

文章编号: 1007-4627(2002)04-0390-05

与散裂中子靶物理相关的理论计算程序探讨*

II 厚靶计算

樊 胜, 于洪伟, 申庆彪, 赵志祥
(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘 要: 散裂中子靶是加速器驱动洁净核能系统的一个重要环节. 相关的理论计算程序和蒙特-卡罗方法是研究该系统的散裂靶物理的一个重要手段. 对相关程序进行了比对和介绍, 并对 SHIELD 程序系统在中国的发展和在散裂靶物理上的应用作了介绍.

关键词: 散裂中子靶; 计算程序; 加速器驱动系统

中图分类号: O571.53 **文献标识码:** A

1 引言

利用中高能质子轰击重金属靶(如铅、铋等)形成散裂中子源在核物理、材料物理和生物等方面有广泛的用途. 近几年来, 加速器驱动洁净核能系统(ADS)作为可使核能大规模、可持续发展的创新技术路线, 在国际上形成了一个研究热点^[1-3], 而散裂中子源是该系统的一个重要环节.

中子产额直接影响系统的能量增益, 中子能谱和空间分布是设计次临界装置的重要参数. 经质子长期轰击后, 靶物质内生成的散裂产物中有大量的

放射性核素, 因此靶成为一个放射性源. 要了解其放射性, 必须知道散裂靶的散裂产物的质量分布.

中能质子轰击重靶, 其物理过程可以分为两个部分(如图 1^[4]所示). 一是核内的微观反应过程, 包括直接、级联和蒸发等过程, 发射出中子、质子、 π 和 Δ 等粒子, 具有较高激发能的余核通过发射 γ 射线和裂变的方式退激; 二是具有较高能量的出射粒子又和厚靶中别的核发生反应, 直至出射粒子逃逸出厚靶或者能量低于发生反应的阈能而停留在靶内, 这是一个粒子在厚靶中的宏观输运过程.

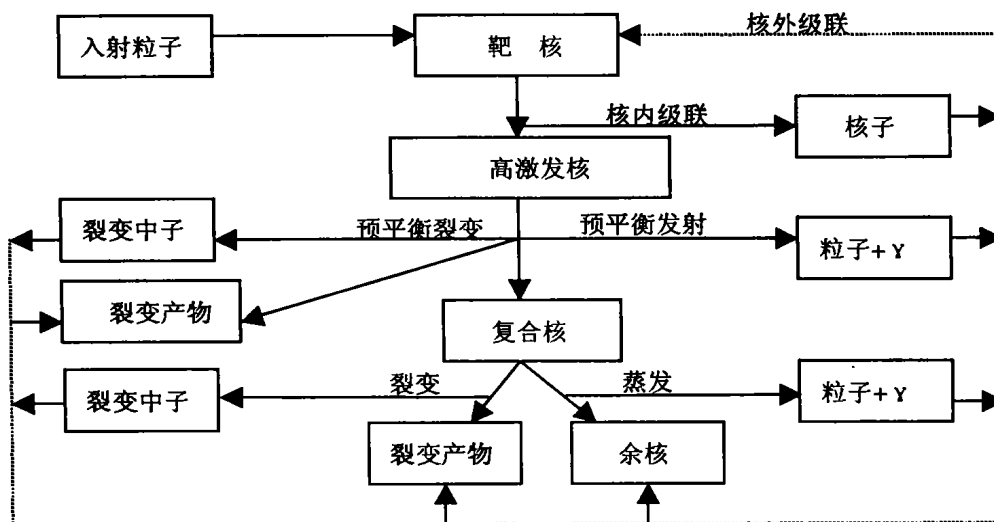


图 1 高能质子在靶内的核内和核外输运过程

收稿日期: 2001-11-14; 修改日期: 2002-06-27

* 基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(G1999022600)

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.

2 厚靶计算程序

OECD(NEA)组织了多次计算程序的比对研究^[5-7]. 比对实验的散裂中子靶是直径 20 cm, 长 60 cm 的圆柱型靶, 质子沿靶的中心轴线入射, 入射质子能量为 800 MeV, 散裂靶材料为铅和钨. 参加比对的有 12 个实验室的 12 个蒙特-卡罗程序. 大多数程序采用高能输运程序(HETC^[8])和某一中子输运程序(如 MORSE^[9]和 MCNP^[10]等)联接在一

起使用. 其中, 在 20 MeV 以下, MCNP 是使用最广泛的程序. 表 1 给出了参加比对的实验室和比对程序, 以及程序应用的相关理论模型. 表 2 给出了参加比对的程序计算的 800 MeV 质子轰击铅靶的中子产额和泄漏露中子数目的比较. 各个程序计算的中子产额有较大的分歧, CDF 和 ANSALDO 计算结果远低于其他程序的计算结果. 而 JAERI 的结果较其他实验室的结果偏高, 其他实验室的计算结果比较一致.

表 1 参加比对的实验室和比对程序, 以及程序应用的相关理论模型^[5]

实验室	作者	所用程序
ANSALDO(Genoa)	P. Neuhold et al.	Mobing Source Model+MCNP
JINR(Dubna)	A. Daniel	SITHA= Linear transport eq. +ENDL82
CDF(Paris)	F. Bacha et al.	GEANT+FLUKA+GHEISHA
INFN(Milano)	A. Ferrary et al.	FLUKA+PEANUT
INR (Moscow)	A. Dementyev et al.	SHIELD=INC+DEEXitation+BNAB
ENEA (Roma)	P. A. Landeyro et al.	HETC(NEA)+MCNP
JAERI (Japan)	H. Takada	MNTC(JAERI)+MCNP
LANL(Los-Alamos)	L. L. Daemen et al.	LAHET+MCNP
KFA (Julich)	P. Cloth et al.	HERMES= HETC(KFA)+MORSE
KfK-1 (Karlstute)	C. Broeders et al.	HERMES= HETC(KFA)+MORSE
KfK-2 (Karlstute)	C. Broeders et al.	HERMES= HETC(KFA)+MCNP
KfK-3 (Karlstute)	M. Segev	HERMES= HETC(KFA)+MCNP
PSI-1(Villigen)	F. Atchison et al.	HETC(PSI)+TWODANT
PSI-2(Villigen)	F. Atchison et al.	HETC(PSI)+05R

表 2 参加比对的程序计算的 800 MeV 质子轰击铅靶中子产额和中子泄漏^[5]

实验室	中子产额			中子泄漏		
	$E_n > 20$ MeV	$E_n < 20$ MeV	总计	$E_n > 20$ MeV	$E_n < 20$ MeV	总计
ANSALDO	0.21	10.32	10.53	—	—	—
JINR	0.72	19.47	20.19	0.66	17.33	17.99
CDF	1.06	8.43	9.49	—	—	—
INFN	—	—	—	—	—	—
INR	2.28	19.46	21.74	0.88	15.43	16.31
ENEA	0.95	18.75	19.70	1.30	19.73	21.03
JAERI	—	—	—	0.77	19.77	20.54
LANL	2.50	15.79	18.29	1.17	15.02	16.19
KFA	1.98	14.59	16.57	0.90	13.37	14.27
KfK-1	1.98	14.59	16.57	0.89	13.06	13.95
KfK-2	1.98	14.94	16.92	—	—	—
KfK-3	1.98	14.69	16.67	—	—	—
PSI-1	0.11	16.36	16.47	1.50	12.37	13.87
PSI-2	0.11	16.52	16.63	1.50	14.47	15.97

图 2 给出了 KFA, LANL, INFN, PSI, INR, ENEA 和 ANSAL 等实验室计算的 800 MeV 质子轰击铅靶的散裂碎片在靶内分布的比较. INFN 的结果在散裂碎片 $A > 150$ 的区间和 KFA, LANL 的结果有很大的分歧. KFA, ANSAL, ENEA 和 INR 等实验室的结果在整个散裂碎片区间都有很大的分歧^[5].

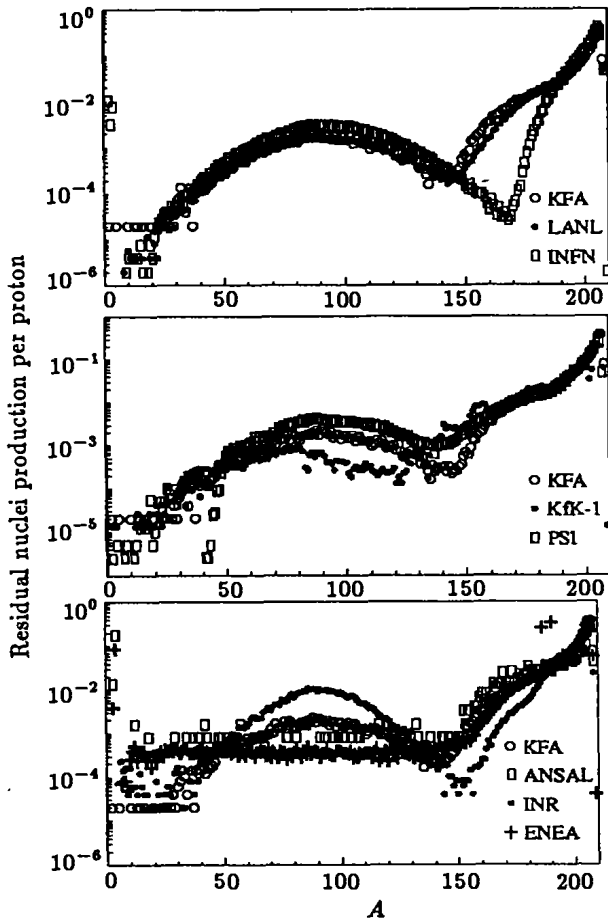


图 2 KFA, LANL, INFN, PSI, INR, ENEA 和 ANSAL 等实验室计算的 800 MeV 质子轰击铅靶的散裂碎片在靶内分布的比较^[5]

3 SHIELD 程序简介

SHIELD 程序是蒙特-卡罗强子输运程序^[11]. 俄罗斯科学院核研究所将其广泛地用于研究中高能质子轰击厚靶时的中子产生、能量沉积、碎片分布、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的靶中的级联过程, 可以处理 1 000 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 (MSDM^[12]) 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^[13].

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 d, t, ^3He 和 α 等轻粒子, 采用联合模型 (Coalescence Model)^[14] 加以考虑, 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)^[15], 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^[16], 而对激发能小于 2 MeV/u 的中重核, 利用包括裂变过程的蒸发模型来考虑, 而对激发能大于 2 MeV/u 的中重核的衰变, 采用多重碎裂统计模型 (SMM)^[12] 加以考虑.

SHIELD 程序考虑过程全面, 它的开放式结构还有利于它的修改和发展, 由于采用了不少基于实验的数据库, 因此它的预言较可靠, 程序运行的速度也很快. 在运行过程中保留了所有粒子的信息, 它是一个与 HETC 等程序平行发展的程序. 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. SHIELD 程序对具有复杂形状的靶处理很复杂, 同时也缺乏相应的图视功能. 徐春成博士把 GEANT 的几何设计技术和图视化技术引入 SHIELD 程序中^[17-19], 改进了 SHIELD 程序的几何设计和图视化功能.

由于低能区主要是复合核的形成和衰变, 计算较为准确. 随着入射质子能量的提高和散裂作用的增强, LAHET, HETC, FLUCK^[20] 和 CEM^[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^[21] 等. 对 SHIELD 程序中使用的能级密度公式的参数进行了更新和改进, 得到的碎片分布结果比 SHIELD 计算得到的好. 我们把 CEM95 模型^[22] 中对次级粒子发射相关的对效应修正、预平衡发射态和蒸发态的角动量、复合核和预平衡态核的转动动能等因素以及余核的裂变在 SHIELD 程序中加以考虑, 采用 Ignatyuk 能级密

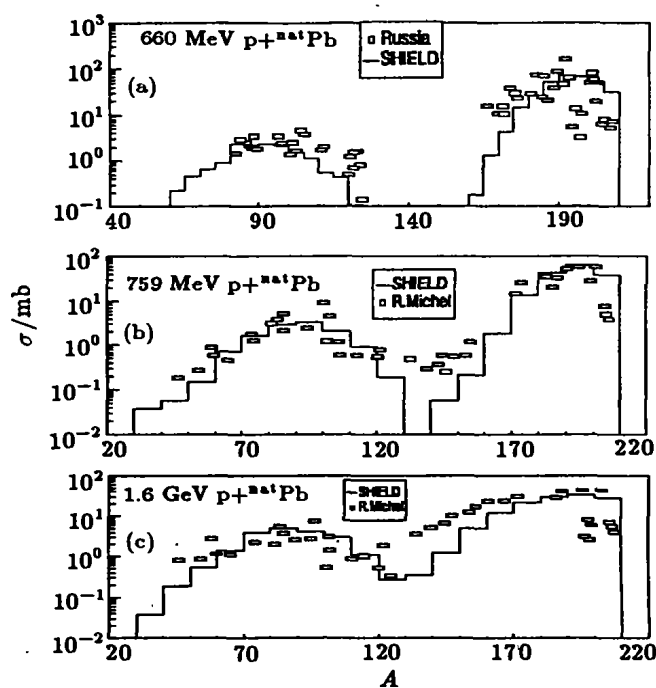


图 3 SHIELD 研究入射能量分别为 660, 759 和 1 600 MeV 的质子轰击天然铅靶的碎片分布

度公式和相关参数改进 SHIELD 程序中原来的 CEM

参 考 文 献:

- [1] Bowmang C D, Arthur E D, Lisowski P W, *et al.* Nuclear Energy Generation and Waste Transmutation Using an Accelerator-driven Intense Thermal Neutron Source[J]. Nucl Instr and Meth, 1992, A320: 336.
- [2] Rubbia C, Rubio J A, Buono S, *et al.* Conceptual Design of a Fast Neutron Operated High Power Energy Amplifier[R]. CERN/AT/95-45(ET)[R], CERN, 1995.
- [3] Carminati F, Klapisch R, Revol J P, *et al.* An Energy Amplifier for Cleaner and Inexhaustible Nuclear Energy Production Driven by Particle Beam Accelerator[R]. CERN/AT/93-47(ET), CERN, 1993.
- [4] Ding Dazhao. Joint IAEA/CNNC Seminar 21st Century Nuclear Energy Development in China[Z]. Beijing China, 1997.
- [5] Sobolevsky N. International Codes Comparison for Intermediate Energy Nuclear Data[R]. NEA/DOC(95)-15, 1995.
- [6] Filges D. OECD Thick Target Benchmark for Lead and Tungsten[R]. NEA/DOC(95)-2, 1995.
- [7] Michel R. Specification for an International Codes and Model Intercomparison for Intermediate Energy Activation Yields [R]. NEA/DOC(95)-8, 1995.
- [8] Cabriel T A, Alsmiller R G, Guthrie M P. An Extrapolation Method for Predicting Nucleon and Pion Differential Produc-

tion Cross Sections from High-energy (>3 GeV) Nucleon-nucleus Collisions[R]. ORNL-4542, Oak Ridge National Laboratory, 1970.

模型, 对质子入射引起的碎片分布进行了研究. 利用改进了的 SHIELD 程序研究了质子轰击不同材料的靶的中子产额、出射中子能谱、放射性废物累计^[23]、散裂碎片分布^[24]、材料的辐射损伤^[25, 26]、能量沉积等, SHIELD 计算的结果很好地再现了实验数据. 图 3 给出了 SHIELD 计算的 660, 759, 1 600 MeV 质子轰击铅靶散裂碎片分布同实验数据的比较. 同时我们为中国的 ADS 原理验证装置设计进行了 150 MeV 质子轰击固态金属靶研究^[27-30].

4 小 结

散裂中子靶是加速器驱动洁净核能系统的一个重要环节. 相关的理论计算程序和蒙特-卡罗方法是研究该系统的散裂靶物理的一个重要手段. 本工作对目前世界上各主要实验室开展散裂中子物理研究的理论程序和蒙特-卡罗程序进行了讨论, 并介绍了我们目前正在使用的 SHIELD 程序的改进和应用.

- [9] Emmett M B. The MORSE Monte Carlo Radiation Transport Code System[R]. ORNL-4972, 1975.
- [10] Briesmeister Judith F. MCNP—A General Monte-Carlo N-particle Transport Code[R]. LA-13709-M, 2000.
- [11] Dmityev A V, Sobolevsky N M. SHIELD— Universal Monte Carlo Hadron Transport Code Scope and Application [C]. Proc of 3rd Workshop on Simulating Accelerator Radiation Environments, KEK, Tsukuba, Japan, 1997.
- [12] Botvina A S, Iljinov A S, Mishustin I N. Multifragment Break-up of Nuclei by Intermediate-energy Protons[J]. Nucl Phys, 1990, A507: 649.
- [13] Sobolevsky N M, Zhukov A P. Some Non-typical Tasks of Hadron Transport with the SHIELD Transport Code[C]. Prof of 4th Workshop on Simulating Accelerator Radiation Environments, Knoxville, Tennessee, USA, 1998.
- [14] Mashnik S G. Neutron-induced Particle Production in the Cumulative and Noncumulative Regions at Intermediate Energies [J]. Nucl Phys, 1994, A568: 703.
- [15] Gudima K K, Mashnik S G, Toneev V D. Cascade-excitation

- Model of Nuclear Reactions[J]. Nucl Phys, 1983, **A401**: 329.
- [16] Botvina A S, Iljinov A S, Mishustin I N, *et al.* Statistical Simulation of the Break-up of Highly Excited Nuclei[J]. Nucl Phys, 1987, **A475**: 663.
- [17] 徐春成, 叶沿林, 陈陶等. 铅靶散裂参数的初步研究[J]. 高能物理与核物理, 1999, **23**(4): 402.
- [18] 徐春成, 叶沿林, 郭华. 对加速器驱动洁净核能系统散裂靶问题的探讨[J]. 原子核物理评论, 1998, **15**(2): 115.
- [19] 徐春成, 叶沿林, 陈陶等. SHIELD 程序靶设计的实用化[J]. 高能物理与核物理, 1999, **23**(12): 673.
- [20] Ferrari A, Sala P R, Guaraldi R, *et al.* An Improved Multiple Scattering Model for Charged Particle Transport[J]. Nucl Instr and Meth, 1992, **B71**: 412.
- [21] Gloris M, Michel R, Herpers U, *et al.* Production of Residual Nuclei from Irradiation of Thin Pb-targets with Protons up to 1.6 GeV[J]. Nucl Instr and Meth, 1996, **B113**: 429.
- [22] Mashnik S G, Sierk A J, Bersillon O, *et al.* Cascade-exciton Model Developed Analsis of the Proton Spallation at Energies from 10 MeV to 5 GeV[R]. Report LANL, 1998,
- [23] 樊胜. 加速器驱动洁净核能系统散裂中子源物理问题研究[D]. 北京: 北京大学, 2000.
- [24] 徐春成. 加速器驱动洁净核能系统靶物理中物理过程的模拟[R]. 北京: 北京大学, 1999.
- [25] 樊胜, 叶沿林, 徐春成等. 中能质子引起散裂反应的碎片质量分布研究[J]. 原子核物理评论, 2000, **17**(2): 91.
- [26] 樊胜, 叶沿林, 赵志祥等. 加速器驱动洁净核能系统散裂靶辐射损伤研究(1)原子位移[J]. 原子能科学技术, 2000, **34**(6): 499.
- [27] 樊胜, 叶沿林, 赵志祥等. 加速器驱动洁净核能系统散裂靶辐射损伤研究(1)气体产生[J]. 原子能科学技术, 2001, **35**(2): 164.
- [28] 樊胜, 叶沿林, 赵志祥等. 150 MeV 质子入射固态金属靶性质研究[J]. 原子能科学技术, 2001, **35**(3): 239.
- [29] 樊胜, 叶沿林, 肖玉衡等. 散裂中子靶能量存积研究[J]. 原子能科学技术, 2001, **35**(4): 293.
- [30] Fan S, Y Ye, Zhao Z, *et al.* Study Properties of the Neutron Production Target Induced from 150 MeV Incident Proton Energy for the China ADS[J]. Nucl Sci and Eng, 2001, **139**: 318.

Theoretic Programs Related to Spallation Neutron Source for ADS*

II Thick Target Simulations

FAN Sheng, YU Hong-wei, SHEN Qing-biao, ZHAO Zhi-xiang
(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: The spallation neutron target for intermediate energy proton incident is an important link for accelerator and subcritical reactor of accelerator driven system (ADS). The theoretic programs and Monte-Carlo codes are a useful approach for solving the physics of spallation neutron source. We discuss those codes at present work and introduce the application and development of SHIELD code.

Key words: spallation neutron target; simulation program; accelerator driven system

* Foundation item, National Key Item of Foundation Research and Development of China (G1999022600)