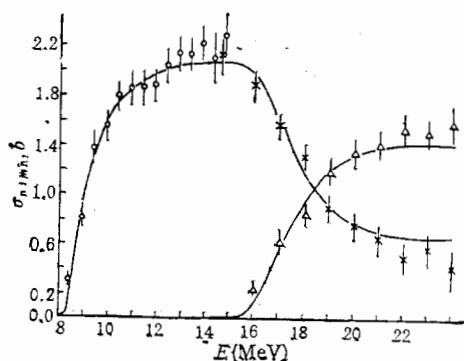


图 4 $^{181}\text{Ta}(n,2n), (n,3n)$ 激发函数曲线
× △ Veesper 1977 ○ Frehaut 1975

(1) 激发函数的计算值与实验符合较好,说明公式(7)的普适性及 g, k, m 参数的可靠性. 与 Seger 等人的工作^[3]比较,重要的改进之处在于本文给出的系统学参数可以计算任何核的 $(n,2n), (n,3n)$ 反应激发函数,而前者反应截面的计算还要受到靶核必须有一个或两个能点的实验值的限制.

(2) 激发函数的计算值,当 A 较小时,低于实验值(图 1. ^{93}Nb 核);随着 A 增加,符合程度变好(图 4, 5. $^{181}\text{Ta}, ^{197}\text{Au}$). 表明公式(7)对重核适用性较好. 例外的是 ^{209}Bi (图 6), 这似乎与能级密度参数的壳效应有关.

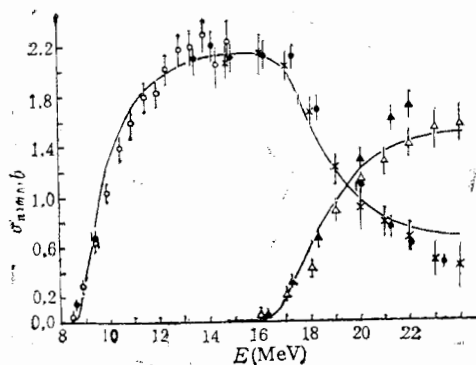


图 5 $^{197}\text{Au}(n,2n), (n,3n)$ 激发函数曲线
 ●▲ Bayhurst 1975 ×△ Veaser 1977
 ○ Frehaut 1975

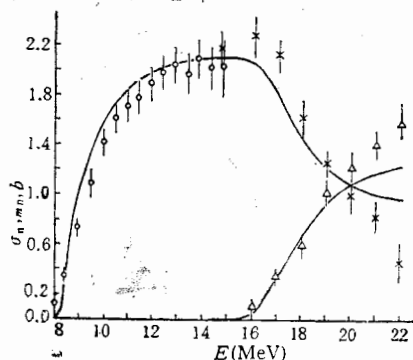


图 6 $^{209}\text{Bi}(n,2n), (n,3n)$ 激发函数曲线
 ×△ Veaser 1977 ○ Frehaut 1980

(3) 当 $E > B_1$ 时, 在 $(n,2n)$ 反应阈附近, 计算结果与实验偏离较大, 主要原因是没有考虑到 γ 发射的竞争. 一个简单的修正是采用所谓“有效阈”的方法. 在 14MeV 附近, 激发曲线变得平缓, 二者符合较好. 当 $E_n > B_2$ 时, $(n,3n)$ 反应发生, 使 $(n,2n)$ 反应的激发曲线下下降变缓; 考虑平衡前发射的贡献, $(n,3n)$ 反应则相应地降低, 计算结果与实验值符合得更好. 这比蒸发模型计算结果有很大的改进.

综上所述, 我们可以得出如下结论:

在考虑了平衡前发射的贡献之后, 中子反应激发函数的系统学行为仍然可以用一组 g, k, m 参数描述.

利用本文给出的这组参数, 公式和文献[4]的公式可以简便地预估至今难以测量或尚未测量的中等和重质量核的 $(n,2n), (n,3n)$ 反应激发函数.

若考虑 $(n,4n)$ 反应 ($E_n \geq B_3$) 及带电粒子发射等的贡献, 可进一步改善高能部分 $(n,2n), (n,3n)$ 反应激发函数与实验的符合程度.

参 考 文 献

- [1] S. Pearlstein, *J. Nucl. Energy*, 27(1973), 81.
- [2] L. Yao et al., *Radiat. Eff(GB)*, 92(1986), 257.
姚立山等, 高能物理与核物理, 11(1987), 533.
- [3] M. Segev et al., *Ann. of Nucl. Energy*, 7(1980), 577.
- [4] 姚立山等, 高能物理与核物理, 12(1988), 683.
- [5] N. N. Flerov et al., *J. Nucl. Energy*, 4(1957), 529.
- [6] J. Zhang et al., *Proc. Inter. Conf. on Nucl. Data for Basic and Applied Science*, Santa Fe, New Mexico, 13—17 May(1985), 1611.
- [7] B. P. Bayhurst et al., *Phys. Rev.*, C12(1975), 451.
- [8] L. R. Veaser et al., *Phys. Rev.*, C16(1977), 1792.
- [9] J. Frehaut et al., *Proc. of Nucl. Cross Sections and Techn.* (Washington), 2(1975), 855.
BNL-NCS-51245(BNL), 1(1980), 399.

A SYSTEMATIC STUDY OF EXCITATION FUNCTIONS FOR $(n, 2n)$ AND $(n, 3n)$ REACTIONS

YAO LISHAN

(Lanzhou University)

CAI DUNJIU

(Institute of Atomic Energy of China, Beijing)

ABSTRACT

The systematics of $(n, 2n)$ and $(n, 3n)$ cross sections has been studied by means of the evaporation model including the preequilibrium emission. A set of the empirical parameters have been extracted on the bases of analysing and fitting the measured data. The $(n, 2n)$ and $(n, 3n)$ cross sections of some nuclei have been predicted, and good agreement with the measured data have been obtained.