

中能 Abrasion - Ablation 模型的核内 核子密度分布修正*

胡佩钢 吴和宇 靳根明 李祖玉 贺智勇 符彦飏
王宏伟 段利敏 张保国 戴光曦

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 将具体的核内核子(包括中子、质子)密度分布引入到中能 Abrasion - Ablation 模型中,用修正后的模型计算了 $30\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{107}\text{Ag}$ 反应中的弹核碎裂过程. 结果表明,在非常周边的碰撞中,修正后的模型计算的碎片截面与修正前的计算相比有明显的差别,反映了核密度边缘弥散的影响. 与实验结果的比较验证了中能弹核碎裂碎片能量相对于束流能量的降低是由摩擦作用引起的.

关键词 Abrasion - Ablation 模型 核子密度分布 弹核碎裂

1 引言

中能区重离子反应中,经常采用 Abrasion - Ablation 模型来描述弹核碎裂过程. Abrasion - Ablation 模型最初是由 J. D. Bowman^[1] 在分析高能重离子碰撞的周边过程时提出来的. 该模型将反应分为两个阶段:第一阶段是弹核与靶核相切,形成高度激发的参加者交叠区及激发能较低的种类旁观者和类靶旁观者,这一阶段称为 Abrasion 过程;第二阶段是系统的重组阶段,即称为 Ablation 过程. 假定处于激发态的种类旁观者经过弛豫过程达到平衡状态,它将通过蒸发轻粒子、裂变等过程退激发形成类弹碎片,在整个退激阶段存在这些过程之间的竞争.

在中能区,因为吸引的平均场与排斥的核子 - 核子相互作用的竞争,反应的机制变得比较复杂. 弹核碎裂过程表现出与高能区不同的特征,如出射碎片平均速度显著低于束流速度,出射碎片与靶核相关等. 为解决这些问题,人们对高能 Abrasion 模型做了不少改进,形成各种中能 Abrasion 模型^[2-4].

在 Abrasion 模型的计算中,通常都是将核内核子密度作锐截近似处理,即假定密度分布为一常数,这时可以比较容易地通过解析表达式计算出弹核在参加者中的核子数.

1999-06-03 收稿

* 甘肃省自然科学基金,中国科学院“九五”基础性研究重大科学基金(KJ95T-03)和“百人计划”基金资助

但是,真实核的核内核子密度却并非常数,而是具有一定的分布.而且,有的核中子和质子的分布也存在着很大的差异(如皮核、晕核),将核密度简单地作常数处理就会引起比较大的误差,比如在核密度下降剧烈的边缘,这突出表现在非常周边的碰撞过程计算误差的增大.因此,本文对 Abrasion 模型作了修正,并将核内质子和中子密度分布体现在模型中.其目的是通过这一修正,在一定程度上改进中能 Abrasion - Ablation 模型的计算结果,提高该模型的适应性,使其能应用于计算放射性次级束物理实验研究中的弹核碎裂过程.本文还给出了部分模型计算结果,并与实验结果进行了比较.

2 模型描述

在 Abrasion 阶段,入射炮弹(A_p, Z_p)以碰撞参数 b 轰击靶核(A_T, Z_T),两核形成一个重叠区,从入射弹核中擦去的核子数 a 正比于一个球体和圆柱体相交部分的体积.假设核内的中子密度分布、质子密度分布是球坐标系的变量 r 的函数,分别为 $\rho_n(r)$, $\rho_p(r)$, 则被擦去的核子数 a 有:

$$a \propto \int_V \rho_n(r) dV + \int_V \rho_p(r) dV, \quad (1)$$

其中,积分区域 V 是弹核球体与靶核半径圆柱体相交的部分.由于积分区域的形状较复杂,很难得到(1)式的解析表达式,因此应采用蒙特卡罗(Monte Carlo)方法计算.

取以弹核中心为原点的球坐标系,在半径为 r_p 的球内分别按分布 $\rho_n(r)$ 和 $\rho_p(r)$ 抽点,其概率密度函数 $f(r, \theta, \varphi) = \rho(r)r^2 \sin\theta \cdot \frac{3}{4\pi R^3}$. 每次抽样结果将得到一组服从 $f(r, \theta, \varphi)$ 分布的球坐标向量 (r, θ, φ) . 很明显,在交叠区域中(将被擦去的部分)的点服从 $(r \sin\theta \cos\varphi - b)^2 + r^2 \sin^2\theta \sin^2\varphi \leq r_T^2$ 的条件,从而抽样得到点落在交叠区中的几率.由此分别计算出弹核被擦去的中子数和质子数,进而得到弹核旁观者的 A, Z 值.

弹核旁观者与参加者分离之前将受到激发,这种激发能的沉积机制非常复杂.在模型的发展中,有多种估算初始激发能的方法^[3-5]. 考虑中能区耗散机制对激发能的影响,1986年 Dayras 等^[2]给出了一种简单的考虑,认为在中能区基态分离能对激发能有贡献,由此给出激发能为

$$E^* = \alpha S_{abr} + (1 - \alpha)E_g, \quad (2)$$

式中 E_g 为基态分离能,可由液滴模型来计算. S_{abr} 为由 Abrasion 引起的表面激发能,由下式给出:

$$S_{abr} = 2E_s S, \quad (3)$$

其中, E_s 为核表面张力系数. S 为擦去部分与剩余部分之间的连接面面积. 系数 α 与反应系统和反应能量相关,在相对论能量时其值应取 1. 而当入射能量变小时,相互作用时间大到允许弹靶交叠区的核子作某种重排,这时 α 值小于 1.

由于核内核子密度分布的存在,与核子密度相关的表面张力系数 E_s 也会有一分布. 假定 E_s 值与密度成正比关系,则 E_s 与核内核子密度分布具有相似的函数形式. 比如,假设核子密度分布(包括中子、质子)为费米分布 $\rho(r) = \frac{\rho_0}{1 + \exp((r - R)/d)}$, 则 E_s 可表示为

$$E_s(r) = E_{s0} \left[\frac{z/A}{1 + \exp((r - R_p)/d_p)} + \frac{N/A}{1 + \exp((r - R_n)/d_n)} \right], \quad (4)$$

式中, $E_{s0} = 0.95 \text{ MeV/fm}^2$ 是核子密度为 ρ_0 时的表面张力系数. R 为核子分布半密度半径, d 为核子分布表面弥散度. 下标 n, p 分别表示中子、质子. 因此 S_{abr} 项的值将由在球体内部的圆柱面上的面积分 $\int_S 2E_s(r) dS$ 得到.

考虑各个衰变道之间的竞争, 带有激发能 E^* 的核 (A, Z) 将衰变为核 (A', Z') , 从而可以得到最终的碎片同位素分布.

3 计算结果和讨论

采用 Abrasion 模型, 计算了 $30 \text{ MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{m1}\text{Ag}$ 反应的弹核碎裂过程. 图 1 显示了

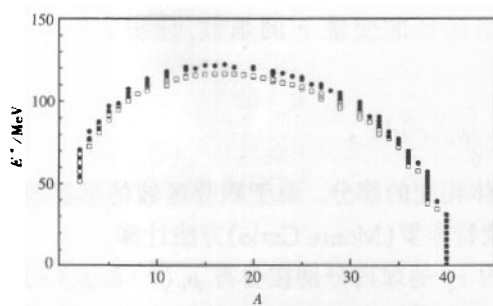


图 1 Abrasion 模型计算得到的 $30 \text{ MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{m1}\text{Ag}$ 反应中的初始激发能随初始碎片质量数 A 的变化以及 S_{abr} 项的贡献 ($\alpha = 0.85$, $E_{s0} = 0.95 \text{ MeV/fm}^2$)

● 模型计算, □ 模型计算的项 S_{abr} 的贡献.

初始激发能的计算结果. α 值取 0.85 时, 基态分离能 E_g 由考虑了核内核子密度分布的迈尔斯-斯韦塔斯基公式计算得到. 从图中可以看出, 在初始碎片质量数 $A \leq 15$ 时, 初始激发能随 A 的增加而逐渐上升, 在 $A = 15-20$ 时达到最大值 120 MeV , 然后逐渐降低, 直到 $A = 40$ 时接近 0. 这一过程与随碰撞参数的变化弹核擦去部分和剩余部分之间的连接面面积的变化相关.

图 2 给出了 $30 \text{ MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{m1}\text{Ag}$ 反应的碎片最终同位素分布计算结果. 由图可以看到, 对于 $Z \leq 14$ 的碎片, 两种模型计算的结果基本相同. 当碎片接近弹核时 (如 P, S 核), 根据模型的几何图像它们应属于非常周边碰撞的产物, 在这里核内核子密度迅速下降, 较大地偏离了锐截止半径假设的情况, 因此两种模型显示出较大的差别.

同时, 从实验中提取了 $30 \text{ MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{m1}\text{Ag}$ 反应中 $Z = 6-14$ 范围内的弹核碎裂碎片的截面, 在图 3 中用实心圆点表示. 图中的曲线是模型计算的结果, 与实验点在趋势上拟合较好. 其中, 实线和虚线是与核子密度分布相关的碎裂程序计算的结果 (实线模拟 10000 次, 虚线模拟 5000 次); 点线是不考虑核内核子密度分布的碎裂程序计算的结果 (模拟 10000 次). 可以看到, 在图中的质量范围内两种模型计算的结果是比较一致的. 之所以未出现大的变化, 一是因为弹核 Ar 的密度分布与锐截止半径图像相去不远; 二是所测质量范围的产物不属于非常周边的碰撞, 所以没有大的差别.

在 Abrasion-Ablation 理论模型中, 由于核-核碰撞交叠面处摩擦的影响, 弹核碎裂碎片的最可几速度 V_f 有以下简单形式^[6]:

$$V_f = V_p \left[1 - \frac{E_{in} A_p}{E_p A_f} \right]^{1/2} \quad (5)$$

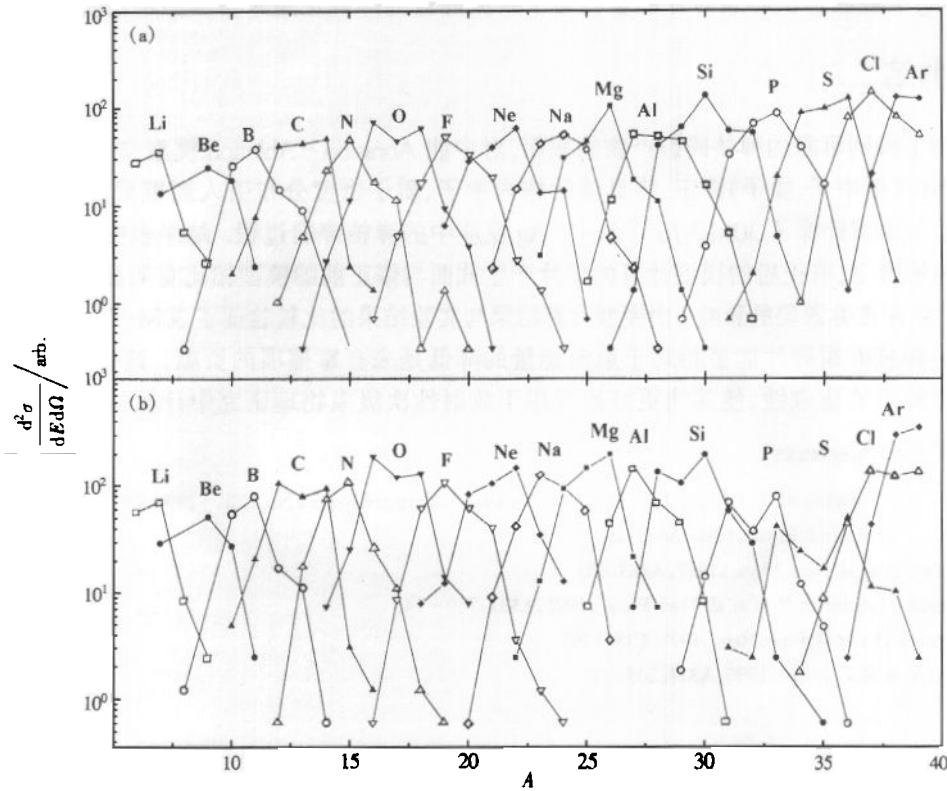


图 2 Abrasion - Ablation 模型计算的 30MeV/u ⁴⁰Ar + ^mAg 反应中同位素分布的比较
(a) 不考虑核子密度分布的模型计算结果; (b) 考虑了核子密度分布修正模型后的计算结果.

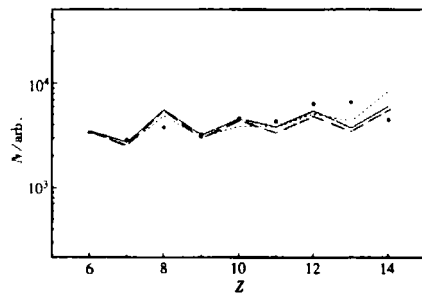


图 3 30MeV/u ⁴⁰Ar + ^mAg 反应中
弹核碎裂碎片的 Z 分布
图中线条说明见正文.

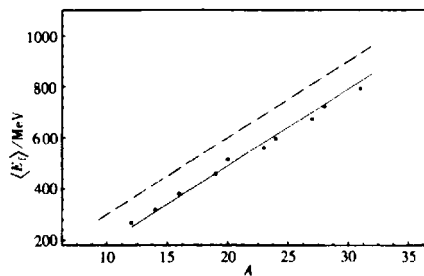


图 4 30MeV/u ⁴⁰Ar + ^mAg 反应中弹核碎裂
碎片的最可几能量与质量数 A 的关系
● 实验结果, — 模型计算结果,
- - - 束流能量的位置.

其中, E_{fi} 是 Abrasion 过程中的 S_{abr} 项的贡献. V_p, A_p, E_p 分别为弹核的速度、质量和总能量. 上式可以变换为
$$E_f = \frac{A_f E_p}{A_p} - E_{fi} \quad (6)$$

E_f 是碎片的最可几能量, E_p/A_p 是弹核单核子能量. 从实验中提取了 30MeV/u ⁴⁰Ar + ^mAg 反应的 $Z=6-14$ 弹核碎裂碎片的 \bar{E}_f 值表示在图 4 中. 从图 1 可以看出, 在 $Z=6-14$ 范围内摩擦项贡献的平均值为 $\alpha S_{abr} = 110 \text{MeV}$, 将此值代入 (6) 式得到了比较好的拟合结果. 由

此可知,中能区弹核碎裂碎片能量相对于束流能量的降低正是来自摩擦项的贡献引起的.

4 小结

为了得到可靠的弹核碎裂产物的截面,对中能 Abrasion - Ablation 模型作了核内核子密度分布(包括中子、质子)修正,将具体的核内中子、质子密度分布引入到模型的计算中.用修正后的模型计算了 $30\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{\text{nat}}\text{Ag}$ 反应中的弹核碎裂过程.结果表明,在非常周边的碰撞情形下,修正后的模型计算的碎片产生截面与修正前的模型相比有明显的差别,反映了核边缘密度弥散层的影响.由模型计算结果与实验结果比较验证了 $30\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{\text{nat}}\text{Ag}$ 反应中弹核碎裂碎片能量相对于束流能量的降低是来自摩擦项的贡献.这一修正模型提高了原模型的适应性,使其能更好地应用于放射性次级束物理研究中计算弹核碎裂过程.

参考文献 (References)

- 1 Bowman J D, Swiatecki W J, Tsang C F. Lawrence Berkeley Laboratory Report No. LBL - 2908, 1973
- 2 Dayras R et al. Nucl. Phys., 1986, **A460**:299 - 323
- 3 Bonasera A et al. Nucl. Phys., 1987, **A463**:653
- 4 Gaimard J J, Schmidt K H et al. Nucl. Phys., 1991, **A531**:709 - 745
- 5 Morrissey D J et al. Phys. Rev., 1978, **C18**:1267
- 6 Borrel V et al. Z. Phys., 1986, **A324**:205

Correction of Abrasion - Ablation Model of Intermediate Energy with Distributions of Nucleon Density in Nucleus *

HU PeiGang WU HeYu JIN GenMing LI ZuYu HE ZhiYong FU YanBiao
WANG HongWei DUAN LiMin ZHANG BaoGuo DAI GuangXi
(*Institute of Modern Physics, The Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*)

Abstract Nucleon density distributions in nucleus (including neutron and proton) have been introduced into the Abrasion - Ablation model for the intermediate energy collision. Process of projectile fragmentation in the reaction of $30\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{\text{nat}}\text{Ag}$ has been simulated with the model of corrected version. The results show that in the rather peripheral collisions there are obvious differences for the calculated cross sections with and without correction of nucleon density distributions in the model. The differences come from the effects of dispersion on the edge of nuclei. It has been verified by comparison with experimental results that reduction of mean energy of projectile - like fragments from beam energy is mainly caused by the action of friction.

Key words Abrasion-Ablation model, distributions of nucleon density, projectile fragmentation

Received 3 June 1999

* Supported by Natural Science Foundation of Gansu Province, Major Subject of The Chinese Academy of Sciences and One Hundred Talents Project