

# 同位旋相关量探测重离子碰撞 趋平衡及对称能<sup>\*</sup>

李庆峰<sup>1</sup> 李祝霞<sup>1-3</sup>

1 (中国原子能科学研究院 北京 102413)

2 (兰州重离子加速器国家实验室理论核物理中心 兰州 730000)

3 (中国科学院理论物理研究所 北京 100080)

**摘要** 用 IQMD 模型分析了由<sup>96</sup>Ru 和<sup>96</sup>Zr 构成的质量对称、同位旋不对称的一组中能核反应,寻求对对称势强度的敏感量和研究反应最终是否达到平衡的问题.研究表明中子-质子差快度分布在弹或靶快度区对对称势强度敏感,且越丰中子的核系统越敏感.中子-质子差快度分布还表明能量为 400MeV/u 时达到的平衡程度要比 100MeV/u 时的高.出射的核子、轻带电粒子和中等质量碎片的  $N/Z$  显示 IMF 的出射有记忆效应.随着入射能量由 100MeV/u 增加到 400MeV/u,IMF 的  $N/Z$  有明显下降,这是由于随入射能量增加使 IMF 中同位素的分布发生变化所致.

**关键词** 同位旋 对称势强度 反应平衡性

## 1 引言

在理论和实验研究中核的多重碎裂现象越来越引起人们的广泛关注,这是因为人们相信从中可以获知核物质性质和核反应动力学等方面的信息.随着放射性核束在多个实验室的建立,人们已经有条件研究同位旋非常不对称核系统的多重碎裂问题.对于一个同位旋不对称的核系统,需要一个双成份(质子、中子)体系来描述,从而有可能包含更为丰富的核物质性质和核反应的动力学信息.一方面,当人们通过研究中能和更高能量重离子反应获取有关核物质性质时,面临一个基本和重要的问题是系统是否已达到平衡.这个问题已经被研究了很多年,但仍有许多问题需要更深入地研究.其中一个特别感兴趣的话题就是多重碎裂是一个统计出射过程还是一个动力学过程<sup>[1-3]</sup>.为了搞清这个问题,FOPI/GSI 研究组<sup>[4]</sup>最近构造了一个称为“混合实验”的方法,即用质量数均为 96 的 Ru 和 Zr 分别作弹(入射能量为 400MeV/u)和靶从而组成 4 个反应系统:<sup>96</sup>Ru + <sup>96</sup>Ru, <sup>96</sup>Ru +

2001-10-26 收稿

\* 国家自然科学基金(19975073,10175093),核工业科学基金,国家重点基础研究发展规划项目(G20000774)资助

$^{96}\text{Zr}$ ,  $^{96}\text{Zr} + ^{96}\text{Ru}$  和  $^{96}\text{Zr} + ^{96}\text{Zr}$ . 与最稳定的同位素  $^{102}\text{Ru}$  和  $^{90}\text{Zr}$  相比,  $^{96}\text{Ru}$  缺 6 个中子, 而  $^{96}\text{Zr}$  多 6 个中子, 这 4 个系统的中子/质子比分别为 1.18, 1.28, 1.28, 1.4. 为了标度不平衡程度, 他们定义了一个量  $R_z = (2 \times Z - Z^{Zr} - Z^{Ru}) / (Z^{Zr} - Z^{Ru})$ . 他们首先测量  $^{96}\text{Zr} + ^{96}\text{Zr}$  和  $^{96}\text{Ru} + ^{96}\text{Ru}$  反应的质子及氦核数  $Z^{Zr}$  和  $Z^{Ru}$ , 然后测量不对称核系统  $^{96}\text{Zr} + ^{96}\text{Ru}$  和  $^{96}\text{Ru} + ^{96}\text{Zr}$  反应产生的质子及氦核数  $Z$ , 由此得到的  $R_z$  如果在所有的快度区都为 0, 则说明至少在出射的质子及氦核中的源中达到平衡, 如果在正快度区和负快度区分别为 +1 和 -1, 则说明系统没有达到平衡. 由实验得到的  $R_z$  表明质子不是从一个平衡源出射的, 反应是半透明的. 这些实验说明平衡并没有最终达到. 但是该实验只给出入射能量为 400MeV/u 时的反应系统平衡情况, 对于更低能量的平衡问题仍然不知道. 另一方面, 状态方程中的对称能有很大的不确定性. 人们从多种理论方法出发对其做了广泛的研究, 但是对称能系数仍然有很大的不确定性. 例如, 在文献[5]中用非相对论 Hartree-Fock 理论得到的对称能系数范围是 27—38MeV, 在文献[6, 7]中用相对论平均场理论得到的范围是 35—40MeV, 而用 Brueckner-Hartree-Fock 理论<sup>[8]</sup>得到的值是 31MeV. 通常对称势能采用如下形式:

$$V_{\text{sym}}(\rho, \delta) = \frac{C_s}{2} u \delta^2, \quad (1)$$

这里  $C_s$  为对称势强度,  $u = \rho / \rho_0$ ,  $\delta = (\rho_n - \rho_p) / \rho$ . 本文采取这种形式分析上面提到的“混合实验”, 探测与对称能项敏感的观测量.

## 2 模型简介

计算中采用了同位旋依赖的量子分子动力学模型(IQMD), 经典的 QMD 模型见文献[9, 10]. 这里简单介绍对 QMD 模型的改造部分: 首先, 在库仑相互作用和核势中考虑了同位旋依赖, 其中对称势强度  $C_s$  与对称能系数  $a_{\text{sym}}$  的关系为

$$a_{\text{sym}} = \frac{3}{5} (2^{2/3} - 1) \epsilon_F^0 + \frac{C_s}{2}, \quad (2)$$

这里  $\epsilon_F^0$  是对称系统在饱和密度  $\rho_0$  时的费米能, 取为 38MeV. 在研究中  $C_s$  分别取 27, 35, 50MeV, 相对应的  $a_{\text{sym}}$  分别约为 27, 31, 38MeV. 其次, 采用了实验得到的同位旋相关的两体弹性散射截面<sup>[11]</sup>. 最后, 对 Pauli 阻塞, 首先区分质子和中子, 并且同时考虑了两种阻塞条件

$$\frac{4\pi}{3} r_{ij}^3 \cdot \frac{4\pi}{3} p_{ij}^3 \geq \frac{h^3}{4}, \quad (3)$$

$$P_{\text{block}} = 1 - (1 - f_i)(1 - f_j), \quad (4)$$

这里  $f_i$  为相空间中粒子  $i$  的分布函数. 公式(3)给出了两粒子的高斯波包中心之间的不确定关系, 公式(4)是两粒子散射时的 Pauli 阻塞几率, 这个条件对重核碰撞尤其有用.

本文中采用传统的 coalescence 模型<sup>[12]</sup>构造碎片, 即把相对动量小于  $P_0$ 、相对距离小于  $R_0$  的所有粒子构造到一个碎片中. 当  $E = 400\text{MeV/u}$  时,  $R_0 = 3.5\text{fm}$ ,  $P_0 = 300\text{MeV}/c$ ; 当  $E = 100\text{MeV/u}$  时,  $R_0 = 3.0\text{fm}$ ,  $P_0 = 200\text{MeV}/c$ . 对两个能量下的反应都采用  $t = 100\text{fm}/c$ .

为了去掉没有物理意义的碎片,只考虑具有合理的质子数  $Z$  和中子数  $N$  的碎片.

计算中采用了“软”状态方程 ( $K = 200\text{MeV}$ ),其主要参数列在表 1 中.

表 1 计算中用到的参数

$\alpha/\text{MeV}$	$\beta/\text{MeV}$	$\gamma$	$\rho_0/\text{fm}^{-3}$	$C_{\text{Yuk}}/\text{MeV}$	$K/\text{MeV}$
-356	303	7/6	0.168	-5.5	200

\* 在文中不作说明时  $C_s$  均采用  $35\text{MeV}$ .

### 3 对 $C_s$ 的灵敏观测量的探索

最近 FOPI/GSI 组<sup>[4]</sup>已经从实验上获得了由 4 个质量数均为 96 的反应系统  $\text{Ru} + \text{Ru}$ ,  $\text{Zr} + \text{Zr}$ ,  $\text{Ru} + \text{Zr}$  和  $\text{Zr} + \text{Ru}$  在入射能量为  $400\text{MeV/u}$  下的  $R_z$ , 我们首先也研究了  $R_z$  与  $C_s$  之间的关系. 研究结果表明它可以探测到核反应中的非平衡效应. 但是也发现了它对  $C_s$  是不敏感的,这在它的定义中也可以看得出,因为在定义中  $C_s$  的改变对  $R_z$  的影响已经大大被压低了. 所以有必要寻找其他对  $C_s$  敏感的观测量.

这里定义了一个归一化的中子-质子差的量

$$N_{np} = \frac{\langle n \rangle - \langle p \rangle}{\langle n \rangle + \langle p \rangle}, \quad (5)$$

这里  $\langle n \rangle$  和  $\langle p \rangle$  分别为出射的平均中子和质子数. 图 1 给出了入射能量为  $400\text{MeV/u}$  时的

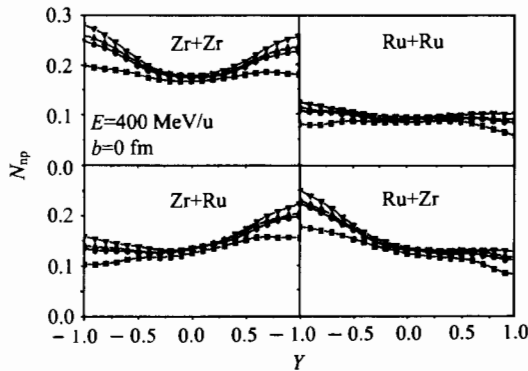


图 1 系统中子-质子数差的快度分布随  $C_s$  的变化

■, ●, ▲, ▼ 分别表示  $C_s$  为 0, 27, 35, 50 MeV.

$N_{np}$  在 4 系统中的快度分布对  $C_s$  的依赖.

从图中可以看出  $N_{np}$  在弹和靶快度区比较明显地依赖于  $C_s$  的选取, 并且基本趋势为  $C_s$  越大  $N_{np}$  越大, 当不考虑核势中的同位旋依赖部分时 ( $C_s = 0\text{MeV}$ ), 对称反应系统  $\text{Zr} + \text{Zr}$  和  $\text{Ru} + \text{Ru}$  的  $N_{np}$  比较平, 而不对称反应  $\text{Zr} + \text{Ru}$  和  $\text{Ru} + \text{Zr}$ ,  $N_{np}$  呈由  $\text{Zr}$  快度区向  $\text{Ru}$  快度区的倾斜, 这意味着反应未达到完全平衡. 当考虑了核势的同位旋依赖部分 ( $C_s$  分别取 27, 35, 50 MeV) 以后, 在大快度区可以明显的看出随着  $C_s$  的增加,  $N_{np}$  明显增大. 为了更为

明显地看出这种效应, 也为了比较入射能量为 400 和  $100\text{MeV/u}$  时的不同, 在图 2 中给出了  $400\text{MeV/u}$  入射能量下 4 系统及  $100\text{MeV/u}$  入射能量下  $\text{Zr} + \text{Zr}$  反应在  $C_s$  为 50 和  $0\text{MeV}$  时的  $N_{np}$  的差. 从图中可以明显地看出由对称能项引起的  $N_{np}$  的增强, 越丰中子的核系统的  $N_{np}$  对  $C_s$  越敏感. 还可以看出在  $100\text{MeV/u}$  入射能量时这种效应更为强烈. 这些都意味着在中能区丰中子系统的核反应可以作为探测对称势强度的敏感量.

### 4 中能重离子核反应的趋平衡问题

从图 1、图 2 对对称势能的研究中已经知道通过同位旋不对称观测量也可以获得关于反应平衡性的信息. 图 3 给出了入射能量为 100, 400 MeV/u, 碰撞参数  $b$  为 0, 5 fm 时  $Zr + Ru$  和  $Ru + Zr$  的  $R_z$  的速度分布. 从图 3 中首先可以明显地看出在该能区重离子碰撞未能达到完全平衡. 同时也发现反应的不平衡程度强烈地依赖于碰撞参数. 但是从  $R_z$  却很难看出它和能量的依赖关系. 从本图中只能得出出射质子不是来源于同一个平衡源, 但它对能量的依赖关系却很弱. 因此必须寻求其他与能量相关的敏感量.

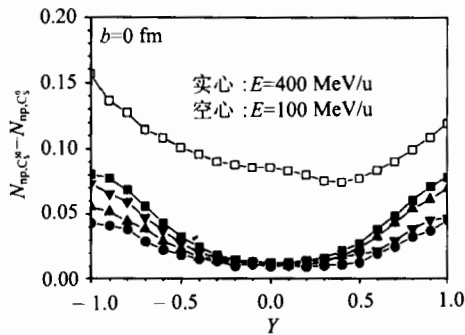


图 2 400 MeV/u 入射能量下 4 系统及 100 MeV/u 入射能量下  $Zr + Zr$  ( $\square$ ) 反应在  $C_s$  为 50 和 0 MeV 时的  $N_{np}$  的差  
 ■  $Zr + Zr$ , ●  $Ru + Ru$ , ▲  $Zr + Ru$ , ▼  $Ru + Zr$ .

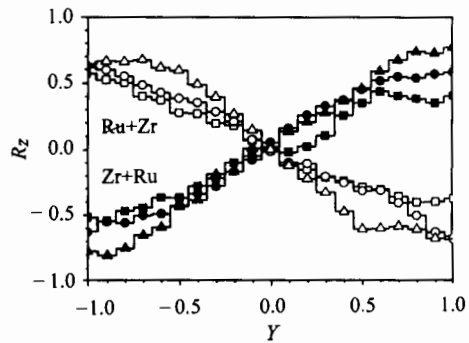


图 3 不同入射能量和碰撞参数下的质子  $R_z$  的速度分布  
 ■, ●, ▲ 分别为入射能量 100, 400, 400 MeV/u,  $b$  分别为 0, 0.5, 5 fm.

图 4 给出了入射能量为 100, 400 MeV/u, 碰撞参数  $b$  为 0, 5 fm 时的 4 系统中子 - 质子的速度分布. 我们知道如果反应系统最终达到平衡, 则应呈现出对  $Y = 0$  对称的高斯形式. 相对于  $Y = 0$  对称形式的偏离就意味着反应未达到平衡. 在图 4(a), (b), (c) 中都可以看出不对称反应  $Zr + Ru$  和  $Ru + Zr$  的中子 - 质子差分布的峰出现在  $Zr$  快度区而不是  $Y = 0$  的地方. 同时从图 4(b) 和 (c) 可以明显看出由于碰撞参数的加大, 平衡程度明显地降低了, 在对 (a) 和 (b) 图的比较中, 还能看出在 100 MeV/u 入射能量下的中子 - 质子差分布偏离高斯形式的程度要甚过在 400 MeV/u 的情况, 这种平衡程度的能量依赖是因为当入射能量从 100 MeV/u 升到 400 MeV/u 时, 两体碰撞变得更加剧烈了. 从计算结果可以看出它可以作为探测反应系统的平衡程度的能量依赖的敏感量.

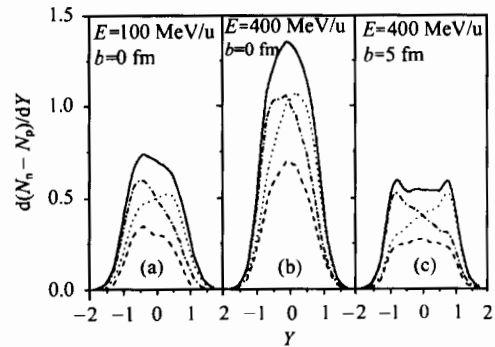


图 4 不同入射能量和碰撞参数下的中子 - 质子的速度分布  
 —  $Zr + Zr$ , - - -  $Ru + Ru$ , ····  $Zr + Ru$ , - · - ·  $Ru + Zr$ .

但是,出射的核子只能给出系统的部分信息.因此我们又研究了出射的轻带电粒子(LCP)和中等质量碎片(IMF)中的同位旋分布.图5分别给出在入射能量为400和100MeV/u时的4系统反应出射的核子(Nucleons),LCP和IMF在弹区(Proj.)、中心区(Cent.)和靶区(Targ.)的中子/质子比( $N/Z$ ).弹快度区定义为 $1.5 \geq Y \geq 0.5$ ,中心区定义为 $0.5 \geq Y \geq -0.5$ ,靶区定义为 $-0.5 \geq Y \geq -1.5$ .由图5可以看到4系统出射的核子在所有快度区 $N/Z$ 的差别比出射的LCP和IMF的差别大.就是说,越丰中子的核系统出射的核子的 $N/Z$ 比越大,而4系统出射的LCP和IMF的 $N/Z$ 相对来说比较接近.由实验<sup>[13]</sup>结果可以知道在几十MeV/u入射能量时越不对称的核系统反应产生越丰(缺)中子的轻块,而重块中的 $N/Z$ 相对变化很小.这里的趋势很类似实验中的情况,只是因为这里的入射能量比实验的高,所以这里是核子与LCP,IMF的比较,而不是LCP与IMF的比较.另外,由于IMF产生于反应的后期,观察由不对称反应产生的IMF的 $N/Z$ 值是否重合也是探测反应是否达到平衡的重要标志.从图中发现同核子的情况一样,IMF中的 $N/Z$ 值仍然带有记忆效应,即偏向Zr区或Ru区,这说明IMF也不是来自于同一个平衡源.

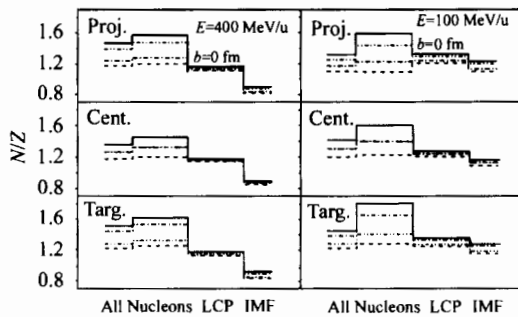


图5 4系统出射的核子、LCP和IMF在弹区、中心区和靶区的 $N/Z$ 比  
——Zr+Zr, ---Ru+Ru,  
-·-·-Zr+Ru, ···Ru+Zr.

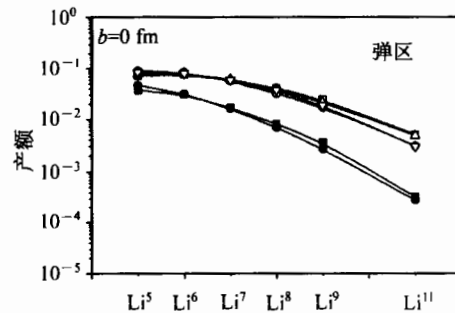


图6 入射能量为100MeV/u时4系统和400MeV/u时Zr+Zr和Ru+Ru反应在弹区产生的Li同位素产额分布

□(100MeV/u)Zr+Zr, ■(400MeV/u)Zr+Zr,  
△(100MeV/u)Zr+Ru, ○(100MeV/u)Ru+Ru,  
●(400MeV/u)Ru+Ru, ▽(100MeV/u)Ru+Zr.

通过比较图5,还发现IMF中的 $N/Z$ 比随着能量的增加而降低了.为了解释这个现象,计算了在100MeV/u下的4系统和400MeV/u下的Zr+Zr,Ru+Ru反应在弹区产生的最丰富的几个粒子Li,Be,B的同位素产额.限于篇幅,在图6中仅提供Li同位素产额分布.首先可以看出在100MeV/u下的产额是400MeV/u下的几倍到几十倍,而且100MeV/u时的产额曲线比400MeV/u时的更平,且越稳定的同位素越多,而400MeV/u时的却是质量数越小的越多.因而使得入射能量由100MeV/u增加到400MeV/u时IMF中的 $N/Z$ 比降低.通过比较100和400MeV/u两种情况,显示出丰(或缺)中子的同位素的产额对初始核系统的依赖程度与入射能量有关.对入射能量为100MeV/u时4个系统的IMF的同位素产额作比较显示 $N/Z$ 越大的初始核产生的丰中子同位素越多,而对于同位旋不对称系统的反应的比较则显示出反应的记忆效应.这种在IMF的同位素产额分布中显示出的记忆

效应在 400MeV/u 时几乎消失了.

## 5 结束语

用 IQMD 模型分析了 $^{96}\text{Ru} + ^{96}\text{Ru}$ ,  $^{96}\text{Ru} + ^{96}\text{Zr}$ ,  $^{96}\text{Zr} + ^{96}\text{Ru}$  和  $^{96}\text{Zr} + ^{96}\text{Zr}$  4 系统的中能核反应,寻找对对称势强度的敏感观测量及研究反应达到的平衡程度对能量的依赖. 研究表明归一的中子-质子差对对称势强度是敏感的,而且对越丰中子的核系统越敏感. 在对出射的质子  $R_z$  的研究中,发现虽然它能够探测出出射的质子不是来源于同一个平衡源,但它对对称能和入射能量对达到的平衡程度的影响都不敏感. 为了研究反应达到平衡的程度对能量的依赖关系,采用了中子-质子差的快度分布,并且发现 400MeV/u 入射能量下的系统平衡程度要比 100MeV/u 入射能量下的强. 对出射的核子、LCP, IMF 的  $N/Z$  比作系统的研究时,还发现 IMF 的出射仍然具有记忆效应. 随着入射能量由 100MeV/u 增加到 400MeV/u, IMF 的  $N/Z$  比有明显地下降,这是由入射能量增加使得 IMF 中的同位素分布发生变化所致. 对 IMF 中的同位素分布的分析还表明,它在 100MeV/u 入射能量时记忆效应还比较明显,但在 400MeV/u 时则几乎消失了. 总之,研究表明,利用质量相同、电荷不同的两种核构成的一套对称和不对称核-核碰撞体系的中能核反应可以对反应最终是否达到平衡提供较确切的知识.

## 参考文献 (References)

- 1 Nebauer R, Aichelin J. Nucl. Phys., 2001, **A681**:353
- 2 Bondorf J P, Botvina A S et al. Phys. Rep., 1995, **257**:133
- 3 Gossiaux P B, Puri R, Hartnack C et al. Nucl. Phys., 1997, **A619**:379
- 4 Rami F et al. Phys. Rev. Lett., 2000, **84**:1120
- 5 Pearson J M, Aboussir Y, Putt A K. Nucl. Phys., 1991, **A528**:1
- 6 Matsui T. Nucl. Phys., 1981, **A370**:365
- 7 Furnstahl R J, Tang H B, Serot B D. Phys. Rev., 1995, **C52**:1368
- 8 Lee C H, Kuo T T S, Li G Q et al. Phys. Rev., 1998, **C57**:3488
- 9 Aichelin J. Phys. Rep., 1991, **202**:233
- 10 Hartnack C et al. Nucl. Phys., 1989, **A495**:303
- 11 CHEN K. Phys. Rev., 1968, **166**:949
- 12 Kruse H, Jacak B V, Molitoris J J et al. Phys. Rev., 1985, **C31**:1770
- 13 Yennello S J et al. Nucl. Phys., 2001, **A681**:317c

## Probing Equilibration in HICs and Symmetry Energy by Using Isospin-Related Observables\*

LI Qing-Feng<sup>1</sup> LI Zhu-Xia<sup>1-3</sup>

1 (China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

2 (Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Lanzhou Heavy Ion Accelerator, Lanzhou 730000, China)

3 (Institute of Theoretical Physics, CAS, Beijing 100080, China)

**Abstract** We have studied the equilibration with respect to isospin degree of freedom in four systems  $^{96}\text{Ru} + ^{96}\text{Ru}$ ,  $^{96}\text{Ru} + ^{96}\text{Zr}$ ,  $^{96}\text{Zr} + ^{96}\text{Ru}$ ,  $^{96}\text{Zr} + ^{96}\text{Zr}$  at 100 MeV/u and 400MeV/u with isospin dependent QMD. It is proposed in this paper that the neutron-proton differential rapidity distribution is a sensitive probe to the degree of equilibration with respect to the isospin degree of freedom. By analyzing the average  $N/Z$  ratio of emitted nucleons, light charged particles (LCP) and intermediate mass fragments (IMF), it is found that there exists memory effect in multifragmentation process. The average  $N/Z$  ratio of IMF reduces largely as beam energy increases from 100MeV/u to 400MeV/u, which may result from the change of the behavior of the isotope distribution of IMF. The isotope distribution of IMF does also show certain memory effect at 100 MeV/u case but not at 400 MeV/u case. We also found the rapidity distribution of differential neutron-proton counting in neutron rich nucleus-nucleus collisions at intermediate energies is sensitive to the isospin dependent part of nuclear potential. In conclusion, based on these studies we have found it's an effective way to explore whether the final equilibration could be reached in intermediate HICs by constructing a set of isospin (a)symmetry nuclear-nuclear collision systems with same mass and different charge.

**Key words** isospin, symmetry potential strength, equilibration

---

Received 26 October 2001

\* Supported by National Natural Science Foundation of China (19975073, 10175093), Science Foundation of Nuclear Industry and Major State Basic Research Development Program (G20000774)