

中能重离子核反应同位素 分布的统计模型计算*

方德清 冯 军 沈文庆 蔡翔舟
王建松 叶 巍 马余刚

(中国科学院上海原子核所 上海 201800)

摘要 用统计擦去模型,引入新的介质中的核子-核子碰撞截面和核物质密度分布弥散度,对中能区由不同质量的重离子引起的核反应的同位素分布进行了研究,探讨了介质效应和核物质密度分布弥散度对同位素分布的影响.

关键词 同位素分布 介质中的核子-核子碰撞截面 核物质密度分布弥散度 统计擦去模型

1 引言

核反应是研究核物理的一种重要手段,随着加速器技术的发展,利用放射性次级束进行核反应机制、核结构和新核素的合成及其衰变特性等方面的研究已成为核物理研究的一个重要方向^[1],并发现了许多新的物理现象^[2],如新的壳模型幻数、新的奇异衰变方式、新的形变区以及奇异核的晕结构和皮结构.这不仅丰富了对核本身的进一步了解,对于完善和发展现有的核理论和模型具有重要意义,而且为核物理在其它领域的应用提供了新的手段.发展多品种、高流强和高品质的放射性次级束技术是开展这一领域研究必不可少的条件.中高能重离子碎裂反应产生的同位素分布是中能放射性次级束技术的重要基础之一,因而对它的研究引起了人们极大的兴趣^[3].

本文采用发展的介质中的核子-核子碰撞截面,并考虑核物质密度分布的表面弥散度的影响,改进了 T. Brohm 等人的统计擦去模型,用该模型对 44MeV/u Xe、Kr、Ar 弹核引起的核反应的同位素分布进行了研究.

2 计算方法和模型

由于中能重离子核反应具有与高能相似的碎裂机制,所以人们首先试图用宏观几何

1998-04-01收稿

* 国家杰出青年基金(19625513),国家自然科学基金(19675059),上海市科学技术发展基金(96XD14011)资助

模型来研究中能碎裂反应. 由于几何模型采用平均密度分布, 不区分核内的中子和质子, 而且对碎块的激发能处理得比较粗糙, 因此发展了许多修正的几何模型^[4-6]. 现有的这些修正模型主要是考虑到中能重离子核反应的复杂性, 对激发能的计算作了各种修正, 如引入可调参数或加摩擦或用窗口公式考虑单体耗散. 模型中计算反应产物的电荷分布主要有两种方法^[7]: 一种是 GDR (giant dipole resonance); 另一种是 HYP (hypergeometry model), 前者算出的宽度较窄, 适合于中子、质子之间存在着较强的关联, 而后者算出的分布则较宽, 在中子、质子之间的关联很弱时适用. 我们曾在 GDR 的计算中, 引入核物质的中子皮, 发展了一种计算方法^[8]. 用修正后的几何模型计算同位素分布, 对较轻的反应系统拟合得很好, 但对较重的系统不能解释实验数据. 后来, T. Brohm 等人提出一个统计擦去模型^[9], 分别考虑中子和质子不同的密度分布, 对重叠区的核子-核子碰撞作完全统计的处理, 该模型能较好地描述碎裂过程中的中子、质子比的涨落.

如果将发生碰撞的两核沿入射方向分为许多平行的细管子(见图 1), 第 i 个管子包含的核子数 $A_i = N_i + Z_i$, 忽略管子的横向运动, 通过各对管子之间的独立碰撞即可描述擦去过程. 在这样的假设下, 一个类型为 k ($k = n$ 为中子, $k = p$ 为质子) 的入射核子穿透靶核的第 j 个管子的几率可以写为^[9]

$$t_{j, k} = \exp\left\{\frac{-1}{F} (N_j \sigma_{nk} + Z_j \sigma_{pk})\right\}, \quad (1)$$

其中, F 为管子的横截面积, $\sigma_{k'k}$ ($k' = n, p$) 为核子-核子碰撞截面. 对核内的中子和质子

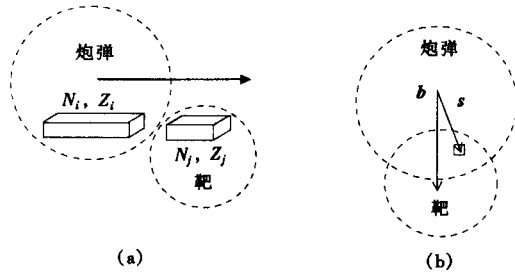


图1 两核相互作用示意图

(a) 用管子对的碰撞描述擦去过程的侧面图;

(b) 同(a), 从入射方向看的截面图.

采用不同的分布, 当 A 小于 10 时密度分布形式采用表面归一的高斯分布, A 大于 10 时采用小液滴模型的双参数费米分布^[10]. 假设每对管子碰撞时擦去的中子数 ΔN_i 和质子数 ΔZ_i 分别满足二项式分布, 所以擦去的总的中子数和质子数将是许多具有不同参数的二项式分布的叠加, 因而无法用一个单一的二项式分布表示出来. 一对相互碰撞的管子擦去的核子数的平均值通过下式计算

$$\langle \Delta A_i \rangle = N_i (1 - t_{j,n}) + Z_i (1 - t_{j,p}) = \langle \Delta N_i \rangle + \langle \Delta Z_i \rangle, \quad (2)$$

而弹核中擦去的总核子数可以通过对所有的管子对求和得到

$$\langle \Delta A \rangle = \sum_{i,j} [N_i (1 - t_{j,n}) + Z_i (1 - t_{j,p})] = \langle \Delta N \rangle + \langle \Delta Z \rangle, \quad (3)$$

在无穷小极限下, 碰撞参数为 b 时的穿透几率可以写为

$$t_k(s-b) = \exp\{- (D_n^T(s-b) \sigma_{nk} + D_p^T(s-b) \sigma_{pk})\}, \quad (4)$$

其中, $D_k^T(r)$ 表示靶核的中子 ($k = n$) 或质子 ($k = p$) 沿入射方向积分的密度分布, 且分别满足归一条件 $\int d^2s D_n^T = N^T$ 和 $\int d^2s D_p^T = Z^T$. 擦去的总核子数的一阶矩和二阶矩可以写为

$$\langle \Delta A(\mathbf{b}) \rangle = \int d^2s D_n^p(s) [1 - t_n(s - \mathbf{b})] + \int d^2s D_p^p(s) [1 - t_p(s - \mathbf{b})], \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \langle (\Delta A(\mathbf{b}) - \langle \Delta A(\mathbf{b}) \rangle)^2 \rangle &= \int d^2s D_n^p(s) [1 - t_n(s - \mathbf{b})] t_n(s - \mathbf{b}) \\ &+ \int d^2s D_p^p(s) [1 - t_p(s - \mathbf{b})] t_p(s - \mathbf{b}), \end{aligned} \quad (6)$$

再与入射方向垂直的平面上进行积分, 对于更高阶矩同样可以算出. 由此可以得到在确定的碰撞参数 \mathbf{b} 下, 擦去的总中子数和质子数的几率分布 $P(\Delta N, \mathbf{b})$ 和 $P(\Delta Z, \mathbf{b})$. 前面已提到, 几率分布无法用解析的式子表示出来, 但在一般的计算要求下, 可用二阶矩展开来近似, 即要求分布具有 (5)、(6) 式给出的一阶矩和二阶矩. 因而中子数为 N , 质子数为 Z 的类弹初级碎块的产生截面可由下式计算

$$\sigma(N, Z) = \int d\mathbf{b} P(N^p - N, \mathbf{b}) P(Z^p - Z, \mathbf{b}). \quad (7)$$

在中能重离子核反应过程中, 由于泡利不相容原理及核物质密度的影响, 介质中的核子-核子碰撞截面是不同于自由空间中的核子-核子碰撞截面的, 因此在计算中采用发展的介质中的核子-核子碰撞截面^[11]

$$\begin{cases} \sigma_{nn} = (13.73 - 15.04\beta^{-1} + 8.76\beta^{-2} + 68.67\beta^4) \frac{1.0 + 7.772 E_{\text{lab}}^{0.06} \rho^{1.48}}{1.0 + 18.01\rho^{1.46}}, \\ \sigma_{pp} = \sigma_{nn}, \\ \sigma_{np} = (-70.67 - 18.18\beta^{-1} + 25.26\beta^{-2} + 113.85\beta) \frac{1.0 + 20.88 E_{\text{lab}}^{0.04} \rho^{2.02}}{1.0 + 35.86\rho^{1.90}}, \end{cases} \quad (8)$$

$$\beta = \sqrt{1.0 - \frac{1.0}{\gamma^2}}, \quad \gamma = \frac{E_{\text{lab}}}{931.5} + 1.0,$$

这里, E_{lab} 为弹核在实验室系中每核子的入射能; ρ 为核物质密度, 单位为 fm^{-3} , 它介于 $0-2\rho_0$ 之间; σ_{nn} (σ_{pp}) 为中子-中子 (质子-质子) 碰撞截面, σ_{np} 为中子-质子碰撞截面. 公式 (8) 对介质中的核子-核子碰撞截面的表述分为两个部分, 前半部分描述自由空间中的核子-核子碰撞截面; 后半部分反映了在介质中截面随入射能和核物质密度的变化关系. 从中可以看出, 介质效应的引入导致了截面的下降, 它在整个中能区都有重要的影响, 随着能量的提高虽然有所减弱, 但依然存在.

在计算激发能时, 根据费米气体理论, 模型认为擦去一个核子平均将会产生 13.3MeV 的激发能. 用 A_{abr} 表示擦去的核子数, 则碎块的激发能可以写为^[6]

$$E^* = 13.3 A_{\text{abr}} (\text{MeV}). \quad (9)$$

3 计算结果及讨论

首先考虑介质效应对擦去的核子数和碎块的激发能的影响. 由于在统计擦去模型中, 碎裂过程是由核子之间的碰撞描述的, 它产生的几率主要取决于核子-核子碰撞截面 $\sigma_{k,k}$, 因此, $\sigma_{k,k}$ 的改变, 将会影响擦去的核子数. 在中能区, 由公式 (8) 算出的介质中的核子-核子碰撞截面约为自由空间中的 74%. 因此, 考虑介质效应后, 擦去的核子数会减少. 对 $44\text{MeV} / \text{u}^{129}\text{Xe} + {}^{90}\text{Zr}$ 的核反应计算得到的结果见图 2(a). 图 2(b) 是激发能与碰撞参数的关系, 由图可见, 考虑了介质效应后, 碎块的激发能减少.

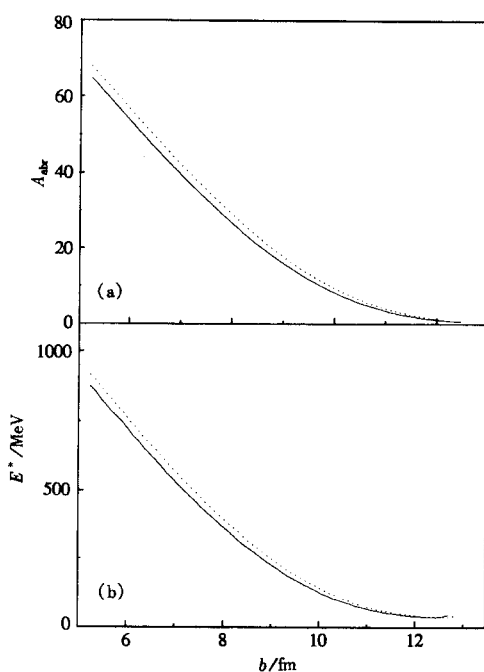


图 2 $44\text{MeV} / \text{u}^{129}\text{Xe} + {}^{90}\text{Zr}$ 反应中考虑介质效应和不考虑介质效应时擦去的核子数(a)和激发能(b)与碰撞参数的关系

——介质; -----自由.

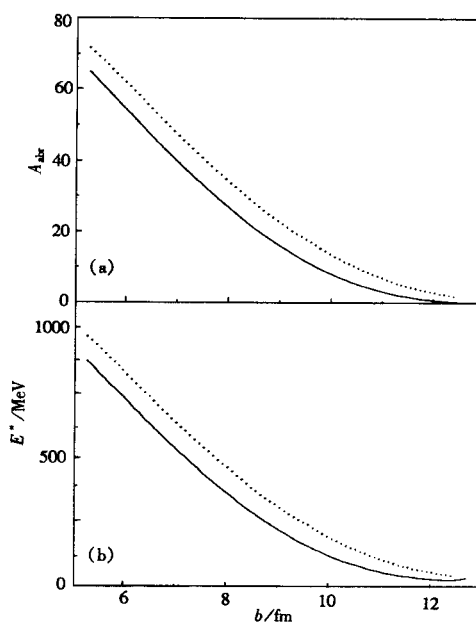


图 3 $44\text{MeV} / \text{u}^{129}\text{Xe} + {}^{90}\text{Zr}$ 反应中考虑核物质分布弥散度随中子过剩度变化时擦去的核子数(a)和激发能(b)与碰撞参数的关系

——小液滴模型弥散度;

-----弥散度随中子过剩度变化(公式(10)).

下面讨论核物质表面弥散度对擦去的核子数和碎块激发能的影响. 考虑到随着核内中子过剩的增大, 中子分布在表面会出现长尾巴. 因此采用下式计算中子的表面弥散度^[12]

$$t_n = t_n^0 + \frac{\hbar}{\sqrt{2N\epsilon m}} \text{ (fm)}, \quad (10)$$

这里 t_n^0 是由小液滴模型算出的中子弥散度, \hbar 为普朗克常数, N 和 m 分别为中子数和中子质量, ϵ 为最后一个中子的分离能. 图 3 给出了在考虑弥散度随中子过剩增大后 $44\text{MeV} / \text{u}^{129}\text{Xe} + {}^{90}\text{Zr}$ 反应的计算结果. 由于弥散度增大, 核物质的分布空间变大, 在一定的碰撞参数下, 两核相互作用几率增大, 因此擦去的核子数变大, 同时激发能也增大.

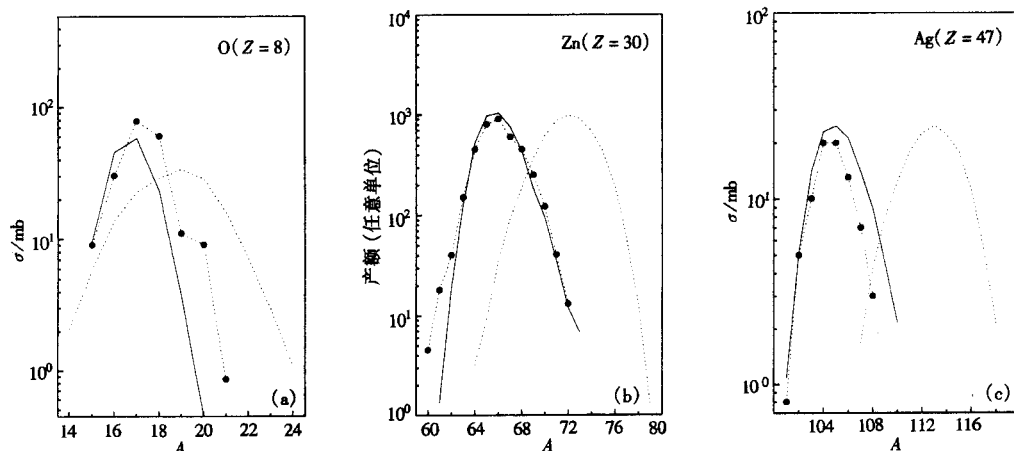


图 4 $44\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{181}\text{Ta}$ (a), $^{86}\text{Kr} + ^{27}\text{Al}$ (b), $^{129}\text{Xe} + ^{90}\text{Zr}$ (c)反
应中的同位素分布

·····●·····实验点^[3,13,14], ——蒸发后, ······蒸发前.

对各反应系统的计算结果表明,考虑介质效应后,反应总截面会下降 5% 左右;而用 (10) 式计算核子分布弥散度后,总截面会增加. 介质效应和弥散度的改变对同位素分布的峰位和形状也有一定影响. 初级碎块的蒸发对同位素分布的宽度和峰位有很大的影响. 通过对 44MeV/u Ar 、 Kr 、 Xe 3 个从轻到重的弹核引起的,从半中心到周边的核反应的同位素分布进行计算,得到了与实验数据较好的拟合. 从图 4 中可以看出,峰位和宽度都与实验符合得很好,截面大小也能较好的符合.

在计算介质中的核子-核子碰撞截面时,取 $\rho = 0.17\text{fm}^{-3}$. 计算中在产生初级碎块后耦合进 CASCADE 模型的蒸发修正程序. 在蒸发修正中,只考虑中子、质子和 α 粒子的蒸发,并由核的态密度计算各粒子的蒸发几率,通过蒸发将使初级碎块向稳定线靠近.

由上述分析可知,统计擦去模型能较好地拟合中能重离子碎裂反应产生的同位素分布,能反映碎裂过程的一些基本特征,对于中子、质子的关联也处理得较好. 同时,这个修正了的统计擦去模型已经可以拟合从轻到重不同质量炮弹引起的中能重离子碎裂反应产生的同位素分布,它对于研究中能重离子核反应机制,预言中能碎裂反应产生的奇异核次级束的强度具有一定的意义.

参 考 文 献

- 1 Tanihata I. Nucl. Phys., 1991, A522; 275c
- 2 Feng J, Shen W Q. Bulletin of National Natural Science Foundation of China (in Chinese), 1997, 4:249 (冯军, 沈文庆. 中国科学基金, 1997, 4: 249)
- 3 Feng J, Shen W Q et al. Phys. Rev., 1994, C50:2420
- 4 Dayras R, Pagano A, Barrette J et al. Nucl. Phys., 1986, A460:299
- 5 Bonaserna A, Toro M D, Gregoire C. Nucl. Phys., 1987, A463:653
- 6 Gaimard J J, Schmidt K H. Nucl. Phys., 1991, A531:709
- 7 Morrissey D J, Marsh W R, Otto R J et al. Phys. Rev., 1978, C18:1267
- 8 Feng J, Shen W Q, Zeng Y W et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 1991, 15(4):322 (冯军, 沈文庆, 曾跃武等. 高能物理与核物理, 1991, 15(4): 322)

- 9 Brohm T, Schmidt K H. Nucl. Phys., 1994, **A569**:821
- 10 Myers W D, Schmidt K H. Nucl. Phys., 1983, **A410**:61
- 11 Cai X Z, Feng J, Shen W Q et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 1998, **22**:(9)830
(蔡翔舟, 冯军, 沈文庆等. 高能物理与核物理, 1998, **22**:(9)830)
- 12 Feng J, Shen W Q, Ma Y G et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 1994, **18**(2):97
(冯军, 沈文庆, 马余刚等. 高能物理与核物理, 1994, **18**(2):97)
- 13 Guerreau D J et al. Nucl. Phys., 1986, **C4**:207
- 14 Bazin D, Guerreau D, Anne R et al. Nucl. Phys., 1990, **A515**:349

Statistical Abrasion Model Calculation of Isotope Distribution Produced by Intermediate Energy Heavy Ion Reaction*

Fang Deqing Feng Jun Shen Wenqing Cai Xiangzhou
Wang Jiansong Ye Wei Ma Yugang

(Shanghai Institute of Nuclear Research, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract The isotope distribution produced by the intermediate energy heavy ion reactions of induced by different projectiles have been calculated based on statistical abrasion model in which new inmedium nucleon-nucleon collision cross section and diffuseness of nuclear matter distribution are used. The effect of the medium and the diffuseness of the nuclear matter distribution has been investigated.

Key words isotope distribution, in-medium nucleon-nucleon collision cross section, diffuseness of nuclear matter distribution, statistical abrasion model

Received 1 April 1998

* Supported by the National Science Fund for Distinguished Young Scholar (19625513), and the National Natural Science Foundation of China (19675059), Shanghai Science and Technology Development Found (96XD1401)