

140 A MeV $^{40,48}\text{Ca}$ 和 $^{58,64}\text{Ni}$ 炮弹碎裂反应 产物的统计擦碎模型计算*

魏慧玲 马春旺[†]

(河南师范大学物理学系, 新乡 453007)

(2009 年 5 月 4 日收到; 2009 年 11 月 21 日收到修改稿)

用统计擦碎模型计算了 140 A MeV $^{40,48}\text{Ca} + ^9\text{Be}$ 和 $^{58,64}\text{Ni} + ^9\text{Be}$ 弹核碎裂反应产物的截面. 通过对碎片截面计算结果和实验测量结果比较发现, 采用自由空间的核子-核子反应截面计算时, 对非中心反应产物的截面拟合很好, 而对中心反应产物的截面有较大高估, 而采用饱和和密度相关的核子-核子反应截面计算时, 对非周边反应产物的截面拟合较好, 而对周边反应产物的截面有一定程度的低估. 在统计擦碎模型中, 对核子-核子反应截面进行细致的介质密度关联, 可能会改进计算值与实验值的符合程度.

关键词: 统计擦碎模型, 炮弹碎裂反应, 丰中子核

PACC: 2570, 2570N

1. 引 言

由于通过炮弹碎裂反应 (projectile fragmentation) 可以产生自然界不存在的极度丰中子和极度丰质子的原子核素, 世界上主要的放射性核束 (radioactive nuclear beams, RNB) 装置都利用炮弹碎裂反应产生丰中子核素和丰质子核素束流. 最新建造和已经完成升级的新一代 RNB 装置将为核物理研究提供种类更多和品质更好的束流, 这将大大地促进人们对极度丰中子核和极度丰质子核 (统称为不对称核物质) 的实验和理论研究, 并使对同位旋现象的理论和实验研究变得更加热门^[1]. 通过丰中子核炮弹碎裂反应产物, 不仅可以研究不对称核物质参与核反应的内在机理, 更能提取不对称核物质的结构信息^[2-10].

在 2000 至 2005 年期间, 美国密歇根大学 (Michigan State University) NSCL 实验室测量了 140 A MeV $^{40,48}\text{Ca} + ^9\text{Be}/^{181}\text{Ta}$ 和 $^{58,64}\text{Ni} + ^9\text{Be}/^{181}\text{Ta}$ 反应产物的截面, 并利用该实验测量开展了多方面的研究^[11,12]. 我们利用统计擦碎模型 (the statistical abrasion-ablation model, SAA) 对 140 A

MeV $^{40,48}\text{Ca} + ^9\text{Be}$ 和 $^{58,64}\text{Ni} + ^9\text{Be}$ 实验数据进行了模拟计算, 发现除了 EPAX 参数化公式、HIPSE 模型 (the macroscopic-microscopic heavy ion phase space exploration model) 和 AMD 模型 (the fully microscopic antisymmetrized molecular dynamics model) 以外^[11,12], SAA 模型也能较好地预言炮弹碎片反应产生碎片的截面^[13]. 在文献 [13] 中, 通过 $^{40,48}\text{Ca}$ 和 $^{58,64}\text{Ni}$ 中能炮弹碎裂反应产物的截面分布, 研究了丰中子核中能炮弹碎裂反应产物中的同位旋依赖, 并尝试寻找同位旋效应与丰中子核内中子密度分布之间的关联. 本文将对用 SAA 模型计算 140 A MeV $^{40,48}\text{Ca} + ^9\text{Be}$ 和 $^{58,64}\text{Ni} + ^9\text{Be}$ 反应产生碎片的截面与实验测量结果^[12] 进行比较, 并指出 SAA 模型可能改进的方面.

2. SAA 模型简介

SAA 模型是 Brohm 和 Schmidt 发展起来的用来描述高能核反应周边反应产物的模型^[14]. Fang 等人对 SAA 模型进行了改进, 使 SAA 模型能够用于描述中能弹核碎裂反应^[15-18]. 本文仅对 SAA 模型进行简单介绍, 模型详细的内容可以参考文献 [14-18].

* 国家自然科学基金 (批准号: 10905017, 10775168, 10775039), 上海科学技术发展基金 (批准号: 06QA14062), 河南省教育厅“2010 年河南省高校科技创新团队”基金 (批准号: 2010IRTSTHN002), 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2007CB815004) 资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: machunwang@126.com

在 SAA 模型中,碰撞中的原子核被看成许多与束流方向平行的小管子. 在无穷小近似下,炮弹核中的一个小管子在碰撞参数 b 位置中子(质子)的穿透概率为

$$t_k(s-b) = \exp\{-[D_n^T(s-b)\sigma_{nk} + D_n^P(s-b)\sigma_{pk}]\}, \quad (1)$$

D^T 为靶核的沿束流方向的核密度分布, $\sigma_{k'k}$ 是核子-核子反应截面($k', k = n$ 表示中子, $k', k = p$ 表示质子). 无穷小近似下,一个小管子在碰撞参数 b 处平均擦掉的质量数为

$$\langle \Delta A(b) \rangle = \int d^2s D_n^T(s) [1 - t_n(s-b)] + \int d^2s D_p^P(s) [1 - t_p(s-b)]. \quad (2)$$

某个特定的同位素产额由下式计算:

$$\sigma(\Delta N, \Delta Z) = \int d^2b P(\Delta N, b) P(\Delta Z, b). \quad (3)$$

$P(\Delta N, b)$ 和 $P(\Delta Z, b)$ 分别是在碰撞参数 b 擦掉中子数和质子数的概率分布,计算采用了文献[23]中的核子-核子反应截面参数化公式,炮弹核和靶核内

的质子和中子密度分布采用 Fermi 型分布.

炮弹核和靶核被擦掉核子后,通过向外发射核子或者能量的方式进行退激发达到稳定,最终获得可以和实验测量结果相比较的计算结果. 可以看出,不考虑退激发因素, SAA 模型中决定碎片产额的主要因素是炮弹核和靶核的密度分布以及核子-核子反应截面 σ_{NN} .

3. 结果分析和讨论

在文献[13]中,用 SAA 模型计算了 140 A MeV^{40,48}Ca + ⁹Be 和^{58,64}Ni + ⁹Be 反应产生碎片的截面, SAA 模型的计算结果和实验测量结果符合较好. 这里分析 SAA 模型计算结果在反应的不同部位(周边反应,中心反应等)与实验测量结果的符合程度. 为了方便比较,定义 $\chi = (\sigma_C - \sigma_E)/\sigma_E$ 来描述计算值与实验数据的符合程度,其中 σ_C 是 SAA 模型的计算结果, σ_E 是实验测量结果,图 1 中画出了 χ 按照碎片质量数的分布.

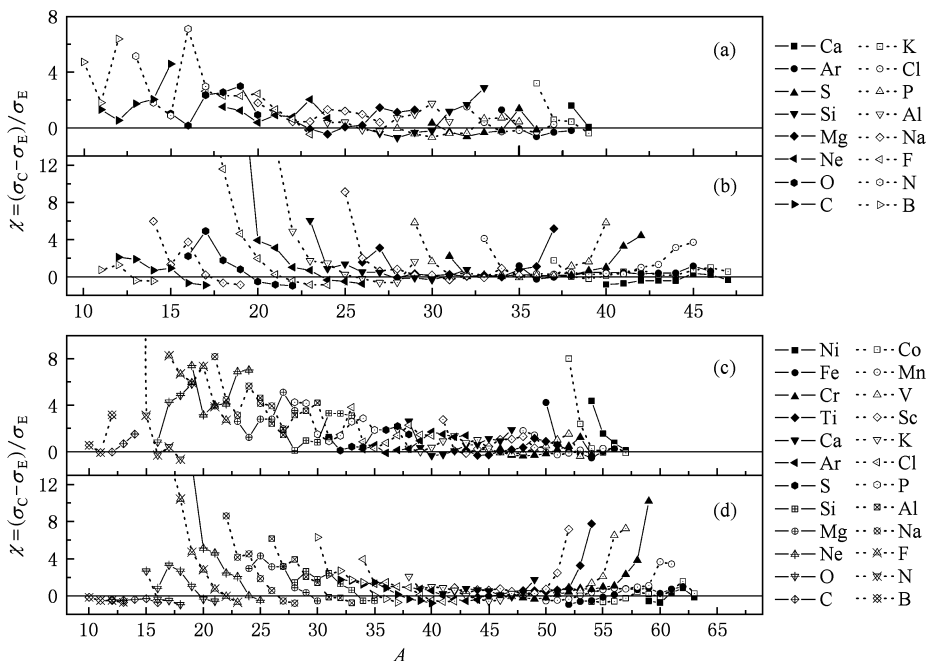


图 1 140 A MeV^{40,48}Ca + ⁹Be 和^{58,64}Ni + ⁹Be 产物碎片截面的 SAA 模型计算值与实验测量值的比较 (Y 轴为 $\chi = (\sigma_C - \sigma_E)/\sigma_E$, X 轴是碎片的质量数) (a) 为⁴⁰Ca + ⁹Be 反应产生碎片的 SAA 模型计算值与实验值的比较; (b) 为⁴⁸Ca + ⁹Be 反应产生碎片的 SAA 模型计算值与实验值的比较; (c) 为⁵⁸Ni + ⁹Be 反应产生碎片的 SAA 模型计算值与实验值的比较; (d) 为⁶⁴Ni + ⁹Be 反应产生碎片的 SAA 模型计算值与实验值的比较

一般情况下,质量较大的类弹碎片是周边反应

的产物,而轻质量的类弹碎片是中心反应的产物,

碎片的质量数从大到小的变化反应从周边反应到中心反应剧烈程度的变换. 从图 1 可以看出, 对于对称核 ^{40}Ca 和 ^{58}Ni , SAA 模型计算的周边反应或半中心反应产物(这里我们取碎片质量数大于炮弹核质量数的一半, 比如, 对于 ^{40}Ca , 碎片质量数 $A_{\text{Frag}} > 20$)的结果基本上都落在实验值一倍范围以内. 而大部分 ^{40}Ca 和 ^{58}Ni 中心反应产物($A_{\text{Frag}} < 0.5 A_{\text{Proj}}$) SAA 模型计算的结果则比实验测量结果大 2 倍以上, 与实验测量结果存在较大的差别. 对丰中子炮弹核 ^{48}Ca 和 ^{64}Ni 来说, 它们周边反应产物截面的 SAA 模型计算结果和实验测量结果相比, 比对称炮弹核碎裂反应产生的碎片截面更多地落在实验测量结果 2 倍范围以内, 显示出 SAA 模型能够较好地与实验测量结果相符合. 尤其应该指出的是, 从 ^{48}Ca 和 ^{64}Ni 炮弹核擦掉 3 个质子或者更少质子的同位素截面的 SAA 模型计算结果与实验结果相差很小. 在中心反应区域, ^{48}Ca 和 ^{64}Ni 产物的截面和物质对称炮弹核 ^{40}Ca 和 ^{58}Ni 相似, 有较多的高估, 但有更多碎片的截面计算值和实验符合较好. 同时也需要指出, 对丰中子炮弹核 ^{48}Ca 和 ^{64}Ni , 周边反应产物中少数极度丰中子同位素截面的 SAA 模型计算结果与实验测量结果相比有较大程度的高估.

在介绍 SAA 模型时我们指出, SAA 模型中决定碎片截面的主要因素是炮弹核和靶核的密度分布以及核子-核子反应截面 σ_{NN} . 利用文献[23]中的 σ_{NN} 参数化公式, 可以计算出 $\rho = 0$ 时自由空间的 $\sigma_{\text{nn,pp}} = 23.2598 \text{ mb}$, $\sigma_{\text{np}} = 50.9955 \text{ mb}$. 随着 ρ 增大 σ_{NN} 被压低, 即存在 σ_{NN} 的介质效应, 记为 σ_{NN}^* . $\rho = 0.17 \text{ fm}^{-3}$ 时 $\sigma_{\text{nn,pp}}^* = 17.3747 \text{ mb}$, $\sigma_{\text{np}}^* = 38.9706 \text{ mb}$.

$\rho = 0.17 \text{ fm}^{-3}$ 处的 σ_{NN}^* 与自由空间的 σ_{NN} 相比被压低了 1/4 左右. 参与中心反应的物质密度比参与周边反应的物质密度大的多, 计算中全局采用自由空间的 σ_{NN} 参数将造成 SAA 模型对碎片截面的理论高估, 正如图 1 所示, 大部分轻质量碎片截面的计算值有较大程度地高估. 常用的理论方法, 也有采用饱和密度相关的 σ_{NN}^* 计算的工作^[23]. 为了对采用饱和密度相关的 σ_{NN}^* 和自由空间密度相关的 σ_{NN} 对碎片的产生截面进行比较, 我们取 $\rho = 0.17 \text{ fm}^{-3}$ 时的 σ_{NN}^* 对 140 A MeV $^{40,48}\text{Ca} + ^9\text{Be}$ 和 $^{58,64}\text{Ni} + ^9\text{Be}$ 反应的碎片的截面进行了计算. 定义了 $\chi^2 = (\sigma_c - \sigma_e)^2 / \sigma_e^2$ 来比较采用两种核子-核子反应截面对实验数据的符合程度.

表 1 列出来不同质量碎片截面的计算值与实验值的符合程度. 按照碎片与炮弹核质量数的比值, 我们对反应区域进行了大致划分. 表 1 中所列的值为一定碎片质量范围内计算值与测量值的 χ^2 之和. 从表 1 中可以看出, 当碎片的质量数较小时, 采用饱和密度相关的 σ_{NN}^* 对实验值的符合较好, 而当碎片的质量数接近炮弹核的质量数时, 采用自由空间的 σ_{NN} 对实验值的符合较好. 而无论采用自由空间的 σ_{NN} 还是采用饱和密度相关 σ_{NN}^* , 中间质量数碎片的截面计算值与实验值符合大致相当, 说明该部分碎片的产额对核子-核子反应截面的依赖较小. 换言之, 全局采用自由空间的 σ_{NN} 对周边反应产生碎片的截面描述较好, 但是会对中心反应产物的截面造成较大的高估. 全局采用饱和密度相关的 σ_{NN}^* 对中心反应产物的碎片的截面符合较好, 却会导致对周边反应产物的截面有较大的低估. 所以 SAA 模型

表 1 分别采用 $\rho = 0$ 时的 σ_{NN} 和 $\rho = 0.17 \text{ fm}^{-3}$ 时的 σ_{NN}^* 对碎片截面的计算值与实验值的符合程度比较(A_f/A_p 表示碎片的质量数和炮弹核质量数的比值)

A_f/A_p	^{40}Ca		^{48}Ca		^{58}Ni		^{64}Ni		
	$\rho = 0$	$\rho = 0.17$	$\rho = 0$	$\rho = 0.17$	$\rho = 0$	$\rho = 0.17$	$\rho = 0$	$\rho = 0.17$	
					0.5—0.6	10.351	2.054	1.311	5.25
					0.6—0.65	5047.99	260.47	252.37	8.247
0.6—0.7	97.83	38.45	68.83	18.99	0.65—0.7	278.188	27.47	398.11	14.468
0.7—0.75	80.817	51.848	1218.8	620.67	0.7—0.75	352.038	97.365	201.72	25.43
0.75—0.8	61.72	48.52	286.35	205.22	0.75—0.8	181.614	107.05	119.26	47.03
0.8—0.85	14.121	14.26	142.21	149.12	0.8—0.85	97.011	93.398	44.71	40.94
0.85—0.9	8.724	7.825	27.77	33.79	0.85—0.9	51.205	61.166	6.859	7.365
0.9—0.95	22.39	25.74	86.64	141.18	0.9—0.95	21.81	26.19	157.43	204.15
0.95—1	16.28	34.18	51.71	60.17	0.95—1	117.16	128.46	263.626	369.806

中,采用全局 σ_{NN}^* 将不能兼顾对周边反应和中心反应描述的准确度. 把 σ_{NN}^* 和参与反应区域介质的密度进行细致关联可能会改进 SAA 模型对丰中子核炮弹碎裂反应产物截面的预言程度.

4. 结 论

本文分析了 140 A MeV^{40,48}Ca + ⁹Be 和^{58,64}Ni

+⁹Be 利用 SAA 模型计算结果与实验测量结果的符合程度. 利用自由空间的核子-核子反应截面计算的周边反应产生碎片的截面与实验测量的结果符合较好,而中心反应产生的碎片的截面与实验测量值比较有较大的高估,这是由于介质密度对核子-核子反应截面的压低产生的. 计算时,把核子-核子反应截面与反应区域介质的密度进行细致的关联是改进 SAA 模型的可能方法之一.

- [1] Li B A, Chen L W, Ko C M 2008 *Phys. Rep.* **464** 113
- [2] Ma Y G 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 654 (in Chinese) [马余刚 2000 物理学报 **49** 654]
- [3] Tsang M B, Friedman W A, Gelbke C K, Lynch W G, Verdel G, Xu H S 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 5023
- [4] Ma Y G, Natowitz J B, Wada R, Hagel K, Wang J, Keutgen T, Majka Z, Murray M, Qin L, Smith P, Alfaro R, Cibor J, Cinausero M, Masri Y El, Fabris D, Fioretto E, Keksis A, Lunardon M, Makeev A, Marie N, Martin E, Martinez-Davalos A, Menchaca-Rocha A, Nebbia G, Prete G, Rizzi V, Ruangma A, Shetty D V, Souliotis G, Staszal P, Veselsky M, Viesti G, Winchester E M, Yennello S J 2005 *Phys. Rev. C* **71** 054606
- [5] Ma Y G, Yan T Z, Cai X Z, Chen J G, Fang D Q, Guo W, Liu G H, Ma C W, Ma E J, Shen W Q, Shi Y, Su Q M, Tian W D, Wang H W, Wang K 2007 *Nucl. Phys. A* **787** 611c
- [6] Hauger J A, Warren P, Albergo S, Bieser F, Brady F P, Caccia Z, Cebra D A, Chacon A D, Chance J L, Choi Y, Costa S, Elliott J B, Gilkes M L, Hirsch A S, Hjort E L, Insolia A, Justice M, Keane D, Kintner J C, Lindenstruth V, Lisa M A, Matis H S, McMahan M, McParland C, Müller W F J, Olson D L, Partlan M D, Porile N T, Potenza R, Rai G, Rasmussen J, Ritter H G, Romanski J, Romero J L, Russo G V, Sann H, Scharenberg R P, Scott A, Shao Y, Srivastava B K, Symons T J M, Tincknell M, Tuvé C, Wang S, Wieman H H, Wienold T, Wolf K (EOS Collaboration) 1998 *Phys. Rev. C* **57** 764
- [7] Liu J Y, Guo W J, Zuo W, Li X G 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1517 (in Chinese) [刘建业、郭文军、左 维、李希国 2009 物理学报 **58** 1517]
- [8] Li X G, Hao H F, Liu J Y, Zuo W 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2136 (in Chinese) [刘建业、郝焕锋、左 维、李希国 2008 物理学报 **57** 2136]
- [9] Chen L W, Li B A, Yong G C, Zuo W 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5116 (in Chinese) [陈列文、李宝安、雍高产、左 维 2006 物理学报 **55** 5166]
- [10] Li W F, Xu H S, Zhang F S, Li J F, Chen L W 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1700 (in Chinese) [李文飞、徐珊珊、张丰收、李剑锋、陈列文 2002 物理学报 **51** 1700]
- [11] Mocko M, Tsang M B, Andronenko L, Andronenko M, Delaunay F, Famiano M, Ginter T, Henzl V, Henzlová D, Hua H, Lukyanov S, Lynch W G, Rogers A M, Steiner M, Stolz A, Tarasov O, Goethem M J, Verde G, Wallace W S, Zalessov A 2006 *Phys. Rev. C* **74** 054612
- [12] Mocko M, Tsang M B, Lacroix D, Ono A, Danielewicz P, Lynch W G, Charity R J 2008 *Phys. Rev. C* **78** 024612
- [13] Ma C W, Wei H L, Wang J Y, Liu G J, Fu Y, Fang D Q, Tian W D, Cai X Z, Wang H W, Ma Y G 2009 *Phys. Rev. C* **79** 034606
- [14] Brohm T, Schmidt K H 1994 *Nucl. Phys. A* **569** 821
- [15] Fang D Q, Shen W Q, Feng J, Cai X Z, Wang J S, Su Q M, Ma Y G, Zhu Y T, Li S L, Wu H Y, Gou Q B, Jin G M, Zhan W L, Guo Z Y, Xiao G Q 2000 *Phys. Rev. C* **61** 044610
- [16] Fang D Q, Shen W Q, Feng J, Cai X Z, Wang J S, Su Q M, Ma Y G, Zhu Y T, Li S L, Wu H Y, Gou Q B, Jin G M, Zhan W L, Guo Z Y, Xiao G Q 2000 *Chin. Phys. Lett.* **17** 267
- [17] Zhong C, Fang D Q, Cai X Z, Shen W Q, Zhang H Y, Wei Y B, Ma Y G 2003 *Chin. Phys. C* **27** 39
- [18] Ma C W, Wei H L, Wang J Y, Liu G J 2009 *Chin. Phys. B* **18** 4781
- [19] Fang D Q, Shen W Q, Feng J, Cai X Z, Ma Y G, Zhang H Y, Hu P Y, Zhan W L, Guo Z Y, Xiao G Q, Li J X, Wang M, Wang J F, Ning Z J, Wang J Q, Wang J S, Wang Q J, Chen Z Q 2001 *Eur. Phys. J. A* **10** 381
- [20] Ma C W, Fu Y, Fang D Q, Ma Y G, Cai X Z, Guo W, Tian W D, Wang H W 2008 *Chin. Phys. B* **17** 1216
- [21] Ma C W, Fu Y, Fang D Q, Ma Y G, Cai X Z, Tian W D, Wang K, Zhong C 2008 *Inter. J. Mod. Phys. E* **17** 1669
- [22] Zhong C, Ma Y G, Fang D Q, Zhong C, Ma Y G, Fang D Q, Cai X Z, Chen J G, Shen W Q, Tian W D, Wang K, Wei Y B, Chen J H, Guo W, Ma C W, Ma G L, Su Q M, Yan T Z, Zuo J X 2006 *Chin. Phys.* **15** 1481
- [23] Cai X Z, Fen J, Shen W Q, Ma Y G, Wang J S, Ye W 1998 *Phys. Rev. C* **58** 572

The calculation of the 140 A MeV $^{40,48}\text{Ca}$ and $^{58,64}\text{Ni}$ projectile fragmentation by the statistical abrasion-ablation model*

Wei Hui-Ling Ma Chun-Wang[†]

(Department of Physics, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China)

(Received 4 May 2009; revised manuscript received 21 November 2009)

Abstract

The cross sections of fragments produced in the 140 A MeV $^{40,48}\text{Ca} + {}^9\text{Be}$ and $^{58,64}\text{Ni} + {}^9\text{Be}$ reactions have been calculated by the statistical abrasion-ablation model. The calculated cross sections of fragments are compared to the experimental results. Adopting the free space nucleus-nucleus cross sections in the calculations, the cross sections of fragments produced in the non-central collisions are well reproduced, but the cross sections of fragments produced in the central collisions are overestimated. If adopting the saturate density related nucleus-nucleus cross sections in the calculation, the cross sections of fragments produced in the non-peripheral collisions are well reproduced, but the cross sections of fragments produced in the peripheral collision are underestimated. It's suggested that the cross sections of fragments will be better reproduced by the SAA model if the nucleus-nucleus cross sections are related to the density distributions of projectile and target nuclei precisely.

Keywords: the statistical abrasion-ablation model, projectile fragmentation, neutron-rich nucleus

PACC: 2570, 2570N

* Project supported by the National Science Foundation of China (Grant Nos. 10905017, 10775168, 10775039), the Shanghai Development Foundation for Science and Technology (Grant No. 06QA14062), Program for Innovative Research Team (in Science and Technology) in University of Henan Province, China (Grant No. 2010IRTSTHN002), the State Key Program of Basic Research of China (Grant No. 2007CB815004).

[†] Corresponding author. E-mail: machunwang@126.com