

$^{52}\text{Cr}(d, 2n)^{52}\text{Mn}^{g,m}$ 反应理论分析

王书暖

(中国原子能科学研究院, 北京)

G. Reffo

(ENEA-Bologna, Italy)

摘 要

利用 Hauser-Feshbach 公式和包含角动量和宇称守恒的激子模型, 同时考虑 d 核破裂效应的直接反应机制, 使用合理的光学模型、能级和预平衡反应的物理参数, 得到了 $^{52}\text{Cr}(d, 2n)^{52}\text{Mn}^{g,m}$ 反应的激发函数和同质异能比与实验值的较好符合。

一、引 言

近年来实验上测量了 $^{52}\text{Cr}(d, 2n)^{52}\text{Mn}^{g,m}$ 反应基态和同质异能态激发函数^[1]。H. I. West 等人利用基于 Hauser-Feshbach 公式和不包含角动量和宇称守恒的激子模型, 即统计模型不能得到总截面 $\sigma(g(6^+) + m(2^+))$ 和同质异能比 $R = \sigma(m(2^+))/\sigma(g(6^+))$ 与实验值的较好符合^[1]。理论计算的 (d, 2n) 截面比实验值高 30—50%, 同质异能比低于 0.5。M. G. Mustafa 等人^[2]因此强调了直接反应机制的贡献。认为在 $^{52}\text{Cr}(d, 2n)^{52}\text{Mn}^{g,m}$ 反应的分析中, 应该同时考虑两个物理过程。其一是考虑只有靶核内部才可吸收 d 核而形成复合系统 $^{54}\text{Mn}^*$, 并称之为 Direct Reaction Approach to Fusion (DRAF) 过程, 然后统计蒸发(预平衡和平衡发射)两个中子, 形成 ^{52}Mn 。其二是考虑 d 核破裂的直接反应机制。认为 d 核破裂后中子飞出, 靶核俘获其质子形成 $^{53}\text{Mn}^*$, 再相继蒸发一个中子形成 ^{52}Mn , 并称之为 Break-up Fusion Evaporation (BFE) 过程。利用 M. G. Mustafa 等人提出的上述 DRAF 和 BFE 模型, $^{52}\text{Cr}(d, 2n)^{52}\text{Mn}^{g,m}$ 反应截面与实验值有较好符合, 同质异能比也得到了改善, 但仍比实验值低 10—20%, 并且随入射 d 核能量的变化(高能部分)趋势与实验不符^[2]。

为更好理解 $^{52}\text{Cr}(d, 2n)^{52}\text{Mn}^{g,m}$ 反应, 我们改进了 M. G. Mustafa 等人的 DRAF 过程的处理, 考虑了 d 核自旋并严格求解了光学模型, 靶核对 d 核的内部吸收部分采用了 l 截断的方法, 激子模型中考虑了角动量和宇称守恒, 同时采用了合理的光学模型、能级参数、预平衡方面等物理参数, 我们的统计模型(预平衡、平衡模型)的计算结果再加上 M. G.

Mustafa 等人的 BFE 过程的计算结果,使截面与实验值符合较好,尤其是使同质异能比与实验值的符合得到了明显改善。

二、物理模型的简单描述

我们利用 Hauser-Feshbach 公式和包含角动量和宇称守恒的激子模型及其相应程序 NAUSICAB^[3] 计算了复合系统 $^{52}\text{Mn}^*(d + ^{52}\text{Cr})$ 预平衡和平衡粒子和 γ 射线的发射过程。

在靶核吸收 d 核形成 $^{52}\text{Mn}^*$ DRAF 截面计算中 M.G. Mustafa 等人在不考虑 d 核自旋情况下采用了如下公式:

$$\sigma_R^F = (\pi/k_d^2) \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1) T_l^F$$

其中

$$T_l^F = 8/\hbar v_d \int_0^{R_l} |x_l(r)|^2 W_d(r) dr$$

这里 k_d 是入射 d 核的波数, W_d 是 d 核光学势虚部, $x_l(r)$ 是扭曲波径向波函数的 l 分波, v_d 是入射 d 核速度, R_l 是截断半径, T_l^F 是带有 R_l 截断的光学模型传输系数. 计算中 R_l 取为合理的自洽的常数。

本文在 DRAF 截面计算中采用了考虑 d 核自旋的严格求解光学模型方法, 但靶核对 d 核的内部吸收部分采用了相应于 R_l 的核尺度效应的 l 截断方法, 并取其截断值 $l_{\text{cut-off}}$ 随入射 d 核能量 E_d 的增大而增大。

本文没有计算 BFE 过程而是直接采用了 M.G. Mustafa 等人的 BFE 过程的计算结果。

在利用 HAUSICAB 程序的 $\sigma(d, 2n)$ 反应道计算中, 我们对完全平衡发射和预平衡发射后再进行平衡发射过程, 分别考虑了 $^{52}\text{Mn}^*$ 复合系统到基态 6^+ 、同质异能态 2^+ 的纯中子发射而无 γ -射线发射和粒子发射与 γ 级联过程的四种可能性。因此我们定义同质异能比 R 为

$$R = \frac{\sum_{i=1}^4 \sigma(M(2^+))}{\sum_{i=1}^4 \sigma(G(6^+))},$$

i 表示以上提到的四种过程。在 γ 发射机制中我们考虑了电磁偶极和电四极跃迁过程。

三、计算结果的分析 and 讨论

1. 光学模型参数

计算中中子、质子、 α 粒子光学势参数同于参考文献[1,2], 并分别取自参考文献[4—6]。

不同的是计算中我们没有采用中子能量低于1MeV的 Moldauer 的光学势参数^[7]. 这一点对计算结果的影响将在截面和同质异能比中讨论. 我们采用文献[8]中曾在15MeV调适过的 Ti 和 Fe 的光学势参数的平均值为能量高于13MeV的 d 核光学势. 根据文献[8]中分别在15MeV和11.8MeV给出的 d 核光学势参数, 我们做了实部和面吸收虚部势的深度和扩散宽度随入射 d 核能量而变化的系统学, 并在入射 d 核能量低于13MeV计算中使用了这些参数的系统学结果.

在 $d + {}^{52}\text{Cr}$ 的复合系统形成截面的 DRAF 处理中, 我们依据文献[2]中 $R_f \sim 7.3\text{fm}$ 给出了 $l_{\text{cut-off}}$ 值, 并在高能部分相应增加了其值.

2. 能级密度参数

${}^{52}\text{Cr}(d, 2n){}^{52}\text{Mn}^{g.m.}$ 反应激发函数和同质异能比的计算结果十分敏感于能级纲图和 γ -射线衰变分支比以及连续区能级密度参数. 我们采用了与文献[2]相同的能级纲图和 γ 射线衰变分支比数据. 共33条分立能级, 最高分离能级的能量为3.2MeV. 本文采用的能级密度参数经过了对中子结合能处的辐射宽度, 平均能级间隔和能级累积数的较好调适. 我们曾分别计算了最高分离能为3.2MeV和2.24MeV而使用相同的能级密度参数情况下的激发函数和同质异能比, 其结果几乎相同. 这说明我们所用能级密度参数与分离能级的衔接是好的.

3. 激子模型

在包含角动量和宇称守恒的激子模型计算中两体相互作用矩阵元参数取为 $K = 190\text{MeV}^3$, 初始激子数 $n_0 = 4(3\rho - 1\hbar)$, 自旋截断因子取为 $\sigma_n^2 = cnA^{2/3}$, $C = 0.24$. 我们分别计算了 $C = 0.2$ 和 0.28 的激发函数和同质异能比. 从计算结果可见, 这样的变化对激发函数没有什么影响但对形状同质异能比的影响却在1—8%之间. C 变小时, 同质异能比略有增加; C 变大时, 同质异能比略有减小. 这是一个合理的结果, 因为同质异能态具有较低的角动量(2^+)而基态具有较高的角动量(6^+).

4. 激发函数和同质异能比

我们的统计模型计算结果由图1,2中实线表示, 加入文献[2]中 BFE 过程贡献部分的最后结果由图1,2中虚线表示, 文献[2]给出的最后结果由图中点折线表示. 从这些结果的比较可见, 利用 Hauser-Feshbach 公式和包含角动量和宇称守恒的激子模型, 同时考虑 d 核破裂效应的直接反应机制和考虑 d 核自旋下的 l 截断处理的 DRAF 方法, 再采用合理的光学模型参数、预平衡反应的物理参数、能级参数, 我们得到了 ${}^{52}\text{Cr}(d, 2n){}^{52}\text{Mn}^{g.m.}$ 反应的激发函数, 特别是同质异能比与实验值的较好符合. 与 M.G. Mustafa 等人的计算结果相比, 我们的同质异能比的计算结果无论在绝对值的大小上还是曲线的走向上都更接近实验值, 但低能区激发函数比 M.G. Mustafa 等人的结果和实验值都偏高. 这可能是由于以下几个原因造成的. 我们知道, 在 ${}^{52}\text{Cr}(d, 2n){}^{52}\text{Mn}$ 反应中, d 核结合能 $B_d = 13.275\text{MeV}$, 发射第一、二中子结合能分别是 $B_{n_1} = 8.928$ 和 $B_{n_2} = 12.054$. 因此, 当 $E_d < 14\text{MeV}$, (d, 2n) 反应开道后相继发射的两个中子的能量都较低. 在计算中子发

射几率中要用到中子光学势来计算相应能量的逆截面。由于 HAUSICAB 程序的限制, 本文只采用了一套适用于较高能区的中子光学势参数, 因而给出了较大的逆截面和中子发射几率, 而没有像文献[1,2]中那样对不同能区, 特别是低能区采用不同的中子光学势参数^[7]。另外本文所采用的 d 核光学势计算 $^{52}\text{Mn}^*$ 复合系统形成截面在 $E_d < 14\text{MeV}$ 能区也可能给出了偏高的结果。实际上我们在改进的 DRAF 过程处理中对较低 E_d 入射情况, 相应的 $l_{\text{cut-off}}$ 值也应变小。如果考虑到这些因素的影响, 低能区激发函数会得到改善。

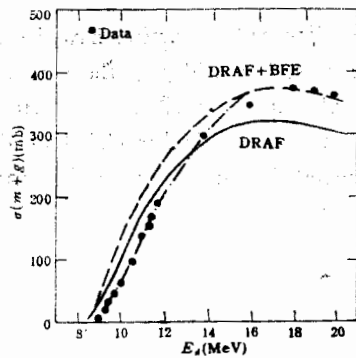


图 1 $^{52}\text{Cr}(d, 2n)^{52}\text{Mn}^{6, m}$ 反应截面。其中实线为统计模型计算结果, 虚线为最后总结结果, 点折线为 Ref[2] 中的总结结果。
...为实验值

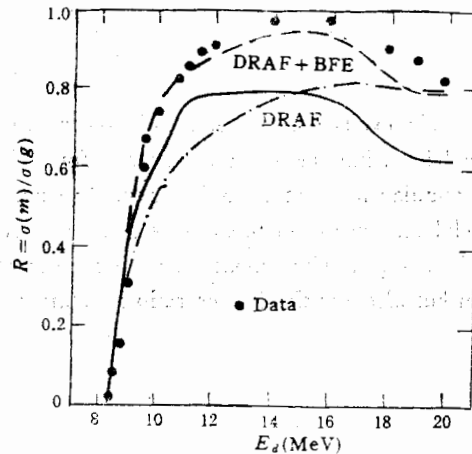


图 2 $^{52}\text{Cr}(d, 2n)^{52}\text{Mn}^{6, m}$ 反应同质异能比。其它同图 1

作者之一(王书暖)对在意大利工作期间得到的 ENEA-Bologna 各方面的支持表示感谢。

参 考 文 献

- [1] H. I. West, Jr., et al., *Phys. Rev. C*, 35 (1987), 2067.
- [2] M. G. Mustafa et al., *Phys. Rev. C*, 35 (1987), 2077.
- [3] NAUSICAB, ENEA-Bologna (Italy), 内部计算机程序.
- [4] J. Rapaport, *Phys. Rep.*, 87 (1982), 25.
- [5] F. G. Perey, *Phys. Rev.*, 131 (1963), 745.
- [6] L. M. Cadden and G. R. Satchler, *Nucl. Phys.*, 84(1966), 177.
- [7] P. A. Moldauer, *Nucl. Phys.*, 47(1963), 65.
- [8] C. M. Perey and F. G. Perey, *Phys. Rev.*, 132 (1963), 755.

THEORETICAL ANALYSIS ON $^{52}\text{Cr}(d,2n)^{52}\text{Mn}^{g,m}$

WANG SHUNUAN

(China Institute of Atomic Energy, Beijing)

G. REFFO

(ENEA-Bologna, Italy)

ABSTRACT

The excitation function and isomer ratio of $^{52}\text{Cr}(d, 2n)^{52}\text{Mn}^{g,m}$ reaction have been analyzed by using the Hauser-Feshbach formalism and exciton model considering the conservation of angular momentum and parity. By summing over the calculated contributions of statistical model and deuteron break-up effects with reasonable parameters for optical model, level density and pre-equilibrium model, a good agreement with experimental data not only for the cross section but also for the isomer ratio is obtained.