

文章编号: 1007- 4627(2000)02-0091-04

中能质子引起散裂反应的碎片质量分布研究*

樊 胜¹, 叶沿林¹, 徐春成¹, 陈 陶¹, 赵志祥², N M Sobolevsky³

1 (北京大学技术物理系, 北京 100871)

2 (中国原子能科学研究院核物理所, 北京 102413)

3 (Institute for Nuclear Research, Moscow)

摘 要: 对 SHIELD 程序进行了部分检验, 利用 SHIELD 程序计算质子入射铅的薄靶产生的靶碎片的截面及质量分布和激发函数, 计算结果较好地再现了实验数据. 并计算了 1.6 GeV 的质子轰击长 60 cm 和直径 20 cm 的铅靶的碎片质量分布.

关键词: SHIELD 程序; 散裂反应; 碎片质量分布

中图分类号: O571.42* 2

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. 在该能区既有多粒子发射反应, 又有铅(铋)或钨等核的多重碎裂和裂变反应. 经过长时间的中能质子轰击后, 靶中有长寿命、高活度同位素的产生和累计. 因此, 靶成为一个不可忽视的放射性污染源. 必须对其进行处理. 同时, 靶内产生 α 和 t 等粒子, 以及在靶内产生以气体形式存在的碎片, 如: ³⁵Cl, ³⁹Ar, ⁸³Rb 等. 这些产物将引起靶材性能的变化, 如惰性气体产物引起靶材的脆变. 为了了解靶的放射性产物累计和产物对靶材料性能的影响, 对中能质子入射引起的核反应碎片质量分布的研究是重要的.

散裂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引起的核反应剩余核和碎片的测量工作^[2, 3]. 近几年来, 受加速器驱动洁净核能系统研究需要, 该合作组的人员和测量范围都迅速的扩大. 他们选择了 40 余种具有代表性的靶, 利用 CERN/Geneve, IPN/Orsay, KFA/Julich, LANL/

Los Alamos, LNS/Saclay, PSI/Viligen, TSL/Uppsala 和 LUC/Louvain 等的试验条件, 质子入射能量从 45 MeV 到 2.6 GeV, 测量了各种碎片的产额, 已获得了近 15 000 个数据点^[2, 3].

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^[4]) 和某一中子输运程序联接在一起使用. 目前, 人们正在努力改进模型和程序来处理碎片问题, 如: HETC/KFA2^[3] 等.

樊胜等^[5, 6]曾利用量子分子动力学(QMD)加上裂变(Fission)模型处理碎片问题, 得到了较为理想的结果^[7]. 但 QMD 计算量大, 且 Fission 模型基本上是一个半经验的方法. SHIELD^[8]程序考虑了碎裂过程, 利用其计算中能质子入射引起反应的碎片质量分布, 其结果和实验测量数据符合较好, 同时对 1.6 GeV 的质子入射在长 60 cm 和直径 20 cm 的铅靶上的碎片分布进行了研究.

2 SHIELD 程序简介

SHIELD 程序产生于 70 年代初, 它主要是用来对任意形状、任意组分的靶中的强子级联过程做模拟^[7], 来模拟核子、 π 介子、K 介子、反核子和 μ 介子等在介质中传输, 它考虑了带电粒子的电离能损

* 收稿日期: 1999-05-11, 修改日期: 1999-11-23

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(19675003); 核工业科学基金资助项目(Y7197AY002); 教育部跨世纪人才计划基金资助项目
作者简介: 樊胜(1968-), 男(汉族), 湖南常德人, 北京大学技术物理系博士后, 从事核物理研究.

以及 π 介子和 K 介子的 2 体和 3 体衰变.

SHIELD 程序的强子-核作用的过程分成核内的碰撞快过程、预平衡发射和平衡态的退激发. 在本工作所关心的能量范围(入射质子的能量小于 3 GeV), 描述核内快过程用的是杜布纳的级联模型^[8]. 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-核子碰撞截面. 预平衡发射^[9]假定快过程产生的粒子会以质子、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退激发的描述, 有几个模型: 对 $A < 16$ 的核, 用的是费米碎裂模型; 对于中等质量及重核, 若每核子激发能大于 2 MeV, 则采用统计多重碎裂模型^[10]. 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.

产生出来的次级粒子(包括蒸发出来的中子)继续在介质中传输, 可能再次与核作用, 或衰变产生光子、正负电子和中微子等. 对低能中子($E < 14.5$ MeV)的传输, SHIELD 程序还做了一个较细致的处理, 即基于 BNAB 的 26 群中子的数据库, 它考虑了中子与核中核子的弹性散射(n, n)、非弹性散射(n, n')、中子被原子核的吸收(n, a)、中子的倍增($n, 2n$)以及中子引起的原子裂变.

该程序设计非常全面, 适用于计算的能区广泛, 原则上可以计算碎裂反应中的各种物理过程.

3 SHIELD 计算结果

图 1 给出了利用 SHIELD 计算的从 10 MeV 到 2 GeV 的 $p + {}^{208}\text{Pb}$ 和 $n + {}^{208}\text{Pb}$ 去弹截面的结果和实验数据^[11]的比较以及 $p + {}^{208}\text{Pb}$ 反应的总截面的比较. 结果表明, SHIELD 计算结果和实验符合的较好.

图 2 给出了利用 SHIELD 计算的入射能量为 1.6 GeV 质子入射薄靶的出射中子的双微分截面和实验数据的比较. 图中折线是 SHIELD 计算的结果^[12], 分离的点是实验数据^[13], 从上至下分别是出射中子为 $15^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$ 和 150° 出射角度的双微分截面. SHIELD 计算的结果很好地再现了实验数据. 可见, SHIELD 程序的物理模型和物理过程考虑是合理和完善的.

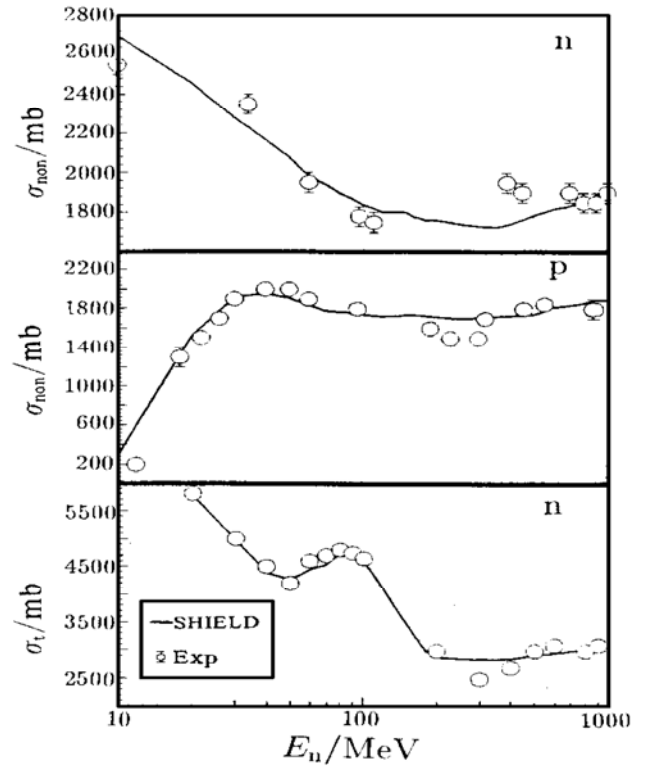


图 1 SHIELD 计算 $n(p) + {}^{208}\text{Pb}$ 的非弹和总截面

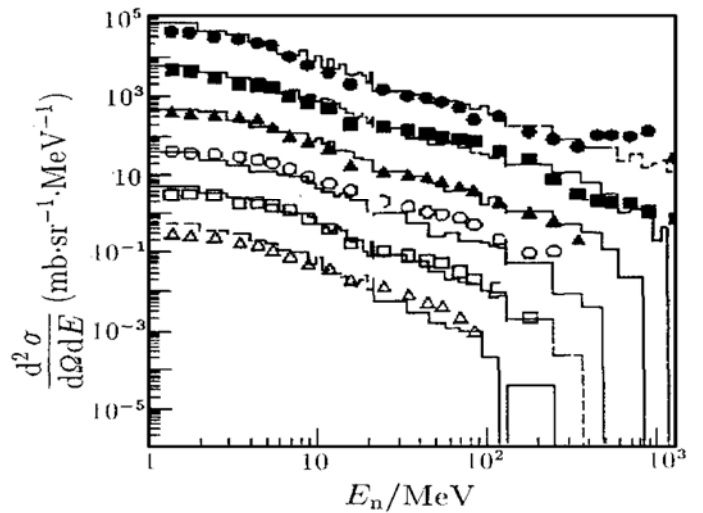


图 2 SHIELD 计算的 1.6 GeV 质子入射的出射中子双微分截面与实验数据的比较

SHIELD 中给出的碎片分布是靶内和靶外的碎片出现的事例数目, 任意碎片 $i (A_i, Z_i)$ 出现的事例数是 N_i , 总的统计数目是 N_R , 入射质子引起核反应的去弹截面为 σ_R , 则碎片 i 的形成截面定义为

$$\sigma_i(A_i, Z_i) = \sigma_R \frac{N_i}{N_R}.$$

质子轰击靶 ${}^{208}\text{Pb}$, ${}^{205}\text{Bi}$ 是一个典型的散裂产物, 通过反应 ${}^{208}\text{Pb}(p, 4n) {}^{205}\text{Bi}$ 形成, 而 ${}^{83}\text{Rb}$ 是一个碎裂产物. ${}^{83}\text{Rb}$ 的形成是质子入射引起的靶核的多重碎裂和裂变引起的.

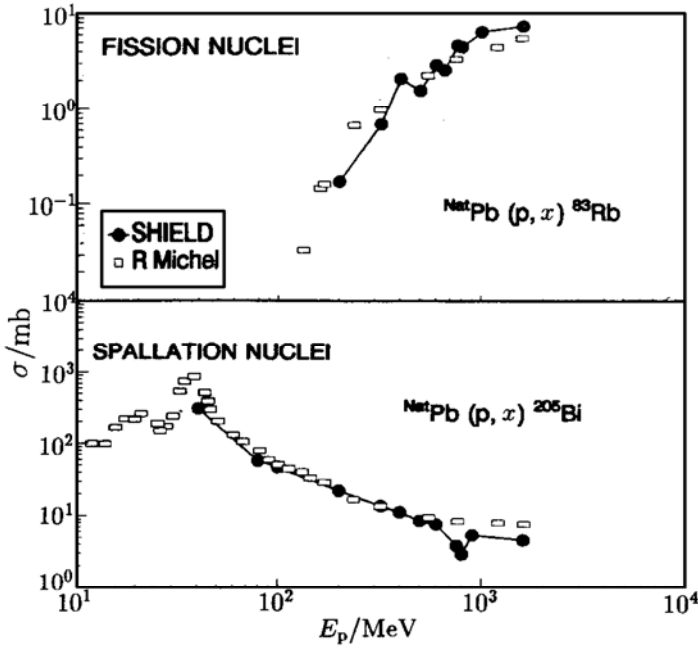


图3 质子入射²⁰⁸Pb 的散裂碎片⁸³Rb 和²⁰⁵Bi 的激发函数

图3 给出了利用 SHIELD 计算的质子入射薄铅靶中的²⁰⁸Pb 产生²⁰⁵Bi 和⁸³Rb 的激发函数. 图中分离的方框点是 R Michel 的实验测量数据^[2], 带点的实线是 SHIELD 的计算结果. 对于在40~ 600 MeV 区间²⁰⁵Bi 的激发函数, 其 SHIELD 计算结果和实验数据符合很好, 而在 $E_p > 600$ MeV 的区间, SHIELD 计算结果偏低于实验结果, 在 1.6 GeV 处, 约偏低20%. ⁸³Rb 的激发函数, 在 $E_p < 1$ GeV 区间, SHIELD 计算结果低于实验结果.

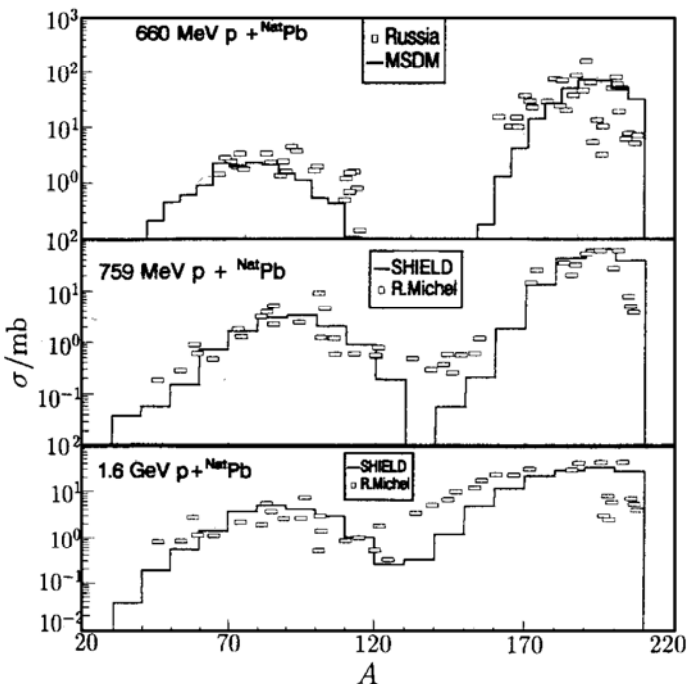


图4 SHIELD 计算660, 759, 1 600 MeV 的质子入射薄^{nat}Pb 靶碎片质量分布

我们利用 SHIELD 程序研究了入射能量分别为660 MeV, 759 MeV, 1.6 GeV 的质子轰击天然薄铅靶的碎片质量分布. 图4 中759 MeV 和1.6 GeV 的碎片质量分布实验数据是 R. Michel 等^[2] 完成的, 660 MeV 的碎片质量分布实验数据是 Y. V. Alexandrov 等^[14] 完成的, 折线是 SHIELD 计算的结果.

图5 给出了利用 SHIELD 计算的能量为1.6 GeV 的质子入射在长60 cm, 直径20 cm 的铅靶上的碎片质量分布. 图中纵坐标是每一个质子入射引起的碎片形成几率. 碎片质量分布在一个很广的区域, 在 $10 < A < 210$ 的区域, 都有碎片的形成. 在质量数约为90的地方, 出现一个高斯分布, 这是裂变和多重碎裂过程的产物, 在 $A > 120$ 的区域, 是散裂和多重碎裂的产物.

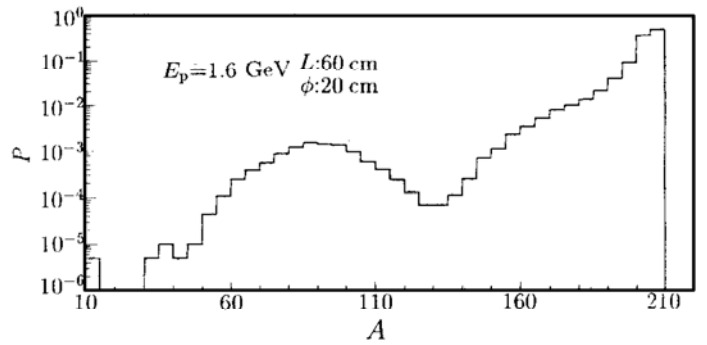


图5 SHIELD 计算1.6 GeV 质子入射^{nat}Pb 厚靶碎片分布

4 结果和讨论

对 SHIELD 程序进行的检验中, 计算入射能量从10 MeV 到2 GeV 的质子和中子轰击²⁰⁸Pb 薄靶的去弹截面和总截面, 入射能量为1.6 GeV 的质子轰击²⁰⁸Pb 薄靶的出射中子的双微分截面, 质子轰击²⁰⁸Pb 薄靶的²⁰⁵Bi 和⁸³Rb 的激发函数, SHIELD 计算结果和实验数据符合得较好. 可见, SHIELD 程序的物理模型考虑是比较合理和完善的.

利用 SHIELD 计算了入射能量分别为 660 MeV, 759 MeV 和1.6 GeV 的质子轰击天然铅薄靶的碎片分布. 计算结果和实验数据符合较好.

SHIELD 计算的能量为1.6 GeV 的质子入射在长60 cm 和直径20 cm 的铅靶上的碎片分布, 在 $10 < A < 210$ 的区域, 都有碎片的形成, 在整个碎片分布中, 主要碎片是质量数和靶核质量数接近的核, 裂变和多重碎裂碎片在整个碎片分布中所占份额很少, 和散裂引起的碎片比较, 约低2个数量级.

在本工作中, 用 SHIELD 程序研究碎片分布, 对于中重核有一定的缺点. 例如: 计算的 ^{83}Rb 的激发函数, 在 $E < 800$ MeV 的能区, SHIELD 计算结果偏低实验数据达 1 个量级. 计算 1.6 GeV 的质子轰击天然铅薄靶的碎片分布, 在 $140 < A < 170$ 的核区, SHIELD 计算结果偏低实验数据几倍. 因此,

SHIELD 程序需要改进. 对具有较高激发能的余核衰变到平衡态的级联-激子(CEM) 模型和中重核多重碎裂统计模型(SMM) 的改进, 有可能使 SHIELD 程序分析碎片分布的结果好转. 这一工作正在进行中.

参 考 文 献:

- [1] 丁大钊, 赵志祥, 罗璋琳等. 加速器驱动洁净核能系统[C]. 香山科学会议第79次学术讨论会, 北京, 香山, 1997, 7: 2~ 5.
- [2] Gloris M, Iange H J, Leya I *et al.* Nuclide Production by Proton-induced Reaction on Elements ($6 \leq Z \leq 29$) in the Energy Range from 800 to 2 600 MeV [J]. Nucl Instr & Meth, 1996, B113: 429~ 475.
- [3] Michel R, Bodemann B, Busemann H *et al.* Cross Section for the Production of Residual Nuclides by Low and Medium Energy Protons from the Target Elements C, N, O, Mg, Al, Si, Cu, Ti, V, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Sr, Y, Zr, Nb, Ba and Au [J]. Nucl Instr & Meth, 1997, B129: 153~ 193.
- [4] Armstrong T W, ORNL-TM-3667, 1972.
- [5] Fan Sheng, Li Zhuxia, Zhao Zhixiang *et al.* Analysis of Proton-induced Reactions on ^{208}Pb with Incident Energy 590 and 322 MeV [J]. Eur Phys J, 1999, A4: 61~ 69.
- [6] 樊 胜. 加速器驱动洁净核能系统中的两个核物理问题研究 [D]. 中国原子能科学研究院博士毕业论文, 1998, 12.
- [7] Sobolevsky N. International Code Comparison for Intermediate Energy Nuclear Data Thick Target Benchmark for Lead and Tungsten [Z]. NSC/DOC(96)-15, 1996.
- [8] Toneev V D, Gudima K K. Particle Emission in Light and Heavy Ion Reactions[J]. Nucl Phys, 1983, A400: 173~ 189.
- [9] Gudima K K, Mashnik S G, Toneev V D. Cascade-exciton Model of Nuclear Reactions [J]. Nucl Phys, 1983, A401: 329 ~ 361.
- [10] Botvina A S, Ilinov A S, Mishustin I N. Multifragment Break-up of Nuclei by Intermediate-energy Protons [J]. Nucl Phys, 1990, A507: 649~ 674.
- [11] Bauhoff W. Atom Data and Nucl Data Tables, 1986, 35: 429~ 432.
- [12] 徐春成. 加速器驱动洁净核能系统散裂靶中物理过程的模拟 [D]. 北京大学博士后出站报告, 北京, 1999, 6.
- [13] Ishibashi K, Takada H, Nakamoto T *et al.* Measurement of n-production Double-differential Cross Section for Nuclear Spallation Reaction Induced by 0. 8, 1. 3, 3. 0 GeV Protons [J]. J of Nucl Sci Tech, 1997, 34: 529~ 537.
- [14] Alexandrov Y V, Eismont V, Ivanov R *et al.* New Data for the Production of Radionuclides in Thin Lead Target by 660 MeV Protons [C]. Conf Proc Nuclear Data for Science and Technology, SIF, Bologna, Italy, 1997, 159: 1 468~ 1 525.

Fragment Mass Distribution of Proton-induced Spallation Reaction with Intermediate Energy*

FAN Sheng¹, YE Yan-lin¹, XU Chun-cheng¹, CHEN Tao¹
ZHAO Zhi-xiang², N. M. Sobolevsky³

1 (Technical Physics Department, Peking University, Beijing 100871, China)

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

3 (Institute for Nuclear Research, Moscow)

Abstract: The test of part benchmark of SHIELD code was performed. The cross section, mass distribution and excitation function of the fragments (including residual nuclei) in the proton-induced spallation reaction on thin Pb target at intermediate energy have been calculated by SHIELD code. And the results are in good agreement with experimental data. The fragment mass distributions from proton-induced spallation reaction on thick Pb target at incident energy 1.6 GeV were also presented.

Key words: SHIELD code; spallation reaction; fragment mass distribution

* **Foundation item:** NSFC (19675003); The Nuclear Industry Science Foundation of China (Y7197AY002)