

文章编号: 1007-4627(2003)04-0239-08

质子入射散裂产物理论研究方法探讨*

张鸿洲^{1,2}, 樊 胜^{1,3}, 阎 芳¹, 孙秀泉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 上海大学射线研究所, 上海 201800)

摘 要: 简要介绍了几种关于中高能质子入射引起散裂反应产物理论计算的方法, 以及这些方法的最新发展. 比较了这些方法在理论计算中的特点, 指出经典外推方法有局限性, 量子分子动力学方法和改进后的 M-C 方法的计算结果与实验数据有较好的符合, 但是计算量大, 而且量子分子动力学方法在与宏观输运理论连接上存在不少的困难. 半经验计算方法已经取得了初步的成果, 需要根据新的实验结果来对其进行发展.

关键词: 质子入射; 散裂反应; 散裂产物

中图分类号: O571 **文献标识码:** A

1 引言

高能质子入射引起的散裂反应是核物理研究的一个重要领域^[1]. 在宇宙射线和地球辐射带中包含了大量的中高能质子, 因此天体物理学家也非常关注这一领域. 例如, 到达地球表面的宇宙射线是经过与星际气体、地球大气层发生碰撞和产生反应后的产物, 定量计算粒子(包括高能质子)入射的反应截面, 就可以推断宇宙射线源和星际气体的成分^[2]; 定量计算这些反应截面, 也可以确定月球表面和陨石中各种同位素的产生率^[2]. 同时航天工程的实践证明, 宇宙射线对航天器和宇航员造成的辐射损伤不可忽视. 例如, 宇宙射线中高能质子轰击电子线路发生的核反应会引起电子线路的单粒子翻转事件(SEU)以及质子等高能带电粒子入射到半导体器件产生的位移效应^[3]. 因此, 自 20 世纪六七十年代开始, 许多科学家研究了高能质子入射的散裂反应, 取得了不少理论成果.

近年来, 由于加速器驱动能源系统(ADS)^[4,5]研究的兴起, 高能质子入射靶物理研究成为一个研究热点. ADS 系统中入射质子束的能量一般在 1 GeV 左右, 入射质子与靶核的作用过程主要可以分为核内微观反应过程(包括直接、级联和蒸发过程

发射中子、质子、 π 和 Δ 等)和具有较高激发能的余核的退激发(通过发射 γ 射线和裂变等方式). 该能区既有多粒子发射反应, 又有靶核和剩余核的多重碎裂和裂变反应. 反应碎片的来源主要有: “外围”反应(核表面的少数核子在激发态被“敲去”); 散裂反应、裂变(直接裂变和具有激发能的余核裂变)、“快碎裂过程”(重碎块的 Break-up)和轻粒子的蒸发等过程. 经过长时间中能质子轰击后, 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 和 t 等粒子, 在靶内还产生以气体形式存在的碎片, 如: ^{35}Cl , ^{39}Ar 和 ^{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靶材脆变. 了解靶的放射性累积和产物对靶材性能的影响, 对散裂产物的质量、电荷分布、碎片的形成截面的研究具有重要意义.

中高能质子入射引起核反应的散裂碎片分布的实验数据较为丰富. 长期以来, 天体物理学家积累了宇宙射线中高能质子入射的大量观测数据^[2]. 德国的 Michel^[6,7]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. 近几年来, 由于 ADS 研究的需要,

收稿日期: 2003 - 04 - 14; 修改日期: 2003 - 09 - 24

* 基金项目: 国家重点基础发展规划资助项目(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, 硕士研究生, 从事核物理研究.

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^[6, 7], 已获得了超过 15 000 个数据点.

2 散裂产物的理论研究方法

散裂产物物理量包括产物的质量、电荷分布、产生截面和产物核形成截面的激发函数等. 主要的研究方法有: 经典理论的外推方法、量子分子动力学(QMD)方法、蒙特-卡罗以及蒙特-卡罗加统计衰变的方法、基于实验测量数据和理论方法的半经验计算方法等.

2.1 经典理论的外推方法

目前在计算入射粒子能量低于 250 MeV 的 ALICE^[8], GNASH^[9], TALYS^[10] 和 MEND^[11,12] 等理论程序基本上是把成熟的低能核反应理论外推到中高能区域. 直接反应机制一般用扭曲波波恩近似理论处理, 复合核的衰变用激子模型和蒸发模型分别考虑预平衡阶段和平衡后的衰变阶段. 对于裂变核, 在入射能较高时还考虑了裂变机制和预平衡阶段的多重激子模型. 例如, 在 MEND^[11,12] 程序模型中, 在入射能量低于 20 MeV 时一般最多考虑粒子的三次发射过程, 实际计算中认为发射一个粒子后剩余核处于平衡态, 二次和三次粒子的发射利用蒸发模型处理. 但对于入射能量比较高的反应过程, 多次粒子发射后剩余核的激发能仍然很高, 系统处于非平衡态的几率仍然比较大, 在每次粒子发射过程中都要考虑平衡和非平衡过程. 在该模型中, 最多考虑到粒子的 18 次发射, 对于复杂粒子如: d, t, ³He 和 α 的发射, 只在三次发射以前考虑其拾取机制.

图 1 给出了 MEND 计算的入射能量低于 250 MeV 的质子轰击 ²⁰⁹Bi 的 (p, 3n) 反应道的计算结果与实验测量数据的比较^[11], 计算结果和实验数据的符合情况还不错. 图 2 给出入射能量为 61.7 MeV 质子轰击 ²⁰⁹Bi, 出射的 d 能谱的理论计算结果与实验测量数据的比较^[12]. 从图 2 看出, 理论计算结果在整个能区与实验结果符合得不太理想.

尽管在 250 MeV 以下能区, 碎裂反应、多重碎

裂反应、费米破裂反应以及散裂反应在整个反应过程中所占的比例不是很大, 但在入射质子能量大于 150 MeV 时, 这些过程是不能忽略的. 在入射能量大于 50 MeV, 核内级联过程也应该加以考虑. 而在经典理论的外推方法中, 基本上没有考虑上述反应过程, 核内级联过程的考虑也比较简单. 这些理论程序还存在输入参数复杂, 仅能考虑临近靶核产物的产生截面的激发函数计算, 不可能完整考虑产物的质量和电荷分布等物理量的计算.

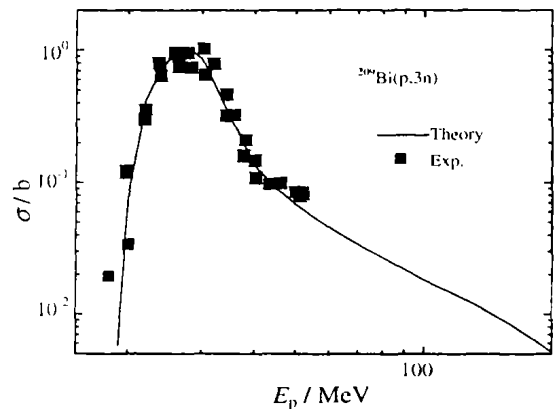


图 1 MEND 计算 ²⁰⁹Bi(p, 3n) 激发函数和实验数据的比较^[11]

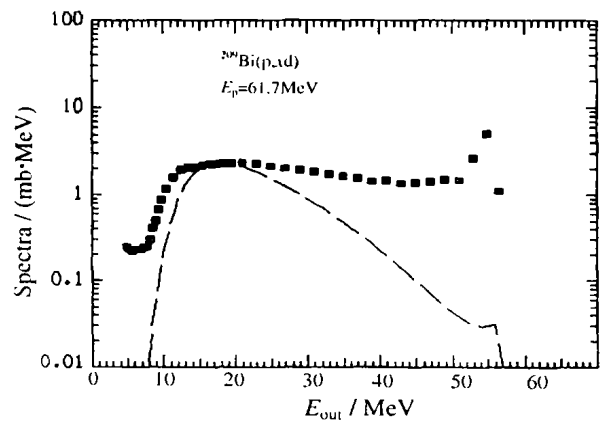


图 2 MEND 计算的质子轰击 ²⁰⁹Bi 出射 d 的能谱和实验测量结果的比较^[6]

---为理论结果, □为实验结果.

2.2 量子分子动力学方法

QMD^[13-16] 理论在研究高能重离子核反应中取得了比较大的成功. 利用 QMD 来研究 (p, xn) 和 (p, xp) 反应的双微分截面首先是由 Peilert 等^[17] 完成的. Peilert 在利用 QMD 计算时未考虑质子入射经过一定时间后, 仍具有较高激发能的余核和碎块的统计衰变过程(SDM). Koji Niita^[18-22] 等考虑

了 SDM 过程, 认为质子入射经过一定的时间 t_{sw} 后, 仍具有较高激发能的余核和碎块通过衰变过程退激发. 在 $0-t_{sw}$ 之间, 利用 QMD 进行计算, 在 t_{sw} 以后利用 SDM 计算. 通过对实验数据的拟合, 得到这个时间开关 $t_{sw} \approx 100 \text{ fm}/c$. 但是 Niita 没能从理论上对这个时间开关参数 t_{sw} 给出解释, 同时 Niita 利用的 QMD 理论的核子-核子相互作用也未能考虑核系统的对称势能. 樊 胜等^[23-27]的工作和 Peilert 以及 Koji Niita 的方法不同. 在 QMD 中, 他们考虑了核系统的对称势能, 没有人为的引入时间开关参数 t_{sw} , 只是延长 QMD 的计算时间, 直到余核能量不能再发射粒子为止. 而且在该工作中, 特别注意了靶核的初始化问题^[23].

图 3 给出了利用 QMD 计算 $E_p = 322 \text{ MeV}$ 时 $p + {}^{208}\text{Pb}$ 的质量分布与实验结果的比较. 很明显实验数据可以分为散裂部分和裂变部分. 我们发现 QMD 计算的散裂产物的质量分布较好地再现了实验测量数据. 由于 QMD 理论没有考虑高能质子轰击靶引起的靶核裂变、多重碎裂和仍具有较高激发能的部分余核的裂变等过程, 因此 QMD 的计算值未能很好的再现裂变峰.

樊 胜等^[24]考虑裂变峰的质量分布时, 认为部分仍具有较高激发能的余核通过裂变退激形成裂变峰是主要的过程. 在 QMD 理论中引入了统计裂变模型来描述裂变峰^[24]. 图 4 给出了利用 Niita 等的 QMD+SDM 理论和樊 胜等 QMD+Fission 理论

计算的 533, 660, 759 和 1 400 MeV 的质子入射 ${}^{208}\text{Pb}$ 的质量分布结果和实验测量数据的比较^[28]. 我们可以发现利用 QMD+Fission 较好地再现了实验测量数据, 即考虑裂变是合理的. 而在 SDM 模型中裂变模型没有被考虑, QMD+SDM 理论中由于 SDM 考虑的统计衰变模型过于简单, 且仅考虑简单粒子如: $d, t, {}^3\text{He}$ 和 α 的发射, 能级密度参数的考虑也比较简单, 因此其计算结果只能再现产物的散裂碎片部分, 而不能很好的再现产物的裂变部分. 利用 QMD+SDM 和 QMD+Fission 模型计算中高能粒子入射, 其计算过程需要相当长的计算机时间.

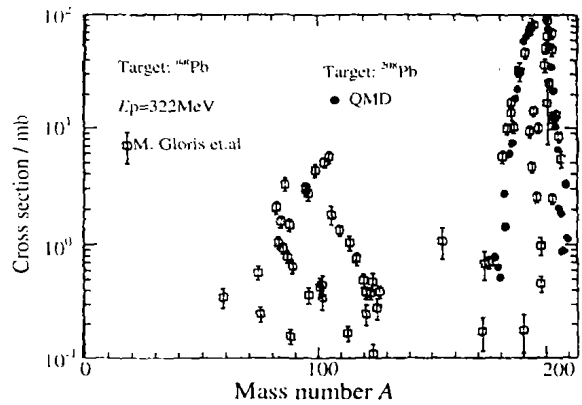


图 3 QMD 计算 322 MeV $p + {}^{208}\text{Pb}$ 质量分布和实验数据的比较^[23]

● QMD 的计算结果, □ 实验测量的数据.

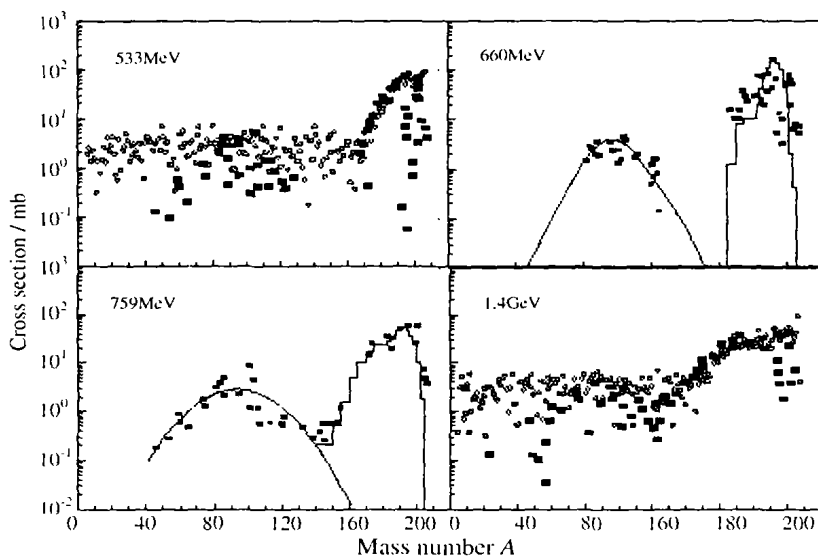


图 4 QMD+SDM 和 QMD+Fission 计算不同能量质子入射铅靶的质量分布和实验数据的比较^[28]

■ 是实验测量数据, ○ 是 QMD + SDM 的计算结果, — 是 QMD+Fission 模型计算结果.

2.3 蒙特-卡罗方法

用蒙特-卡罗方法研究中高能核反应是以 HETC^[29] 为代表的系列程序系统。HETC 考虑了核内级联、预平衡发射、高能裂变和蒸发等过程。该程序采用核内级联的 Bertini 模型^[30]，模拟入射粒子(质子、中子、 π 和 μ 等)在核碰撞过程中产生的粒子的轨迹。对于核子-核碰撞，当入射粒子能量小于 3.5 GeV 时，利用核内级联模型计算反应的去弹碰撞，大于 3.5 GeV 时，利用核内级联外推蒸发模型计算。对于 μ 介子和核碰撞，截断能量值为 2.5 GeV。

LANL 发展 HETC 程序为 LAHET^[31] 程序，

该程序用于计算氢、氦离子等入射的反应截面。在 LAHET 程序中用交替核内级联模型^[32] 取代 HETC 中的 Bertini 模型；用费米崩裂模型取代 HETC 所采用的蒸发模型中的轻核崩裂模型；在核内级联和蒸发过程之间考虑了多步预平衡激子模型(MPE)。把 LAHET 和 MCNP^[33] 连接在一起来使用，称为 LCS^[34] (LAHET-MCNP Codes System) 程序系统。

图 5 给出了利用 HETC 程序系统计算的质子入射 ^{197}Au 的产物核 ^{88}Y ， ^{95}Zr ， ^{96}Tc 和 ^{103}Ru 的产生截面随入射质子能量变化的曲线。可以看出，利用 HETC 等蒙特-卡罗方法计算的结果和实验数据有分歧。

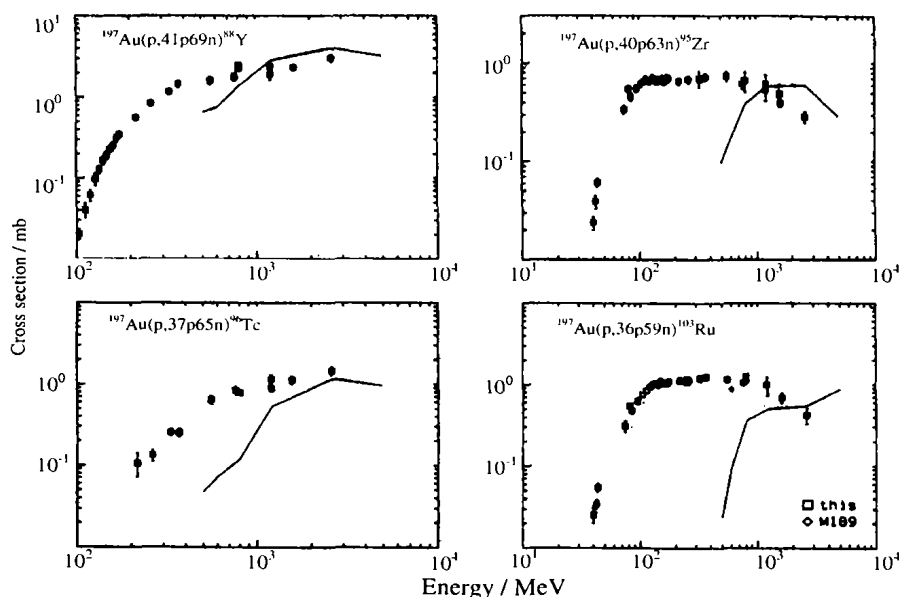


图 5 HETC 计算结果和实验测量数据的比较^[6]

带误差棒点是实验数据，实线是利用 HETC-KFA 计算的结果。

图 6 给出了我们从俄罗斯引进的另一种蒙特-卡罗程序“多步动力学模型(MSDM)^[35, 36]”计算的 322, 660, 1 400 和 2 600 MeV 质子轰击 ^{208}Pb 的裂变产物质量分布和实验数据的比较。该程序对核内快过程采用 Dubna 的级联模型；处理预平衡发射时假定快过程产生的粒子会以质子、中子和复合核等形式发射；对于余核的退激发， $A < 16$ 采用费米碎裂模型，对于中、重核，当每核子激发能大于 2 MeV 时采用统计多重碎裂模型，小于 2 MeV 时简化为蒸发与裂变机制的竞争。图中实线是我们将级联-激子模型(CEM)^[37, 38] 的最新发展^[39, 40] 引入到 MSDM 中的计算结果^[24, 41]。可以发现，改进后的 MSDM 程序计算结果明显好于改进前 MSDM 的计

算结果，但是当入射质子能量为 1.4 和 2.6 GeV 时，产物分布在 $120 < A < 160$ 之间的蒙特-卡罗计算结果仍然明显小于实验数据。

日本的 Shiori Furihata 等^[42] 在 LAHET 程序计算系统剩余核的退激发过程时利用统计衰变模型考虑粒子发射，提出了 ^{24}Mg 的发射过程的 GEM 程序系统。LAHET+GEM 的蒙特-卡罗程序系统计算产物核的产生截面随入射能量的变化，能比较好地再现实验数据。

2.4 半经验计算方法

基于大量的中高能质子引起的核反应产生的产物实验数据，考虑到产物的来源，G Rudstam 等人

在 20 世纪 60 年代提出了产物分布的半经验计算方法。自 20 世纪 70 年代以来，Silberberg 和 Tsao^[2, 43, 44] 发展了如下的半经验公式：

$$\sigma(Z, A) = \sigma_0 f(A) f(E) \exp(-P\Delta A) \cdot \exp(-R | Z - SA + TA^2 |^{\nu}) \Omega \eta \xi .$$

该方法用于计算质子入射到质量数范围在 9 — 209，产物核质量数在 6 — 200 之间的核形成截面。

图 7 给出了利用该半经验计算方法的计算结果和实验数据的比较，在入射能量大于 100 MeV 的能区，符合情况较好。该半经验计算方法不能计算

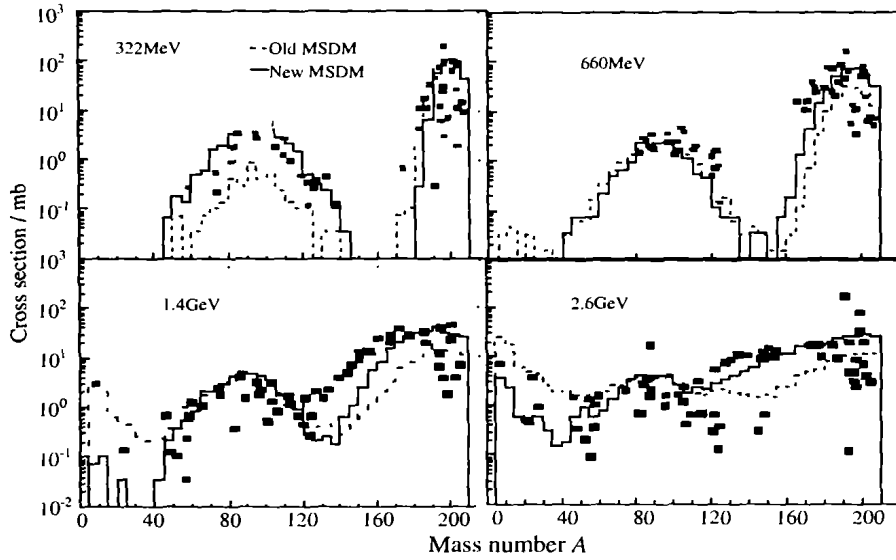


图 6 MSDM 计算结果和实验数据的比较^[41]

■ 是实验数据，— 是改进前 MSDM 计算结果，— 是改进后的 MSDM 程序计算结果。

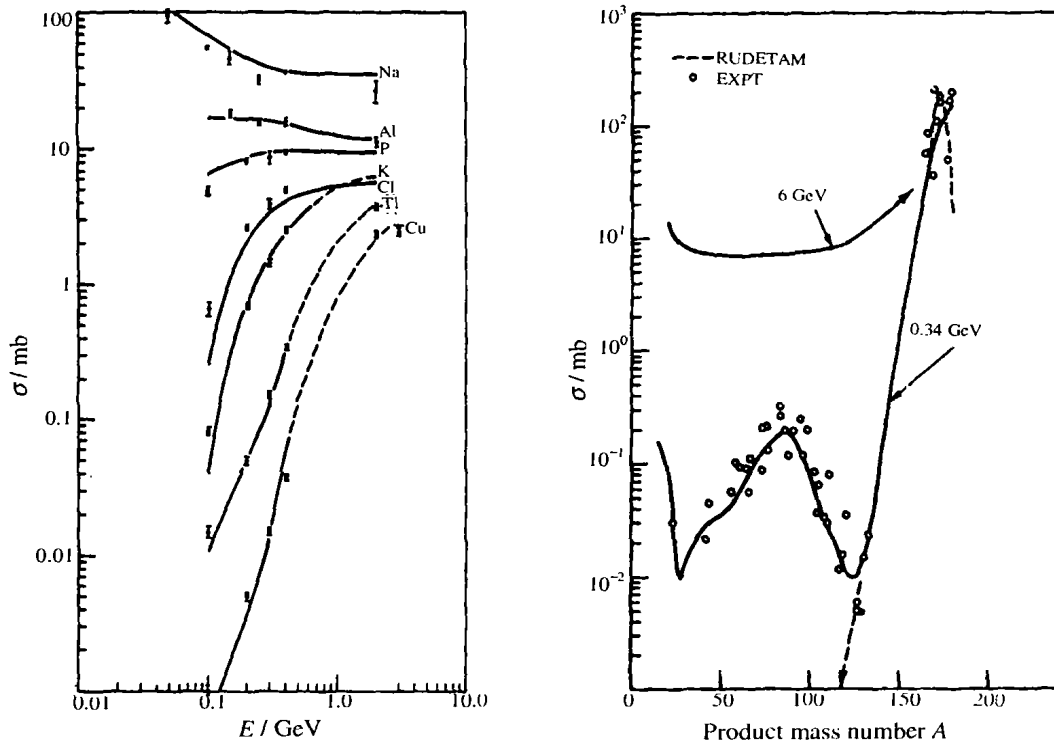


图 7 半经验计算结果和实验数据的比较^[2, 44]

— 是理论计算结果，● 为实验结果；右图中的一是 Rudstam 的计算结果^[44]。

入射能量小于 100 MeV 的能区. 而目前随着 ADS 研究的推动和越来越多的有关质子入射引起反应的产物实验数据的出现^[39], 需要对该半经验计算方法的一些参数给出相应的修正和改进.

Suemmerer 等^[45, 46]根据新的实验数据改进了半经验计算方法, 其计算结果很好地再现了实验数据. 但 Suemmerer 等的半经验方法的参数大多是由于对重离子碰撞实验结果的分析得到的, 而不是针对质子入射, 而且只考虑了重碎片产物, 且与入射能量没有关系.

3 小结和讨论

散裂产物的研究在宇宙射线天体物理、生物物理学和放射性治疗等方面有非常重要的应用价值. 特别是近几年来随着 ADS 研究的升温, 散裂产物, 特别是质子入射引起核反应的产物是了解散裂靶的放射性废物累积以及靶的辐射损伤研究的重要参考指标.

经典理论的外推方法、QMD 方法、蒙特-卡罗以及蒙特-卡罗加统计衰变的方法、基于实验测量数据和理论方法的半经验计算方法等都可以用于研

究散裂产物的物理量, 包括产物的质量、电荷分布、产生截面和产物核形成截面激发函数等. 但经典理论的外推方法输入参数复杂, 计算仅能考虑临近靶核产物的产生截面的激发函数, 不能完全考虑产物的质量和电荷分布等物理量. QMD 方法需要引入统计模型才可能完整的描述散裂产物的质量分布和剩余核的激发函数, 而且 QMD 的计算量大, 和宏观输运理论连接时存在困难. 蒙特-卡罗方法目前计算的工作量比较大, 而且已有的用于计算碎片分布的 M-C 程序, 如: LAHET 和 HETC/KFA 的计算结果不太理想. Suemmerer 的半经验方法的参数来自于对重离子碰撞实验结果的分析得到的, 而不是专门针对质子入射, 只考虑了重碎片产物, 且与入射能量没有关系. 对于 Silberberg 等的系统学, 他们目前还在发展, 但计算结果对于入射质子能量低于 100 MeV 不能再现实验测量数据. 两种半经验方法相比较, Suemmerer 方法在一能量点比 Silberberg 系统学符合实验数据结果好.

致谢 感谢张正军博士、申庆彪教授的有益讨论. 作者之一, 樊胜感谢罗璋琳教授、荣健和吴海成的有益讨论.

参 考 文 献:

- [1] 樊胜, 于洪伟, 申庆彪等. 与散裂中子靶物理相关的理论计算程序探讨(1 薄靶计算)[J]. 原子核物理评论, 2002, 19(3): 329.
- [2] Silberberg R, Tsao C H. Improved Cross Section Calculations for Astrophysical Applications [J]. Astrophysical J Supp, 1985, 58: 873.
- [3] 濮祖荫. 空间物理前沿进展[M]. 北京: 气象出版社, 1998, 16—39.
- [4] Bawman C D, Arthur E D, Lirowski 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.
- [5] Rubbia C, Rubio J A, Buono S, *et al.* Conceptual Design of a Fast Neutron Operated High Power Energy Amplifier [R]. CERN/AT/95-44(ET), 1995.
- [6] Michel R, Bodemann R, Busemann H, *et al.* Cross Sections for the Production of Residual Nuclides by Low- and Medium-energy Protons from the Target C, N, O, Mg, Al, Si, Ca, Ti, V, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Sr, Y, Zr, Nb, Ba, and Au [J]. Nucl Instr and Meth, 1997, B129: 153.
- [7] Gloris M, Michel R, Sudbrock F, *et al.* Proton-induced Production of Residual Radionuclides in Lead at Intermediate Energies[J]. Nucl Instr and Meth, 2001, A463: 593.
- [8] Blann M, Vonach H K. Global Test of Modified Procompound Decay Models[J]. Phys Rev, 1983, C28: 1 475.
- [9] Young P G, Arthur E D, Chadwick M B. Comprehensive Nuclear Model Calculations: Introduction to the theory and use of the GNASH code[R]. LA-12343-MS, 1992.
- [10] Koning A. TALYS, a Nuclear Reaction Code[R]. The Working Party of JEFF Project, Vienna, May 16, 2001.
- [11] 张正军, 申庆彪, 韩银录等. $p + {}^{209}\text{Bi}$ 核反应微观数据的理论计算[J]. 高能物理与核物理, 2002, 26(6): 600.
- [12] 张正军. ADS 相关的核反应理论研究及微观数据计算[D]. 西安: 西北大学, 2002.
- [13] Hartnack C, Li Zhuxia, Peilert G, *et al.* Quantum Molecular Dynamics a Microscopic Model from Unilac to CERn Energies [J]. Nucl Phys, 1989, A495: 320.
- [14] Aichelin J, Peilert G, Bohnet A, *et al.* Quantum Molecular Dynamics Approach to Heavy Ion Collisions: Description of the model, comparison with fragmentation data, and the mech-

- anism of fragment formation [J]. Phys Rev, 1988, **C37**: 2 451.
- [15] Aichelin J. Quantum Molecular Dynamics — A Dynamics Microscopic n -body Approach to Investigate Fragment Formation and the Nuclear Equation of State in Heavy Ion Collisions[J]. Phys Reports, 1991, **202**(5&6): 233.
- [16] Sangster T C, Britt H C, Fields D F, *et al.* Intermediate Mass Fragment Emission in Fe + Au Collisions[J]. Phys Rev, 1992, **C46**: 1 404.
- [17] Peilert G, Konopka J, Stocker H, *et al.* Dynamical Treatment of Fermi Motion in a Microscopic Description of Heavy Ion Collision[J]. Phys Rev, 1992, **C46**: 1 457.
- [18] Niita K, Chiba S, Maruyama T, *et al.* Analysis of the (n, xn) Reactions by Quantum Molecular Dynamics Plus Statistical Decay Model[J]. Phys Rev, 1995, **C52**: 2 620.
- [19] Chadwick M B, Chiba S, Niita K, *et al.* Quantum Molecular Dynamics and Multistep-direct Analyses of Multiple Preequilibrium Emission[J]. Phys Rev, 1995, **C52**: 2 800.
- [20] Chiba S, Chadwick M B, Niita K, *et al.* Nucleon-induced Preequilibrium Reactions in Terms of the Quantum Molecular Dynamics[J]. Phys Rev, 1996, **C53**: 1 824.
- [21] Chiba S, Iwamoto O, Fukahori T, *et al.* Analysis of Proton-induced Fragment Production Cross Sections by Quantum Molecular Dynamics Plus Statistical Decay Model[J]. Phys Rev, 1996, **C54**: 285.
- [22] Chiba S, Iwamoto O, Fukahori T, *et al.* Time Scale of the Preequilibrium Process in Intermediate-energy Nucleon-induced Reactions[J]. Phys Rev, 1996, **C54**: 3 302.
- [23] Fan Sheng, Li Zhuxia, Zhao Zhixiang, *et al.* Analysis of Proton-induced Reactions on ^{208}Pb with Incident Energies 590 and 322 MeV[J]. Eur Phys J, 1999, **A4**: 61.
- [24] Fan Sheng, Li Zhuxia, Zhao Zhixiang. Analysis for Cross Section of (p, xn) Reaction by Quantum Molecular Dynamics[J]. Nucl Sci and Eng, 2002, **142**: 195.
- [25] Fan S, Li X, Xiao Y. Fragment Distribution Analysis of Proton-induced Reactions with Intermediate Energy Using QMD Plus Fission Models[J]. Nucl Sci and Eng, 2001, **137**: 89.
- [26] Fan Sheng, Li Zhuxia, Zhao Zhixiang, *et al.* Analysis for Fragment Products Proton-induced Reactions on Pb with Energy up to 1.6 GeV[J]. J Nucl Sci and Tech, 2002, Supplement 2, August, 1 210.
- [27] 樊胜, 李祝霞. 中能质子在重核上的反应机制研究[J]. 高能物理与核物理, 2000, **24**(8): 755.
- [28] 肖玉衡, 樊胜. 中高能质子入射碎片质量分布研究[J]. 高能物理与核物理, 2002, **26**(12): 1 247.
- [29] Armstrong T M, Alsmiller R G. Monte Carlo Calculations of High-energy Nucleon-meson Cascades and Comparison with Experiment[R]. ORNL-Tm-3667, 1972.
- [30] Bertini H W, Guthrie M P. Instructions for the Operation of Codes Associated with MECC-7, A Preliminary Version of an Intranuclear-cascade Calculation for Nuclear Reactions[R]. ORNL-4564, 1971.
- [31] Prael R E, Lichtenstein H. User Guide to LCS: The LAHET code system[R]. LANL Report No. LA-UR-89-3014, Los Alamos, 1989, <http://www-xdiv.lanl.gov/XTM/LSC/lahet-doc.html>.
- [32] Yariv Y, Fraenkel Z. Intranuclear Cascade Calculation of High Energy Heavy Ion Collisions: Effect of interactions between cascade particles[J]. Phys Rev, 1981, **C24**: 488.
- [33] Briesmeister J F. MCNP — A General Monte Carlo n -particle Transport Code Version 4B[R]. LA-12625-M, Los Alamos National Laboratory, 1997.
- [34] Prael R E, Madland D G. LAHET Code System Modifications for LAHET2.8[R]. LA-UR-95-3605, 1995.
- [35] Mshnik S G, Sierk S J, Bersillon O, *et al.* Cascade-exciton Model Detailed Analysis of Proton Reduced Reactions from 10 MeV to 5 GeV[J]. Nucl Instr and Meth, 1998, **A414**: 68.
- [36] Dementyev A, Sobolevsky N M. SHIELD-universal Monte Carlo Hadron Transport Code: Scope and applications, radiation measurements[J]. Nucl Phys, 1999, **30**: 553.
- [37] Gudima K K, Mshnik S G, Toneev V D, *et al.* Cascade-exciton Model of Nuclear Reactions [J]. Nucl Phys, 1983, **A401**: 329.
- [38] Dementyev A, Gurentsov V, Ryazhskaya O, *et al.* Production and Transport of Hadrons Generated in Nuclear Cascade Initiated by Muons in the Rock[J]. Nucl Phys, 1999, Proc Suppl, **B70**: 486.
- [39] Mashnik S G, Sierk A J. Cascade-exciton Model Detailed Analysis of Proton Spallation at Energies from 10 MeV to 5 GeV[R]. LANL Report, LA-UR-97-2905, 1997.
- [40] Mashnik S G, Sierk A. Recent Developments of the Cascade-exciton Model of Nuclear Reaction[J]. J Nucl Sci and Tech, 2002, Supplement 2, August, 720.
- [41] Fan S, Rong J, Zhang H, *et al.* The Fragment Distribution of Nb, Au and Pb from Proton-induced Reactions with Energies Range from 100 MeV to 3 GeV[J]. Nucl Sci and Eng, to be published in July, 2002.
- [42] Shiori Furihata, Koji Niita. The GEM Code- A Simulation Program for the Evaporation and Fission Processes of the Excited Nucleus[R]. JAERI-Data/Code, 2001-015, 2001.
- [43] Silberberg R, Tsao C H. Partial Cross-section in High-energy Nuclear Reactions, and Astrophysical Applications. I. Targets with $Z < 28$ [J]. Astrophysical J Supp, 1973, **220**(1), **25**: 315.
- [44] Silberberg R, Tsao C H. Spallation Processes and Nuclear Interaction Products of Cosmic Rays[J]. Phys Report, 1990, **191**(6): 351.

- [45] Suemmerer K, Blank B. Modified Empirical Parametrization of Fragmentation Cross Sections[J]. Phys Rev, 2000, C61: 034607.
- [46] Suemmerer K, Bruechle W. Target Fragmentation of Au and Th by 2.6 GeV Protons[J]. Phys Rev, 1990, C42: 2546.

Theoretical Methods on Spallation Products of Proton-induced Reactions with Intermediate Energy*

ZHANG Hong-zhou^{1,2}, FAN Sheng^{1,3}, YAN Fang¹, SUN Xiu-quan²

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

2 *Department of Physics, Northwest University, Xi'an 710006, China;*

3 *Shanghai Applied Radiation Institute, Shanghai University, Shanghai 201800, China*)

Abstract: The analysis on spallation product of proton-induced reaction with intermediate energy has important applications, such as astrophysics, biophysics, spallation neutron source, and accelerator-driven system (ADS) etc. In recent year, some theoretical models have been developed to investigate this reaction processes. At present work, we introduce the extrapolated classic theory, the quantum molecule dynamic (QMD) plus statistical decay and fission models, the method of Mento-Carlo and Smiempirical method for studying the data of spallation product, such as mass and charge distribution, formation cross section etc. The comments on the four methods are given.

Key words: proton-incident; spallation reaction; spallation product

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