

(n,p) 激发函数一种新的半经验计算方法*

樊胜^{1,2,1)} 阎芳^{1,3} 张鸿洲^{1,4} 赵志祥¹

1 (中国原子能科学研究院 北京 102413)

2 (上海大学射线研究所 上海 201800)

3 (南华大学核技术学院 衡阳 421000)

4 (西北大学物理系 西安 710006)

摘要 基于核反应蒸发模型和预平衡激子模型, 在一些近似条件下得到了入射能量小于 20MeV 的 (n,p) 的激发函数解析半经验表达式. 靶核在 $23 \leq A \leq 209$ 的范围内, 利用大量 (n,p) 反应的截面实验数据对可调参数进行了研究, 得到了参数对靶核的 N 和 Z 以及中子入射能量的依赖关系. 对得到的参数做了定性的解释, 利用普适参数对 (n,p) 反应的激发函数做了预言, 预言值在其误差范围内与实验数据一致.

关键词 蒸发模型 预平衡激子模型 (n,p) 反应的激发函数

1 引言

(n,p) 反应截面对于反应堆, 特别是快堆和聚变堆工程设计来说是一种很重要的数据. 该反应产生的带电粒子在材料局部会产生大量的热, 产生 H 气体会在材料中形成气泡, 从而对材料造成辐照损伤, 这些都会直接影响反应堆元件和结构材料的物理和机械性能. 若干年来, (n,p) 反应的实验一直没有中断, 取得了一些重要的进展. 但到目前为止, (n,p) 反应的截面的实验数据还存在很大的分歧^[1], 还有相当的核素没有实验数据, 或仅在 14MeV 附近有实验数据. 对于重结构材料核, 由于 (n,p) 反应截面很小, 实验数据就更加缺少. 因此, 希望通过理论模型和系统学研究来补充实验数据的不足.

目前一些成熟的理论模型程序如: GNASH^[2], TNG^[3], UNF^[4], EMPIRE-II^[5] 利用复合核反应理论不仅可以研究 (n,p) 反应, 还可以研究其他反应道的数据, 如激发函数, 角分布, 双微分截面等等. 但计算过程需要输入大量的参数, 如能级密度、巨偶级共振参数、光学势参数等等, 不仅仅需要输入靶核的这些参数, 而且还必须包括剩余核的参数. 对每一个核

素, 都有一套非常多的参数需要调整, 以使计算结果和实验符合. 这样的工作, 不仅参数和参数调整的工作量巨大, 而且调整的难度很大. 同时这些理论程序考虑的是所有反应道的数据, 而 (n,p) 反应在某些情况下是一个相对小量, 为了其他的反应道能符合实验数据, 而牺牲 (n,p) 反应数据的精确性.

正因为如此, 系统学研究 (n,p) 反应的激发函数自 1957 年 Levkovskii^[6] 的工作以来到目前都有大量的研究工作. 系统学主要是考虑 (n,p) 反应中最主要的特点, 对复杂的理论公式进行大量的简化. 因此系统学既保留了理论模型的清晰物理图像, 又具有公式简单的优点. (n,p) 反应的系统学主要有两类: 单能点, 特别是 14MeV 附近的 (n,p) 反应截面的系统学^[1,7-23]; 这一类的系统学研究有两个共同的缺陷, (1) 都是以统计模型为基础, 没有考虑预平衡发射的贡献, (2) 只能描述 (n,p) 反应截面的趋势, 系统学值对实验数据的偏离比较大. 另一类系统学可以描述 (n,p) 反应的激发函数^[24,25]. S. Pearlstein^[24] 给出了在 $Z = 20-40$ 的核区的 (n,p) 反应的激发函数, 其优点是公式形式简单, 在特定的核区可以粗略地描述实验数据, 但在此核区以外, 对实验数据的描

2003-03-27 收稿

* 国家重点基础发展规划项目(G1999022600), 教育部归国留学基金资助

1) E-mail: sfan@iris.ciae.ac.cn

述就非常差了. 其最大的缺点是仅仅基于蒸发模型, 其形状因子完全是经验选定的, 无法从统计理论中近似导出, 因此无法预言没有实验数据的核素. 赵志祥^[25]则基本上克服了以上系统学的缺点, 在蒸发和预平衡模型的基础上, 考虑了粒子的二次发射, 对理论模型进行了大量的简化, 得到了有两个参数的半经验计算方法. 其系统学的结果很好地再现了实验数据. 但在该系统学中假定了复合系统的形成截面与能量没有关系, 作为该系统学的一个主要参数.

在赵志祥工作的基础上, 在 $E_n \leq 20\text{MeV}$ 的情况下, 忽略了粒子的二次发射过程, 认为复合系统的形成截面是能量相关的, 得到了理论模型清晰、公式形式简单的半经验计算方法, 在靶核 $23 \leq A \leq 209$ 的范围内, 利用大量 (n, p) 反应的截面实验数据对可调参数进行了研究, 得到了参数对靶核的 N 和 Z 以及入射能量的依赖关系. 对得到的参数做了定性的解释, 利用普适参数对 (n, p) 反应的激发函数做了预言, 预言值在其误差范围内与实验数据一致.

2 半经验计算方法

在半经验计算方法中, 为了简化计算得到解析表达式, 在公式的推导中假定:

(1) 复合核能级密度取为常温型, 且和核温度有依赖性;

(2) 预平衡发射过程只考虑 $n_0 = 3$ 的激子态; 无返回近似;

(3) 与发射质子竞争主要是发射中子的过程, 忽略粒子的二次发射过程.

在此假定基础上, (n, p) 反应截面可以表述为

$$\sigma(n, p) = \sigma^{\text{ev}}(E_C, E_R) + \sigma^{\text{pre}}(E_C, E_R), \quad (1)$$

式中 $\sigma^{\text{ev}}(E_C, E_R)$ 为蒸发部分的贡献, $\sigma^{\text{pre}}(E_C, E_R)$ 为预平衡发射的贡献. $E_C = E_n + B_n$, 表示复合核的激发能, E_n, B_n 分别是入射中子的能量以及中子结合能; $E_R = E_C - B_n(B_p) - \epsilon$ 是余核的激发能, ϵ 为出射粒子带走的能量, B_p 为质子结合能.

按照蒸发模型理论^[26], 蒸发部分的贡献为

$$\sigma^{\text{ev}}(E_C, E_R) = C_p(N, Z, E_n) \frac{k}{1+k} \frac{\Gamma_p(E_C, E_R)}{\Gamma^C(E_C)}, \quad (2)$$

$C_p(N, Z, E_n)$ 为复合核的形成截面, 在本工作中为与入射中子能量 E_n 和靶核 N, Z 有关的可调参数;

式中 $\Gamma_p(E_C, E_R)$ 为质子的衰变宽度, $\Gamma^C(E_C)$ 为复合核的总衰变宽度, $k/(1+k)$ 是预平衡发射后达到平衡态的几率, k 是一个可调参数, 对于 $E_n \leq 20\text{MeV}$ 的中子入射, 经验地取为^[27]

$$k = 0.035A \left(1.0 + \frac{B_n}{E_n} \right), \quad (3)$$

A 表示靶核的质量数. 质子的衰变宽度为

$$\Gamma_p(E_C, E_R) = \frac{(2S_p + 1)m_p}{\pi^2 \hbar^2 \rho(A, E_C)} \times \sigma_{\text{in}} \int_0^{E_C - B_p} D(\epsilon) \epsilon \rho(R, E_C - B_p - \epsilon) d\epsilon, \quad (4)$$

S_p 是质子的自旋, m_p 是质子的质量, σ_{in} 为逆截面, $D(\epsilon)$ 为库仑位垒穿透因子, $\rho(A, E_C)$ 为复合核能级密度.

根据与发射质子竞争的主要是发射中子这一假定, 复合核的总衰变宽度 $\Gamma^C(E_C) \approx \Gamma_n(E_C, E_R) + \Gamma_p(E_C, E_R)$, $\Gamma_n(E_C, E_R)$ 为中子衰变宽度, 考虑到 $E_n \leq 20\text{MeV}$ 的中子入射, $\Gamma_n(E_C, E_R) \gg \Gamma_p(E_C, E_R)$, 则复合核的总衰变宽度近似为 $\Gamma^C(E_C) \approx \Gamma_n(E_C, E_R)$, 中子衰变宽度可以写为

$$\Gamma_n(E_C, E_R) = \frac{(2S_n + 1)m_n}{\pi^2 \hbar^2 \rho(A, E_C)} \times \sigma_{\text{in}} \int_0^{E_C - B_n} \epsilon \rho(R, E_C - B_n - \epsilon) d\epsilon, \quad (5)$$

式中 S_n 是中子的自旋, m_n 是中子的质量. 库仑位垒穿透因子 $D(\epsilon)$ 取为

$$D(\epsilon) = \begin{cases} 1.0 & \epsilon \geq E^p \\ \frac{\epsilon}{E^p} & \epsilon < E^p \end{cases}, \quad (6)$$

E^p 是库仑位垒势高度, 取为^[28]

$$E^p = 1.03 \times \frac{(Z - Z_p)Z_p}{(A + 1 - A_p)^{1/3} + A_p^{1/3}} \times \left[1 - \frac{1.13}{(A + 1 - A_p)^{1/3}} \right], \quad (7)$$

式中 A_p, Z_p 分别为质子的质量数和核电荷数. 复合核能级密度取为常温型

$$\rho(A, E) \propto e^{-E/T} \quad (8)$$

T 为核温度, 在 $E_n \leq 20\text{MeV}$ 的情况下取为^[9]

$$\frac{1}{T} = \sqrt{\frac{a}{U_s}} + \frac{3}{2U_s}, \quad U_s = 2.5 + \frac{150}{A}, \quad (9)$$

a 为能级密度参数, 取文献[9]中的值. 由于 $m_n \approx m_p$, 则蒸发部分的贡献可以近似写为

$$\sigma^{\text{ev}}(E_C, E_R) = C_p(N, Z, E_n) \frac{k}{1+k} \frac{\Gamma_p(E_C, E_R)}{\Gamma^C(E_C)} \equiv$$

$$C_p(N, Z, E_n) = \frac{k}{1+k} \times \frac{\int_0^{E_c - B_p} D(\epsilon) \epsilon \rho(R, E_c - B_p - \epsilon) d\epsilon}{\int_0^{E_c - B_n} \epsilon \rho(R, E_c - B_n - \epsilon) d\epsilon} \quad (10)$$

按照预平衡激子理论^[29], 预平衡发射的贡献可以表述为

$$\sigma^{pre}(E_c, E_n) = C_p(N, Z, E_n) \frac{1}{1+k} \frac{L_p(n=3)}{L} \quad (11)$$

L_p 和 L 是质子的预平衡发射几率和复合核的总预平衡发射几率. 质子在激子态 $n=3$ 的情况下预平衡发射几率, 可以写为,

$$L_p(n=3) = \frac{(2S_p + 1) m_p \sigma_{in}}{\pi^2 \hbar^3 \omega_c(2, 1, E_c)} \times \int_0^{E_c - B_p} \epsilon D(\epsilon) \omega(1, 1, E_c - B_p - \epsilon) d\epsilon, \quad (12)$$

$\omega_c(2, 1, E_c)$ 为复合核系统两个粒子和一个空穴 ($n=3$) 的激子态密度. 根据与发射质子竞争的主要是发射中子这一假定, 复合核的预平衡发射几率 $L \approx L_n + L_p$, 考虑到 $E_n \leq 20\text{MeV}$ 的中子入射, $L_n \gg L_p$, 则复合核的总预平衡发射几率近似为 $L \approx L_n$, 中子预平衡发射几率为

$$L_n(n=3) = \frac{(2S_n + 1) m_n \sigma_{in}}{\pi^2 \hbar^3 \omega_c(2, 1, E_c)} \times \int_0^{E_c - B_n} \epsilon \omega(1, 1, E_c - B_n - \epsilon) d\epsilon. \quad (13)$$

激子态密度采用 Ericson 公式^[30],

$$\omega_c(p, h, E) = \frac{g(gE)^{n-1}}{p! h! (n-1)!}, \quad (14)$$

p 为粒子数, h 为空穴数目, 激子数目为 $n = p + h$. g 为单粒子态密度参数. 由于入射中子能量低于 20MeV, 单粒子态密度取为

$$g = \frac{A}{8}. \quad (15)$$

预平衡发射的贡献近似为

$$\sigma^{pre}(E_c, E_n) \approx C_p(N, Z, E_n) \frac{1}{1+k} \times \frac{\int_0^{E_c - B_p} \epsilon D(\epsilon) \omega(1, 1, E_c - B_p - \epsilon) d\epsilon}{\int_0^{E_c - B_n} \epsilon \omega(1, 1, E_c - B_n - \epsilon) d\epsilon}, \quad (16)$$

也可以得到解析表达.

因此我们得到的 (n, p) 反应激发函数的半经验计算公式中只有唯一的参数 $C_p(N, Z, E_n)$.

3 参数系统学研究和计算结果

由于 (n, p) 反应的截面的实验数据还存在很大的分歧^[1], 而且还有相当的核素没有实验数据, 或仅在 14MeV 附近有实验数据. 我们选取研究 $C_p(N, Z, E_n)$ 参数的实验数据时, 尽可能地收集了所有的最新测量数据, 对数据进行了修正和加权处理^[31], 并对选取的实验数据和国际通用的四大评价数据库, ENDF/B6, CENDL2, JEFF3, JENDL3.3 的 (n, p) 反应激发函数进行了比较, 只有实验数据和所有评价数据库数据一致的才采用, 对于低于 1mb 的数据也没有采用.

研究表明^[24,25], 参数在一定入射能量下, $C_p(N, Z, E_n)$ 与 $(1 + A^{1/3})^2$ 以及不对称参数^[23], $\exp(k(N - Z)/A)$ 有关, 我们研究了 20MeV 以下的 (n, p) 反应的 $C_p(N, Z, E_n)$ 情况, 确实发现有相应的关系,

$$C_p(N, Z, E = \text{Constant}) = (1 + A^{1/3})^2 \times \exp^{2.30 \times (B + K \frac{N-Z}{A})}. \quad (17)$$

图 1 到图 4 给出了 8, 11, 14.5 和 20MeV 的中子入射的情况下, $C_p(N, Z, E_n)$ 与靶核的 N, Z 的相关性. 图中可以看出 $C_p(N, Z, E_n)$ 的 N, Z 的系统学规律非常明显. 由于 14.5MeV 的实验点非常多 (在我们的工作中, 选取了 300 多个核素的 (n, p) 反应截面在 14.5MeV 的数据), 其结果也比较较好. 考察图 1—4, 发现 (n, p) 反应, 当不对称参数相同时, 较重核的 $C_p(N, Z, E_n)$ 比实验值偏高, 较轻的核素偏低. 这种规律可以利用核的稳定性来解释. 在 β 稳定线上, $A-Z$ 的半经验公式为^[32]

$$Z \cong \frac{A}{1.98 + 0.0155A^{2/3}} \quad (18)$$

则不对称参数

$$\left(\frac{N-Z}{A}\right)_\beta \approx 1 - \frac{2}{\alpha + \beta A^{2/3}} \quad (19)$$

并不是一个常数, 而是随 A 的增大而增大.

通过对 $E_n \leq 20\text{MeV}$ 的 $C_p(N, Z, E_n)$ 与入射中子能量 E_n 的依赖关系进行了研究, 得到公式 (17) 中的参数 K 和 B 的能量相关性如下:

$$\begin{aligned} K &= -37.17493(\pm 4.17235) + \\ &1.48428(\pm 0.27889) \times E_n, \\ B &= 1.3309(\pm 0.2955) - \\ &0.1594(\pm 0.0199) \times E_n. \end{aligned} \quad (20)$$

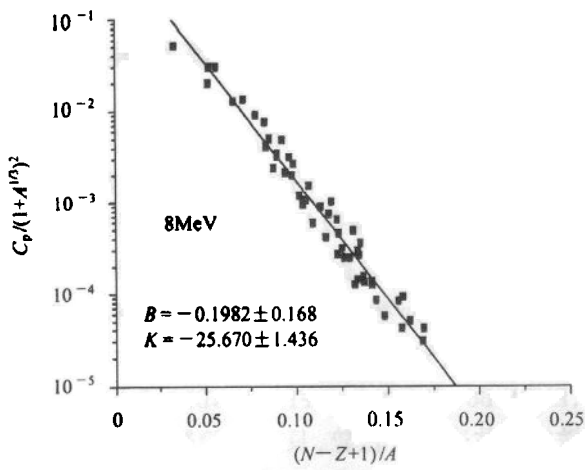


图 1 入射中子为 8MeV 的 $C_p(N, Z, E_n)$ 与靶核 N 和 Z 系统规律

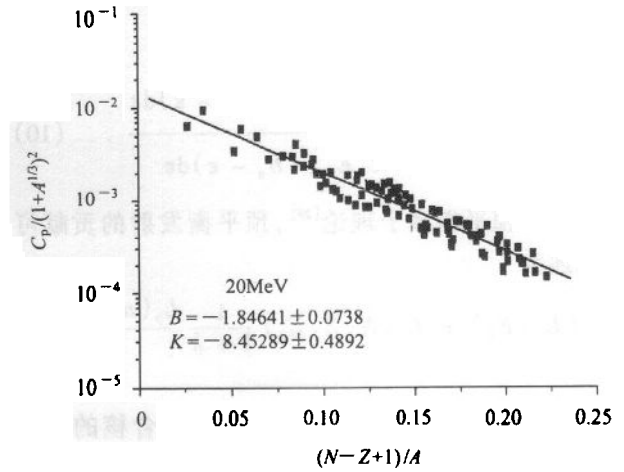


图 4 入射中子为 20MeV 的 $C_p(N, Z, E_n)$ 与靶核 N 和 Z 系统规律

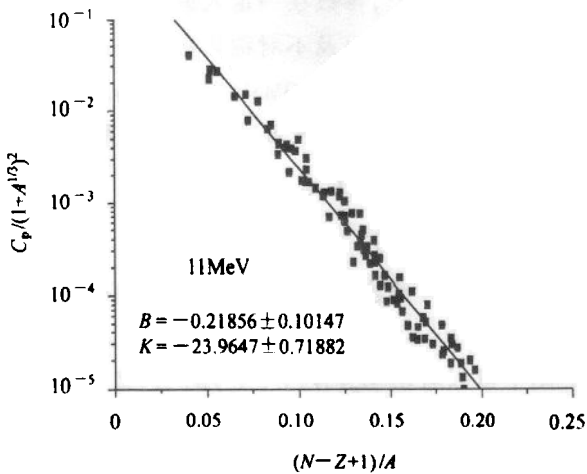


图 2 入射中子为 11MeV 的 $C_p(N, Z, E_n)$ 与靶核 N 和 Z 系统规律

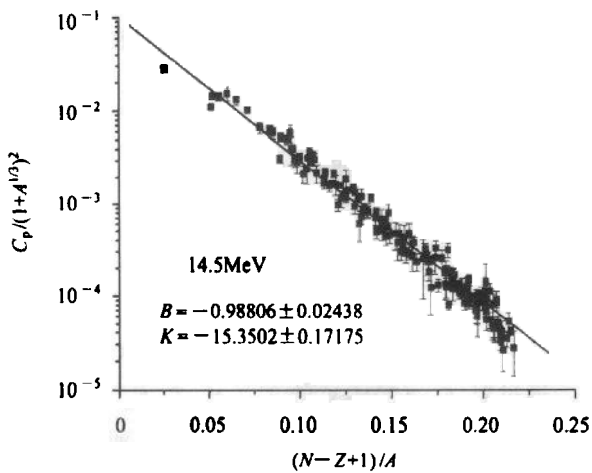


图 3 入射中子为 14.5MeV 的 $C_p(N, Z, E_n)$ 与靶核 N 和 Z 系统规律

可以看出,随入射中子能量的增加,不对称参数的系数增加.

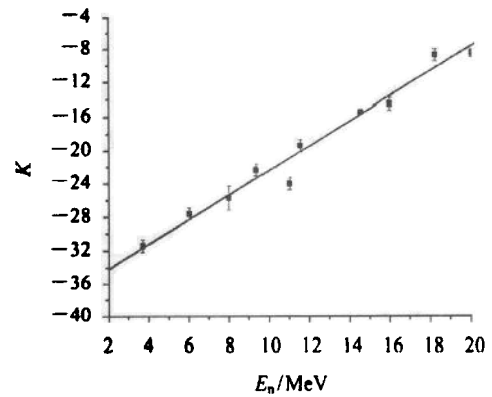


图 5 参数 K 的能量依赖关系

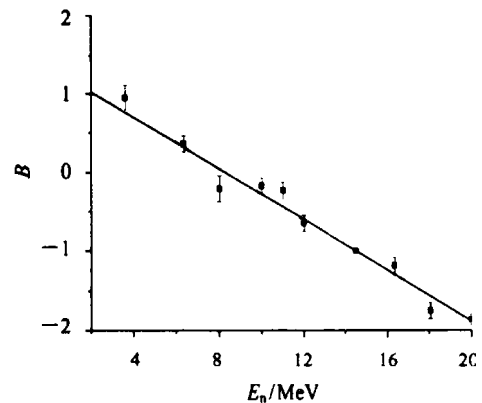


图 6 参数 B 的能量依赖关系

图 5 和图 6 给出了我们研究的 4, 6, 8, 10, 11, 12, 14.5, 16, 18, 20MeV 的参数 K 和 B 的拟合结果.

利用得到的 $C_p(N, Z, E_n)$ 与 N, Z 和 E_n 的依赖关系这个普适参数,图 7—10 是系统学半经验计算

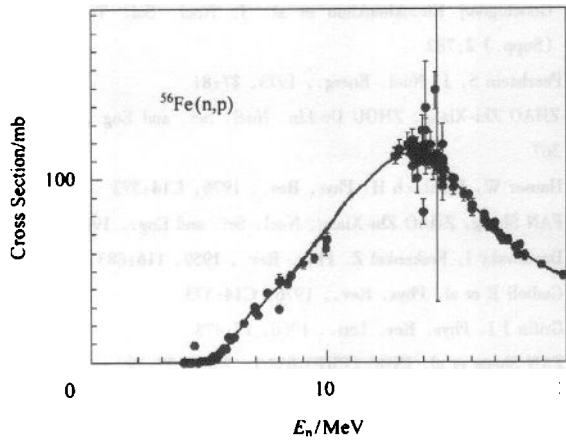


图 7 $^{56}\text{Fe}(n,p)$ 激发函数的半经验计算方法结果和实验数据^[33-38]的比较

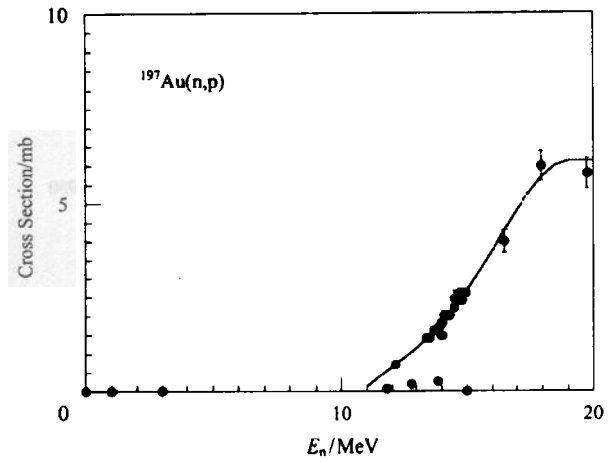


图 10 $^{197}\text{Au}(n,p)$ 激发函数的半经验计算方法结果和实验数据^[45,46]的比较

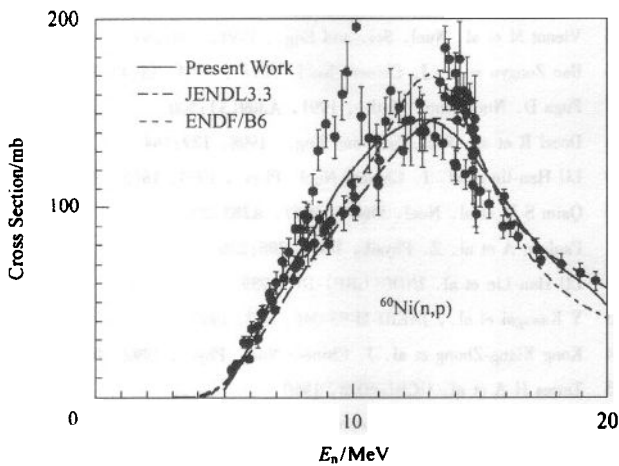


图 8 $^{60}\text{Ni}(n,p)$ 激发函数的半经验计算方法结果和实验数据^[38-41]以及 ENDF/B6 和 JENDF3.3 数据库中结果的比较

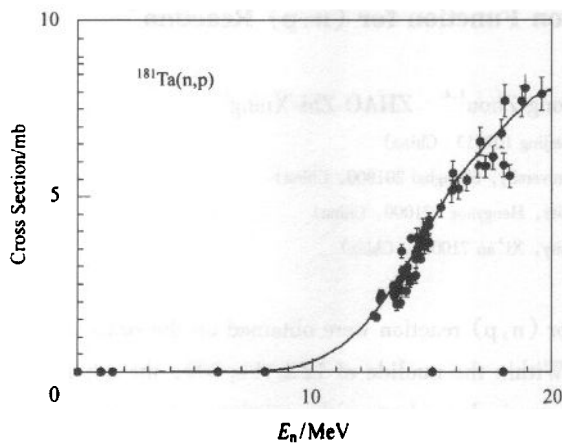


图 9 $^{181}\text{Ta}(n,p)$ 激发函数的半经验计算方法结果和实验数据^[42-44]的比较

法得到的 $^{56}\text{Fe}(n,p)$, $^{60}\text{Ni}(n,p)$, $^{181}\text{Ta}(n,p)$ 和 $^{209}\text{Bi}(n,p)$ 的激发函数. 系统学计算结果很好的再现了实验数据^[33-46]. 图 8 中实线是系统学半经验计算方法的结果, 点划线是 JENDF3.3 结果, 短划线上 ENDF/B6 数据库中的结果, 带误差的方框是实验数据.

4 小结和讨论

在 $E_n \leq 20\text{MeV}$ 的情况下, 基于复合核蒸发和预平衡激子模型, 忽略粒子的二次发射过程; 假定复合核能级密度取为常温型, 且和核温度有依赖性; 预平衡发射过程只考虑 $n_0 = 3$ 的激子态; 无返回近似; 与发射质子竞争的主要是发射中子的过程的情况下, 得到了理论模型清晰、公式形式简单的半经验计算方法. 在该半经验计算方法中只有一个参数. 和其他系统学方法比较, 我们不仅考虑了预平衡激子发射的贡献, 而且参数少, 该参数有靶核的 N, Z 和中子入射能量相关性. 在靶核 $23 \leq A \leq 209$ 的范围内, 利用大量 (n,p) 反应的截面实验数据对可调参数进行了研究, 得到了参数对靶核的 N 和 Z 以及入射能量的依赖关系. 对得到的参数做了定性的解释, 利用普适参数对 (n,p) 反应的激发函数做了预言, 预言值在其误差范围内与实验数据一致.

参考文献 (References)

- 1 Qaim S M et al. Nucl. Sci. and Eng., 1984, **88**(2):143
- 2 Young P G, Arthur E D. LA-6947, Los Alamos National Laboratory, 1977
- 3 FU C Y. ORNL-TM-7402, Oak Ridge National Laboratory, 1980
- 4 ZHANG J. Nucl. Sci. and Eng., 1980, **114**:55
- 5 Herman M. <http://www-nds.iaea.or.at/empire/>
- 6 Levkovskii V N. Soviet Physics-JETP, 1957, **4**:291
- 7 Badansky D. Annl. Rev. Nucl. Sci., 1962, **12**:79
- 8 Wen Deh Lar. Phys. Rev., 1971, **C4**:1173
- 9 Nuclear Data Center of 2nd Machine Industry Ministry. Theory and Its Applications of Nuclear Reaction. Beijing: Atomic Energy Press, 1980. 329(in Chinese)
(二机部核数据中心. 核反应理论方法及其应用文集. 北京: 原子能出版社. 1980. 329)
- 10 Gardner D G et al. Nucl. Phys., 1962, **29**:373
- 11 Gardner D G et al. Nucl. Phys., 1964, **60**:49
- 12 Gardner D G et al. Nucl. Phys., 1961, **24**:274
- 13 Gardner D G et al. Nucl. Phys., 1967, **A96**:121
- 14 Strohal P. Nucl. Phys., 1962, **30**:49
- 15 Chatterjee A. Nucl. Phys., 1963, **49**:686
- 16 Chatterjee A. Nucl. Phys., 1963, **47**:511
- 17 Chatterjee A. Nucl. Phys., 1964, **60**:373
- 18 Sigg R A et al. Nucl. Sci. and Eng., 1976, **60**:235
- 19 Havlik E et al. Acta Physica Austriaca, 1971, **34**:209
- 20 Struwe W et al. Nucl. Phys., 1974, **A222**:605
- 21 Molla N I S, Qaim M. Nucl. Phys., 1977, **A283**:269
- 22 Belgaib M, Asghar M. Nucl. Instr. Meth., 1998, **B142**:463
- 23 Gonchigdorj Khuukhenkhuu et al. J. Nucl. Sci. Tech., 2002, (Supp.) **2**:782
- 24 Pearlstein S. J. Nucl. Energ., 1973, **27**:81
- 25 ZHAO Zhi-Xiang, ZHOU De-Lin. Nucl. Sci. and Eng., 1988, **99**:367
- 26 Hauser W, Feshbach H. Phys. Rev., 1976, **C14**:573
- 27 FAN Sheng, ZHAO Zhi-Xiang. Nucl. Sci. and Eng., 1996, **124**:349
- 28 Dostrovsky I, Frakenkel Z. Phys. Rev., 1959, **116**:683
- 29 Gadioli E et al. Phys. Rev., 1976, **C14**:573
- 30 Griffin J J. Phys. Rev. Lett., 1966, **17**:478
- 31 FAN Sheng et al. INDC (CRP)-058/L, 2002, **27**:19
- 32 LU Xi-Ting. Nuclear Physics. Beijing: Atomic Energy Press, 2000. 46 (in Chinese)
(卢希庭. 原子核物理, 北京: 原子能出版社. 2000. 46)
- 33 Sardf S K et al. Nucl. Sci. and Eng., 1991, **107**:365
- 34 Cabral S et al. Nucl. Sci. and Eng., 1990, **106**:308
- 35 Vienot M et al. Nucl. Sci. and Eng., 1991, **108**:289
- 36 Bao Zongyu et al. J. Chinese Nucl. Phys., 1994, **15**(4):341
- 37 Fuga D. Nucl. Intr. Meth., 1991, **A309**(3):500
- 38 Doczi R et al. Nucl. Sci. and Eng., 1998, **129**:164
- 39 LU Han-lin et al. J. Chinese Nucl. Phys., 1994, **16**(3):263
- 40 Qaim S M et al. Nucl. Phys., 1977, **A283**:269
- 41 Paulsen A et al. Z. Physik, 1967, **205**:226
- 42 LU Han-Lin et al. INDC(CRP)-16, 1989
- 43 Y Kasugai et al., JAERI-M-93-046, 277, 1992
- 44 Kong Xiang-Zhong et al. J. Chinese Nucl. Phys., 1992, **14**(3):239
- 45 Tewes H A et al. UCRL-6028, 1960
- 46 Peck R A et al. Phys. Report, 1957, **106**:965

A New Semiempirical Expression of Excitation Function for (n,p) Reaction *

FAN Sheng^{1,2;1)} YAN Fang^{1,3} ZHANG Hong-Zhou^{1,4} ZHAO Zhi-Xiang¹

1 (China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

2 (Shanghai Applied Radiation Institute, Shanghai University, Shanghai 201800, China)

3 (Nuclear Technology College, Nanhua University, Hengyang 421000, China)

4 (Department of Physics, Northwest University, Xi'an 710006, China)

Abstract A semiempirical expression for the excitation function for (n,p) reaction were obtained on the basis of evaporation and exciton models with the energies range up to 20 MeV. Within the nuclide of $12 \leq A \leq 209$, the adjusted parameter of the semiempirical expression was investigated, the parameter is dependent on the atomic number, mass number of the target nuclide, and the energy of the incident neutron. The predictions of the excitation function for (n,p) reaction are good agreement with the experimental data.

Key words evaporation model, exciton model, excitation function for (n,p) reaction

Received 27 March 2003

* Supported by National Key Item of Foundation Research and Development Project of China under contract (G1999022600), Foundation for Homecoming and Study Abroad of Education Ministry of China

1) E-mail: sfan@irs.ciae.ac.cn