

## (n,t)反应截面的系统学\*

姚立山

(陕西师范大学 西安 710062)

**摘 要** 本文研究中等和重质量核 14MeV 中子(n,t)反应截面的系统学特征,在考虑奇偶效应的基础上给出了系统学经验公式,计算结果和实验值符合较好.还讨论了 Q 值效应及可能的反应机制.

**关键词** 系统学, 截面, (n,t)反应, 奇偶效应, Q 值效应.

### 1 引 言

14MeV 中子(n,t)反应截面对聚变技术的应用变得越来越重要,尤其是对计算辐射损伤、核蜕变和诱发活性等.十多年来,对非常轻核的(n,t)截面已有较好的研究,而对中等和重质量核,由于其截面很小( $\mu\text{b}$ 量级),给实验测量带来了较大的困难.因此,早期的数据一般仅有一个测量值或仅给出上限.主要原因是,在数据处理中没有扣除或没有完全扣除靶材料中杂质及同位素产生的干扰反应,致使测量结果常常是相互矛盾或差别较大.例如, $^{40}\text{Ca}(n,t)$ 反应截面可以从  $3.5 \pm 1.4 \mu\text{b}$  到  $20 \pm 4 \text{mb}$ .直到 70 年代, Qaim 等人<sup>[1]</sup>采用高纯靶材料和放射化学分离技术才获得了一批较好的数据.此后,对(n,t)截面的测量主要的还有 Woo<sup>[2]</sup>、Diksic<sup>[3]</sup> 和 Suder<sup>[4]</sup> 等人以及其它工作<sup>[5~9]</sup>.

本工作在对实验数据分析、评价的基础上,进一步研究了(n,t)截面的系统学特性.在考虑奇偶效应的情况下,拟合评价的实验数据,给出了一套新的系统学公式和经验参数,计算了  $A=27 \sim 238$  部分核素的 14.6MeV 中子的(n,t)截面,为聚变技术的研究提供具有一定价值的参考数据.

### 2 数据的评价和 Q 值效应

本工作收集了 1990 年底以前  $A=27 \sim$

238 范围内 41 个核素的 14~15MeV 中子的(n,t)反应截面,并对其进行了分析和评价.(n,t)截面的一个显著特点是数值很小( $\mu\text{b}$ 量级),各种干扰反应的影响是一个不可忽略的因素.例如, $^{56}\text{Fe}(n,t)$ 反应,可能的杂质反应是 $^{55}\text{Mn}(n,2n)$ 和同位素反应 $^{54}\text{Fe}(n,p)$ ,它们的产物核与所研究反应的余核相同.杂质的影响可以通过放化分离方法除去,而同位素的影响一方面可以选作待测核的内监督的标准反应,另一方面尽可能选择单同位素元素或最重的、最大丰度的同位素作为靶核.除此之外,靶本身的(n,dn)和(n,p2n)反应与所研究的(n,t)反应具有相同的产物核,因此也可能成为干扰因素.但是,幸运的是它们的反应阈能都较高,其影响基本上可以忽略或作为实验误差处理.

在(n,t)截面测量中,标准截面的不确定性也是引起较大误差的原因之一.例如, Qaim<sup>[1]</sup>对 $^{141}\text{Pr}(n,t)$ 截面的测量值用文献<sup>[10]</sup>的标准截面  $\sigma_{n,p}=9.0 \text{mb}$  重新归一后为  $104 \pm 30 \mu\text{b}$ ,增大将近一倍,这与文献<sup>[6,8]</sup>的结果基本一致.再如 Diksic<sup>[4]</sup>对 $^{54}\text{Fe}(n,t)$ 的截面用文献<sup>[11]</sup>的标准截面  $\sigma_{n,2n}=8 \text{mb}$  重新归一后,为  $175 \pm 15 \mu\text{b}$ ,这和 Qaim<sup>[1]</sup>的结果在误差范围内相一致.此外,对 $^{32}\text{S}$ 和 $^{40}\text{Ca}$ 也有类似情况.

在分析、评价的基础上,得到实验数据的权重平均值和误差(见图 1).图中纵坐标表示经过核半径修正后的截面值.从对 Z 的描绘可以看出,奇 A 核和偶 A 核分别位于两个不

\* 中国核数据中心资助课题

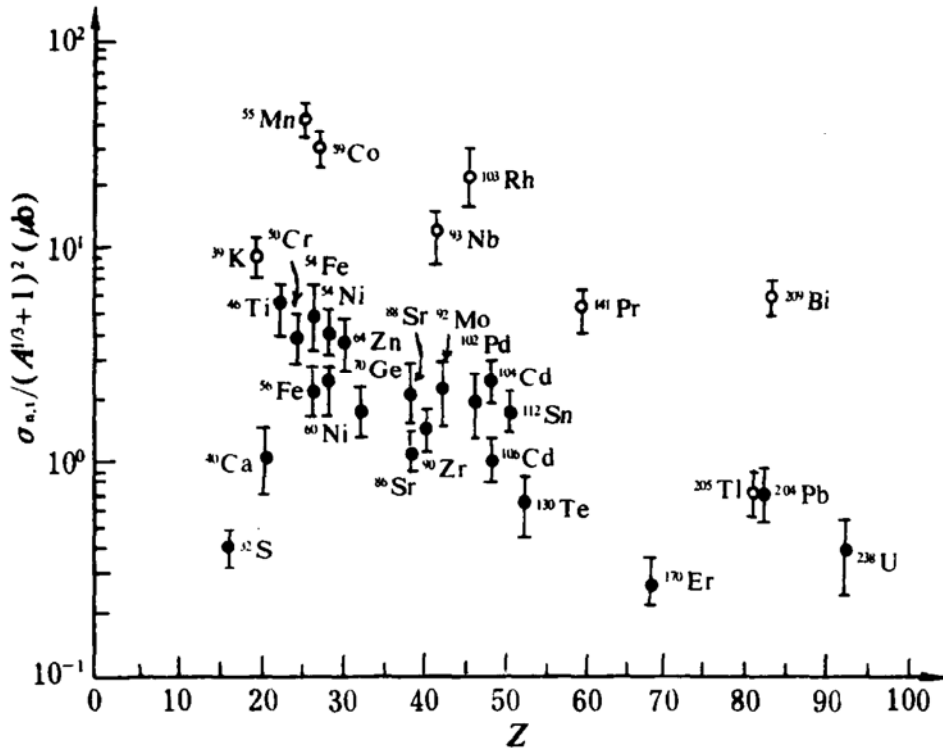


图 1 14MeV 中子(n,t)反应截面对核电荷数 Z 的描绘关系

同的区域内,前者的截面较后者约高一个量级. 这表明,(n,t)反应中存在奇偶效应. 这种现象是由于中子、质子有各自成对相处的趋势,同类核子成对相处时结合能增大,不成对相处时结合能减少,从而使奇、偶 A 核的截面差别较大. 可见,奇偶效应不是一般地 Q 值效应,而是 Q 值中的对能效应的结果. 其次,对偶 A 核的分析,可以看到在 Z=25 附近,其分布有一极值. 在 Z>25 时,截面随 Z 增加而缓慢下降,这与发射中子的 (n,n'γ) 和 (n,xn) 反应的竞争有关. 可见,在中等和重质量核的范围内仍然可以有包括奇偶效应在内的截面与不对称参数 (N-Z)/A 的系统学关系.

### 3 系统学经验公式

从复合核统计理论,激发能为  $E_a^*$  的复核 a 发射一个 x 粒子的分宽度为  $\Gamma_x$ ,按照细致平衡原理可以写成

$$\Gamma_x = \frac{(2S_x + 1)m_x}{\pi^2 \hbar^2 \rho(E_a^*)} \int_{V_x}^{E_a^* - B_x - \delta_x} e_x \sigma_c(e_x) \times \rho(E_b^*) de_x \quad (1)$$

其中,  $S_x$  和  $m_x$  分别是 x 粒子的自旋和质量,  $B_x$  和  $\delta_x$  是复合核中 x 粒子的分离能和奇偶特性的能量修正,  $\rho(E_a^*)$  和  $\rho(E_b^*)$  分别是复核和余核的能级密度,可近似地表示成系统熵的函数,即

$$\rho(E_b^*) / \rho(E_a^*) \approx \exp[S(E_b^*) - S(E_a^*)] \quad (2)$$

系统的熵由下式求得

$$\begin{aligned} S(E_b^*) - S(E_a^*) &\approx (E_b^* - E_a^*) / T \\ &= - (B_x + \delta_x - e_x) / T \end{aligned} \quad (3)$$

代(2,3)式到(1)式中,得到

$$\begin{aligned} \Gamma_x &= \frac{(2S_x + 1)m_x}{\pi^2 \hbar^2} \int_{V_x}^{E_a^* - B_x - \delta_x} e_x \sigma_c(e_x) \\ &\quad \times \exp[-(B_x + \delta_x + e_x) / T] de_x \end{aligned} \quad (4)$$

式中,  $\sigma_c$  为逆截面,可表示为

$$\sigma_c(e_x) = \begin{cases} \pi R^2 (1 - V_x / e_x) & e_x > V_x \\ 0 & e_x < V_x \end{cases} \quad (5)$$

$V_x$  为出射粒子所受到的库仑势垒, 对 neutron,  $V_x=0$ . 一般认为逆截面与出射粒子动能无关, 近似地取几何截面 ( $\pi R^2$ ). 于是, 对 (4) 式积分就可得到发射中子和 t 粒子的几率分别为

$$\left. \begin{aligned} \Gamma_n &= \frac{(2S_n + 1)m_n R^2}{\pi^2 \hbar^2} T^2 \exp[-(B_n + \delta_n)/T] \\ \Gamma_t &= \frac{(2S_t + 1)m_t R^2}{\pi^2 \hbar^2} T^2 \exp[-(B_t + \delta_t + V_t)/T] \end{aligned} \right\} (6)$$

(n,t) 反应截面为

$$\sigma_{n,t} \approx \sigma_R \Gamma_t / \Gamma_n$$

$$= \sigma_R \frac{m_t}{m_n} \exp[(Q_{n,t} - V_t)/T] \quad (7)$$

其中,  $Q_{n,t} = B_n - B_t + \delta_n - \delta_t$  为有效 Q 值. 按照 Tahar 和 Selvi 的半经验质量公式, (n,t) 反应截面的系统学关系不是依赖于  $(N-Z)/A$ , 而是与不对称参数  $(N-Z+\delta)/A$  有关. 这里  $\delta=0, 1$  分别对应于奇和偶质量核. 于是, 在引入奇偶效应的修正后, 系统学公式可以写成如下的形式

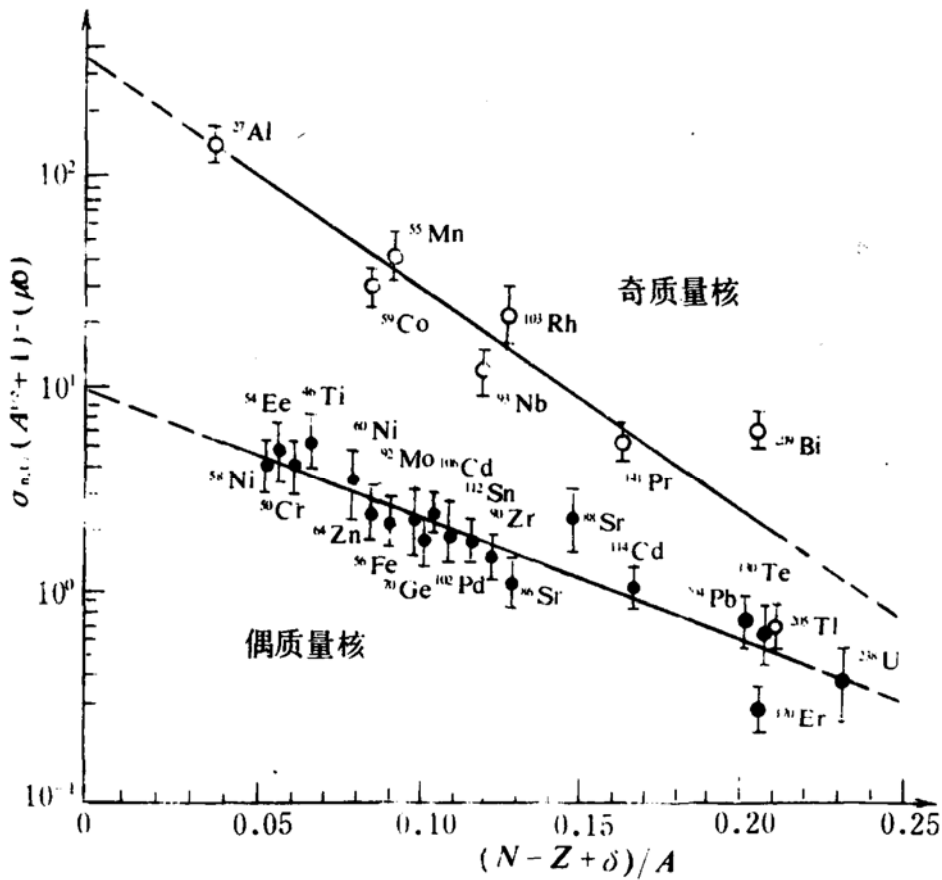


图 2 14MeV 中子(n,t)反应截面的系统学关系

$$\sigma_{n,t}/(A^{1/3} + 1)^2 = \alpha \exp(\beta \frac{N-Z+\delta}{A}) \quad (8)$$

显然, 对截面进行核半径修正并取对数后的截面与  $(N-Z+\delta)/A$  有线性关系. 式中,  $\alpha$  和  $\beta$  是两个待定参数. 利用最小二乘法拟合评价的实验数据得到的参数分别为

$$\left. \begin{aligned} \text{对奇 } A \text{ 核, } \sigma_{n,t}/(A^{1/3} + 1)^2 &= 327.602 \exp(-24.495 \frac{N-Z}{A}) \\ \text{对偶 } A \text{ 核, } \sigma_{n,t}/(A^{1/3} + 1)^2 &= 9.592 \exp(-14.038 \frac{N-Z+1}{A}) \end{aligned} \right\} (9)$$

## 4 结果与讨论

利用(9)式对 14.6MeV 中子的中等和重质量核的(n,t)反应截面计算结果示于图 2(实线),(n,t)反应具有明显的奇偶效应.由于实验数据的缺乏,奇 A 核仅给出一个粗略的趋向.<sup>209</sup>Bi和<sup>205</sup>Tl偏离线性较大,需要重新测量和评价.偶 A 核的实验值与计算结果在实验误差范围内符合较好,说明实验测量的截面与不对称参数有较好的线性关系.此外,随 A 的增加,奇偶效应逐渐减弱.这是由于当 A 增加时,奇偶核的 Q 值差别越来越小之缘故.

另外,在系统学研究中,为了消除 Q 值的不同所引起的影响,总是希望把截面归一到相同的反应能  $E_r (= E_n + Q + V)$ . 对(n,t)反应,由于阈能较高,则  $E_r$  是一个较小的量,它的任何变化都会引起截面较大的变化.这正是(n,t)反应中系统学关系比(n,p)和(n,2n)反应较弱的主要原因.显然,能点归一的方法对(n,t)反应的系统学研究尤为重要,然而由于激发函数实验测量的困难,目前尚难实现.

对于(n,t)反应机制的研究,由于几乎没有角分布和能谱的系统测量数据,对机制的研究都是依靠理论计算与测量截面的比较进行推测. Woo<sup>[2]</sup>对 A=40~205 却的 7 个核的统计理论计算结果都比实验值约小 1~3 个量级.而 Qaim<sup>[12]</sup>对 A=27~59 的 12 个核的计

算表明,对 A=27~40 的核,统计过程占主导地位,而对 A>40 的核,主要是非统计过程.最近, Wolfle<sup>[13]</sup>关于 8 个核的 16~19MeV 激发函数测量结果和 Woo、Qaim 的结论也一致.这说明,在较重的核中有直接作用存在,反应机制可能是 t 粒子的敲出和 n-p 粒子对的拾取.

为进一步改进(n,t)反应系统学关系和研究(n,t)反应机制,尚需更多、更高精度的截面数据,尤其是角分布和能谱的实验测量结果.

## 参 考 文 献

- 1 Qaim S M, et al. J. Inorg. Nucl. Chem., 1973, 35 : 19, Nucl. Phys., 1976, A257 : 233
- 2 Woo T W, et al. In Proc. Int. Conf. on Nucl. Cross Sections for Technology, Knoxville 1979, 853. T-ANS., 1978, 28 : 9
- 3 Diksic M, et al. J. Inorg. Nucl. Chem., 1974, 36 : 447
- 4 Sudar S, et al. Nucl. Phys., 1979, A319 : 157
- 5 Biro T, et al. J. Inorg. Nucl. Chem., 1975, 37 : 1583
- 6 Csikai J, et al. Radiochimica Acta, 1979, 26 : 135
- 7 Liljavirta H, et al. Phys. Scripta, 1978, 18 : 75
- 8 Katoh T, et al. NEANDC(J)-137/U, 1989, 17
- 9 Kawade K, et al. NEANDC(J)-154/U, 1990, 17
- 10 Qaim S M, et al. Radiochem Radioanal. Letters, 1976, 25 : 335
- 11 Qaim S M, et al. Nucl. Phys. 1972, A185 : 614
- 12 Qaim S M, et al. Phys. Rev., 1980, C22 : 1371
- 13 Wolfle R, et al. Radiochimica Acta, 1990, 50 : 5

## Systematics of (n, t) Reaction Cross Sections

Yao Lishan

(Shanxi Normal University, Xian 710062)

**Abstract** The systematic characters of (n,t) reaction cross sections have been studied for medium and heavy mass nuclei at 14 MeV. A set of the empirical formulas have been given on the bases of the odd-even effects. The (n,t) reaction cross sections of some nuclei have been calculated, and a good agreement with the experimental data have been obtained. The Q-value effect and possible reaction mechanism are also discussed.

**Key Words** systematics, cross section, (n,t) reaction, odd-even effect, Q-value effect.