



中能质子引起散裂反应的碎片分布研究

樊胜¹⁾ 叶沿林¹⁾ 赵志祥²⁾ 徐春成¹⁾ 陈陶¹⁾ N. M. Sobolevsky³⁾

1) 北京大学技术物理系, 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, Russia

摘要 对 SHIELD 程序进行了部分检验, 利用 SHIELD 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。计算了 1.6 GeV 的质子轰击长 60 cm, 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

引言

近年来, 利用中能质子加速器轰击重靶产生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^[1~4]。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、高放射性核素的产生和累积。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 , T 等粒子, 以及在靶内产生以气体形式存在的碎片, 如: ^{35}Cl , ^{39}Ar , ^{83}Rb 等。这些产物将引起靶材性能的变化, 如惰性气体产物引起的靶材脆变。为了了解靶的放射性累积和产物对靶材性能的影响, 对中能质子入射引起核反应的碎片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与核碰撞引起核反应的剩余核和碎片的测量工作^[5~8]。近几年来, 受加速器驱动洁净核能系统研究需要的刺激, 该合作组的人员和测量范围都迅速扩大。他们选择了 40 余种具有代表性的靶, 利用 CERN/Geneva, 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 15000 个数据点^[7,8]。

近年来, 已发展了十余种模型和程序来模拟计算散裂靶问题。大多数程

序为高能输运程序 (HETC^[9]) 和某一中子输运程序 (如: MORSE^[10], MCNP^[11] 等) 联接在一起使用。其中, 在 20 MeV 以下, MCNP 是最广泛使用的程序。由于低能区主要是复合核的形成和衰变, 计算较为准确。入射质子能量的提高, 散裂作用增强, LAHET^[12], HETC, FLUKA^[13], CEM^[14, 15] 等程序都能用于处理这一物理过程。但是大多数程序没有考虑碎裂的机制, 碎片的处理效果不好。近年来, 人们正在努力改进模型和程序来处理碎片问题, 如 HETC/KFA2^[7] 等。

樊胜, 本文作者之一, 利用 QMD 加上 FISSION 模型处理碎片问题, 得到了较为理想的结果^[16~18]。但 QMD 计算量大, 且 FISSION 模型基本上是一个半经验的方法。SHIELD(MSDM)^[19~21] 程序考虑了碎裂过程, 我们对 SHIELD (MSDM) 程序进行了基准检验计算, 用于处理中能质子入射引起反应的碎片分布研究, 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 直径 20 cm 的铅靶上的碎片分布进行了研究。

1 SHIELD (MSDM) 程序

SHIELD (MSDM) 程序是蒙特卡罗强子输运程序。俄罗斯科学院核研究所将其广泛地用于研究中高能质子入射厚靶上的中子产生、能量沉积、碎片分布及由入射粒子和次级粒子在靶材上引起的辐射损伤, 加速器和空间粒子引起的辐射防护等方面的研究。SHIELD 程序能计算强子在任意形状和成分靶中的级联过程, 可以处理 1000 GeV 以下的核子, π 介子, ν 介子, μ 介子和反粒子的产生和输运, 以及这些粒子的两体和三体衰变。在 SHIELD 程序中, 核内级联采用 Dubna 核内级联模型。它的关键部分是强子-核反应的粒子产生, 采用多进程动力学模型 (Many Stage Dynamics Model -MSDM)^[22] 来考虑强子-核和核子-核子反应的粒子产生。对于非常高能量, 采用独立的夸克-胶子弦模型。中子输运采用基于 BNAB 的 26 群中子数据库的 LOENT 程序^[23]。

SHIELD 考虑碎片的形成, 对于不同核区和能区的碎片, 采用了不同的模型。对于 ^2H , ^3H , ^3He , ^4He 等轻粒子, 采用联合模型加以考虑 (Coalescence Model)^[24], 具有较高激发能的余核衰变到平衡态, 采用级联-激子模型 (Cascade-Excitation Model)^[25], 平衡状态的核退激发, 对于 $A < 16$ 的粒子, 利用轻核的费米破裂模型 (Fermi Break-up)^[26], 而激发能小于 2 MeV/Nucleon 的中重核, 利用包括裂变过程的蒸发模型来考虑, 激发能大于 2 MeV/Nucleon 的中重核的衰变, 采用多重碎裂统计模型 (SMM)^[27] 加以考虑。

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

2 SHIELD (MSDM) 计算结果分析

2.1 SHIELD (MSDM) 基准检验

图 1 给出了利用 SHIELD 计算的从 10 MeV 到 2 GeV 的 $p + {}^{56}\text{Fe}$, $p + {}^{208}\text{Pb}$ 和 $n + {}^{56}\text{Fe}$, $n + {}^{208}\text{Pb}$ 去弹截面的结果和实验数据^[28~30]的比较以及 $p + {}^{208}\text{Pb}$ 反应的总截面的比较。图中分离的点是实验数据, 实线是 SHIELD 计算结果。SHIELD 计算结果和实验符合得较好。

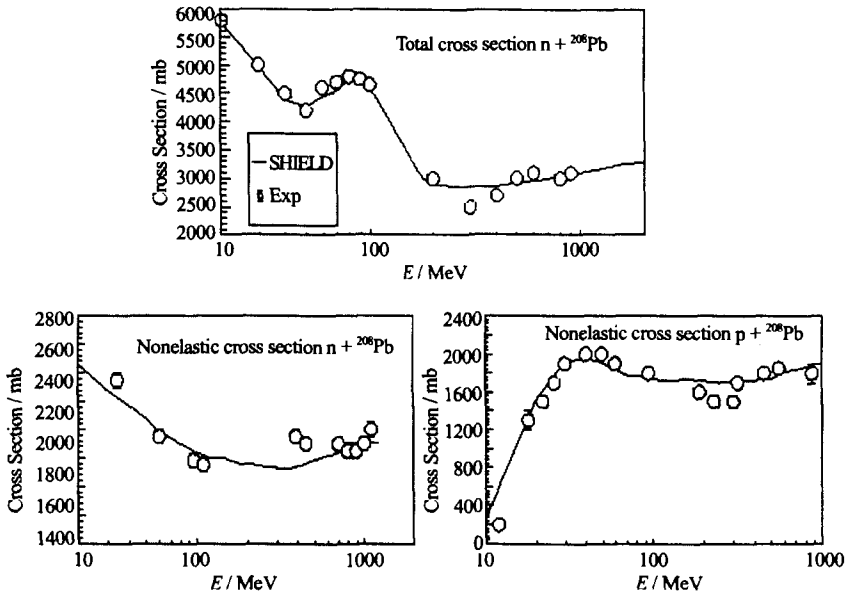


图 1 SHIELD 计算的 $p + {}^{208}\text{Pb}$ 和 $n + {}^{208}\text{Pb}$ 的去弹截面

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 $i (A_i, Z_i)$ 出现的事例是 N_i , 总的入射质子数目是 N , 入射质子引起核反应的去弹截面为 σ_R , 则碎片 i 的形成截面是,

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

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 ${}^{83}\text{Rb}$ 是一个典型的裂变产物。 ${}^{83}\text{Rb}$ 的形成是质子入射引起的靶核的多重碎裂和裂变引起的。

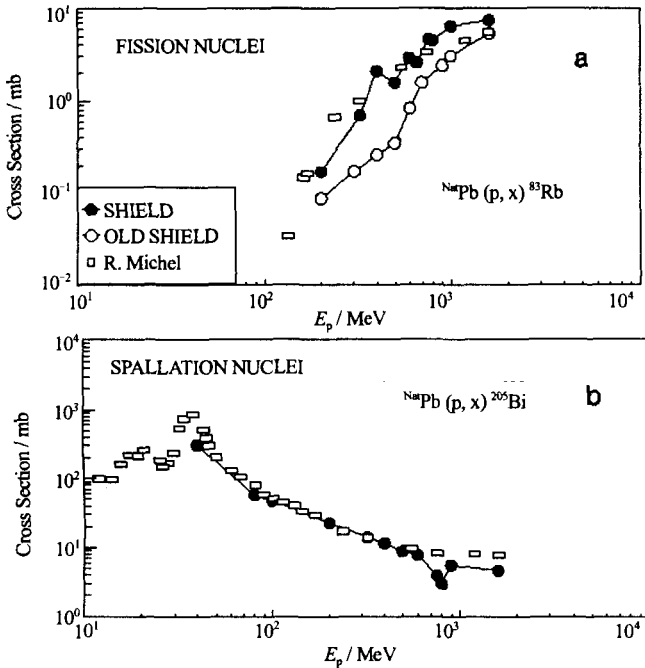


图2 SHIELD 计算的 $^{208}\text{Pb}(p, x)^{83}\text{Rb}$ 和 $^{205}\text{Pb}(p, x)^{205}\text{Bi}$ 的激发函数

图2给出了利用SHIELD计算的质子入射铅薄靶的 ^{208}Pb 、 ^{205}Bi 和 ^{83}Rb 的激发函数。图中分离的方框点是R. Michel的实验测量数据^[7]，带点的实线是SHIELD的计算结果。对于 ^{205}Bi 的激发函数，在40 MeV~600 MeV的区间，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，在1.6 GeV处，约偏低20%。 ^{83}Rb 的激发函数，在 $E_p < 1$ GeV区间，SHIELD计算结果偏低。

我们通过计算不同数目的入射质子的 ^{205}Bi 和 ^{83}Rb 的激发函数发现，由入射质子数目引起的统计误差不大。

2.2 薄靶和厚靶的碎片分布

我们利用SHIELD程序研究了入射能量分别为660 MeV、759 MeV、1.6 GeV的质子轰击天然铅薄靶(1.4% ^{204}Pb + 24.1% ^{206}Pb + 22.1% ^{205}Pb + 52.4% ^{208}Pb)的碎片分布。图3中759 MeV和1.6 GeV的碎片分布实验数据是R. Michel等完成的^[7]，660 MeV的碎片分布实验数据是Y. V. Alexandrov等完成的^[33]。折线是SHIELD计算的结果。

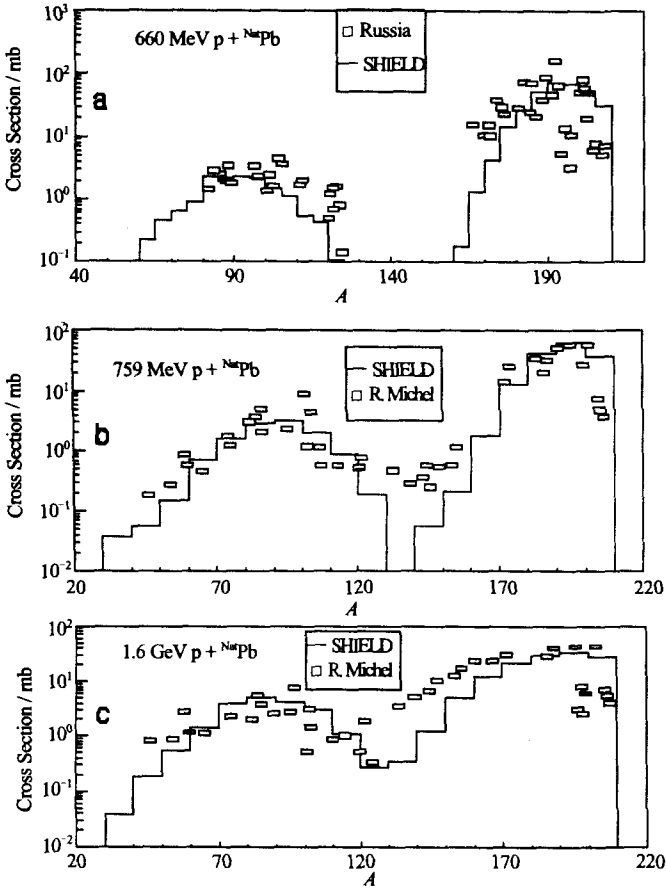


图3 SHIELD 计算的 660 MeV, 759 MeV, 1.6 GeV
质子入射 ^{208}Pb 靶的散裂碎片分布

从 SHIELD 计算结果我们可以看出, 中、高能质子轰击靶, 余核的形成截面很明显的分为二个部分, 在图中为各自相互独立的二个高斯分布。靠近右边的一个高斯峰, 峰的位置接近于靶核的质量数 (A), 很明显, 这个峰是散裂产物的分布。随着入射质子能量的增加, 峰的位置逐渐向左移动, 分布的宽度逐渐展宽, 峰的高度也逐渐减小。这是因为, 随着入射质子能量的增加, 入射质子敲出的核子数目增多, 相应的远离靶核质量数目的余核增多。

在靶核的质量数一半($\frac{A}{2}$)的地方出现另一个高斯分布。很明显, 这个峰是一个裂变峰。这个峰的出现可能是仍然具有较高激发能的散裂余核通过裂变的方式, 或者是高能质子引起的靶核的高能裂变, 或者是较高能量质子入射的多重碎裂反应所形成的碎块。峰的宽度随入射质子能量的增加相对展宽, 但峰的位置基本上保持不变, 而峰的高度也逐渐增高。这是因为, 随着入射质子能量的增加, 靶核的裂变几率和多重碎裂几率增加。

表 1 碎片的形成截面¹⁾

mb

Nuclide		Exp. ²⁾	MSDM ³⁾
⁵⁴ Mn	i	0.860±0.116	0.76
⁷⁴ As	i	2.29±0.25	1.52
⁷⁵ Se	c	2.14±0.26	2.28
⁸³ Rb	c	5.12±0.69	2.28
^{85g} Sr	c	3.77±0.40	1.14
⁹⁶ Nb	i	7.34±1.13	1.14
^{95m} Tm	c	2.74±0.43	1.14
^{96r} Tc	i	1.61±0.22	1.52
^{101m} Ru	c	3.28±0.40	1.14
¹⁰² Rh	i	2.52±0.20	2.08
^{106m} Ag	i	1.02±0.16	1.14
^{110m} Ag	i	0.899±0.119	0.38
¹²⁰ Sb	i	0.430±0.075	0.38
^{124g} Sb	i	0.331±0.057	0.38
^{119m} Te	c	0.544±0.094	0.76
^{121m} Te	c	0.489±0.071	0.38
¹⁶⁸ Tm	i	0.304±0.077	0.38
^{196g} Au	i	3.20±0.35	3.42
²⁰⁵ Bi	i	7.18±0.84	5.70

注: 1) 1.6 GeV p + ²⁰⁸Pb 的余核形成截面(单位: mb); i: 为独立产额, c: 为累计产额。

2) Exp: M. Gloris, Nucl. Instr. and Meth. Phys. Res. B113, (1996), 429.

3) MSDM: 本工作。

表 1 给出了入射能量为 1.6 GeV 的质子轰击 ²⁰⁸Pb 薄靶的几种不同碎片的形成截面。¹⁶⁸Tm, ^{196g}Au, ²⁰⁵Bi 是散裂产物, 其它是裂变产物。利用 SHIELD

计算的结果和实验符合得很好。由于累计产额是通过所有的途径形成某一核的总的形成截面，而 SHIELD 独立产额，因此累计产额实验值应该高于 SHIELD 计算值。

图 4 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。在整个碎片分布中，主要的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的份额很少，和散裂引起的碎片比较，约低二个数量级。

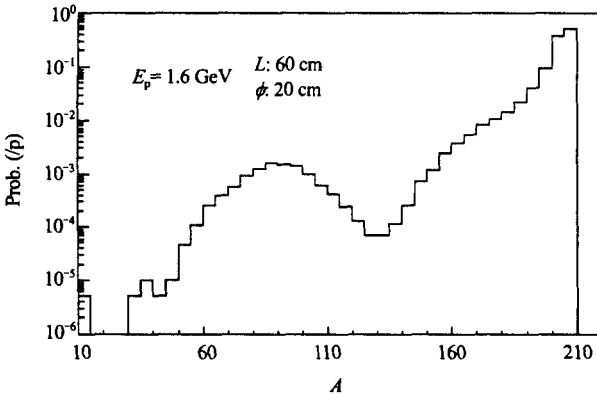


图 4 SHIELD 预言的 1.6 GeV 的质子入射长 60 cm，直径 20 cm 的铅靶的碎片分布

3 结论和讨论

我们对 SHIELD (MSDM) 程序进行了基准检验，利用 SHIELD 计算入射能量从 10 MeV 到 2 GeV 的质子和中子轰击 ^{208}Pb 和 ^{56}Fe 的薄靶的去弹截面和总截面；入射能量为 1.6 GeV 的质子轰击 ^{208}Pb 薄靶的出射中子的双微分截面；质子轰击 ^{208}Pb 薄靶的 ^{205}Bi 和 ^{83}Rb 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合理和完善的，其计算结果是可靠的。

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。从计算可以看出, 碎片分布为相互独立的二个高斯峰, 随入射质子能量的增加, 峰的高度和位置相应的发生移动。二个峰的宽度随入射质子能量增加而展宽, 散裂峰的高度随入射能量的增加而降低, 而裂变峰的高度则增加。

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, 主要的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的份额很少, 和散裂引起的碎片比较, 约低二个数量级。

SHIELD 研究碎片分布, 对于中重核有一定的缺点。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一个量级, 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 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。

参 考 文 献

- 1 Bawman C D, et al. Nucl. Instr. Meth., A320, 336, 1992
- 2 Carminati F, et al. CERN/AT/93-47 (ET), 1993
- 3 Rubbin C, et al. CERN/AT/95-44 (ET), 1995
- 4 丁大钊等. 加速器驱动洁净核能系统, 香山科学会议第 79 次学术讨论会, 北京, 香山: 1997, 7, 2~5
- 5 Gloris M, et al. Conf. Proc. Vol59, Nuclear Data for Science and Technology, P1468, SIF, Bologna, Italy, 1997
- 6 Michel R, et al. Nucl. Instr. Meth., B103,183, 1995
- 7 Gloris M, et al. Nucl. Instr. Meth., B113,429, 1996
- 8 Michel R, et al. Nucl. Instr. Meth., B129,153, 1997
- 9 Armstrong T W, et al., ORNL-TM-3667, 1972
- 10 Straker E A, et al. ORNL-4585, 1970
- 11 Briesmeister J F. LA-12625-M, 1993
- 12 Richard E, et al. LA-UR-3014, 1989
- 13 Ferrari A, et al. Nucl. Instr. Meth., B71, 412, 1992
- 14 Gudima K K, et al. Nucl. Phys. A401, 329, 1983
- 15 Mashnik S G. Acta Phys. Slovaca, 43, 86, 1993
- 16 Fan Sheng, et al. Eur. Phys. J. A4, 61,1999

- 17 樊胜等. 利用 QMD+FISSION 模型计算中能质子入射引起核反应的碎片分布 (in press)
- 18 樊胜等. 中国原子能科学研究院博士毕业论文, 1998, 12
- 19 Sobolevsky N. NSC/DOC (96)-15, 1996
- 20 Dementyev A, et al. Nucl. Phys., B70, 486, 1999
- 21 Dementyev A, et al. Proc. Of Specialists' Meeting "Intermediate Energy Nuclear Data Model and Codes", Paris, May 30-June 1 1994, NEA, OECD, Paris . P237
- 22 Botvina A S. Nucl. Phys., A507, 649, 1990
- 23 Dementyev A, et al. Proc. Of 3rd Workshop on Simulating Accelerator Radiation Environments, May 7-9, 1997, KeK, Tsukuba, Japan
- 24 Toneev V D, et al. Nucl. Phys., A400, 173, 1983
- 25 Gudima K K, et al. Nucl. Phys., A401, 329, 1983
- 26 Botvina A S, et al. Nucl. Phys., A475, 663, 1987
- 27 Botvina A S, et al. Nucl. Phys., A507, 649, 1990
- 28 Schutt R, et al. Phys. Lett., B203, 22, 1988
- 29 Bauhoff W. Atom Data and Nucl. Data Tables, 35, 429, 1986
- 30 Prael P E, et al. Conf. Proc. Vol.59, Nuclear Data for Science and Technology, P1468, SIF, Bologna, Italy, 1997. P1449
- 31 Xu C C, et al. Study of a Planned ADS Target System with the Improved SHIELD Code* (in press)
- 32 ISHIBASHI K, et al. J. Nucl. Sci. Tech., 1997 (34) 529
- 33 Alexandrov Y V, et al. Conf. Proc. Vol.59, Nuclear Data for Science and Technology, P1468, SIF, Bologna, Italy, 1997. P1525

Fragment Mass Distribution of Proton-Induced Spallation Reaction with Intermediate Energy

FAN Sheng¹⁾ YE Yanlin¹⁾ XU Chuncheng¹⁾ CHEN Tao¹⁾
ZHAO Zhixiang²⁾ N. M. Sobolevsky³⁾

1) Technical Physics Department, Peking University, 100871

2) China Institute of Atomic Energy, Beijing, 102413

3) Institute for Nuclear Research, Moscow, Russia

Abstract: The test of part benchmark of SHIELD code is finished. The fragment cross section and mass distribution and excitation function of the residual nuclei from

proton-induced spallation reaction on thin Pb target with intermediate energy have been calculated by SHIELD code. And the results are in good agreement with measured data. The fragment mass distribution of the residual nuclei from proton-induced spallation reaction on thick Pb target with incident energy 1.6 GeV have been simulated.

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