

粒子 ($E \geq 45$ MeV)核内级联 Monte Carlo 模拟程序研究

胡志良 周斌 曾智蓉 梁天骄

Development of an intranuclear-cascade code CBIM applicable to the nuclear reaction with incident particle energy above 45 MeV

Hu Zhi-Liang Zhou Bin Zeng Zhi-Rong Liang Tian-Jiao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 232501 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.232501

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.232501>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I23>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

中国散裂中子源靶站重要部件的辐照损伤计算与分析

Calculation and analysis of DPA in the main components of CSNS target station

物理学报.2011, 60(5): 052501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.60.052501>

乏燃料贮运用铝基碳化硼复合材料的屏蔽性能计算

Shielding property calculation of B_4C/Al composites for spent fuel transportation and storage

物理学报.2013, 62(22): 222401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.222401>

利用超相对论量子分子动力学模型研究交变梯度同步加速器能区 Au+Au 碰撞中的核阻止效应

Study of nuclear stopping in Au+Au collisions at alternating gradient synchrotron energies by the ultra-relativistic quantum molecular dynamic model

物理学报.2013, 62(22): 222402 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.222402>

非定常辐射输运问题的蒙特卡罗自适应偏倚抽样

Adaptive source biasing sampling for time-dependent radiation transport problems

物理学报.2011, 60(2): 022401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.60.022401>

同位旋非对称核物质状态方程

The equation of state of the isospin asymmetrical nuclear matter

物理学报.2009, 58(3): 1517-1525 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.58.1517>

粒子 ($E \geq 45$ MeV) 核内级联 Monte Carlo 模拟程序研究*

胡志良 周斌 曾智蓉 梁天骄†

(中国科学院高能物理研究所, 北京 100049)

(东莞中子科学中心, 东莞 523808)

(2016年6月23日收到; 2016年9月1日收到修改稿)

本文基于核内级联物理过程, 采用 Monte Carlo 方法发展了一款质子、中子以及 π 介子的粒子输运程序. 基本物理模型基于适当简化和核内级联 Bertini 模型, 同时借鉴了 INCL 模型质心系下的角微分分布以克服 Bertini 模型之不足, 即采用 Monte Carlo 方法模拟核子与核子、核子与 π 介子间的弹性散射、非弹性散射等过程, 粒子相互作用时, 核子密度随半径变化且作用截面参考 Bertini 模型 22 类实验截面数据, 出射粒子散射角在质心系下的抽样遵从 INCL 模型所确定的微分分布. 可模拟 45—3500 MeV 的中子、质子或 2500 MeV 以下 π 介子引起的核内级联过程. 入射粒子能量在 60—378 MeV 范围内反应截面理论计算值与已有实验数据、以及在 65—3000 MeV 较宽能区范围内反应截面、出射粒子增殖比、微分截面和剩余核等计算结果与 MCNPX, GEANT 4 和 PHITS 模拟结果符合较好.

关键词: 核子, π 介子, 核内级联, Monte Carlo 方法

PACS: 25.40.Sc, 24.10.Lx

DOI: 10.7498/aps.65.232501

1 引言

高能核子轰击靶核通过非弹性散射产生大量的次级粒子的过程, 称为散裂反应^[1], 一般将散裂反应细分为核内级联、预平衡、蒸发/裂变三个过程. 当入射粒子能量足够高, 其德布罗意波长小于原子核内核子(质子或中子)间的平均距离时, 可认为入射粒子与核内的核子单独相互作用而非与核子们的集体相互作用, 此时, 高能入射粒子与单个原子核的相互作用可用级联模型描述: 入射粒子通过核子-核子碰撞, 将部分能量转移给被撞核子, 增加其动能, 能量较高的入射粒子与被撞核子在原子核内继续与核内其他核子碰撞, 从而发生一系列级联碰撞, 上述在原子核内的级联过程称为“核内级联”. 能量较高的核内级联过程发射的二次粒子如中子、

质子和 π 介子等以及可能离开该原子核的原初入射粒子, 可在多个原子核继续导致一系列碰撞, 这种与多个原子核发生级联碰撞的过程称为“核外级联”.

部分粒子直接被敲出靶核, 在残余相互作用下, 体系由简单组态过渡到复杂组态, 最后达到统计平衡, 形成所谓的复合核, 此过渡过程称为预平衡. 复合核是处于一定激发态的剩余核, 通过蒸发/裂变来实现退激发, 激发核在退激的同时各向同性地发射低能 (MeV 量级) 中子 (n)、质子 (p)、氘 (${}^2_1\text{H}$)、氚 (${}^3_1\text{H}$)、氦-3 (${}^3_2\text{He}$), Alpha (${}^4_2\text{He}$) 粒子以及更重的一些粒子, 如果靶核较重, 在退激过程中, 裂变将和粒子蒸发过程竞争, 直至剩余核的激发能有效降低, 然后通过发射伽马光子实现剩余核退激到基态.

对于散裂反应的核内级联过程, 国外先后发

* 中国科学院高能物理研究所谢家麟基金 (批准号: Y454624) 和广东省产学研协作项目 (批准号: 2015B090901048) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: liangtj@ihep.ac.cn

展了 Bertini^[2-4], INCL^[5], Isabel^[6], CEM^[7] 等模型. 其中 Bertini 模型较早发展且应用广泛, 该模型将靶核沿半径方向分为三个区域, 各区域内核子密度为常数, 模型以 22 类微观截面^[1]为基础, 可计算粒子与靶核的相互作用的反应截面、穿透率、各剩余核种类及其激发态的能量, 出射粒子倍增系数、能量/角度的微分分布等物理量, 计算结果在较大范围内与实验结果符合较好^[1]. 然而该模型也有以下不足: 1) 核密度非连续变化; 2) 没有考虑 π 介子与核子之间的作用势; 3) 忽略了粒子与靶核作用时的反射和衍射. 国内多采用调参光学模型研究中高能粒子的散裂反应^[8-10], 基于 Monte Carlo 方法研究散裂反应及其子过程较少. 王海桥等^[11]研究了高能 (400 GeV) 强子与核碰撞中靶核碎裂模型, 但旨在给出靶核碎片分布的饱和性. 陈翔^[12]、张树发^[13]、王同权和张文勇^[14] 研究了高能质子在重核内引起核内级联过程, 但发展的程序只能输运质子且最大质子能量为 300 MeV, 程序中核子密度设为常数、核子作用截面均由半经验公式计算所得.

近年来, 国内在粒子输运程序开发方面已有一定的发展, 但仅限于中低能粒子输运程序且主要用于反应堆设计等, 缺乏高能部分模块, 无法应用于散裂源等需要中高能粒子输运模拟能力的设计工作. 鉴于上述研究现状, 我们在传统 Bertini 模型基础上, 结合粒子微观截面实验数据, 考虑核子-核子、核子-介子间相互作用、核子密度随半径连续变化, 经适当假定和简化后, 发展了粒子核内级联 Monte Carlo 模拟程序 (China Bertini Intranuclear Cascade Model, CBIM), 可模拟计算 45—3500 MeV 中高能粒子 (质子、中子、 π^0 、 π^- 、 π^+) 引起的核内级联反应. 本文将介绍该程序的基本物理模型、基本蒙卡计算策略、程序流程, 以及与部分实验结果及主流 Monte Carlo 粒子输运程序的计算结果对比, 验证本程序模拟计算的正确性.

2 基本物理模型

2.1 核模型

CBIM 程序引入一些近似或假定, 对核模型做了适当简化: 1) 入射粒子可为质子、中子、 π^0 、 π^- 和 π^+ , 其进入靶核前不与靶核发生任何作用, 也不考虑其在靶核表面的折射和反射; 2) 靶核原子序数必须大于 2, 且视为球状; 3) 靶核内部中子、质子均匀

分布, 入射粒子进入核内后依截面抽样确定被撞核子, 碰撞后的粒子逐一重复抽样-碰撞过程; 4) 质心系下散射角遵从微分截面所确定的分布.

考虑到不同质量数 A 的靶核核结构存在较大差异, 为准确描述核子在核内分布, 根据靶核质量数不同采用不同核密度表达式 $\rho(r)$ ^[15]:

$$\begin{aligned} A < 6, & \text{ 均匀分布;} \\ 6 < A \leq 27, & \\ \rho(r) = \rho_0 & \left[1 + R_0 \left(\frac{r}{\alpha} \right)^2 \right] \exp \left[- \left(\frac{r}{\alpha} \right)^2 \right]; \\ A > 28, & \rho(r) = \frac{\rho_0}{1 + \exp \left(\frac{r - R_0}{\alpha} \right)}. \end{aligned} \quad (1)$$

式中 r 为靶核内相对于靶核球心在径向上的距离; ρ_0 为密度常数, 以确保核密度积分等于原子序数; R_0 为靶核半径; α 为经验参数; 详见文献^[15].

核内中子与质子有相同的分布区域, 且处处保持相同的中子/质子比. 各分布中均有归一化系数, 以保证积分后的数值等于靶核质量数.

中子和质子在核内的每一点都具有零温费米动量分布, 其分布函数^[14]如下:

$$f(p) = \begin{cases} \frac{3p^2}{p_{\text{fp}}^3}, & 0 < p < p_{\text{fp}}, \\ 0, & \text{其他,} \end{cases} \quad (2)$$

式中 p, p_{fp} 分别为核子动量和费米动量. 直接抽样, 可确定核内核子的动量, 进一步可计算核子费米能.

2.2 核子作用截面

程序所涉截面数据如表 1 所示, 既沿袭了 Bertini 模型的传统优势, 又借鉴 INCL 模型质心系下的角微分分布, 克服了原有模型在散射角抽样时的不足. 同时, 为节省计算资源, 所有截面数据重新编制, 按照一定的格式整理成可供程序调用的截面文件. 程序截面数据以 Bertini 模型的 22 类实验截面数据为基础 (截面数据能量上限为 3500 MeV) 主要涉及核内级联过程中的核子间的弹性散射、非弹性散射、 π 介子与核子的弹性散射、电荷交换以及 π 介子产生等截面数据. 模型只考虑了单个 π 介子和两个 π 介子产生的反应道, 因为随着入射粒子能量的增高, 将有更多的反应道被打开, 暂无相应截面数据支持, 这也限制了模型在更高能区的适用性.

表1 Bertini INC模型所需截面列表^[1]
Table 1. Cross sections required for Bertini INC model^[1].

| 反应类型 | 截面类型 | 反应类型 | 截面类型 | 反应类型 | 截面类型 |
|-------------------|--------|-------------------|------|-------------------|-------|
| n-p | 微分 | n-p | 弹性散射 | p-p | 单个π产生 |
| p-p | 微分 | p-p | 弹性散射 | n-p | 单个π产生 |
| π ⁺ -p | 微分 | π ⁻ -p | 弹性散射 | π ⁺ -p | 单个π产生 |
| π ⁻ -p | 微分 | π ⁰ -p | 弹性散射 | π ⁻ -p | 单个π产生 |
| π ⁻ -p | 微分电荷交换 | π ⁰ -n | 弹性散射 | p-p | 两个π产生 |
| π ⁰ -p | 微分 | π ⁺ -p | 吸收 | n-p | 两个π产生 |
| π ⁻ -p | 电荷交换 | π ⁰ -p | 吸收 | π ⁰ -p | 单个π产生 |
| | | | | π ⁰ -n | 单个π产生 |

3 核内级联计算策略

中高能粒子进入靶核后, 首先通过抽样确定入射粒子的状态(入射位置、能量和运动方向), 进入靶核后的粒子受核势阱影响, 其动量和能量发生变化, 可根据能量和动量守恒推出. 靶核内核子密度随半径变化, 总截面可通过积分求出, 进而可得有效总截面, 确定飞行距离. 根据入射粒子在核内的运动方向和飞行距离, 计算出下一个碰撞点的可能位置(需考虑泡利不相容原理), 如果该有效碰撞点在核外, 则粒子历史终止; 如在核内, 重新抽样飞行距离, 确定下一个可能位置. 如此反复, 直至粒子逃出或粒子能量过低被束缚于核内.

3.1 抽样确定作用位置, 计算入射粒子在核内的动量、能量

以靶核中心为坐标原点, 入射粒子平行于Z轴正向入射, 并且在核的整个投影面上均匀抽样, 入射点的坐标为:

$$\begin{cases} x_0 = (2\xi_1 - 1)R_0, \\ y_0 = (2\xi_2 - 1)R_0, \\ (2\xi_1 - 1)^2 + (2\xi_2 - 1)^2 \leq 1, \\ z_0 = -\sqrt{R_0^2 - x_0^2 - y_0^2}, \end{cases} \quad (3)$$

式中 ξ_1, ξ_2 为随机数.

粒子进入核内后的能量为

$$E_0 = E_k + E_b + E_f + m_N C^2, \quad (4)$$

其中 E_k 为入射粒子的动能, E_b 为核子的结合能, 由半经验公式给出, E_f 为核子的费米能, $m_N C^2$ 为

入射粒子的质量能量. 粒子的动量 P_0 可由质壳条件给出,

$$P_0 = \sqrt{\frac{E_0^2}{C^2} - m_N^2 C^2}, \quad (5)$$

动量方向则根据角动量守恒确定.

3.2 确定飞行距离

根据实验室坐标系的粒子动能与微观截面数据, 可插值获取当前入射粒子动能所对应的截面值, 分别记为 $\sigma_{i,p}, \sigma_{i,n}$, 其中 i 为质子、中子、 π^0, π^- 和 π^+ . 根据当前入射粒子的位置, 由核密度表达式可得此处的核密度, 进而就得该处的中子密度 ρ_n 和质子密度 ρ_p .

入射粒子与靶内核子作用总截面为

$$\begin{aligned} \Sigma &= 4\pi \int_0^R (\rho_p \sigma_{i,p} + \rho_n \sigma_{i,n}) r^2 dr \\ &= 4\pi \left(\frac{N}{A} \sigma_{i,p} + \frac{Z}{A} \sigma_{i,n} \right) \int_0^R \rho(r) r^2 dr, \end{aligned} \quad (6)$$

则质心系下的有效总截面^[16]为:

$$\Sigma' = \Sigma \cdot \left[1 - \left(\frac{p_{fp}}{p_0} \right)^2 \right], \quad (7)$$

利用平均自由程, 可以得到从本次碰撞到下次碰撞之间的碰撞长度 d ,

$$d = -\frac{1}{\Sigma'} \ln \xi, \quad (8)$$

式中 ξ 为随机数.

3.3 确定碰撞位置

根据当前碰撞点坐标、运动方向、碰撞长度可确定下次碰撞点坐标. 若此点在核外, 则粒子穿过原子核, 成为逃逸粒子; 若此点在核内, 因质子、中

子均为费米子, 需判断是否满足泡利不相容原理, 满足即为真实碰撞, 继而进行碰撞处理, 反之则重新抽取碰撞长度.

3.4 碰撞处理

依据入射子与核子作用的微观截面, 可抽样确定被撞核子类型及反应类型, 同时根据零温费米动量分布抽样被撞粒子的动量, 继而求得其能量. 被撞核子的动量方向则根据各向同性散射角余弦分布抽样.

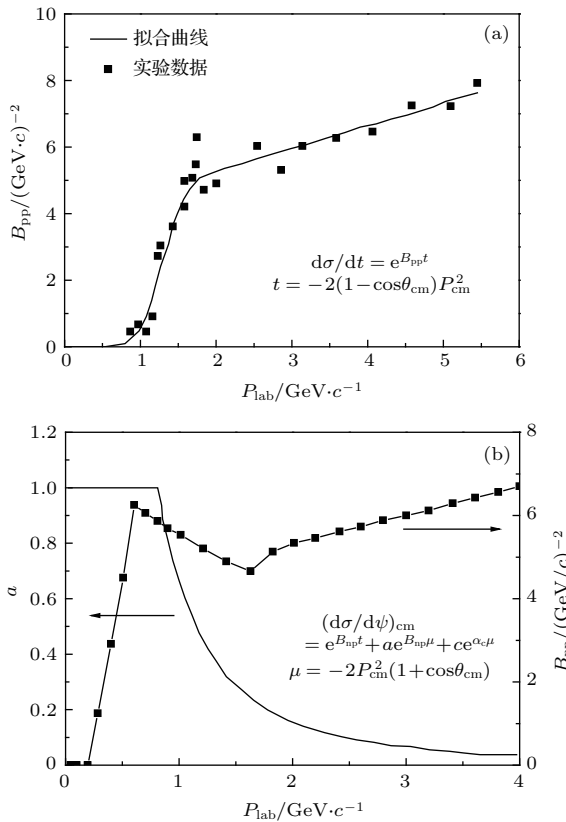


图1 INCL模型质心系核子碰撞角微分分布^[1] (a) n-n/p-p碰撞角微分分布; (b) n-p碰撞角微分分布

Fig. 1. Angular distributions of nucleon-nucleon scattering in Center-of-Mass frame: (a) Distribution of n-n or p-p collision; (b) distribution of n-p collision.

碰撞处理中, 我们假设: 1) 碰撞后粒子的能量分配根据粒子质量与体系总质量的比值分配; 2) 将中子质量视为单位质量, 质子质量、靶核质量均采用了相对中子质量. 将入射粒子的动量、能量以及被撞粒子的动量、能量经洛伦茨变换至质心系下, 在质心系下完成碰撞处理, 详细推导见文献^[12]. 质心系下散射角分布借鉴INCL模型角微分分布, 如图1所示. 碰撞完成之后, 将末态粒子的动量、能量经洛伦茨逆变换至实验室坐标系下. 若此时两粒

子的能量均大于其相应的费米能, 则前面确定的碰撞位置是允许的, 即真实碰撞, 否则为伪碰撞, 需重新抽样碰撞距离. 此即为执行泡利不相容原理.

3.5 粒子历史终止

随着粒子在核内级联碰撞的进行, 粒子能量逐渐降低, 当碰撞后核子能量小于截断能时, 粒子被终止输运, 此为粒子历史终止的情况之一. 另一种情况为核子飞出核外, 即从靶核中逃逸, 粒子历史被终止. 一般情况下, 质子截断能略高于中子, 因为质子在核表面处有库仑力.

4 CBIM程序开发及模拟结果

4.1 CBIM程序的开发

图2为按照上述思路绘制的程序流程图, 我们开发了基于Monte Carlo方法的粒子核内级联程序CBIM. 程序开发中采用相对中子质量, 截面处理及调用等. 经调试、编译, 程序可计算粒子与靶核相互作用的反应截面、穿透率、各剩余核种类及其激发态能量, 出射粒子倍增系数、能量/角度微分分布等物理量.

4.2 程序验证

核内级联过程是散裂反应的第一阶段, 因属人为划分, 实验上很难区分, 仅有部分此阶段实验数据. 在程序验证过程中, 我们一方面参考实验数据, 但更多验证工作围绕国际通用大型Monte Carlo模拟计算程序计算结果开展, 从反应截面、出射粒子增殖比、微分截面和剩余核等四个方面予以对比校验.

4.2.1 反应截面

表2给出不同能量质子与靶核相互作用时的反应截面实验测量值及计算值^[16]. 表3给出了质子、中子与靶核作用时, CBIM与Monte Carlo粒子输运程序核内级联过程计算结果之间的差异^[17], 其中表3第4—6列数据原则上是各Monte Carlo粒子输运程序中Bertini模型计算值, 部分核素为INCL模型计算值, “—”表示数据暂缺, 第7列为CBIM计算结果, 从两表可以看出, 无论是对于中等质量靶核还是重核, CBIM计算结果与实验值及其他程序计算值符合较好.

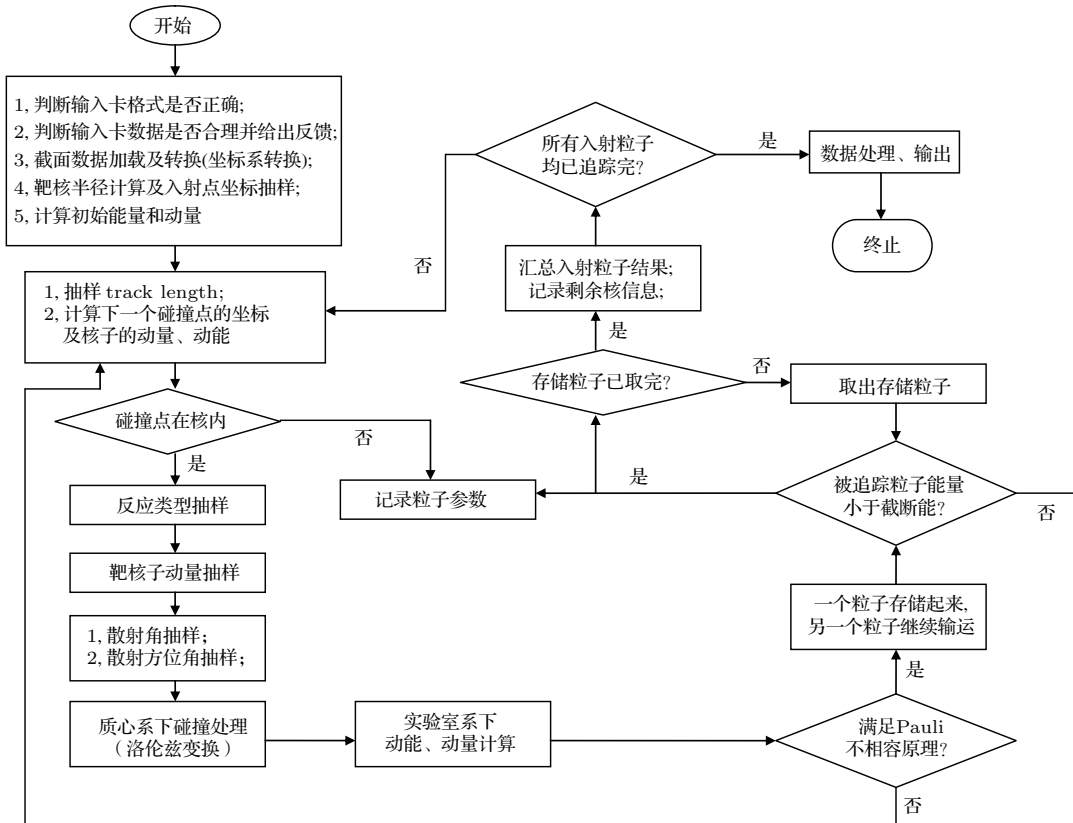


图2 程序流程图

Fig. 2. Program flow chart.

表2 CBIM 计算结果与 VEGAS 及实验结果反应截面对比

Table 2. Comparison of CBIM, VEGAS results and experiment data for reaction cross section.

| 核素 | 入射质子能量/MeV | VEGAS [16]/mb | CBIM/mb | 实验值 [16]/mb |
|-------------------|------------|---------------|---------|-------------|
| Al ²⁷ | 95 | 555±8 | 448.65 | 415 |
| | 160 | 475±8 | 415.33 | 400 |
| Cu ⁶⁵ | 80 | 1036±26 | 851.06 | 780 |
| | 160 | 888±25 | 795.45 | 750 |
| | 300 | 811±24 | 737.53 | 635 |
| As ⁷⁵ | 378 | 907±21 | 817.27 | ~ 700 |
| Ag ¹⁰⁸ | 300 | 1130±26 | 1066.54 | ~ 920 |
| Ta ¹⁸¹ | 375 | 1564±26 | 1543.19 | ~ 1340 |
| Bi ²⁰⁹ | 60 | 1883±60 | 1833.69 | 1680 |
| | 140 | 1821±64 | 1827.84 | 1700 |
| | 375 | 1725±34 | 1731.79 | ~ 1500 |
| U ²³⁸ | 155 | 1955±22 | 1984.37 | ~ 1920 |

注: 1 b = 10⁻²⁴ cm².

4.2.2 出射粒子增殖比

表4 举例列出 1.0 GeV 质子轰击铅靶从出射粒子增殖的角度对比了 CBIM 与 MCNPX 不同模型

计算值之间的差异. 从表中可以看出, CBIM 计算值介于 MCNPX 内置各模型计算值之间; 另, 计算物理模型相同, 各类出射粒子倍增系数则相同, 而与模型几何尺寸无关.

表3 CBIM 与 Monte Carlo 粒子输运程序反应截面计算值^[17] 对比
Table 3. Comparison of CBIM and MCNPX codes results^[17] for reaction cross section.

| 核素 | 入射粒子 | 能量/MeV | GEANT 4 /mb | PHITS /mb | MCNPX2.6 /mb | CBIM /mb |
|-------------------|------|--------|----------------|-----------|--------------|----------|
| Pb ²⁰⁷ | p | 800 | 1860 | 1847.12 | 1777.34 | 1782.76 |
| | p | 1200 | 1905 | 1865.35 | 1820.76 | 1788.64 |
| | p | 1600 | 1920 | 1867.83 | 1832.02 | 1798.21 |
| Fe ⁵⁶ | p | 800 | 775 | 754.76 | 720.48 | 702.87 |
| | p | 1200 | 801 | 762.21 | 741.82 | 712.58 |
| | p | 1600 | 810.6 | 763.22 | 742.33 | 715.29 |
| | P | 3000 | — | 763.38 | 739.83 | 733.47 |
| Bi ²⁰⁹ | n | 65 | — | 847.2 | 843.59 | 775.98 |
| | n | 542 | 1707.16 (INCL) | 2080.89 | 1725.45 | |
| Al ²⁷ | p | 730 | 431.17(INCL) | 446.43 | 441.06 | 432.56 |
| | p | 2205 | 448.67(INCL) | 453.65 | 451.63 | 440.43 |
| C ¹² | p | 730 | 239.51 (INCL) | 248.34 | 248.88 | 214.31 |
| Ta ¹⁸¹ | p | 1200 | 1641.35(INCL) | — | 1657.81 | 1622.83 |

表4 CBIM 与 MCNPX 出射粒子增殖比对比
Table 4. Comparison of CBIM and MCNPX codes results for particle multiplication factor.

| 质子打铅靶 靶厚度/cm | 出射粒子倍增系数 | | | | | 计算模型 | 总倍增系数 |
|-----------------|---------------------|---------------------|------------------------|------------------------|------------------------|---------|---------|
| | 质子 | 中子 | π^+ | π^0 | π^- | | |
| 1.0 | 1.376×10^0 | 2.866×10^0 | 7.976×10^{-2} | 1.535×10^{-1} | 9.082×10^{-2} | CEM2K | 4.56608 |
| 0.1 | 1.376×10^0 | 2.866×10^0 | 7.976×10^{-2} | 1.535×10^{-1} | 9.082×10^{-2} | CEM2K | 4.56608 |
| 1.0 | 1.563×10^0 | 1.909×10^0 | 1.057×10^{-1} | 1.074×10^{-1} | 6.711×10^{-2} | Bertini | 3.75221 |
| 1.0 | 1.563×10^0 | 1.909×10^0 | 1.057×10^{-1} | 1.074×10^{-1} | 6.711×10^{-2} | ISABLE | 3.75221 |
| 1.0 | 1.874×10^0 | 2.207×10^0 | 8.499×10^{-2} | 8.539×10^{-2} | 5.108×10^{-2} | INCL4 | 4.30246 |
| — | 1.672×10^0 | 2.300×10^0 | 9.649×10^{-2} | 1.195×10^{-1} | 4.935×10^{-2} | CBIM | 4.23735 |

4.2.3 微分截面

图3给出了1.6 GeV质子轰击铅靶后产生的中子的微分分布,数据源自IAEA^[17].图中显示,出射中子能量大于10 MeV时,CBIM计算值与各模

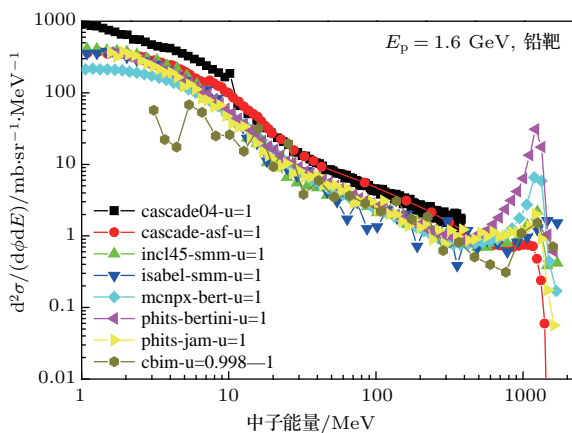


图3 (网刊彩色) 1.6 GeV 质子轰击铅靶后出射中子的微分分布

Fig. 3. (color online) Differential cross section for neutron in the 1.6 GeV p+Pb reaction.

型计算值符合较好;而对于低能中子,CBIM计算值明显低于其他模型.众所周知,散裂反应产生的中高能出射粒子绝大部分来自核内级联和蒸发过程,能量较低的粒子则产生在裂变,而当前的CBIM仅能模拟核内级联过程,这可能是造成低能粒子较少的主要原因.

4.2.4 剩余核信息

表5从剩余核平均激发态能量、剩余核平均原子序数和剩余核平均质量数三个方面,考量了粒子核内级联蒙特卡罗模拟程序.对比计算时,考虑了以下因素:1)尽量覆盖较广的入射粒子能量范围;2)尽量多考虑几种入射粒子;3)靶核尽量为不同的原子核.从表5中可知,国际主流Monte Carlo输运程序针对同一问题,因计算模型不同,其计算结果^[17]存在差异;而CBIM计算值在剩余核信息方面,与上述程序符合较好,虽部分数据存在差异,但介于极值之间.

表5 CBIM 与其他模型剩余核信息对比
Table 5. Comparison of CBIM and other codes results for residual nuclei.

| 入射粒子类型 & 能量 | 靶核类型 | 计算模型 | 剩余核平均激发态能量/MeV | 剩余核平均原子序数 | 剩余核平均质量数 |
|------------------|------------|-------------|----------------|-----------|-----------|
| $E_p = 160$ MeV | Al^{27} | INCL45-ABLA | 38.45 | 12.71 | 25.71 |
| | | CEM03-03 | 36.2±34.4 | 12.8±0.7 | 26.2±0.8 |
| | | CBIM | 43.10 | 13.03 | 26.50 |
| $E_n = 65$ MeV | Fe^{56} | INCL45-ABLA | 29.00 | 25.43 | 55.52 |
| | | CEM03-03 | 37.8±24.8 | 25.8±0.4 | 56.0±0.7 |
| | | CBIM | 45.95 | 25.75 | 56.23 |
| $E_p = 3000$ MeV | Pb^{207} | INCL45-ABLA | 241.71 | 78.60 | 198.62 |
| | | CEM03-03 | 691.9±448.5 | 79.8±2.0 | 194.5±8.1 |
| | | CBIM | 496.12 | 80.51 | 201.96 |
| $E_p = 1000$ MeV | U^{238} | CEM03-03 | 292.0±183.6 | 91.6±1.1 | 232.2±3.5 |
| | | CBIM | 300.84 | 91.35 | 234.93 |

5 结论与展望

本文在 Bertini 模型基础上, 借鉴 INCL 模型质心系下的核子散射角微分分布, 开发出一款能模拟中高能粒子(质子、中子、 π^0 、 π^- 、 π^+)引起的核内级联过程的 Monte Carlo 输运程序, 并从反应截面、出射粒子增殖比、微分截面和剩余核等四个方面与已有实验数据及主流 Monte Carlo 模拟程序计算结果予以对比较验, 验证了程序的可靠性和准确性. 程序开发过程中, 有些核结构参数由半经验公式计算而得, 有些物理过程如剩余核激发态退激处理等暂未考虑, 后续我们将围绕这些不足, 开展核结构参数优化、完善剩余核激发态退激处理等工作.

参考文献

[1] Filges D, Coldenbaum F 2009 *Handbook of Spallation Research* (Weinheim: Wiley-VCH) pp3-92
 [2] Bertini H W 1970 *Ph. D. Dissertation (America: Oak Ridge National Laboratory)*
 [3] Bertini H W 1963 *Phys. Rev.* **131** 1801
 [4] Bertini H W 1969 *Phys. Rev.* **188** 1711
 [5] Boudard A, Cugnon J, Leray S 2002 *Phys. Rev. C* **66** 044615

[6] Yariv Y, Fraenkel Z 1979 *Phys. Rev. C* **20** 2227
 [7] Gudima K K, Mashnik S G, Toneev V D 1983 *Nucl. Phys. A* **401** 329
 [8] Han Y L 2004 *High Energy Physics and Nuclear Physics* **28** 48 (in Chinese) [韩银录 2004 高能物理与核物理 **28** 48]
 [9] Yu H W, Cai C H, Zhao Z X 2005 *High Energy Physics and Nuclear Physics* **29** 263 (in Chinese) [于洪伟, 蔡崇海, 赵志祥 2005 高能物理与核物理 **29** 263]
 [10] Liang C T, Cai C H 2007 *Atomic Energy Science and Technology* **41** 1 (in Chinese) [梁春恬, 蔡崇海 2007 原子能科学技术 **41** 1]
 [11] Wang H Q, Cai X, Liu Y 1992 *High Energy Physics and Nuclear Physics* **16** 259 (in Chinese) [王海桥, 蔡勛, 刘庸 1992 高能物理与核物理 **16** 259]
 [12] Chen X 1982 *J. National University of Defense Technology* **2** 17 (in Chinese) [陈翔 1982 国防科技大学学报 **2** 17]
 [13] Zhang S F 1982 *J. National University of Defense Technology* **2** 27 (in Chinese) [张树发 1982 国防科技大学学报 **2** 27]
 [14] Wang Q T, Zhang W Y 2007 *J. Tsinghua Univ. (Sci. & Tech.)* **47** 1072 (in Chinese) [王同权, 张文勇 2007 清华大学学报 (自然科学版) **47** 1072]
 [15] Boudard A 2008 *Joint ICTP-IAEA Advanced Workshop on Model Codes for Spallation Reactions*, Trieste, February 4-8, 2008 p1930
 [16] Chen K, Fraenkel Z, Friedlander G, Grover J R, Miller J M, Shimamoto Y 1968 *Phys. Rev.* **166** 949
 [17] http://www-nds.iaea.org/spallations/spal_md1.html [2016-7-11]

Development of an intranuclear-cascade code CBIM applicable to the nuclear reaction with incident particle energy above 45 MeV*

Hu Zhi-Liang Zhou Bin Zeng Zhi-Rong Liang Tian-Jiao[†]

(Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(Dongguan Institute of Neutron Science, Dongguan 523808, China)

(Received 23 June 2016; revised manuscript received 1 September 2016)

Abstract

The Monte Carlo intra-nuclear cascade program CBIM has been developed for describing spallation reactions involving protons, neutrons and pions on complex nuclei.

In order to describe cascade process, several simplifications and assumptions are made in the following: firstly, neither reaction, nor reflection, nor refraction, nor ionization will be taken into account before the incident particle enters into the target nucleus; secondly, target nucleus is regarded as being spherical and the atom number should be greater than 2; thirdly, the knocked nucleon is determined by cross section sampling; finally, in the center-of-mass frame, the scattering angle is sampled based on differential cross section distribution.

The basis physics model is based on the above assumptions and Bertini intra-nuclear cascade model; meanwhile, nucleon-nucleon angle differential distributions of INCL in the center-of-mass frame are introduced to overcome the shortage of Bertini model. The interactions between nucleon and nucleon or between nucleon and pion, such as elastic scattering, pion production and charge exchange, are included in the code. In the particles collision, the nucleon density changes with the target nucleus radius; and the interaction cross sections refer to 22 kinds of experimental cross sections in Bertini model. The intra-nuclear cascades induced by 45–3500 MeV neutron, proton or pion below 2500 MeV can be simulated by this code.

Finally, comparisons between experimental reaction cross section over the energy range 60–378 MeV, and some simulation results by MCNPX, GEANT4 and PHITS over the energy range 65–3000 MeV show that they are in reasonable agreement with the CBIM results over the broad energy range considered.

Keywords: nucleon, pion, intranuclear-cascade, Monte Carlo method

PACS: 25.40.Sc, 24.10.Lx

DOI: 10.7498/aps.65.232501

* Project supported by the Xie Jia-Lin Foundation of Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences (Grant No. Y454624) and the Project on the Integration of Industry, Education & Research of Guangdong Province, China (Grant No. 2015B090901048).

[†] Corresponding author. E-mail: liangtj@ihep.ac.cn