

# 同位旋依赖的动量相关作用对同位旋分馏的影响随入射道条件的演化\*

刘建业<sup>1)2)†</sup> 邢永忠<sup>1)3)</sup> 郭文军<sup>2)4)</sup>

1) 天水师范学院数理信息学院基础物理研究所, 天水 741000)

2) 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

3) 兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心, 兰州 730000)

4) 南京大学物理系, 南京 210008)

(2004 年 12 月 14 日收到, 2005 年 3 月 21 日收到修改稿)

由量子分子动力学通常应用的动量相关作用公式出发, 引入同位旋自由度后得到了在量子分子动力学中可用于数值计算的同位旋依赖的动量相关作用. 并用这个公式较系统地研究了在它的作用下, 同位旋分馏比的入射道效应和它们的动力学机理. 结果表明所有入射道能量、碰撞参数以及所有的丰中子碰撞系统中子-质子比和质量条件下动量相关作用的同位旋依赖性对同位旋分馏过程产生了重要的同位旋效应. 然而它没有明显改变同位旋分馏比对于对称势灵敏的依赖性, 即在考虑动量相关作用的同位旋自由度后同位旋分馏比仍是提取同位旋非对称核物质状态方程的灵敏探针.

关键词: 同位旋分馏比, 动量相关作用, 重离子碰撞

PACC: 2570, 2587, 0260

## 1. 引言

同位旋非对称核物质状态方程不仅对于了解原子核的性质是重要的, 而且也是研究和了解天体和宇宙演化过程的重要物理基础. 故近年来从理论和实验两个方面开展了许多研究并取得了可喜的进展<sup>[1-27]</sup>. 其中动量相关作用多年来一直是中能重离子碰撞研究中的一个重要研究课题, 但动量相关作用中的同位旋效应一直未被考虑. 最近 Das 和 Li 等研究了非对称核物质中对称势的动量相关作用和给出了在 Boltzmann-Uehling-Uhlenbeck (BUU) 方程中用于实际计算的公式<sup>[28, 29]</sup>. 但是同位旋依赖的量子分子动力学 (IQMD) 中动量相关作用 (MDI) 的同位旋效应尚未见报道. 本文主要是对量子分子动力学 (QMD) 中原有的 MDI 公式中引入同位旋自由度, 从而得到在 QMD 中可用于数值计算的同位旋依赖的动量相关作用 (IDMI) 的公式, 并应用该公式比较系

统地研究了中能重离子碰撞在各种入射道条件下, IDMI 对同位旋分馏过程的作用和它们的动力学机理. 计算结果表明, 对于所有束流能量、碰撞参数和丰中子碰撞系统, IDMI 都会在同位旋分馏中产生明显的同位旋效应. 然而对于所有的丰中子碰撞系统 IDMI 并没有改变同位旋分馏比对于对称势灵敏的依赖性.

## 2. 具有 IDMI 的同位旋依赖的量子分子动力学 (IQMD)

### 2.1. 具有 MDI 的 IQMD

在对 QMD 中的同位旋相关平均场, 两体碰撞包括泡里阻塞以及碰撞系统基态性质考虑同位旋效应后得到了同位旋依赖的量子分子动力学<sup>[30-33]</sup>. 而 IQMD 中的相互作用如下:

$$U(\rho) = U^{\text{Sky}} + U^{\text{Coul}} + U^{\text{sym}} + U^{\text{Yuk}} + U^{\text{MDI}} + U^{\text{Pauli}} \quad (1)$$

\* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: G2000077400), 国家自然科学基金重点项目 (批准号: 10435080), 国家自然科学基金面上项目 (批准号: 10447006, 10575075, 10447113, 10175080), 江苏省博士后科研项目和中国科学院知识创新工程重要方向项目 (批准号: KJCX2-SW-N02) 资助的课题.

$U^{\text{Sky}}$  是密度相关的 Skyrme 势,

$$U^{\text{Sky}} = \alpha \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right) + \beta \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^{\gamma}, \quad (2)$$

$U^{\text{Coul}}$  是库仑势;  $U^{\text{Yuk}}$  表示 Yukawa 势,

$$U^{\text{Yuk}} = t_3 \exp\left(\frac{|r_1 - r_2|}{m}\right) / \left(\frac{|r_1 - r_2|}{m}\right), \quad (3)$$

$U^{\text{MDI}}$  是动量相关作用 (MDI),

$$U^{\text{MDI}} = t_4 \ln^2 [t_5 (\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2)^2 + 1] \frac{\rho}{\rho_0}, \quad (4)$$

$U^{\text{Pauli}}$  是泡里势,

$$U^{\text{Pauli}} = V_p \left( \frac{\hbar}{q_0 p_0} \right)^3 \times \exp\left(-\frac{(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j)^2}{2q_0^2} - \frac{(\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j)^2}{2p_0^2}\right) \delta_{\text{pipj}}, \quad (5)$$

$$\delta_{\text{pipj}} = \begin{cases} 1 & \text{中子-中子或质子-质子,} \\ 0 & \text{中子-质子,} \end{cases}$$

$U^{\text{sym}}$  是对称势, 对称势的形式是有很多种, 本文使用了两种常用的对称势<sup>[1,2]</sup>

$$U_1^{\text{sym}} = cF_1(u) \delta\tau_z, \quad (6)$$

$$U_2^{\text{sym}} = cF_2(u) \left[ \delta\tau_z - \frac{1}{2} \delta^2 \right], \quad (7)$$

其中

$$\tau_z = \begin{cases} 1 & \text{中子,} \\ -1 & \text{质子,} \end{cases}$$

这里  $c = 32\text{MeV}$  是对称势的强度,  $u \equiv \rho/\rho_0$ ;  $F_1(u) = u$  和  $F_2(u) = u^{1/2}$ ;  $\delta$  是相对中子过剩, 即

$$\delta = \frac{\rho_n - \rho_p}{\rho_n + \rho_p} = \frac{\rho_n - \rho_p}{\rho}.$$

$\rho, \rho_0, \rho_n, \rho_p$  分别是核密度、饱和密度、中子密度和质子密度. 一个经验的密度相关的介质中核子-核子碰撞截面的公式如下<sup>[34]</sup>:

$$\sigma_{\text{NN}}^{\text{med}} = \left( 1 + \alpha \frac{\rho}{\rho_0} \right) \sigma_{\text{NN}}^{\text{free}}, \quad (8)$$

这里参数取  $\alpha = -0.2$  被发现与集体流的实验数据得到很好地符合,  $\sigma_{\text{NN}}^{\text{free}}$  是实验核子-核子碰撞截面<sup>[35]</sup>.

## 2.2. 同位旋依赖的动量相互作用 (IMDI)

没有同位旋效应的动量相关作用如方程(4)所示.

为了描述动量相关作用中的同位旋效应, 在方程(4)中引入同位旋自由度, 将同位旋无关的动量相关作用(4)式改造为 IMDI, 其中分别包括中子的 IMDI 和质子的 IMDI 如下:

$$V_n^{\text{MDI}}(\rho, k_n, p)$$

$$= t_4 \ln^2 [t_5 (\mathbf{p}_n - \mathbf{p}_n'')^2 + 1] C_{\text{nn}} \frac{\rho_n}{\rho_0} + t_4 \ln^2 [t_5 (\mathbf{p}_n - \mathbf{p}_p)^2 + 1] C_{\text{np}} \frac{\rho_p}{\rho_0}, \quad (9)$$

$$V_p^{\text{MDI}}(\rho, k_p, n)$$

$$= t_4 \ln^2 [t_5 (\mathbf{p}_p - \mathbf{p}_p'')^2 + 1] C_{\text{pp}} \frac{\rho_p}{\rho_0} + t_4 \ln^2 [t_5 (\mathbf{p}_p - \mathbf{p}_n)^2 + 1] C_{\text{pn}} \frac{\rho_n}{\rho_0}. \quad (10)$$

方程(9)左边的  $p$  和右边的  $\mathbf{p}_n''$  分别表示质子符号和除了中子  $n$  的  $\mathbf{P}_n$  以外其他中子的动量. 类似地, 方程(10)左边的  $n$  和右边的  $\mathbf{p}_p''$  分别表示中子符号和除了质子  $p$  的  $\mathbf{P}_p$  以外其他质子的动量. 这里  $\rho = \rho_n + \rho_p$ ,  $\mathbf{p}_n = \hbar k_n$  和  $\mathbf{p}_p = \hbar k_p$ .

最后我们得到同位旋依赖的动量相关作用

$$V_{\tau}^{\text{MDI}}(\rho, k_{\tau}, \tau')$$

$$= t_4 \ln^2 [t_5 (\mathbf{p}_{\tau} - \mathbf{p}_{\tau'})^2 + 1] C_{\tau\tau} \frac{\rho_{\tau}}{\rho_0} + t_4 \ln^2 [t_5 (\mathbf{p}_{\tau} - \mathbf{p}_{\tau'})^2 + 1] C_{\tau\tau'} \frac{\rho_{\tau'}}{\rho_0}. \quad (11)$$

这里  $\rho = \rho_{\tau} + \rho_{\tau'}$  和  $\mathbf{p}_{\tau} = \hbar k_{\tau}$ . 类似地方程(11)左边的  $\tau'$  和右边的  $\mathbf{p}_{\tau}'$  分别表示核子  $\tau'$  的符号和除了核子  $\tau$  的  $\mathbf{p}_{\tau}$  以外其他核子  $\tau''$  的动量. 本文写为  $V^{\text{MDI}} \equiv V^{\text{MDI}}(\rho, k) \equiv \text{MDI}$  和  $V^{\text{IDMI}} \equiv V_{\tau}^{\text{IDMI}}(\rho, k, \tau') \equiv \text{IDMI}$  这里  $C_{\text{nn}} = C_{\text{pp}} = C_{\tau\tau}$  和  $C_{\text{np}} = C_{\text{np}} = C_{\tau\tau'}$ . 上式中  $\tau \neq \tau'$ . 单体势如下式所示:

$$U_{\tau} = U_{\tau}(\rho, \kappa, \delta) = U^{\text{Sky}} + U^{\text{IDMI}} + U^{\text{sym}}, \quad (12)$$

$U^{\text{Sky}} \equiv U^{\text{Sky}}(\rho)$  由(2)式所示和  $U^{\text{sym}} \equiv U^{\text{sym}}(\rho, \delta, \tau)$ , 由(6)和(7)式所示. 其中

$$U_{\tau}^{\text{IDMI}} = \sum_{\tau'} t_4 \ln^2 [t_5 (\mathbf{p}_{\tau} - \mathbf{p}_{\tau'})^2 + 1] C_{\tau\tau} \frac{\rho_{\tau}}{\rho_0} + \sum_{\tau'} t_4 \ln^2 [t_5 (\mathbf{p}_{\tau} - \mathbf{p}_{\tau'})^2 + 1] C_{\tau\tau'} \frac{\rho_{\tau'}}{\rho_0}, \quad (13)$$

(13)式中的求和仅对核子的动量进行.  $C_{\tau\tau}$  和  $C_{\tau\tau'}$  由单体势(13)式和 Gogny 势的复合来确定<sup>[36]</sup>. 结果它们分别为  $C_{\tau\tau} = 0.5$  和  $C_{\tau\tau'} = 1.5$ . 这就表明中子-质子关联比中子-中子和质子-质子关联强. 单体 Gogny 势从有效 Gogny 相互作用计算得到. 具有 IDMI 的 IQMD 被用于确定碰撞系统基态性质, 例如结合能和均方半径必须与实验值一致. 在以上初始化过程中, 在 IQMD 中分别具有 MDI 和 IDMI 的相互作用势的参数如表 1 所示.

表 1 IQMD 中具有 IDMI 和 MDI 的相互作用势的参数

	$C_{\tau\tau}$	$C_{\tau\tau'}$	$\alpha/\text{MeV}$	$\beta/\text{MeV}$	$\gamma$	$t_3/\text{MeV}$	$m/\text{fm}$	$t_4/\text{MeV}$	$t_5(\text{c}^2/\text{MeV}^2)$	$V_p/\text{MeV}$	$\rho_0(\text{MeV}/c)$	$q_0/\text{fm}$
MDI	1.0	1.0	-390	320	1.14	7.5	0.8	1.57	$10^{-3}$	30	400	5.64
IDMI	0.05	1.5	-397	320	1.14	7.5	0.8	1.57	$10^{-3}$	30	400	5.64

### 3. 结果和讨论

介质中同位旋有关的核子-核子截面由  $\sigma^{\text{iso}}$  表示. 这里  $\sigma^{\text{iso}}$  表示  $\sigma_{np} \geq \sigma_{nn} = \sigma_{pp}$ ,  $\sigma_{np}$ ,  $\sigma_{nn}$  和  $\sigma_{pp}$  是分别由 (8) 式表示的中子-质子, 中子-中子和质子-质子截面.

#### 3.1. $\left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{nucl}} / \left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{frag}}$ 在 MDI 和 IDMI 两种条件下对碰撞系统中子-质子比的依赖关系

本文中同位旋分馏比由核子发射中子-质子比  $\left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{nucl}}$  对碎片发射中子-质子比  $\left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{frag}}$  的比值

$\left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{nucl}} / \left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{frag}}$  表示. 其中  $\left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{frag}}$  包括所有电荷数大于和等于 2 的碎片. 由于  $\left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{nucl}} / \left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{frag}}$  同时依赖于碰撞系统的质量和

中子-质子比, 故我们研究  $\left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{nucl}} / \left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{frag}}$  对系统中子-质子比的依赖性时系

统的质量必须确定. 研究  $\left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{nucl}} / \left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{frag}}$  对系统质量关系时系统

中子-质子比必须确定. 这样才能突出  $\left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{nucl}} / \left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{frag}}$  对系统中子-质子比的影响而将系

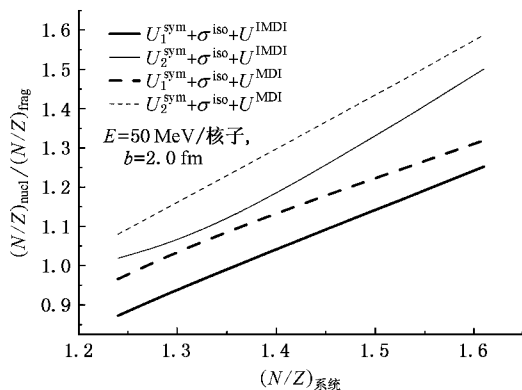
统质量的影响压低到最小; 反之亦然. 图 1 表示冻结时间  $\left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{nucl}} / \left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{frag}}$  对于系统

中子-质子比的依赖关系, 其中包括 4 个碰撞系统  $^{94}\text{Kr} + ^{94}\text{Kr}$ ,  $^{94}\text{Zr} + ^{94}\text{Zr}$ ,  $^{94}\text{Mo} + ^{94}\text{Mo}$  和  $^{94}\text{Ru} + ^{94}\text{Ru}$ . 其入射能量和碰撞参数分别是 50 MeV/核子和 2.0 fm. 4 个系统的质量都是 188. 包括两种情况 MDI 和 IDMI. 4 个碰撞系统的中子-质子比如表 2 所示.

表 2 4 个碰撞系统的中子-质子比

系统	$^{94}\text{Kr} + ^{94}\text{Kr}$	$^{94}\text{Zr} + ^{94}\text{Zr}$	$^{94}\text{Mo} + ^{94}\text{Mo}$	$^{94}\text{Ru} + ^{94}\text{Ru}$
$N/Z$	1.61	1.35	1.24	1.14

如我们所知丰中子系统的  $\left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{nucl}} / \left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{frag}}$  灵敏的依赖于对称势, 而弱的依赖于核子-核子截

图 1  $\left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{nucl}} / \left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{frag}}$  作为碰撞系统中子-质子比的函数

面<sup>[23, 25]</sup>. 因此  $\left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{nucl}} / \left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{frag}}$  仅对不同的对称势  $U_1^{\text{Sym}}$  和  $U_2^{\text{Sym}}$  及相同的核子-核子截面  $\sigma^{\text{iso}}$  计算.

从图 1 很明显看到, IDMI 引起  $\left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{nucl}} / \left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{frag}}$  从图中标识 MDI 的两条虚线降低到相应的标识 IDMI 的两条实线, 对 4 个碰撞系统都是如此. 同时从图 1 清楚地看到, 两条标识 IDMI 的具有不同对称势的两条实线之间差与标识 MDI 的具有不同两种对称势两条虚线之差属同一数量级. 这就表明在考虑 MDI 的同位旋依赖性后  $\left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{nucl}} / \left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{frag}}$  对于对称势的灵敏依赖性没有改变. 而且发现在 MDI 和 IDMI 两种情况下  $\left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{nucl}} / \left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{frag}}$  随系统中子-质子比的增加而增加, 因为丰中子对称势比缺中子对称势作用强, 由于对称势 (见 (6) 和 (7) 式) 与相对中子过剩  $\delta$  或  $\delta^2$  成比例. 然而丰中子系统的  $\delta$  比缺中子系统的  $\delta$  大. 因为 4 个系统的质量相同, 故丰中子系统致使更多的中子发射, 因为对称势对中子是斥力, 而对质子是吸引力, 结果就导致  $\left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{nucl}}$  的增加. 由

于系统中荷守恒, 故  $\left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{frag}}$  减小, 它们的比  $\left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{nucl}} / \left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{frag}}$  增加. 同时从图 1 看到, 在 MDI 和 IDMI 两种

情况下,对于丰中子系统 $^{94}\text{Kr} + ^{94}\text{Kr}$ ,  $\left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{nucl}} \left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{frag}}$  大于 1.0. 这意味着相对于碰撞系统中中子-质子比而言,丰中子为气相,缺中子为液相. 然而对于缺中子系统 $^{94}\text{Mo} + ^{94}\text{Mo}$  和  $^{94}\text{Ru} + ^{94}\text{Ru}$ ,  $\left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{nucl}} \left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{frag}}$  随着系统 中子-质子比的下降而逐渐降到 1.0 以下. 这意味着缺中子为气相,丰中子为液相. 因在同位旋分馏过程中初始激发态的缺中子碎片向丰中子  $\beta$  稳定线方向衰变从而产生丰中子碎片. 由于系统中荷守恒而产生缺中子气相,结果它们的比  $\left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{nucl}} \left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{frag}}$  随着系统中子-质子比的下降而逐渐下降到 1.0 以下.(缺中子气相表明  $\left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{nucl}}$  减小,丰中子液相即  $\left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{frag}}$  增加).

### 3.2. $\left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{nucl}} \left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{frag}}$ 对系统质量的依赖关系

图 2 表示为 IMDI 和 MDI 两种情况下,  $\left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{nucl}} \left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{frag}}$  作为系统质量的函数. 束流能量和碰撞参数分别为 50MeV/核子和 2.0fm. 3 个丰中子系统是  $^{64}\text{Fe} + ^{64}\text{Fe}$ ,  $^{89}\text{Kr} + ^{89}\text{Kr}$  和  $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ . 它们相应的中子-质子比分别为 1.48, 1.47 和 1.48. 即 3 个系统的中子-质子比基本相同.

对于 MDI 和 IMDI 以及两种不同对称势和相同核子-核子截面情况下进行计算,图 2 中曲线和它们的意义同图 1. 很明显 IMDI 将从标识 MDI 的两条虚线降低到相应的标识 IMDI 的两条实线. 且两条实线的间隔与两条虚线的间隔属同一数量级. 即意味着在考虑 MDI 的同位旋效应后对 3 个丰中子系统,没有改变  $\left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{nucl}} \left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{frag}}$  对于对称势灵敏的依赖性.

从图 2 很明显看到在 MDI 和 IMDI 两种情况下,  $\left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{nucl}} \left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{frag}}$  随系统质量的增加而减小,如图 3 所示,系统的密度  $\rho/\rho_0$  随系统的质量的增加而减小. 图 3 为 3 种系统的密度  $\rho/\rho_0$  随时间的演化. 很明显  $^{64}\text{Fe} + ^{64}\text{Fe}$  的密度比  $^{89}\text{Kr} + ^{89}\text{Kr}$  密度高,而重系统  $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$  的  $\rho/\rho_0$  最低.

从对称势 (6) 和 (7) 式可以看出对称势随密度的下降而减弱,这种对称势减弱就导致

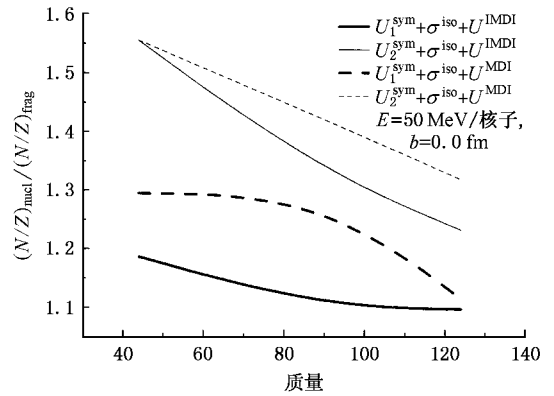


图 2 在 IMDI 和 MDI 两种情况下  $\left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{nucl}} \left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{frag}}$  作为系统质量的函数

$\left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{nucl}} \left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{frag}}$  的下降,即  $\left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{nucl}} \left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{frag}}$  随系统质量的增加和对称势的降低而降低. 因为同位旋分馏是在对称势作用下产生,故对称势的增强会加快同位旋分馏过程. 以上结果就表明重系统难以压缩而具有高的不可压缩性,而轻系统容易压缩具有低的不可压缩性.

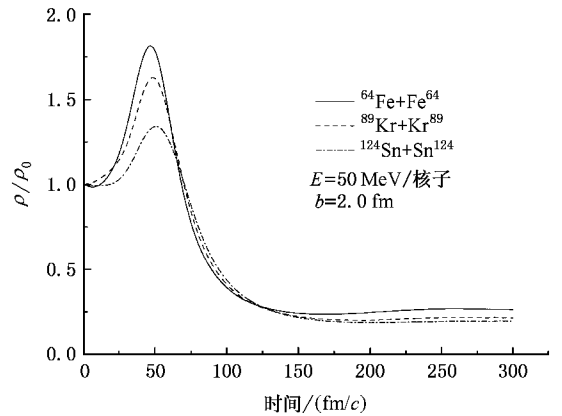


图 3 在入射能量  $E = 50\text{MeV/核子}$  和碰撞参数  $b = 2.0\text{fm}$  时,碰撞系统密度  $\rho/\rho_0$  随碰撞时间的演化

### 3.3. $\left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{nucl}} \left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{frag}}$ 在 MDI 和 IMDI 两种条件下对束流能量的依赖性

为了研究  $\left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{nucl}} \left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{frag}}$  在考虑动量相关作用 的同位旋效应之后随束流能量的演化. 图 4 表示  $\left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{nucl}} \left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{frag}}$  在碰撞参数  $b = 2.0\text{fm}$  条件下对束流能的演化,反应系统为丰中子的  $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ . 从图

4 很清楚看到,对于所有能量,IMDI 明显地将  $\left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{nucl}} / \left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{frag}}$  从标识 MDI 的两条虚线降到标识 IMDI 的两条实线. 而对应不同对称势,  $U_1^{\text{sym}}$  和  $U_2^{\text{sym}}$  的两条实线之差与对应同样两种对称势的两条实线之差属同数量级,这就意味着在考虑动量相关作用的同位旋效应之后对于所有能量,虽然引起  $\left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{nucl}} / \left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{frag}}$  明显的降低但并不改变  $\left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{nucl}} / \left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{frag}}$  对于对称势灵敏的依赖性. 同样看出,由 IMDI 引起  $\left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{nucl}} / \left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{frag}}$  减小的幅度,即具有相同  $U_1^{\text{sym}}$  的两条粗线之差或者具有  $U_2^{\text{sym}}$  的两条细线之差随束流能量的增加而增加. 这是由于系统激发能随束流能量的增加而增加,从而导致了同位旋分馏过程的加快和同位旋分馏比的增加.

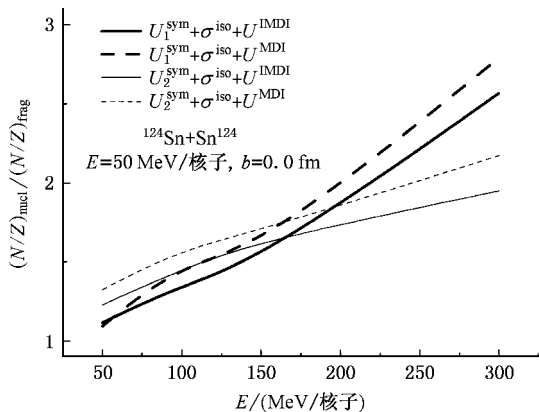


图 4 在碰撞参数  $b = 2.0 \text{ fm}$  条件下,  $\left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{nucl}} / \left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{frag}}$  对束流能量的演化

### 3.4. 在 MDI 和 IMDI 两种情况下, $\left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{nucl}} / \left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{frag}}$ 对碰撞参数 $b$ 的依赖性

图 5 表示在冻结时间和束流能量为 50 MeV/核子的条件下,  $\left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{nucl}} / \left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{frag}}$  对碰撞参数  $b$  的关系. 从图 5 可清楚看出对于所有碰撞参数  $b$ , IMDI 引起从标识 MDI 的两条虚线降到标识 IMDI 的两条

实线. 然而两条实线之差与两条虚线之差属同数量级. 即在考虑动量相关作用的同位旋效应之后对所有的碰撞参数并没有改变  $\left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{nucl}} / \left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{frag}}$  对于对称势的灵敏的依赖性.

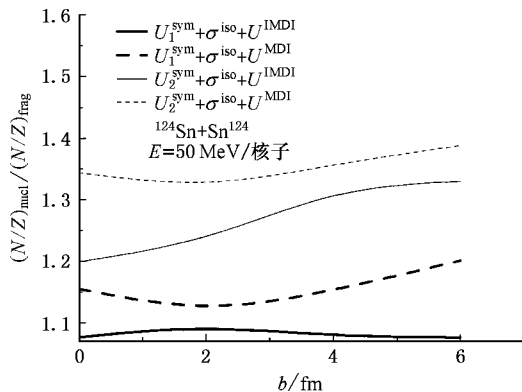


图 5 表示在冻结时间和束流能量为 50 MeV/核子时,  $\left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{nucl}} / \left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{frag}}$  对碰撞参数的关系

总结以上的计算结果,对于本文所研究的所有入射能量、碰撞参数和碰撞系统,动量相关作用的同位旋自由度对同位旋分馏过程产生了重要的同位旋效应. 但对于所有入射能量、碰撞参数和丰中子碰撞系统而言,IMDI 对  $\left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{nucl}} / \left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{frag}}$  的降低并没有改变它对于对称势灵敏的依赖性. 我们这个结果与 Li 在 BUU 方程中考虑动量相关作用的同位旋自由度后所得结论是一致的<sup>[29]</sup>.

## 4. 结 论

我们得到了在 IQMD 中可用于数值计算的同位旋依赖的动量相关作用 IMDI. 对本文研究的所有入射能量、碰撞参数和丰中子碰撞系统而言,IMDI 对中能重离子碰撞的同位旋分馏比产生了重要的同位旋效应. 但并不改变它对于对称势灵敏的依赖性. 故对于动量相关作用中同位旋效应的研究对于定量的研究和建立同位旋非对称核物质状态方程是重要的.

- [ 1 ] Li B A , Ko C M , Bauer W 1998 *Int. J. Mod. Phys. E* **7** 147
- [ 2 ] Li B A , Udo Schröder W 2001 *Isospin Physics in Heavy-Ion Collisions at Intermediate Energies* ( book ), ( New York : Nova Science Publishers , Inc )
- [ 3 ] Wada R , Hildenbrand , Lynen U *et al* 2003 *Phys. Rev. Lett.* **68** 014608
- [ 4 ] Yennello S J , Young B , Yee J *et al* 1994 *Phys. Lett.* **B321** 14  
Yennello S J , Veslesky M , Laforest R *et al* 2001 *Nucl. Phys.* **A681** 317c
- [ 5 ] Pak R , Benenson W , Bjarki O *et al* 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 1022  
Pak R , Li B A , Benenson W 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 1026
- [ 6 ] Westfall G D 2001 *Nucl. Phys.* **A630** 27c  
Westfall G D 1998 *Nucl. Phys.* **A681** 343c
- [ 7 ] Kunde G J , Gaff S J , Gelbke C K *et al* 1996 *Phys. Rev. Lett.* **77** 2897
- [ 8 ] Miller M L , Bjarki O , Magestro D J *et al* 1999 *Phys. Rev. Lett.* **82** 1399
- [ 9 ] Xu H 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 716
- [ 10 ] Udo Schröder W , Toke J 2001 *Nucl. Phys.* **A681** 418c
- [ 11 ] Sobotka L G 1994 *Phys. Rev.* **C50** R1272
- [ 12 ] Rami F , Leifels Y 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 1120
- [ 13 ] Sobotka L G , Charity R J , Agnihotri D K 2000 *Phys. Rev.* **C62** 031603
- [ 14 ] Li B A 2000 *Phys. Rev.* **C64** 054604
- [ 15 ] Li B A 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 4221
- [ 16 ] Li B A , Ko C M , Ren Z Z *et al* 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 1644
- [ 17 ] Pak R , Benenson W , Bjarki O , Brown J A , Hannuschke S A , Lacey R A , Li B A , Nadasen A , Norbeck E , Pogodin P , Russ D E , Steiner M , Stone N T B , Vander Molen A M , Westfull G D , Yang L B , Yennello S Y 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 1022
- [ 18 ] Pak R , Li B A , Benenson W , Bjarki O , Brown J A , Hannuschke S A , Lacey R A , Magestro D J , Nadasen A , Norbeck E , Russ D E , Steiner M , Stone N T B , Vander A , Molen M , Westfall G D , Yang L B , Yennello S J 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 1026
- [ 19 ] Colonna M , DiToro M , Fabbri G *et al* 1998 *Phys. Rev.* **C57** 1410  
Di Toro M , Baran V , Colonna M *et al* 2001 *Nucl. Phys. A* **681** 426C
- [ 20 ] Liu J Y , Guo W J , Wang S J , Zuo W , Zuo Q , Yang Y F 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 975
- [ 21 ] Liu J Y , Zhao Q , Wang S J , Zuo W , Guo W J 2001 *Phys. Rev. C* **63** 054612  
Liu J Y , Guo W J , Wang S J , Zuo W , Zhao Q , Yang Y F , 2001 *Nucl. Phys. A* **687** 475
- [ 22 ] Liu J Y , Guo W J , Xing Y Z , Zuo W , Lee X G 2002 *Phys. Lett. B* **540** 213  
Liu J Y , Xing Y Z , Guo W J , Zuo W , Lee X G 2002 *Chin. Phys. Lett.* **20** 216  
Liu J Y , Xing Y Z , Guo W J 2003 *Chin. Phys. Lett.* **20** 643  
Liu J Y , Xing Y Z , Guo W J 2003 *Chin. Phys. Lett.* **20** 8329
- [ 23 ] Liu J Y , Guo W J , Xing Y Z , Liu H 2003 *Nucl. Phys. A* **726** 123
- [ 24 ] Baran V , Colonna M , Di Toro M *et al* 2002 *Nucl. Phys.* **A703** 603
- [ 25 ] Guo W J , Liu J Y , Xing Y Z 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3316 ( in Chinese ) [ 郭文军、刘建业、邢永忠 2005 物理学报 **54** 3316 ]
- [ 26 ] Li W F , Xu S H , Zhang F S 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1020 ( in Chinese ) [ 李文飞、徐珊瑚、张丰收 2004 物理学报 **53** 1020 ]
- [ 27 ] Li W F , Zhang F S 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1888 ( in Chinese ) [ 李文飞、张丰收 2001 物理学报 **50** 1888 ]
- [ 28 ] Das C D , Das Gupta S , Gale C , Li B A 2003 *Phys. Rev.* **C68** 014608
- [ 29 ] Li B A , Das C B , Das Gupta S , Gale C 2004 *Phys. Rev.* **C69** 011606( R )
- [ 30 ] Bertsch G F , Gupta S D 1988 *Phys. Rep.* **160** 1991
- [ 31 ] Aichelin J , Rosenhauer A , Peilert G *et al* 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 1926
- [ 32 ] Aichelin J , Peilert G , Böhner A 1988 *Phys. Rev.* **C37** 2451
- [ 33 ] Reinhard P G 2000 *Computational Nuclear Physics* Vol.1 ( Springer-Verlag , Berlin ) pp28—50
- [ 34 ] Klakow D , Welke G , Bauer W 1993 *Phys. Rev.* **C48** 1982
- [ 35 ] Alkhozov G , Alkhozov G D , Bauer T *et al* 1977 *Nucl. Phys.* **A280** 365
- [ 36 ] Guo W J , Liu J Y , Xing Y Z 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3316 ( in Chinese ) [ 郭文军、刘建业、邢永忠 2004 物理学报 **53** 3316 ]

# Entrance channel effects on the role of isospin-dependent momentum interaction in isospin fractionation in heavy ion collisions<sup>\*</sup>

Liu Jian-Ye<sup>1,2,3)†</sup> Xing Yong-Zhong<sup>1,3)</sup> Guo Wen-Jun<sup>2,4)</sup>

1) *Department of Physics ,Tianshui Normal College , Tianshui 741000 ,China )*

2) *Institute of Modern Physics , Chinese Academy of Sciences , Lanzhou 730000 ,China )*

3) *Center of Theoretical Nuclear Physics , National Laboratory of Heavy Ion Accelerator ,Lanzhou 730000 ,China )*

4) *Department of Physics , Nanjing University , Nanjing 210008 ,China )*

( Received 14 December 2004 ; revised manuscript received 21 March 2005 )

## Abstract

An isospin degree of freedom is inserted into the momentum dependent interaction in the quantum molecular dynamics model to obtain an isospin dependent momentum interaction given in a form practically usable in isospin dependent quantum molecular dynamics model. We investigate the entrance channel effects for the role of isospin momentum dependent interaction on the isospin fractionation ratio and its dynamical mechanism in the intermediate energy heavy ion collisions. It is found that the isospin dependent momentum interaction induces a significant reduction of isospin fractionation ratio under all entrance channel conditions. However the strong dependence of isospin fractionation ratio on the symmetry potential is preserved after considering the isospin degree of freedom in the momentum dependent interaction.

**Keywords :** isospin fractionation ratio , momentum dependent interaction , heavy ion collision

**PACC :** 2570 , 2587 , 0260

<sup>\*</sup> Project supported by the Major State Basic Research Development Program in China ( Grant No. G2000077400 ), the Key Project of National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 10435080 ), the State Key Program of Natural Science Foundation of China ( Grant Nos. 10447006 , 10575075 , 10447113 , 10175080 ), the Jiangsu Planned Projects for Postdoctoral Research Funds and by the Funds of CAS for Key Topics in Innovation Engineering ( Grant No. KJCX2-SW-N02 ).

<sup>†</sup>E-mail : liujy@lzb. ac. cn