

中能重离子碎裂反应的同位旋效应 及其消失*

方德清 沈文庆 冯 军 蔡翔舟 苏前敏 马余刚

(中国科学院上海原子核研究所 上海 201800)

摘要 用修正的统计擦去模型计算了中能重离子碎裂反应产生的同位素分布的同位旋效应,发现随着 $(Z_{\text{proj}} - Z)/Z_{\text{proj}}$ 的增大,碎裂反应的同位旋效应将逐渐减小直到消失.同时,研究表明碎裂反应的同位旋效应的消失主要是由擦去阶段的几何效应和随后的蒸发效应导致的.

关键词 同位旋效应 碎裂反应 同位素分布 统计擦去模型

1 引言

随着放射性次级束流装置在世界上许多国家的相继建成和运行,人们通过测量核反应总截面发现了中子晕和中子皮结构(如 ${}^6,8\text{He}$, ${}^{11}\text{Li}$, ${}^{11,14}\text{Be}$, ${}^{19}\text{C}$ 等核)^[1];质子晕和质子皮的存在与否也成为十分感兴趣的课题,这使得放射性核束物理成为当前核物理发展的主流之一.

放射性次级束流的产生和利用使核反应同位旋效应的研究成为可能,从而使同位旋效应的研究成为重离子核反应的前沿课题之一.人们对核反应中的各种物理量的同位旋相关性进行了一些探索^[2-5].研究表明在由奇异核引起的核反应中存在同位旋效应,但是在一定的条件下同位旋效应可能会消失.最近,Miller^[6]等人发现随着入射能从中能变到高能,多重碎裂的同位旋效应将消失.

实践表明中能重离子核碎裂反应是一种产生奇异核的十分有效和常用的方法,如何预言中能碎裂反应产生的次级束流强度就成为一个十分重要的课题.在中能区由于核子-核子碰撞和平均场的相互作用使得核反应机制变得复杂,从而增加了预言碎块产生截面的难度.由于碎裂反应产生的同位素分布是进行这些研究的重要基础之一,因此对中能重离子碎裂反应产生的同位素分布,特别是同位旋效应对碎裂反应产生的同位素分布的影响的研究具有重要意义^[7-9].

文献[9]用修正的统计擦去模型计算了60MeV/u O, Ar, Ca打Be靶发生碎裂反应产

1999-09-08 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(96DX14011)资助

生的同位素分布,探讨了同位旋效应对碎裂反应产生的同位素分布的影响. 为了加深对这一结果的了解,本文对碎裂反应的同位旋效应对同位素分布的影响进行了更深入的研究,同时对同位旋效应消失的原因进行了探讨.

2 计算模型

统计擦去模型是 Brohm 等^[10]发展的能较好地描述高能重离子碰撞的模型. 该模型区分中子和质子,对炮弹和靶核的重叠区的核子-核子碰撞作完全统计的处理. 该模型预言了与实验相符的由核子-核子碰撞的统计性引起的碎块的中子、质子比的涨落. 在模型中对核内中子和质子密度分布的分别处理,使得该模型能研究碎块的产生截面对炮弹的中子数和质子数的依赖关系,从而能探讨碎裂反应的同位旋效应. 统计擦去模型能成功地描述高能碎裂反应. 然而,由于介质效应和密度分布的影响,为了研究中能区的奇异核引起的反应,我们需要对统计擦去模型作一些修正^[11].

在中能重离子核反应中,由于核物质密度分布的影响,介质中的核子-核子碰撞截面不同于自由空间的核子-核子碰撞截面. 因此计算中采用了我们发展的介质中的核子-核子碰撞截面^[12].

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

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

其中 β 为炮弹的速度与光速之比, $\sigma_{nn(pp)}$ 是中子-中子(质子-质子)碰撞截面,而 σ_{np} 是中子-质子碰撞截面. ρ 是以 fm^{-3} 为单位核物质密度分布, E_{lab} 为实验室系中炮弹的入射能量(单位为 MeV).

在核反应中核物质表面密度分布对核子-核子相互作用有重要影响. 对稳定核小液滴模型预言的弥散度约为 2.4fm. 对于奇异核,由于分离能小的表面核子受到很弱的约束,从而使核物质密度分布具有长的尾巴. 相对论性的 Hartree 理论预言丰中子核的中子弥散度随着与中子分离能相关的中子过剩度的增加而增加^[13]. 考虑到上面这些因素,我们在计算中采用了与分离能相关的中子弥散度^[14]

$$t_N = 2.4 \text{ fm} + \frac{\hbar}{\sqrt{2Nme}}, \quad (3)$$

这里 N 和 m 分别为核内的中子数和核子的质量, \hbar 是普朗克常数. 通过比较最外层的单中子和双中子的分离能,取较小的作为 ϵ 的值(单位为 MeV). 这些修正使统计擦去模型能在很宽的能区范围内适用于丰中子或丰质子核引起的反应. 研究表明,修正后的模型能很好地拟合 44MeV/u ^{40}Ar , ^{86}Kr , ^{129}Xe 产生的同位素分布^[11]

3 碎裂反应的同位旋效应的消失

放射性束流的出现为核物理提供了一个新的同位旋维度,因此研究碎裂反应的同位旋效应对同位素分布的影响是十分有意义的. 通过统计擦去模型的计算,比较了 60MeV/u ^{16}O 和 ^{18}O , ^{36}Ar 和 ^{40}Ar , ^{40}Ca 和 ^{48}Ca 打 ^9Be 靶的碎裂反应产生的同位素分布^[9], ^{36}Ar 和 ^{40}Ar 的结果如图 1 所示. 通过比较发现,丰中子炮弹将使同位素分布向丰中子一侧移动. 但是随着产生的同位素远离炮弹,移动将逐渐减小直到消失.

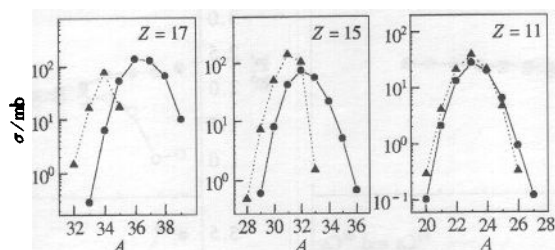


图 1 60MeV/u ^{36}Ar (三角形)和 ^{40}Ar (圆点)打 Be 靶的碎裂反应产生的同位素分布

为了对碎裂反应的同位旋效应作更深入的探讨,我们通过对由炮弹 $\text{O}, \text{Ar}, \text{Ca}$ 产生的同位素分布进行高斯拟合,然后提取出它们的峰位和宽度. 同位素分布的峰位与稳定同位核素的质量差 $\Delta A = A_{\text{peak}} - A_{\beta}$ 和宽度作为 $(Z_{\text{proj}} - Z)/Z_{\text{proj}}$ 的函数如图 2 所示. 其中 A_{peak} 是电荷数为 Z 的同位素分布的峰位, A_{β} 是由 $Z = A_{\beta}/(1.98 + 0.0155 * A^{2/3})$ 得到的稳定同位核素的质量数^[15]. Z 和 Z_{proj} 分别为产生的同位素和炮弹地核电荷数. 在一定意义上, $(Z_{\text{proj}} - Z)/Z_{\text{proj}}$ 可以看作是与核反应时间、耗散能量、激发能或碰撞参数(炮弹与靶相重叠的程度)相关的表征核反应的强烈程度的物理量. 从图 2 可以看出,随着炮弹中子丰度的增加 ΔA 也将增加,但随着 $(Z_{\text{proj}} - Z)/Z_{\text{proj}}$ 从 0 变到 0.5, ΔA 逐渐变为零;当 $(Z_{\text{proj}} - Z)/Z_{\text{proj}}$ 大于 0.5 时, ΔA 几乎为零,即同位素分布的峰位在稳定线上. 对于同位素分布的宽度,随炮弹中子丰度的增加它也增加,当 $(Z_{\text{proj}} - Z)/Z_{\text{proj}}$ 大于 0.5 时,宽度几乎变为常数(约为 1.7). 对三种不同的炮弹都有同样的结论. 这表明随着 $(Z_{\text{proj}} - Z)/Z_{\text{proj}}$ 的增加或核反应的激烈程度增强,炮弹的碎裂反应产生的同位旋效应对同位素分布的影响将减小. 而当 $(Z_{\text{proj}} - Z)/Z_{\text{proj}}$ 大于 0.5 时,不同的炮弹的碎裂反应产生的同位素分布几乎没有差别,即炮弹碎裂反应的同位旋效应对同位素分布的影响将消失.

在统计擦去模型中把核反应分为两个阶段. 首先是碎裂阶段,两核相碰撞,通过重叠区的核子-核子相互作用产生出具有一定激发能的初级碎块;然后是蒸发阶段,被激发的初级碎块通过蒸发粒子得到最终产物. 为了解释碎裂反应的同位旋效应消失的原因,我们同时给出了蒸发前和蒸发后碎裂反应产生的同位素分布的归一化峰位差 $\Delta A_{\text{peak}}/\Delta A_{\text{proj}}$ 与 $(Z_{\text{proj}} - Z)/Z_{\text{proj}}$ 的关系,其中 ΔA_{proj} 为 Z 相同的两种同位素炮弹的质量数差, ΔA_{peak} 为不同的同位素炮弹的碎裂反应产生的同位素分布的峰位差,结果如图 3 所示. 从图可以看

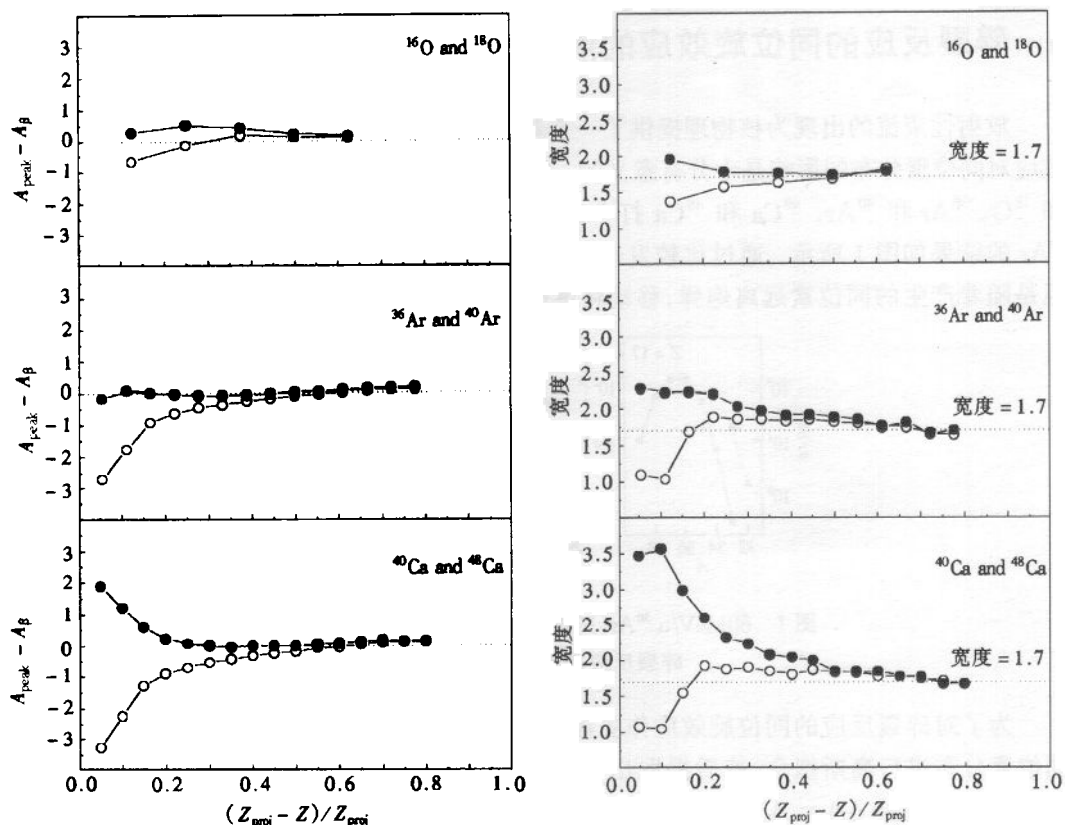


图 2 碎裂反应产生的同位素分布的峰位与稳定同位核素的质量差 $A_{\text{peak}} - A_{\beta}$ 和宽度与 $(Z_{\text{proj}} - Z)/Z_{\text{proj}}$ 的关系

● 丰中子炮弹 ^{18}O , ^{40}Ar , ^{48}Ca 的结果, ○ ^{16}O , ^{36}Ar , ^{40}Ca 的结果.

出,随着 $(Z_{\text{proj}} - Z)/Z_{\text{proj}}$ 的增加,蒸发后的 $\Delta A_{\text{peak}}/\Delta A_{\text{proj}}$ 逐渐减小直到为零,这是碎裂反应的同位旋效应逐渐消失的表现;同时,随着 $(Z_{\text{proj}} - Z)/Z_{\text{proj}}$ 的增加,蒸发前的 $\Delta A_{\text{peak}}/\Delta A_{\text{proj}}$ 也逐渐减小,表明蒸发前碎裂反应的同位旋效应也有减小的趋势,这是擦去阶段的几何效应造成的. 这说明随着 $(Z_{\text{proj}} - Z)/Z_{\text{proj}}$ 的增加,擦去阶段的几何效应和随后的蒸发效应同时对碎裂反应的同位旋效应逐渐消失起作用. 对周边碰撞,核反应主要取决于核表面的核子-核子相互作用. 在核表面,核子受到较弱的约束. 对不同的同位素炮弹,核表面中子和质子的密度不同,这使得炮弹碎裂反应的同位旋效应对同位素分布有影响. 随着 $(Z_{\text{proj}} - Z)/Z_{\text{proj}}$ 的增加,一般说来碰撞参数将减小. 而对较中心的碰撞,核反应主要取决于核中心的核子-核子相互作用. 在核中心,核子受到较强的约束,不同同位素炮弹的中子和质子的密度相差较小,因此同位旋效应将变小. 同时,对较中心的碰撞,初级碎块的激发能将较大,从而使丰中子的碎块蒸发掉更多的中子,因此同位旋效应将会被蒸发过程抹去.

这些结论对于如何选择合适的炮弹来产生所需的丰中子奇异核将有一定指导意义.

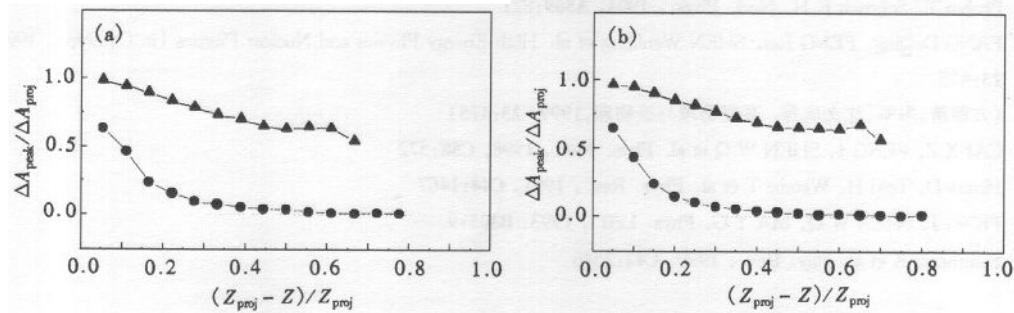


图 3 碎裂反应产生的同位素分布的归一化峰位差 $\Delta A_{\text{peak}}/\Delta A_{\text{proj}}$ 与 $(Z_{\text{proj}} - Z)/Z_{\text{proj}}$ 的关系

(a) ^{36}Ar 和 ^{40}Ar ; (b) ^{40}Ca 和 ^{48}Ca .

▲ 蒸发前的结果, ● 蒸发后的结果.

所选的丰中子炮弹最好离所需产生的丰中子奇异核比较近,因为随着炮弹与产生的核的距离的增加,丰中子炮弹与稳定炮弹的碎裂反应产生奇异核的产生截面的差别变小.但是必须指出中能重离子核反应产生奇异核的机制是很复杂的,除了炮弹碎裂反应外,多核子转移和多重碎裂等反应机制都可能产生奇异核.特别是质量和电荷数远离炮弹的产物很可能主要是由多重碎裂产生的,它在中能下有强烈的同位旋效应,使丰中子炮弹能产生大得多的丰中子奇异核的截面.

4 小结

在统计擦去模型中考虑了核子-核子相互作用截面的介质效应和与分离能相关的中子分布弥散度.修正后的模型能适用于中能奇异核引起的碎裂反应,因此能研究碎裂反应的同位旋效应.

利用修正的统计擦去模型,研究了 O, Ar, Ca 炮弹打 Be 靶的碎裂反应产生的同位素分布的同位旋效应.结果表明,随着产生的同位素分布远离炮弹,碎裂反应的同位旋效应将逐渐减小直到消失.同时研究显示,碎裂反应的同位旋效应的消失是由擦去阶段的几何效应和随后的蒸发效应引起的.

参考文献 (References)

- 1 Tanihata I, Harnagaki H, Hashimoto O et al. Phys. Rev. Lett., 1985, **55**:2676
- 2 LI B A, Ko C M, Baur W. International Journal of Modern Physics, 1998, **E7**:147
- 3 Kortemeyer G, Baur W, Kunde G J. Phys. Rev., 1997, **C55**:2730
- 4 CHEN L W, ZHANG F S, JIN G M. Phys. Rev., 1998, **C58**:2283
- 5 Kumar S, Sharma M K, Puri P K et al. Phys. Rev., 1998, **C58**:3494
- 6 Miller M L, Bjarki O, Magestro D J et al. Phys. Rev. Lett., 1999, **82**:1399
- 7 Bazin D, Guerreau D, Anne R et al. Nucl. Phys., 1990, **A515**:349
- 8 FENG J, SHEN W Q, MA Y G et al. Phys. Rev., 1994, **C50**:2420
- 9 FANG D Q, SHEN W Q, FENG J et al. Isospin Effect of Fragmentation Reaction on the Isotopic Distribution. Produced in Intermediate Energy Heavy Ion Collisions, Accepted by Chin. Phys. Lett., to be published

- 10 Brohm T, Schmidt K H. Nucl. Phys., 1994, **A569**:821
- 11 FANG DeQing, FENG Jun, SHEN WenQing et al. High Energy Physics and Nuclear Physics (in Chinese), 1999, **23**:475
(方德清,冯军,沈文庆等. 高能物理与核物理,1999, **23**:475)
- 12 CAI X Z, FENG J, SHEN W Q et al. Phys. Rev., 1998, **C58**:572
- 13 Hirata D, Toki H, Watabe T et al. Phys. Rev., 1991, **C44**:1467
- 14 FENG J, SHEN W Q, MA Y G. Phys. Lett., 1993, **B305**:9
- 15 Summerer K et al. Phys. Rev., 1990, **C42**:2546

Isospin Effect of Fragmentation Reaction and Its Disappearance in Intermediate Energy Heavy Ion Collisions*

FANG DeQing SHEN WenQing FENG Jun CAI XiangZhou
SU QianMin MA YuGang

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

Abstract Isospin effect of fragmentation reaction on isotopic distribution was investigated by a modified statistical abrasion – ablation model. It is shown that the isotopic distribution shifts toward the neutron rich side for neutron rich projectile, but this isospin effect will decrease and disappear at last when $(Z_{\text{proj}} - Z)/Z_{\text{proj}}$ closes to 0.5 and becomes larger than 0.5 independent of the reaction systems, where Z and Z_{proj} are the atomic numbers of the produced isotope and projectile, respectively. It is pointed out that the disappearance of isospin effect comes mainly from the geometry effect in abrasion stage and the evaporation process later.

Key words isospin effect, fragmentation reaction, isotopic distribution, statistical abrasion – ablation model

Received 8 September 1999

* Supported by National Science Fund for Distinguished Young Scholar (19625513), NSFC (19675059) and Shanghai Science and Technology Development Fund (96DX14011)