

# 同位旋效应对中能重离子反应中轻粒子 产物的影响\*

张虎勇<sup>1)</sup> 马余刚<sup>1)</sup> 苏前敏<sup>1)</sup> 沈文庆<sup>1,2)</sup> 蔡翔舟<sup>1)</sup> 方德清<sup>1)</sup> 胡鹏云<sup>1)</sup> 韩定定<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> (中国科学院上海原子核研究所, 上海 201800)

<sup>2)</sup> (宁波大学物理系, 宁波 315321)

<sup>3)</sup> (华东师范大学电子科学系, 上海 200062)

(2000 年 5 月 3 日收到, 2000 年 8 月 20 日收到修改稿)

利用同位旋相关的量子分子动力学模型, 研究了 $^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$  和 $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$  两反应系统在不同入射能量、不同碰撞参数、不同势场和不同核子-核子碰撞截面下的粒子发射特征. 阐述了发射体系的同位旋对轻粒子产额比的影响. 发现轻粒子产额比是同位旋的敏感观测量. 另外, 还发现中快度区发射的粒子有更高的丰中子程度. 同时, 轻粒子的比不敏感于核子-核子碰撞截面, 而敏感于核态方程, 这使得从轻粒子比提取同位旋相关的核态方程变成一种可能.

关键词: 同位旋相关的量子分子动力学, 同位旋效应, 轻粒子产额比

PACC: 2570, 2587

## 1 引 言

随着世界上多个放射性束流装置的建成<sup>[1-5]</sup>, 人们能够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, 同时也使人们对于同位旋自由度的研究和认识发生了很大的变化, 同位旋效应的研究逐步成为当今核物理热点问题之一<sup>[6]</sup>. 通过研究同位旋自由度对核反应性质的影响, 从中可以提取同位旋有关的核状态方程和介质中核子-核子碰撞截面, 这对核物质的基本性质的理解以及对高能物理、粒子物理和核天体物理的进一步的研究有着极为重要的作用.

轻粒子的产额是重离子反应中的一个重要的观测量. 一方面, 通过分析轻粒子产额以及轻粒子的产额比, 可以一定程度上体现出核反应过程中不同的反应机制和物理内涵. 随着核温度的变化, 系统可能经历从轻粒子的蒸发为主到碎裂, 甚至多重碎裂<sup>[7]</sup> 进而到气化的变化, 在这些过程中可以通过对轻粒

子的研究来获取有关系统随核激发状态演化的情况. 另一方面, 从实验和理论的角度来讲, 核温度是一个非常重要的物理量, 它的提取通常也需要对轻粒子及其同位素能谱或产额等进行测量<sup>[8]</sup>. 从以上两个角度出发, 我们选取轻粒子作为分析原子核的同位旋效应对碎裂产物的影响.

在我们近来的工作中, 通过统计模型, 同位旋相关的晶格气体模型<sup>[9]</sup> 研究了轻粒子的发射, 了解轻粒子发射的一些情况<sup>[10]</sup>, 但是由于晶格气体模型仅处理的是一个已达到了热平衡的源发射粒子的情况, 没有涉及到重离子碰撞的整个动力学过程. 因此用动力学的模型进行轻粒子发射的研究, 是十分有益的. 一方面可以比较与统计模型的差别. 另一方面, 从动力学模型出发, 还可讨论更多的物理因素对轻粒子产生的影响, 如粒子速度、碰撞截面、核态方程与介质中核子-核子截面等.

本文基于同位旋相关的量子分子动力学 (IQMD) 模型, 分析了入射能量分别为 50 MeV/u, 60 MeV/u, 70 MeV/u 不同碰撞参数条件下 $^{112}\text{Sn}$

\* 国家杰出青年基金(批准号: 19725521) \ 国家自然科学基金(批准号: 19705012) \ 上海市科技启明星计划(批准号: 97QA14038) \ 中国科学院院长基金和国家基础研究发展规划(批准号: G200077400) 共同资助的课题.

+  $^{112}\text{Sn}$  和  $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$  中多重碎裂的同位旋效应, 同时还采用不同势场及不同核子-核子碰撞截面条件下的同位旋的依赖性的关系.

## 2 模型和方法

### 2.1 量子分子动力学(QMD)模型<sup>[11]</sup>

在 QMD 模型中, 核子由一定宽度的高斯波包表示, 波包的中心随时间演化, 波包的宽度被认为是常数, 系统的分布函数为高斯波包之和,

$$f(r, p, t) = \sum_{i=1}^n f_i(r, p, t), \quad (1)$$

$$f_i(r, p, t) = \frac{1}{(\pi\hbar)^3} \exp\{-[r - r_i]^2/2L - 2L[p - p_i]^2/\hbar^2\}, \quad (2)$$

其中  $r_i, p_i$  为第  $i$  个核子的坐标和动量,  $r_i, p_i$  的时间演化由哈密顿方程来表示,

$$\dot{p}_i = -\{p_i, H\}, \quad \dot{r}_i = \{r_i, H\}, \quad (3)$$

其中  $H$  包括总动能和相互作用部分. 相互作用势为 Skyrme, Coulomb 和 Yukawa 之和,

$$U = U^{\text{Sky}} + U^{\text{Coul}} + U^{\text{Yuk}}. \quad (4)$$

### 2.2 IQMD 模型

在 IQMD 模型中, 从同位旋的自由度, 即同位旋相关的核子-核子碰撞截面、对称能项、库仑势及同位旋相关的泡利阻塞等方面着手对 QMD 进行改进. IQMD 模型已被成功地用来解释中能重离子碰撞中的一些同位旋效应<sup>[12, 13]</sup>. 在 IQMD 模型中, 核的平均势可以参数化

$$U(\rho, \tau_Z) = \alpha \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right) + \beta \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma + \frac{1}{2}(1 - \tau_Z)V_C + C \frac{\rho_n - \rho_p}{\rho_0} \tau_Z + U^{\text{Yuk}}, \quad (5)$$

式中  $\rho_0 = 0.168 \text{ fm}^{-3}$ , 即正常核物质的饱和密度,  $\rho, \rho_n$  和  $\rho_p$  分别是总的、中子的和质子的相互作用密度,  $\tau_Z$  是具有同位旋自由度的第三分量, 对于中子和质子, 分别等于 1 和 -1;  $V_C$  代表库仑势;  $U^{\text{Yuk}}$  为 Yukawa(表面)势. 参数  $\alpha, \beta$  和  $\gamma$  的选择将采用所谓的软势(不可压缩系数  $K = 200 \text{ MeV}$ ). 对称能强度系数  $C = 32 \text{ MeV}$ . 核子-核子碰撞截面采用参数化的实验截面<sup>[14]</sup>, 对质子-中子( $\sigma_{np}$ )和质子-质子或中子-中子( $\sigma_{nn}$ )进行了仔细的区分.

对于碰撞系统  $^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$  和  $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$  来

说, 它们具有相同的电荷数, 但是它们具有不同的中子质子比  $N/Z$ , 即分别为 1.24 和 1.48. 我们通过非线性的相对论平均场理论(RMF)得到  $^{112}\text{Sn}$  和  $^{124}\text{Sn}$  两系统的中子质子的密度分布, 丰中子核的中子密度分布明显大于质子的密度分布. 通过核子初始化程序(对均方根半径和平均结合能随时间演化的分析来选取基态坐标和动量分布, 同时确定势的参数)得到稳定的核, 从中选取一个稳定  $^{112}\text{Sn}$  和  $^{124}\text{Sn}$  的基态核作为初始的反应核.

## 3 计算结果的分析及讨论

用 IQMD 模型分别对  $^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$  和  $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$  系统进行了比较系统的计算(都是两百个事件的模拟). 反应系统为对称系统, 两反应系统具有相同质子数和不同中子数, 因而两体系具有不同的同位旋, 它们的同位旋  $(N - Z)/A$  分别为 0.107 和 0.194. 同位旋效应包含库仑相互作用势、对称势、同位旋相关的截面以及泡利阻塞四个因素. 我们对两反应系统分别在不同入射能量、不同碰撞参数、不同势场以及不同反应截面下的轻粒子发射特征进行了研究.

考虑到在目前中能重离子碰撞实验中, 通常对带电粒子或中子的测量只选其中之一. 所以我们主要关心的是带电粒子, 同时考虑到实验中探测效率的限制. 我们将采用的轻粒子的比可以很大程度上抵消由于探测效率带来的系统误差. 因此本文主要显示有关轻粒子比的结果. 另一方面, 近来的有关实验<sup>[15]</sup>和理论<sup>[10, 16, 17]</sup>的研究表明中快度区的丰中子的轻粒子的产额似乎高于弹核快度同类粒子. 我们也将首次以 IQMD 模型出发研究这种现象.

由于是动力学模型, 首先应该看一下时间相关的物理量, 从而进行提取稳定时刻后的物理量来分析讨论. 作为一个例子, 图 1 显示了对  $^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$  在碰撞参数  $b = 0 - 1.5 \text{ fm}$ , 能量  $E = 50 \text{ MeV/u}$  软势作用下的中快度空间和炮弹快度空间轻粒子产额比随时间的演化过程, 图中的误差是计算的统计误差. 假如在质心系中定义归一化的靶核快度为 -1, 弹核的快度为 1, 中快度空间的范围定义在  $-0.25 \leq Y \leq 0.25$  之间,  $Y \geq 0.25$  为弹核粒子快度. 可以发现, 到  $t = 100 \text{ fm}/c$  时, 比值基本不变, 说明轻粒子产额比  $R(d/p), R(t/d), R(n/p), R(t^3\text{he}), R(d^3\text{he}), R(t^4\text{he})$  已经基本稳定. 因此我们可以从

$t \geq 100 \text{ fm}/c$  时取出反应末态的轻粒子比值.

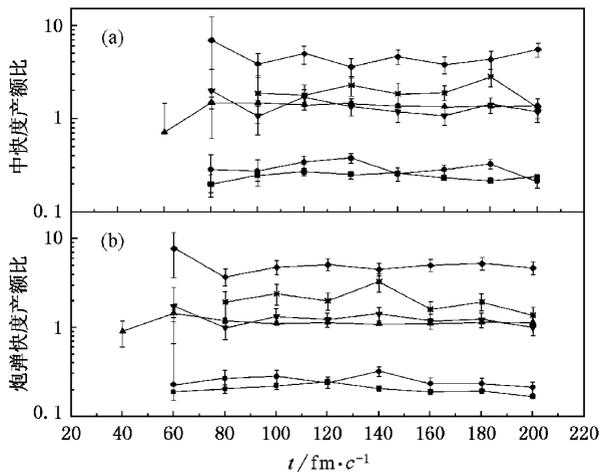


图 1 各种轻粒子比随时间的演化图

(a) 为中快速度空间轻粒子产额比随时间的演化 (b) 为炮弹快速度空间轻粒子产额比随时间的演化

■为  $R(d/p)$ , ●为  $R(t/d)$ , ▲为  $R(n/p)$ , ▼为  $R(t^3/he)$ , ◆为  $R(d^3/he)$ , \* 为  $R(t^4/he)$

程度. 对于  $R(t^3/he)$ ,  $R(d^3/he)$  和  $R(t^4/he)$  情形比较复杂, 可能是由于不同的元素的可比性复杂.

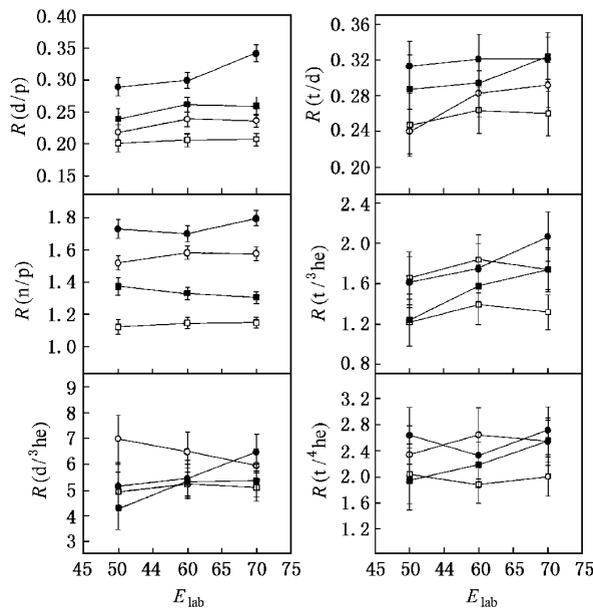


图 2 中快速度轻粒子产额比和炮弹快速度轻粒子产额比随能量的变化图

●为  $^{124}\text{Sn}$  系统中快速度轻粒子产额比, ○为  $^{124}\text{Sn}$  系统炮弹快速度轻粒子产额比, ■为  $^{112}\text{Sn}$  系统中快速度轻粒子产额比, □为  $^{112}\text{Sn}$  系统炮弹快速度轻粒子产额比

图 2 显示了  $^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$  和  $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$  系统分别在相同的碰撞参数 (0—1.5 fm), 相同的势场 (软势) 以及在不同能量点 (50 MeV/u, 60 MeV/u, 70 MeV/u) 下产生的炮弹快速度空间轻粒子产额的比值和中快速度空间轻粒子产额的比值随着入射能量的变化. 在各个不同能量点下,  $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$  系统产生的中快速度区间轻粒子比 (用 ● 点表示)  $R(d/p)$ ,  $R(t/d)$ ,  $R(n/p)$ ,  $R(t^3/he)$ ,  $R(d^3/he)$ ,  $R(t^4/he)$  比  $^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$  系统产生的轻粒子的比值 (用 ■ 点表示) 大, 同样  $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$  系统产生的炮弹快速度区间轻粒子比 (用 ○ 点表示) 比  $^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$  系统产生的轻粒子的比值 (用 □ 点表示) 大. 体现了这些比值能够反映出发射源的同位旋大小, 是一种系统同位旋的探针. 这与我们以前同位旋相关的晶格气体模型的结论是一致的. 对于不同能量下的同一系统的中快速度区粒子比值和炮弹快速度的粒子比值进行比较分析, 发现中快速度空间粒子比与炮弹快速度空间的粒子比几乎保持相同的趋势. 另一方面, 这些轻粒子比值基本上随着能量的变化不大明显, 这是由于单粒子的产额随着能量增长规律几乎是同样的, 但比值后能量依赖性就相互抵消了. 同时对  $R(d/p)$ ,  $R(t/d)$  和  $R(n/p)$ , 明显发现中快速的比要高于炮弹快速度. 这说明中快速度区间通常可以产生更多的丰中子同位素, 也就是, 如果存在着中快速度源的话, 它具有更高的丰中子

我们选取能量为 50 MeV, 采用软势对  $^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$  和  $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$  系统在不同碰撞参数下进行了研究. 碰撞参数  $b$  分别取为 0—1.5 fm, 1.5—3.0 fm, 3.0—4.5 fm, 4.5—6.0 fm 四个区间, 所得到的碰撞参数为这个区间中的随机产生数. 在图 3 中分别用横坐标的 1, 2, 3, 4 来表示上述四个区间, 每个碰撞参数下取 200 个事件. 图 3 显示了两个不同反应系统产生的炮弹快速的轻粒子比以及中快速度范围的轻粒子比随碰撞参数的变化. 从  $R(d/p)$ ,  $R(t/d)$ ,  $R(n/p)$ ,  $R(t^3/he)$ ,  $R(d^3/he)$ ,  $R(t^4/he)$  这些比值能够发现  $^{124}\text{Sn}$  系统产生的炮弹快速的轻粒子比值和中快速的轻粒子比值与  $^{112}\text{Sn}$  系统产生的相比显得要大一点, 这当然体现了它们对入射道同位旋的依赖性. 对于同一系统的炮弹快速的轻粒子比与中快速度轻粒子比进行比较, 发现两系统的  $R(d/p)$ ,  $R(t/d)$ ,  $R(n/p)$  的中快速度范围内的轻粒子的比值要大于炮弹快速的轻粒子的比值, 也就是说中快速度范围产生粒子的相对丰中子程度比炮弹快速度范围内的大, 这在不同的碰撞参数条件下几乎都是如此. 类似于图 1, 这些比值与碰撞参数的依赖性也

不强,因为轻粒子产额随碰撞参数几乎以相同的规律减少,它们的比值会相互抵消这种效应.

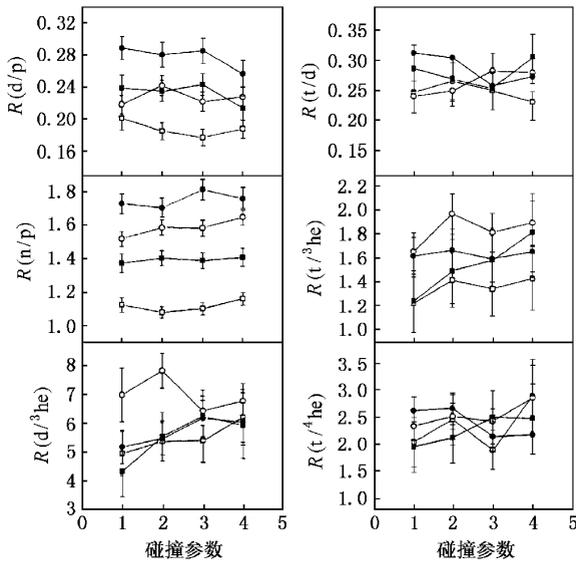


图 3 炮弹快度的轻粒子比和中快度轻粒子比随碰撞参数的变化图

■为<sup>112</sup>Sn系统中快度的轻粒子比, □为<sup>112</sup>Sn系统炮弹快度的轻粒子比, ●为<sup>124</sup>Sn系统中快度的轻粒子比, ○为<sup>124</sup>Sn系统炮弹快度的轻粒子比

对于能量为 50 MeV 的<sup>112</sup>Sn + <sup>112</sup>Sn 系统,我们采取不同势场(soft potential, stiff potential)进行进一步的比较,发现势场对于产生的轻粒子的比有一定的影响.对于  $R(d/d), R(t/d), R(n/p)$  轻粒子比来说,软势条件下产生的比值比在硬势条件下产生的大,而  $R(t/{}^3\text{he}), R(d/{}^3\text{he}), R(t/{}^4\text{he})$  则相反,造成的原因是在软势下<sup>3</sup>he, <sup>4</sup>he 产生的比硬势下的多,而 n, p, d 和 t 在硬势下更容易产生.中快度轻粒子比值与炮弹快度轻粒子比值的趋势是一致的,如表 1 2.

表 1 不同势场下不同轻粒子(中快度)比值的比较

	$R(d/p)$	$R(t/d)$	$R(n/p)$	$R(t/{}^3\text{he})$	$R(d/{}^3\text{he})$	$R(t/{}^4\text{he})$
软势	0.239	0.287	1.372	1.239	4.317	1.957
硬势	0.212	0.276	1.258	1.636	5.935	2.971

表 2 不同势场下不同轻粒子(炮弹快度)比值的比较

	$R(d/p)$	$R(t/d)$	$R(n/p)$	$R(t/{}^3\text{he})$	$R(d/{}^3\text{he})$	$R(t/{}^4\text{he})$
软势	0.201	0.247	1.122	1.217	4.946	2.045
硬势	0.183	0.208	1.101	1.429	6.866	2.351

在不同核子-核子截面条件下对于发射粒子进行了研究.如图 4,分别取截面  $\sigma/\sigma_{\text{exp}}$  为 0.80, 1, 1.20, 系统为<sup>112</sup>Sn + <sup>112</sup>Sn 在能量为 50 MeV、硬势和软势以及在中心碰撞的条件计算得到.采用轻粒子比值,它们分别为  $R(d/p), R(t/d), R(n/p), R(t/{}^3\text{he}), R(d/{}^3\text{he}), R(t/{}^4\text{he})$ .从图 4 中可以看到不同  $\sigma$  对于轻粒子的产额比的影响不大,这对于在硬势和软势条件下都是一致的.  $R(d/{}^3\text{he}), R(t/{}^4\text{he})$  这两个比值涨落虽然大了一点,但它们的相对影响还是比较小,软势下分别为 5.096% 和 6.92%,硬势下分别为 2.25% 和 1.29%.总体来说,不同反应截面对于轻粒子比的影响不大.

通过以上对势场和核子-核子截面作用对轻粒子比值的影响,提示我们可能从对轻粒子比的研究中,有可能提取核态方程的软硬度.

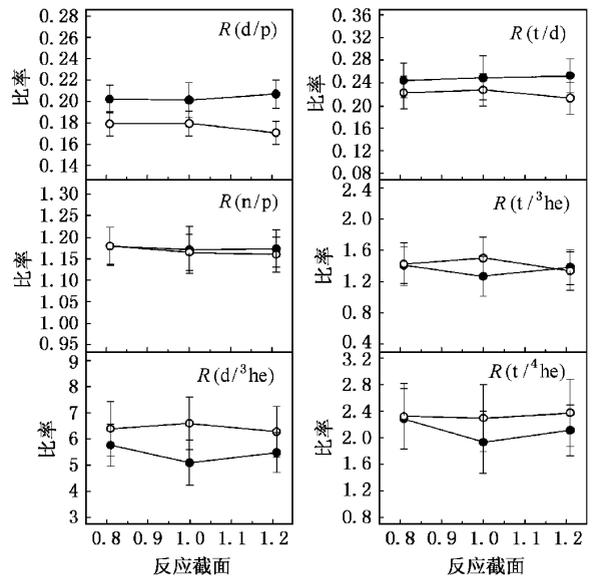


图 4 不同反应截面下的轻粒子的比值

●软势下计算得到的比值, ○硬势下计算得到的比值

## 4 结 论

利用 IQMD 模型,研究了<sup>112</sup>Sn + <sup>112</sup>Sn 和<sup>124</sup>Sn + <sup>124</sup>Sn 两反应系统在不同的入射能量、不同碰撞参数、不同势场以及不同反应截面下轻粒子的发射情况.发现轻粒子比能够较好地反应重离子碰撞中的同位旋效应.除了非常周边的反应外,相同快度区间丰中子系统的轻粒子比 ( $R(d/p), R(t/d), R(n/p), R(t/{}^3\text{he}), R(d/{}^3\text{he}), R(t/{}^4\text{he})$ ) 比缺中子系统的大.非常周边反应的同位旋效应有减小的倾向性,有

时发生逆转. 非常周边反应由于二核重叠少等原因, 整个核的同位旋所引起的同位旋效应的作用需要更细致地讨论. 通过理论计算和实验数据的比较, 有可

能从轻粒子比中提取核态方程的信息, 同时还可以促进理论本身的发展.

- [ 1 ] W. L. Zhan, Z. Y. Guo, G. H. Liu *et al.*, Radioactive Ion Beam Line in Lanzhou Science in China, **A**(1999) (in press).
- [ 2 ] T. Kubo *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods In Phys. Res.*, **B70** (1992) 309.
- [ 3 ] H. Geissel *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods In Phys. Res.*, **B70** (1992) 286.
- [ 4 ] A. C. Mueller, R. Anne, *Nucl. Instrum. Methods In Phys. Res.*, **B56/57**(1991) 559.
- [ 5 ] B. M. Sherrill *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods In Phys. Res.*, **B56/57**(1991) 1106.
- [ 6 ] B. A. Li, C. M. Ko, W. Bauer, *Inter. Jour. Mod. Phys.*, **E2** (1998) 147.
- [ 7 ] Y. G. Ma *et al.*, *Phys. Rev.*, **C51**(1995) 710.
- [ 8 ] Y. G. Ma *et al.*, *Phys. Lett.*, **B390**(1997) A1.
- [ 9 ] Y. G. Ma, *Phys. Rev. Lett.*, **83**(1999) 3617.
- [ 10 ] Y. G. Ma *et al.*, *Phys. Rev.*, **C60**(1999) 24607.
- [ 11 ] J. Aichelin, *Phys. Rep.*, **202**(1990) 233.
- [ 12 ] L. W. Chen, X. D. Zhang, L. X. Ge, *High Energy Phys. and Nucl. Phys.*, **20**(1998) 1091 (in Chinese) [ 陈列文等, 高能物理与核物理 **20**(1998) 1091 ].
- [ 13 ] B. Chen, J. Y. Liu, F. S. Zhang *et al.*, *High Energy Phys. and Nucl. Phys.*, **24**(2000) 244 (in Chinese) [ 陈列文等, 高能物理与核物理 **24**(2000) 244 ].
- [ 14 ] K. Chen *et al.*, *Phys. Rev.*, **C166**(1968) 949.
- [ 15 ] J. F. Dempsey *et al.*, *Phys. Rev.*, **C54**(1996) 1710.
- [ 16 ] L. G. Sobotka *et al.*, *Phys. Rev.*, **C55**(1997) 2109.
- [ 17 ] P. H. Chomatz, F. Gulminelli, *Phys. Lett.*, **B447**(1990) 211.

## ISOSPIN EFFECTS ON THE LIGHT PARTICLES IN INTERMEDIATE ENERGY HEAVY ION COLLISIONS\*

ZHANG HU-YONG<sup>1)</sup> MA YU-GANG<sup>1)</sup> SU QIAN-MIN<sup>1)</sup> SHEN WEN-QING<sup>2)</sup>  
CAI XIANG-ZHOU<sup>1)</sup> FANG DE-QING<sup>1)</sup> HU PENG-YUN<sup>1)</sup> HAN DING-DING<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Shanghai Institute of Nuclear Research, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

<sup>2)</sup> Department of Physics, Ningbo University, Ningbo 315321, China)

<sup>3)</sup> Department of Electron Engineering, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

(Received 3 May 2000; revised manuscript received 20 August 2000)

### ABSTRACT

Within the framework of an isospin-dependent quantum molecular dynamics (IQMD) model, the emission features of light particles in  $^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$  and  $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$  are investigated at different beam energy, different impact parameter, different EOS and different nucleon-nucleon cross section. Calculations show that the ratios of light particles are consistent with the systematics of entrance channel isospin and the midrapidity region can emit more neutron-rich particles than projectiles-like rapidity. In addition, it is found that the light particle ratio is sensitive to the nuclear EOS but not to the nucleon-nucleon cross section, which makes it possible to extract the isospin-dependent EOS.

**Keywords** : isospin-dependent quantum molecular dynamics, isospin effects, ratio of the yields of light particles

**PACC** : 2570, 2587

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 19705012), National Natural Science Funds for Distinguished Young Scholar (Grant No. 19725521), Shanghai Science and Technology Development Funds (Grant No. 97QA14038), Special Foundation of Presidential of the Chinese Academy of Sciences and Major State Basic Research Development Program (Grant No. G200077400).