

# 中能重离子碰撞中带电粒子多重性的同位旋效应\*

胡荣江<sup>1,2,1)</sup> 吴和宇<sup>1</sup> 靳根明<sup>1</sup> 诸永泰<sup>1</sup> 李松林<sup>1</sup> 肖志刚<sup>1</sup>  
王宏伟<sup>1</sup> 段利敏<sup>1</sup> 李祖玉<sup>1</sup> 殷旭<sup>1</sup> 王素芳<sup>1</sup> 张保国<sup>1</sup>  
魏志勇<sup>1</sup> 王晓秋<sup>1</sup> 卢朝晖<sup>1</sup> 朱海东<sup>1</sup> 冯兆庆<sup>1,2</sup> 袁小华<sup>1,2</sup>

1(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

2(中国科学院研究生院 北京 100039)

**摘要** 利用兰州  $4\pi$  带电粒子探测器阵列测量带电粒子多重性,研究了  $55\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{58,64}\text{Ni}$  核反应中 He 和中等质量碎片的产额与反应系统同位旋的关系,以及这种同位旋效应与反应系统的碰撞参数(即碰撞的激烈程度)、系统的激发能的变化关系.对两个反应系统,观察到带电粒子多重性中 He 的比分会随带电粒子多重性的增加而增大,带电粒子多重性中 IMF 的比分会随带电粒子多重性的增加而先增大,后减小的规律.两个反应系统虽然具有相同的核电荷数,但轻粒子 He 和中等质量碎片在多重性中的比分会明显的同位旋相关性.

**关键词** 多重性 碰撞参数 激发能 同位旋效应

## 1 引言

在中能重离子核反应的研究中,一个主要的目标就是提供有关高温高密热核的形成和衰变性质的信息.在重离子核碰撞过程中形成的高激发核系统通过发射大量的中子、轻带电粒子( $Z=1-2$ )和中等质量碎片( $Z=3-20$ )进行退激.尤其引起人们兴趣的是热核的多重碎裂衰变过程<sup>[1-3]</sup>.作为一种新发现的反应机制,多重碎裂的研究是近些年来中能重离子物理研究中的一个重要课题,也是探索核反应动力学演化的一个重要的探针.

随着重离子物理研究的深入和世界上多个放射性束流装置的建成和运行<sup>[4-8]</sup>,使人们能够深入探索原子核体系中的中子、质子不对称性所导致的化学不稳定性,也为人们研究同位旋自由度对核反应机制的影响提供了条件.放射性束的大量使用、晕核和皮核的发现使同位旋物理这一新研究领域逐步成为当今核物理研究中的热点问题之一<sup>[9]</sup>.近

年来,我们先后展开了同位旋弛豫的实验研究,用不同同位旋产物的产额比<sup>[10]</sup>和同位旋平均的产额<sup>[11]</sup>与能量耗散的关系,发现了同位旋输运也是一个相对慢的过程.在热核衰变的同位旋效应研究中,发现热核衰变发射的粒子具有同位旋选择性<sup>[12]</sup>,粒子发射顺序、产额和温度也因此而改变<sup>[13,14]</sup>,并开始了衰变时标的同位旋相关性研究.近年来,多重碎裂的同位旋效应也成为理论研究的一个热点,刘建业等人用同位旋相关的量子分子动力学(IQMD)模型计算的结果表明,在中能重粒子碰撞中带电粒子多重性有明显的同位旋效应<sup>[15-17]</sup>.为进一步检验这些新结果的合理性,我们进行了实验研究.

本文介绍了在兰州重离子国家实验室  $4\pi$  带电粒子探测器阵列(MUDAL)上完成的  $55\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{58,64}\text{Ni}$  核反应中 He 和中等质量碎片(IMF)的发射及其同位旋相关性的研究结果.本工作在实验上验证了热核多重碎裂的同位旋相关性.

2003-04-08 收稿

\* 国家自然科学基金(10175081,19575055),国家重点基础研究发展规划项目(G2000077401)资助

1) E-mail: hurj@impcas.ac.cn

## 2 实验概况

### 2.1 MUDAL 简介

为探测在中能重离子碰撞过程中发射的大量的粒子和碎片,要求探测系统覆盖  $4\pi$  立体角,并且要分成足够多的单元,使得每个单元同时测到一个反应中发射的两个以上粒子的几率足够小(如  $< 5\%$ ),还要求每个探测单元有较低的能量探测阈、宽的能量和动量的动态范围,以及足够好的能量分辨和粒子鉴别能力. 目前国际上  $4\pi$  探测器系统有法国 GANIL 的 INDRA、美国 MSU 的 MINIBALL、德国 GSI 的 FOPI、俄罗斯 DUBNA 的 FOBOS、意大利 INFN-LNS 的 CHIMERA 以及兰州近代物理研究所的  $4\pi$  带电粒子多探测器系统 MUDAL<sup>[18]</sup>.

MUDAL 共有 16 个环,276 个单元探测器组成<sup>[18]</sup>. 考虑到中能重离子碰撞中出射产物的特征,如前角出射的粒子能量高,且多重性大,后角出射的粒子能量低,且多重性也低,每一个环上的探测器数目和构成也有所差别. 在粒子发射的前角区,环 1 到环 3(角度  $\theta$  为  $2^\circ$ — $7^\circ$ )将面临比较强的散射粒子,这些环选用了辐射损伤小,信号时间快的快—慢塑料闪烁叠层探测器,每个叠层探测器由 0.5mm 厚的 BC400 快塑料闪烁膜和 200mm 厚的 BC444 慢塑料闪烁晶体构成. 环 4 到环 16(角度  $\theta$  为  $7^\circ$ — $172^\circ$ ),每个探测器单元是由  $40$ — $30\mu\text{m}$  厚的快塑料闪烁体 BC498X 和  $50$ — $30\text{mm}$  厚的 CsI(Tl)晶体组成的光叠层探测器. 快塑料闪烁体 BC498X 主要用来抑制时间响应慢的  $\gamma$  射线和选择时间响应快的带电粒子产物进行测量和记录.

### 2.2 实验安排

实验是在中国科学院近代物理研究所重离子加速器(HIRFL)上进行的. 采用  $55\text{MeV}/u$  的稳定束流  $^{40}\text{Ar}$  轰击稳定丰质子同位素靶  $^{58}\text{Ni}$  和稳定丰中子同位素靶  $^{64}\text{Ni}$ ,两个系统的中质比分别是 1.13, 1.26. 鉴于目前所能达到的条件,我们只在  $4\pi$  探测器的 3—14 环(角度  $\theta$  为  $4.5^\circ$ — $130^\circ$ )部分安装了探测器,其中 3—9 环各安装 6 套,10—13 环各安装 4 套,14 环安装 1 套,共 59 套,其中 3—13 环每环的探测器在  $\varphi$  方向都是均匀分布的. 这 59 套探测器覆盖的立体角约为  $0.68\pi$ ,占全空间的 17%,在反应的质心系中,探测器覆盖约 25% 的几何空间. 为了测量轻

带电粒子的能谱和产额,实验中在中后角的 10—12 和 14 环上各放置了一套 3 叠层 Si 半导体望远镜.

### 2.3 探测器工作原理

对于快(BC400)慢(BC444)塑料闪烁体光叠层探测器,给出有两种不同衰减时间(分别为  $2$ — $3\text{ns}$  和约  $230\text{ns}$ )的快慢成分. 利用快慢成分的比例可以进行轻粒子的同位素鉴别. 另一类光叠层探测器由快的 BC498X 塑料闪烁体(衰减时间约为  $3\text{ns}$ )和 CsI(Tl)晶体组成,后者的输出脉冲具有  $15\text{ns}$  的上升时间和两种衰减时间: $0.3$ — $1.0\mu\text{s}$  的慢成分和  $7\mu\text{s}$  的长成分. 慢成分与 BC498X 的快成分的相对比随被探测粒子种类而变化,这种关系可用来鉴别粒子,特别是对轻粒子非常有效;长成分则与粒子的入射能量相关,而与探测粒子的种类无关. 利用这些成分之间的比例关系可以组成典型的  $\Delta E$ - $E$  的粒子鉴别望远镜,这能非常有效地鉴别中等质量碎片的核电荷数  $Z$ .

实验中把每套探测器引出的信号进行分路,并开了两个不同的时间门,用电荷数码转换器 QDC 对反应碎片在探测器的光电脉冲信号在不同的时间门内进行积分,得到了塑料闪烁体快、慢成分的双维谱和 CsI(Tl)晶体中产生的慢、长成分的双维谱<sup>[19]</sup>,分别如图 1 所示.

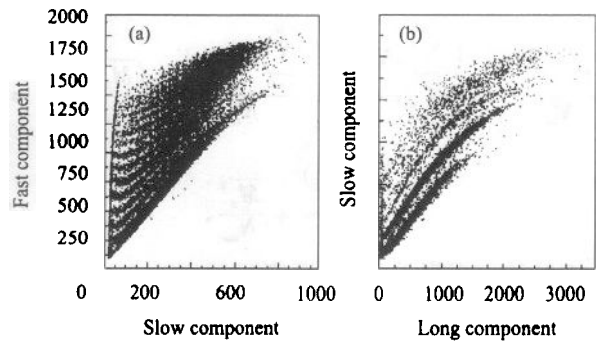


图 1 塑料闪烁体快、慢成分(a)和 CsI(Tl)晶体中产生的慢、长成分(b)的双维谱

## 3 实验数据处理

我们对获取的数据进行分析时,首先在双维谱上开窗排除噪声和暗电流的影响,逐个事件地统计其点火的探测器数,即该次事件的带电粒子总多重性  $M$ . 然后判断点火探测器中是否含有 He 或 IMF,并统计 He 或 IMF 的个数  $M_{\text{He}}$ ,  $M_{\text{IMF}}$ . 以 He 为例,按照总多重性  $M$  和  $\alpha$  多重性  $M_{\alpha}$  将事件进行分类,称

之为  $M, M_0$  事件. 所有事件逐个统计完之后, 得到了不同  $M, M_0$  事件的统计数  $N$ . 对于某一特定的带电粒子多重性  $M$ , 其中可能的 He 的个数可以为  $M_0 = 0, 1, 2 \dots M$ , 即可能的情况有  $M + 1$  种. 假定  $M + 1$  种情况的统计数分别为  $N_i (i = 0, 1, 2 \dots M)$ , 则计数率  $M_0$  的加权平均值

$$\overline{M_0} = \frac{\sum_{i=0}^M iN_i}{\sum_{i=0}^M N_i} = \frac{\sum_{i=0}^M iN_i}{N_{\text{tot}}} = \sum_{i=0}^M i \frac{N_i}{N_{\text{tot}}} = \sum_{i=0}^M iW_i, \quad (1)$$

其中  $N_{\text{tot}}$  是带电粒子多重性为  $M$  时的事件总数,  $W_i$  是第  $i (i = 0, 1, 2 \dots M)$  种事件的权重. 对特定的带电粒子多重性  $M$ , 带电粒子多重性中 He 所占比分

$$P_0(M) = \frac{\overline{M_0}}{M}, \quad (2)$$

同样的方法, 可以得到带电粒子多重性中 IMF 所占比分

$$P_{\text{IMF}}(M) = \frac{\overline{M_{\text{IMF}}}}{M}. \quad (3)$$

在确定实验误差时, 我们只考虑统计误差. 根据误差传递公式, (1) 式的方差

$$\begin{aligned} \sigma^2_{\overline{M_0}} &= \frac{\sum_{i=0}^M (i^2 \sigma^2_{N_i})}{\left(\sum_{i=0}^M N_i\right)^2} + \left(\frac{\sum_{i=0}^M iN_i}{\sum_{i=0}^M N_i}\right)^2 \sum_{i=0}^M \sigma^2_{N_i} = \\ &= \frac{\sum_{i=0}^M (i^2 N_i)}{N_{\text{tot}}^2} + \frac{\left(\sum_{i=0}^M iN_i\right)^2}{N_{\text{tot}}^3} = \frac{\sum_{i=0}^M (i^2 N_i)}{N_{\text{tot}}^2} + \frac{(\overline{M_0} N_{\text{tot}})^2}{N_{\text{tot}}^3} = \\ &= \frac{\sum_{i=0}^M (i^2 N_i)}{N_{\text{tot}}^2} + \frac{\overline{M_0}^2}{N_{\text{tot}}}, \quad (4) \end{aligned}$$

则  $\overline{M_0}$  的均方根误差 (绝对误差)

$$\sigma_{\overline{M_0}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^M (i^2 N_i)}{N_{\text{tot}}^2} + \frac{\overline{M_0}^2}{N_{\text{tot}}}},$$

故总带电粒子多重性中 He 所占比分

$$P_0(M) = \frac{M_0}{M} \pm \frac{\sigma_{\overline{M_0}}}{M}, \quad (6)$$

总带电粒子多重性中 IMF 所占比分

$$P_{\text{IMF}}(M) = \frac{M_{\text{IMF}}}{M} \pm \frac{\sigma_{M_{\text{IMF}}}}{M}.$$

### 4 结果与讨论

图 2 分别给出了  $P_0(M)$  和  $P_{\text{IMF}}(M)$  随  $M$  的变

化关系曲线, 图中的误差由公式 (6), (7) 给出, 两条曲线分别对应于两个不同中质比的丰中子 ( $^{40}\text{Ar} + ^{64}\text{Ni}$ ) 和缺中子 ( $^{40}\text{Ar} + ^{58}\text{Ni}$ ) 反应系统.

从图 2(a) 中可以看出, 不管哪个反应系统, 在带电粒子多重性中 He 的比分随着带电粒子总多重性的增加而增加. 带电粒子总多重性在中高能区核反应中能很好地描述核-核碰撞的激烈程度, 对应于热核激发能的高低. 带电粒子多重性的增加, 也就对应着碰撞参数的减小和初始激发能的增加. He 的相对产额的增大, 表明低激发能时主要为质子、氘、氚发射, 在较高激发能时出现相对高的 He 发射几率, 这与蒸发理论的结果是一致的. 比较两个系统可以发现, 对于丰中子系统, 在带电粒子多重性中 He 的比分更大一些, 这是由两个系统退激过程的同位旋效应引起的. 对所研究的系统而言, 核碰撞过程中形成的高激发核系统通过发射轻带电粒子 ( $Z = 1-2$ ), 尤其是质子和 He 退激是主要的. 在发射质子和 He 的竞争过程中, 显然 He 的发射能够带走更多的中子, 因此丰中子系统相对于缺中子系统而言, 通过发射 He 退激的几率更大一些, 这就导致了丰中子系统中, 带电粒子多重性中 He 的比分要大一些, 而缺中子系统中, 带电粒子多重性中 He 的比分小一些.

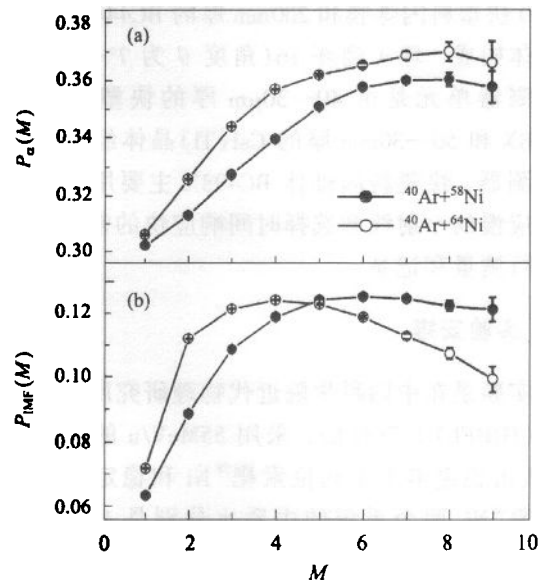


图 2  $P_0(M), P_{\text{IMF}}(M)$  随带电粒子多重性  $M$  的变化规律

从图 2(b) 中可以看出, 带电粒子多重性中 IMF 的比分随着带电粒子多重性的增加, 先增大后减小. 两个反应系统有类似的规律, 也就是随着碰撞参数

的减小和初始激发能的增加先增大后减小. 就其中任何一个系统,随着带电粒子多重性由小变大,碰撞越来越激烈,初始激发能也逐渐增高,因而发射 IMF 的几率也由小变大. 但是初始激发能大到一定程度时,系统离解成为更小的碎片可以带走更多的激发能,这就导致 IMF 的发射几率变小.

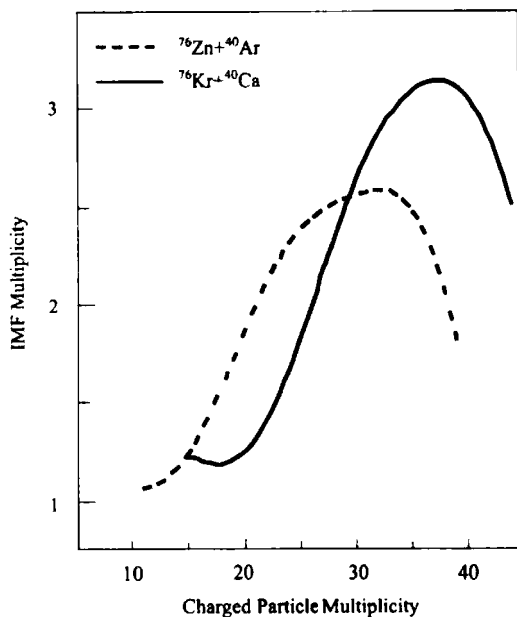


图 3 理论计算的不同同位旋系统 IMF 产额与带电粒子多重性关系曲线

比较两个系统,在带电粒子多重性比较小时,丰中子系统的带电粒子多重性中 IMF 的比分会大一些,而在带电粒子多重性比较大时,缺中子系统的带电粒子多重性中 IMF 的比分会大一些. 这种两条曲线的交叉现象与刘建业等人用 IQMD 模型的计算结果完全类似. 图 3 显示了理论计算的 80MeV/u  $^{76}\text{Zn} + ^{40}\text{Ar}$  和  $^{76}\text{Kr} + ^{40}\text{Ca}$  反应中 IMF 的产额与带电粒子多重性的关系曲线<sup>[15]</sup>. 导致图中现象的原因可能是:在带电粒子多重性比较小时,对应于比较大的

碰撞参数,碰撞后形成的激发核系统的初始激发能比较低,相对于缺中子系统而言,丰中子系统由于其所含的中子比较多,更有利于发射含有较多中子的 IMF,因而表现为在带电粒子多重性较小时,丰中子系统的 IMF 的比分会大一些. 而对于比较大的带电粒子多重性,其碰撞参数较小,碰撞比较激烈,碰撞后形成的激发核系统的初始激发能比较高,对于丰中子系统,在碰撞中通过发射大量的中子而带走激发能,导致激发能迅速降低,中子的大量发射和激发能的降低都不利于 IMF 的形成和发射,这就使得丰中子系统在碰撞参数比较小时,随着碰撞参数的进一步减小,IMF 的产额迅速降低. 而对于缺中子系统,这样的影响相对小一些,缺中子系统 IMF 的产额就减小得比较慢一些. 这样就导致了在碰撞参数比较小时,缺中子系统带电粒子多重性中 IMF 的比分会大于丰中子系统带电粒子多重性中 IMF 的比分会.

## 5 结论

在中能重离子碰撞中,带电粒子的发射及其多重性有明显的同位旋效应. 它是由核-核碰撞截面的同位旋相关性和发射粒子的同位旋与系统同位旋的相关性(发射粒子的选择性)而引起的. 因而在中能重离子碰撞中,可以利用 He, IMF 的多重性与带电粒子总多重性关联、集体流及单粒子动量分布四极矩<sup>[15,16]</sup>等的同位旋相关性为探针,结合相关的理论模型,就有可能得到核-核碰撞截面同位旋依赖的有关信息. 而我们现在正在进行的对出射粒子发射时标的提取以及研究不同同位旋粒子发射时序与反应系统的同位旋的关系,可以提供核衰变过程中发射粒子的同位旋对系统同位旋依赖的有关信息.

## 参考文献 (References)

- Kim Y D et al. Phys. Rev. Lett., 1989, **63**:1088
- Bowmann D R et al. Phys. Rev. Lett., 1991, **67**:1527
- Bauger F et al. Phys. Rev. Lett., 1993, **B302**:3705
- ZHAN W L, GUO Z Y, LIU G H et al. Science in China A, 1999, **42** (5):528
- Kubo T et al. Nucl Instrum. Methods In Phys. Res., 1992, **B70**:309
- Geissel H et al. Nucl Instrum Methods In Phys. Res., 1992, **B70**:286
- Mueller A C, Anne R. Nucl Instrum Methods In Phys. Res., 1991, **B56/57**:559
- Sherrill B M et al. Nucl Instrum Methods In Phys. Res., 1991, **B56/57**:1106
- LI B A, KO C M, Bauer W. Inter Jour. Mod. Phys., 1988, **E2**:147
- WU H Y, XIAO Z G, JIN G M et al. Physics Letters, 2002, **B538**:39
- XIAO Zhi-Gang, WU He-Yu, LI Zu-Yu et al. HEP & NP, 2001, **26** (6):494(in Chinese)  
(肖志刚,吴和宇,李祖玉等.高能物理与核物理, 2001, **26**(6):494)
- WU He-Yu, XIAO Zhi-Gang, LI Zu-Yu et al. HEP & NP, 1999, **23**

- (11):1115
- 13 XIAO Zhi-Gang, WU He-Yu, WANG Hong-Wei et al. HEP & NP, 2001, **25**(7):643(in Chinese)  
(肖志刚, 吴和宇, 王宏伟等. 高能物理与核物理, 2001, **25**(7):643)
- 14 XIAO Zhi-Gang, WU He-Yu, WANG Hong-Wei et al. HEP & NP, 2001, **25**(11):1071(in Chinese)  
(肖志刚, 吴和宇, 王宏伟等. 高能物理与核物理, 2001, **25**(11):1071)
- 15 LIU Jian-Ye, YANG Yan-Fang et al. Physical Review, 2001, **C63**:054612
- 16 LIU Jian-Ye, GUO Wen-Jun, WANG Shun-Jin et al. Physics Review Letters, 2001, **86**(6):975
- 17 LIU Jian-Ye, CHEN Bo, ZHAO Qiang et al. Nucl. Phys. Rev., 1999, **16**(3):165(in Chinese)  
(刘建业, 陈波, 赵强等. 原子核物理评论, 1999, **16**(3):165)
- 18 WANG Hong-Wei, DUAN Li-Min, XIAO Zhi-Gang et al. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2002, **22**(3):204(in Chinese)  
(王宏伟, 段利敏, 肖志刚等. 核电子学与核探测技术, 2002, **22**(3):204)
- 19 LI Song-Lin, ZHU Yong-Tai, JIANG Zhong-He et al. Nucl. Tech., 2000, **23**(8):584(in Chinese)  
(李松林, 诸永泰, 江中和等. 核技术, 2000, **23**(8):584)

## Isospin Effect of Charged Particle Multiplicity in Intermediate Energy Heavy Ion Collisions \*

HU Rong-Jiang<sup>1,2,1)</sup> WU He-Yu<sup>1</sup> JIN Gen-Ming<sup>1</sup> ZHU Yong-Tai<sup>1</sup> LI Song-Lin<sup>1</sup>  
XIAO Zhi-Gang<sup>1</sup> WANG Hong-Wei<sup>1</sup> DUAN Li-Min<sup>1</sup> LI Zu-Yu<sup>1</sup> YIN Xu<sup>1</sup> WANG Su-Fang<sup>1</sup>  
ZHANG Bao-Guo<sup>1</sup> WEI Zhi-Yong<sup>1</sup> WANG Xiao-Qiu<sup>1</sup> LU Zhao-Hui<sup>1</sup>  
ZHU Hai-Dong<sup>1</sup> FENG Zhao-Qing<sup>1,2</sup> YUAN Xiao-Hua<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>(Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

<sup>2</sup>(Department of Physics, The Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract** The dependence of He and intermediate mass fragments (IMF) production rates in the reactions  $55\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{58,64}\text{Ni}$  on the isospin, impact parameter and primary excitation energy of the reaction system was studied by using the  $4\pi$  charged particle multidetector array system (MUDAL). For the mentioned two reaction systems, the measured He particle contribution in the total charged particle multiplicity increases with increasing the total charged particle multiplicity but for the contribution of IMFs in the total charged particle multiplicity increases with increasing the total charged particle multiplicity at lower total charged particle multiplicities, and latter on it drops down with further increase of the total charged particle multiplicities. The experimental results of these two reaction systems with the same nuclear charge indicate that the contributions of He and IMFs in the total charged particle multiplicities are obviously isospin dependent.

**Key words** multiplicity, impact parameter, excitation energy, isospin effect

Received 8 April 2003

\* Supported by National Natural Science Foundation of China (19775055, 19735081), Major State Basic Research Development Program (G2000077401)

1) E-mail: hurj@impcas.ac.cn