

文章编号: 1007-4627(2004)04-0389-03

## (n, p)和(n, α)激发函数半经验计算方法\*

樊 胜<sup>1</sup>, 阎 芳<sup>1</sup>, 张鸿洲<sup>1,2</sup>, 赵志祥<sup>1</sup>

(1 中国原子能科学研究院, 北京 102413;

2 西北大学物理系, 陕西 西安 710069)

**摘 要:** 在  $E_n \leq 20$  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)和(n, α)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)和(n, α)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:** 激发函数; 半经验计算方法; 系统学参数

**中图分类号:** O571.4 **文献标识码:** A

### 1 引言

(n, p)和(n, α)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. (n, p)和(n, α)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, 反应截面的实验数据还存在很大的分歧, 还有相当的核素没有实验数据, 或仅在 14 MeV 附近有实验数据. 对于重材料核, 由于反应截面很小, 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. 一些成熟的理论模型程序如 GNASH<sup>[1]</sup>, TNG<sup>[2]</sup>, UNF<sup>[3]</sup>和 EMPIRE-II<sup>[4]</sup>, 利用复合核反应理论不仅可以研究(n, p)和(n, α)反应, 还可以研究其他反应道的数据. 但计算过程需要输入大量的参数.

系统学研究(n, p)和(n, α)反应的激发函数自 1957 年 Levkovskii<sup>[5]</sup>的工作以来到目前有大量的研究工作. 系统学主要是考虑(n, p)和(n, α)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

本工作在  $E_n \leq 20$  MeV 的情况下, 忽略了粒子的二次发射过程, 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)和(n, α)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)和(n, α)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 半经验计算公式

在半经验计算方法中, 为了简化计算得到解析表达式, 我们在公式的推导中假定: 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; 考虑无返回近似; 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, q) (q 表示 p, α 粒子)反应截面可以表述为

$$\sigma(n, q) = \sigma^{eq}(E_C, E_R) + \sigma^{pre}(E_C, E_R),$$

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

研究表明, 参数在一定入射能量下,  $C_p(N, Z,$

收稿日期: 2004 - 08 - 16

\* 基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(G1999022600); 国家自然科学基金资助项目(10305021)

作者简介: 樊 胜(1968--), 男(汉族), 湖南常德人, 博士后, 从事核物理研究; E-mail: sfan@iris.ciae.ac.cn

$E_n$ )与 $(1+A^{1/3})^2$ 以及不对称参数  $\exp(k(N-Z)/A)$ 有关. 我们研究了 8, 11, 14.5 和 20 MeV 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:

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

图 1 给出了 8, 11, 14.5 和 20 MeV 的中子入射的情况下,  $C_p(N, Z, E_n)$ 与靶核的  $N$  和  $Z$  的相关性. 从图中可以看出,  $C_p(N, Z, E_n)$ 的  $N, Z$  和不对称参数的系统学规律非常明显.

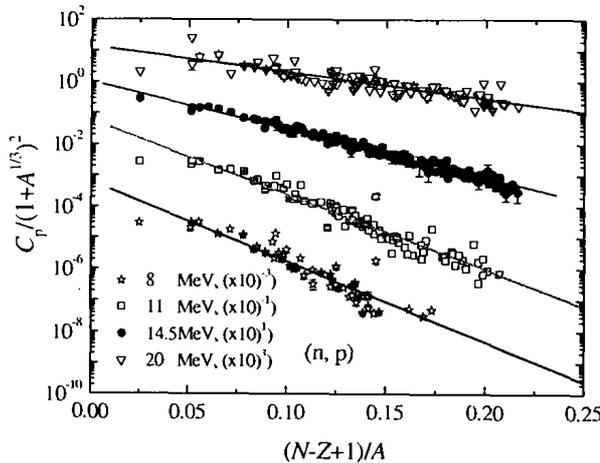


图 1 入射中子能量分别为 8, 11, 14.5 和 20 MeV 的  $C_p(N, Z, E_n)$ 与靶核  $N$  和  $Z$  系统规律

我们也对自己的系统学公式和其他系统学公式的计算结果进行了比较. 图 2 给出了在入射中子能量在 14.5 MeV 的情况下计算结果和实验数据的比值, 本工作在 0.7—1.3 之间, 而 Belgaid<sup>[6]</sup>的落在 0.5—2.0 之间. 和实验数据比较的  $\chi^2$ , 本工作为 1.56, Belgaid 的为 2.07.

$(n, \alpha)$ 激发函数的研究中, 预平衡激子模型采用了“pick-up”机制<sup>[7]</sup>, 研究结果和 $(n, p)$ 激发函数

的类似.

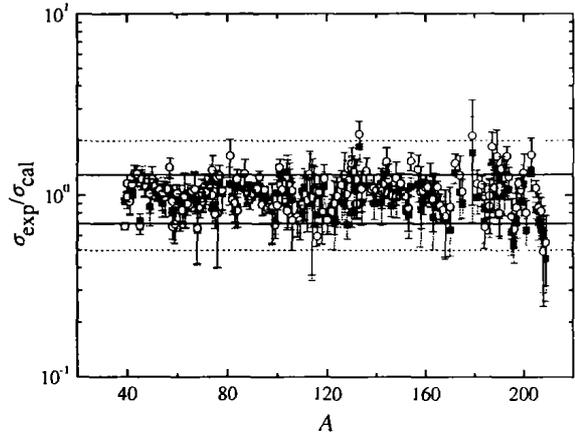


图 2 不同系统学方法计算结果的比较

### 3 小结和讨论

在  $E_n \leq 20$  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; 考虑无返回近似; 在与发射质子和  $\alpha$  粒子竞争的主要是发射中子过程的情况下, 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系统学参数. 和其它系统学方法比较, 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 $(n, p)$ 和 $(n, \alpha)$ 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 $(n, p)$ 和 $(n, \alpha)$ 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:

- [1] Young P G, Arthur E D. LA-6947, Los Alamos National Laboratory, 1977.
- [2] Fu C Y. ORNL-TM-7402, Oak Ridge National Laboratory, 1980.
- [3] Zhang J. Nucl Sci and Eng, 1980, **114**: 55.
- [4] Herman M. <http://www-nds.iaea.or.at/empier/>.
- [5] Levkovskii V N. Soviet Physics-JETP, 1957, 4 291.
- [6] Belgaid M, Asghar M. Nucl Instr and Meth, 1998, **B142**: 463.
- [7] Iwamoto A, Harada K. Phys Rev, 1982, **C26**: 1 821.

(下转第 397 页)

tam. On this basis, we pointed out that all the former solutions are basically based on so-called cumulative reaction data not on independent data. On the analysis of newly data measured by GSI, we founded that mass distribution of spallation production could be divided to two parts; one is independent on induced-energy, but on the mass number of target; one is dependent on energy. Also, we argued that such phenomenon is due to different quick process in high energy proton-nucleus collision. On the basis of this find, we developed the semi-empirical method, and the calculation is well reproduced the experiment data.

**Key words:** spallation product; semi-empirical methods; quick process

---

(上接第 390 页)

## Semi-empirical Method for $(n, p)$ and $(n, \alpha)$ Reactions' Excitation Function\*

FAN Sheng<sup>1</sup>, YAN Yang<sup>1</sup>, ZHANG Hong-zhou<sup>1,2</sup>, ZHAO Zhi-xiang<sup>1</sup>

(1 *China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;*

2 *Physics Department, Northwest University, Xi'an 710069, China*)

**Abstract:** To simplify the calculation, some assumptions are considered at present work. The preequilibrium emission is the first step in the equilibrium process, which is characterized by exciton  $n=3$  and "never come back" are considered at the preequilibrium emission process; the proton and alpha emissions are only competed with the neutron emission, the second particle emission is neglected. A semiempirical method of the cross section for  $(n, p)$  and  $(n, \alpha)$  reactions were obtained on the basis of evaporation and exciton models in the energy range up to 20 MeV. A strong dependence on  $(N-Z+1)/A$  and the incident energy has been observed for  $23 \leq A \leq 209$ . The predictions of the semi-empirical systematics with the global parameter of the excitation functions for  $(n, p)$  and  $(n, \alpha)$  reactions are in good agreement with the experimental data.

**Key words:** excitation function; semiempirical method; systematics parameter

---

\* **Foundation item:** National Key Item of Foundation Research and Development Project of China(G1999022600); National Natural Science Foundation of China(10305021)