

文章编号: 1007-4627(2004)04-0391-03

利用 MSDM 分析 $p + {}^{208}\text{Pb}$ 散裂反应产物*

樊 胜¹, 阎 芳¹, 张鸿洲^{1,2}, 赵志祥¹

(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: 多步动力学模型(MSDM)研究中、高能质子引起的散裂反应分为 3 个过程: 核内级联、粒子预平衡发射以及通过蒸发粒子和裂变方式的剩余激发核退激发过程. 利用 Ignatyuk 能级密度公式代替 MSDM 模型中的费米气体能级密度公式, 改进其研究质子入射引起散裂产物的形成截面. 采用 Ignatyuk 能级密度公式 MSDM 研究 $p + {}^{208}\text{Pb}$ 散裂产物的电荷、质量分布以及产物核形成截面, 结果很好地再现了实验数据, 且比利用费米气体能级密度的 MSDM 结果好得多.

关键词: 多步动力模型; 散裂产物; 能级密度

中图分类号: O571.41⁺¹ **文献标识码:** A

1 引言

近年来, 利用中能质子加速器提供的束流轰击重靶产生的散裂中子驱动次临界反应堆的洁净核能系统(ADS)是国际上的一个热点^[1]. 该系统的一个重要环节是中能质子轰击铅(铋)或钨靶的散裂中子源.

碎片的实验数据较为丰富. 德国的 R. Michel 领导的国际合作组几十年来, 一直注重对中能质子与核碰撞引起核反应的剩余核和碎片的测量工作^[2], Yu Etitarenk 等^[3]测量了大量的 100—2 600 MeV 的质子入射的散裂产物的形成截面, 但这些实验数据基本上是采用放射化学方法和质谱法, 这些数据不能作为细致研究散裂反应理论模型的基准. Enqvist 等^[4]利用 1 GeV/A 的 ${}^{208}\text{Pb}$ 束流轰击液态氢靶的反冲动能方法给出了 ${}^{208}\text{Pb}$ 散裂产物 Ti 到 Pb 的同位素形成截面和独立产额分布, 这个数据可以很好地检验散裂反应理论模型.

近年来, 已发展了 10 余种模型和程序来模拟计算散裂靶问题. 大多数程序采用高能输运程序(HETC^[5])和某一中子输运程序联接在一起使用. 这些程序系统的研究结果和实验数据有很大的分歧^[3]. 在本工作中, 采用多步动力学(MSDM)^[6,7]方法和程序来研究中能质子入射引起核反应的散

裂碎片分布.

2 MSDM 方法及改进

MSDM^[6,7]考虑高能质子引起的散裂反应分为 3 个过程: 核内级联、粒子预平衡发射以及通过蒸发粒子和裂变方式的剩余激发核退激发过程. 在入射质子的能量小于 3 GeV 情况下, 核内快过程用的是杜布纳的级联模型. 模型假定核内快过程可等效于若干个强子-核子碰撞的子过程, 所用截面为自由强子-核子撞截面. 预平衡发射假定快过程产生的粒子以质子、中子和复合粒子等形式发射, 以使体系达到平衡. 对于已达平衡的剩余核的退激发, 采用了几个模型; 对 $A < 16$ 的核, 采用费米碎裂模型; 对于中等质量及重核, 若每核子激发能大于 2 MeV, 采用统计多重碎裂模型; 每核子激发能小于 2 MeV 时, 则多重碎裂模型可以简化为重核的“蒸发”与裂变机制的竞争.

在 MSDM 中, 为了简化计算, 能级密度简单取费米气体能级密度形式

$$\rho(E^*) \sim \exp 2\sqrt{aE^*},$$

其中, 能级密度的参数 a 取值为 0.1—0.14 $A \cdot \text{MeV}^{-1}$, E^* 为复合核激发能. 为了更好地考虑壳效

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, 研究员, 博士, 从事核物理研究; E-mail: sfan@iris.ciae.ac.cn

应, 采用目前国际上最新的 Ignatyuk 能级密度公式^[8]

$$\alpha(Z, N, E^*) = \bar{\alpha}(A) \cdot \left\{ 1 + \Delta_{\text{shell}}(Z, N) \frac{f(E^* - \Delta)}{E^* - \Delta} \right\}.$$

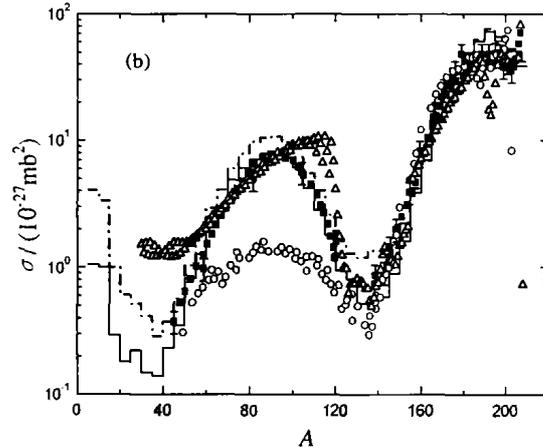
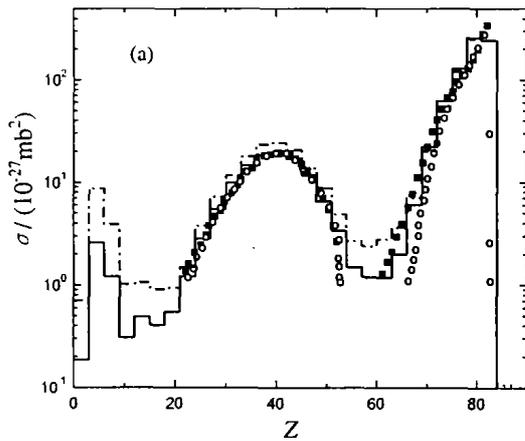


图 1 1 GeV p + ²⁰⁸Pb 产物的电荷(a)和质量(b)形成截面分布结果

■ 实验数据^[4], — Ignatyuk 能级密度的 MSDM 计算结果, --- 费米气体模型的 MSDM 计算结果, ● LAHET 计算结果, △ 半经验公式 YIELDX 的计算结果, ○ INCL4+KHSv3p 模型计算结果.

裂变部分高出实验数据 50%, 在散裂部分低于实验数据约 30%, 在电荷和质量分布为 $50 \leq Z \leq 62$ 和 $120 \leq A \leq 160$ 之间高出实验数据约 200%. 在 $Z = 50, A \approx 140$ (图 1 中产物散裂和裂变部分的相交形成的“谷底”)的区间, 考虑了能级密度壳效应的理论计算很好地描述了实验数据的趋势. 而费米能级密度参数在 $Z = 50, A \approx 140$ 有非常明显的壳效应引起的大的涨落. INCL4+KHSv3p 模型计算的电荷分布在 $50 \leq Z \leq 75$ 低于实验数据. LAHET 计算的质量分布在散裂部分和实验数据符合较好, 而在裂变部分低于实验数据约一个数量级, 主要是 LAHET 裂变机制的考虑不完善. 半经验方法 YIELDX 计算的质量分布在这个区间和实验数据都符合不好. MSDM 计算结果还给出了电荷和质量分布 $Z \leq 15$ 和 $A \leq 30$ 的一个峰. 这主要是 MSDM 考虑了 p, d, t, ³He, ⁴He, … Mg 等轻粒子出射, 而实验测量的产物中最轻的核是 Ti, 因此在图 1 中没有核素轻于 Ti 的实验数据. 图 2 还给出了 MSDM, QMD+SDM 和 QMD+FISSION 计算的 160, 271, 533, 1 400 和 2 600 MeV 质子入射 ²⁰⁸Pb 的碎片分布结果. 利用 MSDM 计算的结果能很好地再现中高能质子入射碎片的质量分布的两个峰, 其计算结果在整个产物的核区 ($0 < A < 220$) 的范围内都能较好地再现实验测量数据. 尤其对于 $A < 10$

图 1 给出了不同的能级密度 MSDM 计算的 1 GeV p + ²⁰⁸Pb 产物的电荷和质量分布结果. 采用 Ignatyuk 能级密度的 MSDM 计算的电荷和质量分布很好地再现了实验数据^[4], 采用费米气体能级密度在

的碎片, MSDM 模拟计算结果也可以较好地再现实验测量结果.

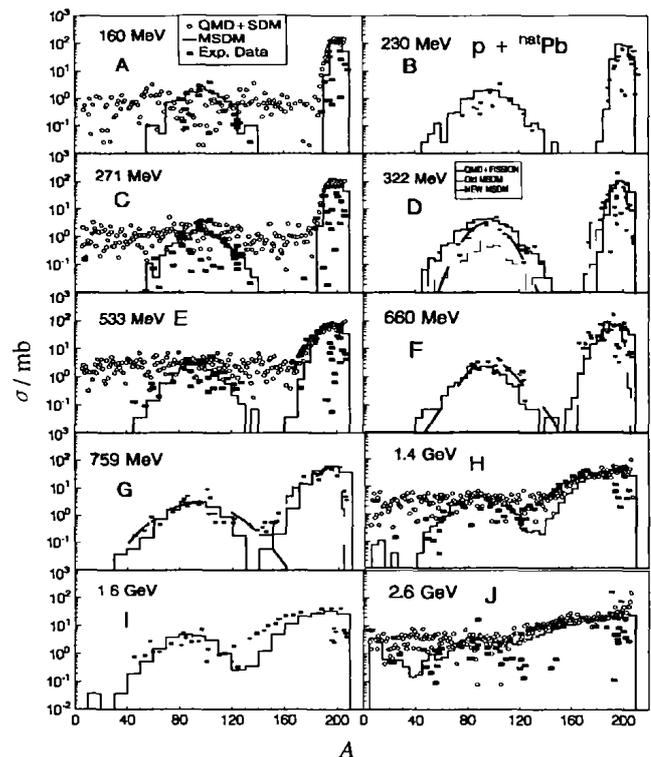


图 2 利用 MSDM 分别计算的 160, 230, 271, 322, 533, 660, 759, 1 400, 1 600 和 2 600 MeV 的质子入射 Pb 靶的碎片质量分布和实验测量数据、QMD+SDM 以及 QMD+FISSION 计算结果的比较

3 结论和讨论

考虑壳效应的 Ignatyuk 能级密度的 MSDM 计算的电荷和质量分布较好地再现了实验数据. 利用 MSDM 计算的结果能很好地再现中高能质子入射碎片的质量分布的两个峰. 其计算结果在整个产物的核区 ($0 < A < 220$) 的范围内都能较好地再现实验

测量数据. 尤其对于 $A < 10$ 的碎片, MSDM 模拟计算结果也可以较好地再现实验测量结果. 在电荷和质量分布为 $Z \approx 50$ 和 $A \approx 140$, 可以看出明显的壳效应. 在 $60 \leq Z \leq 80$ 和 $140 \leq A \leq 190$, 预平衡发射的贡献则需要仔细考虑.

参 考 文 献:

- [1] Bawman C D, Arthur E D, Lisowski P W, *et al.* Nucl Instr and Meth, 1992, **A320**: 336.
- [2] Gloris M, Michel R, Sudbrock F, *et al.* Nucl Instr and Meth, 2001, **A463**: 593.
- [3] Titarenko Yu E, Batyaev V F, Karpikhin E I, *et al.* INDC (CCP)-434, 2002.
- [4] Enqvist T, Wlazlo W, Armbruster P, *et al.* Nucl Phys, 2001, **A686**: 481.
- [5] Cabriel T A, Galsmiller R, Guthrie M P. ORNL-4542, 1970.
- [6] Gudima K K, Mshnik S G, Toneev V D. Nucl Phys, 1983, **A401**: 329.
- [7] Dementyev A, Sobolevsky N. Radiation Measurements, 1999, **30**: 553.
- [8] Ignatyuk A V, *et al.* Sov J Nucl Phys, 1975, **21**: 255.

Analyses for Spallation Fragment of $p + {}^{208}\text{Pb}$ by Using MSDM*

FAN Sheng¹, YAN Fang¹, ZHANG Hong-zhou^{1, 2}, ZHAO Zhi-xiang¹

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

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

Abstract: The level density of Ignatyuk formula is introduced into the Many stages dynamics model (MSDM) instead of Fermi-gas formula to improve the simulation of spallation fragments. The results of MSDM with Ignatyuk formula reproduced the experimental data well for the mass and charge distributions, the formation cross sections of isotopic product of proton-induced spallation on ${}^{208}\text{Pb}$. The calculations are in agreement with the experimental data and better than some simulations by MSDM with Fermi-gas formula of level density, also better than some calculations by QMD + SDM, QMD + FISSION, LAHET and YIELDX etc.

Key words: many stages dynamics model; spallation fragment; level density

* **Foundation item:** National Key Item of Foundation Research and Development Project of China(G1999022600); National Natural Science Foundation of China(101305021)