

(n, ³He) 反应截面的系统学*

姚立山 靳玉玲
(陕西师范大学 西安 710062)

摘要 本文研究了中、重质量核的 14MeV 中子的 (n, ³He) 反应截面的系统学特性, 在对实验数据分析, 评价的基础上, 给出了系统学的经验公式, 计算了一批核素的反应截面, 同实验值符合较好, 并讨论了可能的反应机制。

关键词 系统学, 截面, 反应能。

1 引言

随着聚变技术的发展和堆工程设计的要求, 14MeV 中子 (n, ³He) 反应的重要性显得越来越大。尤其是在高中子通量下, 这类反应产生的 ³He 粒子对结构材料产生的辐射损伤将严重影响材料的机械性能和反应堆的安全运行。但是, 由于 (n, ³He) 反应截面很小 (~ μb 量级), 实验测量比较困难, 理论计算又受到核模型不完善的限制, 利用截面的系统学方法可以弥补这两个方面的不足。其次, 通过 (n, ³He) 反应的研究还可以弄清这类反应的机制。

2 实验数据的分析和评价

(n, ³He) 截面测量的主要方法是活化法和放化分离技术。早期的工作由于没有考虑各种干扰反应的影响, 致使测量结果常常是相互矛盾和彼此差别较大, 或仅给出上限值。如 ¹⁰³Rh(n, ³He)¹⁰¹Tc 的截面 $\sigma_{n,h}$, 可从 1.2 μb 递增^[2]到 3500 μb。分析表明, 测量结果的巨大变化主要是由靶核材料中杂质的干扰反应的影响而引起的。用放化分离技术可消除靶核杂质的干扰反应。对于同位素的干扰反应, 一方面可以用其作为内监督的标准反应, 另一方面还应尽可能选择单同位素元素或丰度最大的同位素作为靶材料。对于个别较复杂的反应还需要进行其它的截面修正。另外, 靶子自身的

(n, 2pn), (n, n'2p), (n, pnp) 和 (n, dp) 反应都可能产生与所研究的 (n, ³He) 反应相同的余核。因此测量的截面应是上述所有反应截面之和。但幸运的是上述反应的阈能都较高, 对 14MeV 中子 (n, ³He) 反应来说其贡献可以忽略或作为实验误差处理。所以最后测量的结果仍可代表真实的 (n, ³He) 截面。

14MeV 中子 (n, ³He) 截面的测量主要是在 Jülich 和 Zagreb 两个实验室进行, 还有一些工作见文献[4~7]。在 Jülich, Qaim^[1,2] 利用高纯靶材料、专门的放化分离技术和高分辨 γ 射线计数系统进行了测量。作者不仅对杂质、同位素的干扰反应进行了仔细的考虑, 而且对其它效应的影响也进行了修正, 其结果比较可靠。在 Zagreb, Diksic 等人^[5] 测量的 14 个核中, ³¹P、⁴¹K、⁵⁹Co、⁶³Cu、⁷¹Ga、⁷⁵As、⁸³Nb 和 ¹¹⁵In 等 8 个核的 $\sigma_{n,h}$ 都较 Qaim 的值要高 5 倍以上。其余几个核或因反应中的杂质不易化学分离, 或因几组射线能量相近不易分辨, 如 ¹⁰⁹Ag 的 (n, ³He) 和 (n, n'α) 反应, 以致测量的误差较大。总之, Diksic 等人的数据虽然比早期的结果较好, 但大多数数据仍然太高, 达不到实际要求的精度, 因此对 Zagreb Lab. 的数据给予较小的权重。而早期的工作因其测量错误或误差较大而被放弃, 而后 Jülich Lab. 的测量结果比较可靠, 所以常以此作为 (n, ³He) 反应系统学研究的主要依据。

* 本工作由中国核数据中心资助

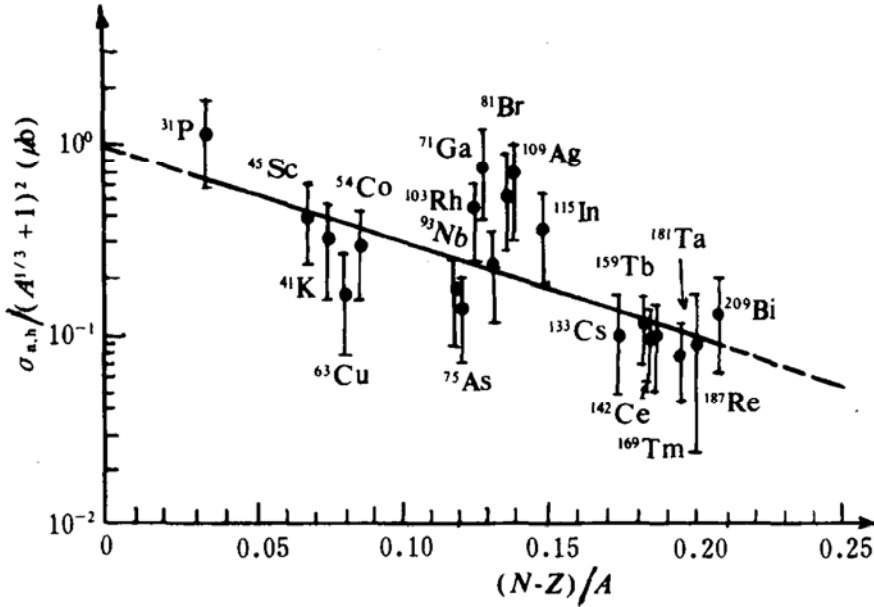


图 1 14MeV 中子的 (n, ³He) 反应截面系统学

在分析和评价的基础上,利用权重平均的方法对所选取的实验数据进行处理后,可得到 (n, ³He) 反应截面的平均值和误差(见图 1)。

3 反应截面的系统学

3.1 系统学公式和经验参数

从核反应的统计理论可得到复合核发射一个中子和 ³He 粒子的几率分别为

$$\Gamma_n = \frac{(2S_n + 1)m_n R^2}{\pi \hbar^2} T^2 \cdot \exp[-(B_n + \delta_n)/T] \quad (1)$$

$$\Gamma_{3\text{He}} = \frac{(2S_{3\text{He}} + 1)m_{3\text{He}} R^2}{\pi \hbar^2} T^2 \cdot \exp[-(B_{3\text{He}} + V_{3\text{He}} + \delta_{3\text{He}})/T] \quad (2)$$

因此, (n, ³He) 反应截面可近似为

$$\begin{aligned} \sigma_{n,3\text{He}} &= \sigma_R \cdot \Gamma_n / \Gamma_{3\text{He}} \\ &= \sigma_R \frac{m_{3\text{He}}}{m_n} \exp[(Q'_{n,3\text{He}} - V_{3\text{He}})/T] \quad (3) \end{aligned}$$

其中,

$$Q'_{n,3\text{He}} = B_n - B_{3\text{He}} + \delta_n - \delta_{3\text{He}} \quad (4)$$

称为有效 Q 值。(3) 式具有明显的物理意义:

$\sigma_{n,3\text{He}}$ 除与形成截面 σ_R 有关外,还决定于反应 Q 值、³He 粒子受到的库仑势垒、系统的对能修正和核温度等。反应截面与不对称参数 $(N - Z + \delta)/A$ 有关。但对 (n, ³He) 反应仅有奇核的测量值,因此取 $\delta = 0$, 于是有

$$\sigma_{n,3\text{He}} = (A^{1/3} + 1)^2 \alpha \cdot \exp[\beta(N - Z)/A] \quad (5)$$

显然,对截面进行核半径的修正并取对数后与 $(N - Z)/A$ 有线性关系。式中 α 和 β 是两个待定参数。利用 (5) 式对评价的实验数据进行最小二乘法拟合,可得到 (n, ³He) 反应的系统公式

$$\begin{aligned} \sigma_{n,3\text{He}} / (A^{1/3} + 1)^2 \\ = 0.918 \exp[-11.338(N - Z)/A] \quad (6) \end{aligned}$$

3.2 反应能的影响

在 $\sigma_{n,3\text{He}} / (A^{1/3} + 1)^2 \sim (N - Z)/A$ 的关系中,实际上忽略了反应能差别的影响。对 (n, ³He) 反应,除受较高(负)Q 值的制约外,库仑势垒也有重要的影响。从反应能的关系 $E_v = E_n + Q + V$ 来看,对大多数核而言 E_v 较小,它的任何小的变化都可引起截面的较大变化。因此,在系统学研究中,总是希望将截面归一

到相同的某一 E 值. 但是, 目前尚没有可利用的实验测量数据, 所以能点归一难以实现. 不过定性地来看, 反应 Q 值随 $(N-Z)/A$ 的增加而减小, 而库仑势垒 V 却随 $(N-Z)/A$ 的增加而变大. 这样, E 似乎变化不大, 从而可以补偿反应能的差别给出系统学研究带来的影响.

4 结果和讨论

利用(6)式计算了 14.6MeV 的中子引起中重质量核 $(n, {}^3\text{He})$ 反应截面, 结果如图 1(实线)所示. 由图不难看出, 在 $(n, {}^3\text{He})$ 反应中没有壳结构效应, 是否存在奇偶效应还有待于偶质量核的测量. 其次, 截面值处于 $(2\sim 10)\mu\text{b}$ 之间, 随 $(N-Z)/A$ 的增加而下降很慢, 这和 (n, p) , (n, α) 的系统学关系截然不同. 在 (n, p) 和 (n, α) 中, 由于蒸发中子的 $(n, n'\gamma)$ 和 (n, xn) 反应的强烈竞争, 发射 p 、 α 粒子的截面会随 $(N-Z)/A$ 增大而迅速下降. 而 $(n, {}^3\text{He})$ 反应, 这种缓慢的变化意味着蒸发中子的过程对其影响不大, 可能还存在其它非统计过程.

对于非常轻的核, 反应主要是通过直接作用, 而对中重质量核的情况则不同. 由于缺少角分布和能谱方面的数据, 反应机制的研究主要是通过理论计算与实验测量截面数据的比较进行推测. 早在 60 年代, Csikai 和 Frevert^[4] 就预言了 ${}^{103}\text{Rh}(n, {}^3\text{He})$ 和 ${}^{59}\text{Co}(n, {}^3\text{He})$ 反应存在直接过程. 此后, Qaim^[8] 对 $A=27\sim$

59 的 12 个核给出的统计理论计算结果较实测截面值小 $(2\sim 3)$ 个量级, 这表明统计理论的不适用性, $(n, {}^3\text{He})$ 反应中必然有某种非统计过程. 可以这样认为, 由于蒸发 ${}^3\text{He}$ 粒子受低激发能的制约, 核结构效应将促使直接过程的出现. 直接作用最可能的过程是 ${}^3\text{He}$ 粒子的敲出和 p-p 粒子对的拾取反应.

综上所述, 可以得出: (1) 尽管 $(n, {}^3\text{He})$ 反应的系统学关系较弱, 但总的趋势仍然存在, 而且可以用不对称参数 $(N-Z)/A$ 来描绘. (2) 利用导出的系统学公式可以计算一批核素的 $(n, {}^3\text{He})$ 反应截面, 这些数据对聚变技术的研究具有重要的意义. (3) $(n, {}^3\text{He})$ 反应中包含直接作用过程.

系统学关系的进一步改进和反应机制的研究尚需更多和更高精度的截面数据, 及对 ${}^3\text{He}$ 粒子的角分布和能谱的实验测量.

参 考 文 献

- 1 Qaim S M. *Radiochimica Acta*, 1978, 25 : 13
- 2 Qaim S M, et al. *J. Inorg. Nucl. Chem.*, 1974, 36 : 239
- 3 Diksic M, et al. *J. Inorg. Nucl. Chem.*, 1974, 36 : 477
- 4 Frevert E, et al. *Acta Phys. , Austriaca*, 1965, 20 : 304
- 5 Qaim S M, et al. *Phys. Rev.*, 1986, C34 : 489
- 6 Mijanich D, et al. *Nucl. Phys.*, 1984, A419 : 315
- 7 Husain L, et al. *J. Inorg. Nucl. Chem.*, 1968, 303 : 3145
- 8 Qaim S. M., et al. *Phys. Rev.*, 1980, C22 : 1371

Systematics of $(n, {}^3\text{He})$ Reaction Cross Sections

Yao Lishan Jin Yuling

(*Shanxi Normal University, Xi'an 710062*)

Abstract The systematic characters of $(n, {}^3\text{He})$ reaction cross sections have been studied for medium and heavy mass nucleus at 14MeV. A set of the empirical parameters have been extracted on the bases of analyzing and evaluating available data. The $(n, {}^3\text{He})$ reaction cross sections of some nuclei have been calculated, and a good agreement with the experimental data have been obtained. Most possible reaction mechanisms are also discussed.

Key Words systematics, cross section, reaction energy.