

中高能质子入射反应散裂碎片的半经验方法研究*

张鸿洲^{1,2}, 樊 胜¹, 孙秀泉^{3,2}

(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;

3 深圳大学工程技术学院, 广东 深圳 518060)

摘 要: 简要分析了质子入射核反应的半经验研究方法, 指出半经验研究方法应该建立在独立产额数据之上, 而目前半经验研究方法主要是建立在以往的累积产额数据之上. 通过对最新的实验得到的独立产额数据并结合 MSDM 的计算结果的分析, 发现描述散裂质量分布的参数应该分为与能量有关和无关两个部分, 并指出这与快过程平衡时间的不同有关.

关键词: 散裂碎片; 质量分布; 反应快过程

中图分类号: O571.4 **文献标识码:** A

1 引言

中高能质子入射引起的核反应的数据在天体物理和生物物理等方面有着重要的用途, 多年来对于这一问题已有了深入的研究, 取得了比较好的结果. 在诸多方法中, 半经验方法由于其计算的实时性的突出特点显得尤为重要, 并且半经验方法的研究也有助于从直观上理解这类核反应, 有助于推动微观模型的发展^[1]. 目前半经验方法研究基本上都是基于 Rudstam^[2]于 1966 年提出的具有开拓性的系统学公式. 许多科学家不断改进了这一公式, 其中具有代表性的 R. Silberberg 和 K. Sümmerer. R. Silberberg 的工作及相应的计算程序 YEILDY 主要是从较轻靶核 ($Z \leq 29$) 的中能 ($E \geq 100$ MeV) 质子入射实验数据的基础上发展而来, 并推广到较重核 ($Z \leq 209$), 可以计算反应的产物基本上涵盖 $A_{\text{product}} \geq 4$ 的全部核素, 但是对于 ADS 关心的重靶核该程序给出的质量分布明显不合理, 特别是裂变峰的位置预测不准确, 在靠近靶核的质量分布有一明显的谷值^[3], 而且该程序的各部分连接性差. K. Sümmerer 为解决高能重离子核反应的实验问题, 也在前人的基础上发展了与能量无关的计算程序 EXPA, 可计算所谓极限能量下, 即产额与能量无

关时, 重离子核反应的散裂产物 ($A_{\text{product}} \geq 40$) 截面^[4]. 该程序也可用来计算质子入射核反应, 但不能用于能量较低(与能量有关)的情况.

应该指出的是, 迄今为止实验上测量到的有关中高能质子入射核反应的数据, 主要是从对宇宙射线和加速器加速质子的实验得到的, 相关的粒子甄别技术依靠放射化学和质谱仪的方法^[2-5]. 这些方法只能测量到反应发生后经过一定时间 Δt 的累积产物数据, 而非所谓独立产额数据^[3]. 包括半经验方法在内的理论计算方法, 所依赖的和所给出的应该是在理论上有意义的独立产额数据, 所以迄今为止的半经验方法的缺陷还是比较明显的. 直到 GSI 近来使用加速后的重离子轰击液态氢靶^[3], 才有了真正可以称之为独立产额的实验数据.

2 半经验方法的改进

下式为一个典型的半经验公式:

$$\sigma(A, Z) = Y(A) \cdot n \cdot \exp(-R |Z_p - Z|^U),$$
$$Y(A) = \sigma_0 P \exp(-P \Delta A). \quad (1)$$

其中质量分布的描述是通过参数 P 来表达的, 即 (1) 式中 $\sigma_0 e^{-P \Delta A}$ 描述了随 A 的减少产物截面的变

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: 张鸿洲(1973--), 男(汉族), 陕西岐山人, 在读博士研究生, 从事核物理研究.

联系人: 樊 胜, E-mail: sfan@iris.ciae.ac.cn

化. 例如在 Silberberg^[2]的公式理论中, 参数 P 主要与入射粒子的能量有关, 与靶核的质量数仅有微弱的依赖关系. 当入射粒子能量大于某一临界值时, P 就被 P_H 取代, 而 P_H 仅与靶核质量数有关:

$$P = 20E_i^{-0.77} c_p \quad P_H = 1.98A_i^{-0.92}$$

$$c_p = \begin{cases} 1 - 0.32 \exp - \left(\frac{E_i - 100}{100} \right)^2, & 20 \leq Z_i \leq 30 \\ 1 - 0.000\ 015 \times (A_i - 100) \cdot \left(\frac{E_c + 150}{E_i + 150} \right), & A_i > 100 \end{cases} \quad (2)$$

在 Sümmerer 等^[4]的理论中由于只针对极限能量情况, 参数 P 仅与靶核质量数有关:

$$P = e^{p_2 \cdot A_i + p_1}, \quad p_1 = -2.584, \\ p_2 = -7.57 \times 10^{-3}. \quad (3)$$

比较两个不同作者给出的参数 P , 我们可以发现共同点是当能量高过一定值时, P 只与靶核质量数有关. 实际上同位素分布的所有顶点位置也刻画了质量分布的情况^[2]. 图 1 给出了这样的比较, 其中带点的抛物状曲线是 GSI 得到的 1 GeV $p+^{208}\text{Pb}$ 的产物同位素分布, 实线是 Sümmerer 的计算程序 EXPA 所预言的质量分布曲线. 1 GeV 的入射能量是小于 Sümmerer 的极限能量或是 Silberberg 的临界能量. 从图 1 可以发现两点: 一是质量分布并不像 Silberberg 的程序 YEILDY 或是 EXPA 预言的

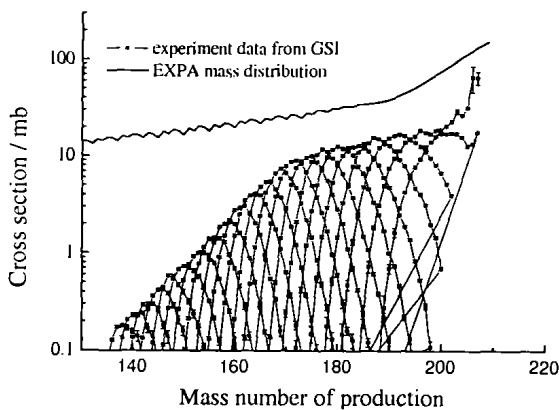


图 1 GSI 实验测量的截面分布的外轮廓显示出的质量分布特点与 EXPA 预言的积分质量分布比较

那样, 只有一个给定参数 P 描述的单调下降, 而是需要两个给定参数 P 来描述; 二是其中靠近靶核处的曲线斜率与 Sümmerer 所预言的与能量无关的斜率相近. 进一步利用基于多步动力学程序 MSDM^[5]

的计算结果, 发现这一部分的斜率基本保持不变, 但是这一部分的宽度随能量的增大而增加. 因此我们可以认为这一部分散裂碎片的质量分布行为与能量无关, 可以用 Sümmerer 的极限能量下参数 P 来描述; 相应的也应将参数 P 分为与能量 P 和能量相关的 $P(E)$. 基于这一发现我们重新给出了与能量无关的 P 参数, 依据最新实验数据拟合得到 $P(E)$. 在式 (1) 中的 Z_p 是同位素分布中顶点值即最可机值, Z_p 的值会强烈地影响计算结果, 重新参数化了 Z_p , 使得其更与实验值相吻合 (见图 2); 同时给出了新的形状指数 ν 的值, 很好地再现了实验数据. 图 3 给出了我们的计算结果与实验值和 Sümmerer 的计算结果之间的比较.

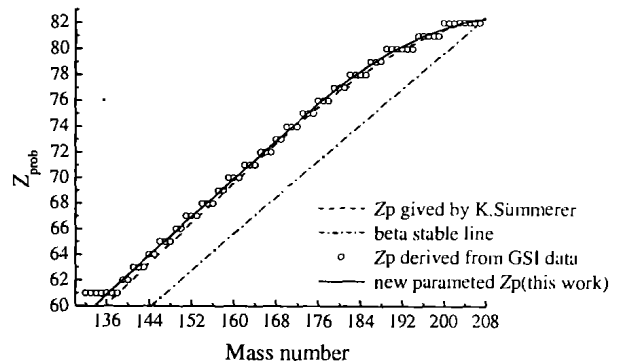


图 2 同质异能位素分布中的电荷最可机值 Z_p

3 讨论

我们认为关于 P 的不同描述是本职工作最为主要的发现. J. Hüfner 1981 年在总结前人研究结果的基础上, 第一次比较系统地提出了对于 G. Rudstam 公式 (1) 的解释^[7]: 如果将中高能质子入射核反应描述为质子与核初次碰撞在快过程中形成的预裂碎块和接下来在慢过程中预裂碎块退激发两步的话, 预裂碎块通过退激发会达到热力学平衡性质, 决定了同质异位素呈准高斯分布; 由参数 P 反映的散裂区域反应产物质量分布的单调下降, 是由预裂碎块退激发时的粒子蒸发特点决定的, 与激发能在预裂碎块中的分布密切相关. 因此我们可以将与能量无关的 P 理解为它代表了入射质子与靶核充分相互作用, 使预裂碎块中的激发能快速达到平均分布, 进而通过蒸发粒子退激发; 与能量有关的 $P(E)$ 所反映的是入射质子与靶核作用并不充分, 当预裂碎块并没有达到平衡或只达到局部平衡就开始蒸发

粒子. 前一种情况相当于碰撞参数较小, 后一种情况相当于碰撞参数相对较大的情形. 相同的入射能量下, 当碰撞参数较小时与入射质子发生初次碰撞的核子较多, 由此级联碰撞次数要大于碰撞参数较大的情况, 这时预裂碎块更快的达到平衡状态; 而当碰撞参数较大时系统可能来不及达到完全平衡就开始蒸发粒子. 相同的碰撞参数时, 由于更高的入射能量意味着更激烈的初次碰撞和更多更激烈的级

联碰撞, 系统以较大的几率趋于或达到完全平衡. 反映在质量分布曲线是随着能量增加 P 所代表的区域会展宽, $P(E)$ 的值更接近 P 的值, 这也是我们通过 MSDM 计算所观察到的现象. 实际上, 这一理解是符合近年来用 QMD 方法研究核-核碰撞的弛豫时间的. QMD 的研究表明, 能量较小时系统要经过更长的平均时间才能达到完全平衡^[8].

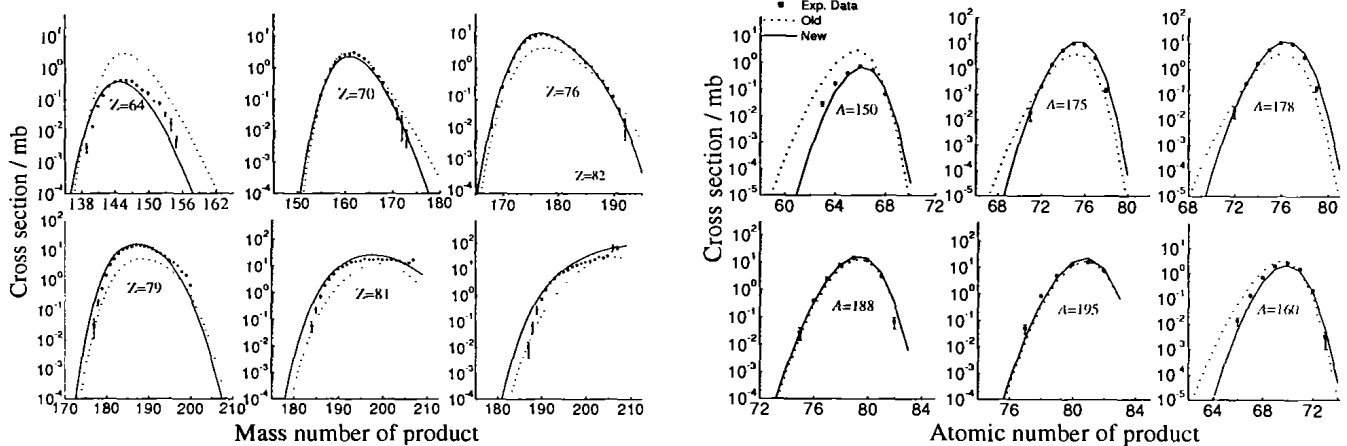


图 3 1 GeV 的质子与²⁰⁸Pb 的反应实验数据与计算结果比较
— 我们的计算, --- Sümmerer 的计算, ... GSI 的实验结果.

参 考 文 献:

[1] 张鸿洲, 樊 胜, 阎 芳等. 原子核物理评论, 2003, 20(4): 239.
 [2] Rudstam G. Naturforschung Z. 1966, 21A: 1 027.
 [3] Enqvist T, Wlazlo W, Armbruster P, et al. Nuclear Physics, 2001, A86: 481.
 [4] Sümmerer K, Blank B. Phys Rev, 2000, C61: 034607-1.
 [5] Silberberg R, Tsao C H. Phys Rep, 1990, 191(6): 351.
 [6] 樊 胜, 阎 芳, 张鸿洲等. 利用 MSDM 分析 1 GeV p + ²⁰⁸Pb 散裂反应产物, 已投原子能科学技术.
 [7] Hüfner J. Phys Rep, 1984, 125(4): 125.
 [8] Satoshi Chiba, Koji Niita, Osamu Iwamoto. 1996, 54(6): 3 302.

Semi-empirical Research on Spallation Production of Proton Induced Nuclear Reaction with Medium-high Energy*

ZHANG Hong-zhou^{1, 2}, FAN Sheng¹, SUN Xiu-quan^{1, 3}

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

2 Physics Department of Northwest University, Xi'an 710069, China;

3 Engineering Technology College of Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong, China)

Abstract: We analyzed the former solution of semi-empirical methods, which is first funded by G. Ruds-

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

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, α) Reactions' Excitation Function*

FAN Sheng¹, YAN Yang¹, ZHANG Hong-zhou^{1,2}, ZHAO Zhi-xiang¹

(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, α) 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, α) 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)