

# 核子-核子碰撞截面对同位素标度 参数 $\alpha$ 的同位旋效应\*

刘建业<sup>1)†</sup> 郭文军<sup>4)</sup> 左 维<sup>2)‡</sup> 李希国<sup>2)‡</sup>

1) 天水师范学院数理和信息学院, 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) 上海理工大学科学学院, 上海 200093)

(2007 年 12 月 8 日收到, 2008 年 1 月 27 日收到修改稿)

对两对重离子中心碰撞系统  $^{40}\text{C} + ^{40}\text{Ca}$  和  $^{60}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$  以及  $^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$  和  $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$  反应中就同位素标度参数  $\alpha$  对于核子-核子碰撞截面的同位旋效应进行了研究. 计算结果表明  $\alpha$  对同位旋相关核子-核子碰撞截面  $\sigma_{\text{NN}}^{\text{med}}(\alpha_m)$  相对于同位旋无关核子-核子碰撞截面  $\sigma_{\text{NN}}^1(\alpha_m)$  的同位旋效应很明显, 然而  $\alpha$  对  $\sigma_{\text{NN}}^{\text{med}}(\alpha_m)$  相对于同位旋无关核子-核子碰撞截面  $\sigma_{\text{NN}}^2(\alpha_m)$  的同位旋效应是较小的. 对以上两种条件下  $\alpha$  同位旋效应的机理进行了仔细研究.

关键词: 同位旋效应, 核子-核子截面, 机理, 同位素标度

PACC: 2570, 2587, 0260

## 1. 引 言

重离子碰撞中同位素标度特征已从实验和理论两方面被发现<sup>[1-4]</sup>, 即重离子碰撞中的同位素组成包含了关于核反应过程同位旋的信息. 如果在给定束流能量条件下完成两个具有相同电荷数  $Z_1 = Z_2 = Z$  和不同中子数  $N_2 > N_1$  其质量数分别为  $A_1(Z)$  和  $A_2(Z)$  的重离子碰撞, 结果发现两个碰撞系统同位素产额比  $R_{21}(N, Z)$  满足下述指数定律:

$$R_{21}(N, Z) = \frac{Y_2(N, Z)}{Y_1(N, Z)} = C \exp(\alpha N + \beta Z) \quad (1)$$

这里  $\alpha$  和  $\beta$  是拟合参数,  $C$  是归一化常数. 称关系式 (1) 为同位素标度定律. 这是在中能重离子碰撞中普遍存在的现象. 此后从实验和理论两个方面对于同位素标度行为的各种特征进行了研究<sup>[5-9]</sup>. 然而关于同位素标度参数  $\alpha$  对于核子-核子碰撞截面的同位旋效应没有研究, 对于介质中同位旋相关核子-核子碰撞截面  $\sigma_{\text{NN}}^{\text{med}}(\alpha_m)$  的知识知之甚少.

我们已知同位旋相关的核子-核子(N-N)截面

$\sigma_{\text{NN}}^{\text{med}}(\alpha_m)$  灵敏地依赖于碰撞系统的密度  $\rho$  和束流能量  $E_{\text{lab}}$ . 所以  $\sigma_{\text{NN}}^{\text{med}}(\alpha_m)$  和  $\frac{\sigma_{\text{np}}}{\sigma_{\text{pp}}}$  随密度  $\rho$ , 同位旋不对称性  $\delta = \frac{(\rho_n - \rho_p)}{(\rho_n + \rho_p)} = \frac{(\rho_n - \rho_p)}{\rho}$  和束流能量  $E_{\text{lab}}$  的变化对于重离子碰撞中观测量的影响及其研究对于得到介质中同位旋相关的核子-核子碰撞截面的知识是重要的. 例如从实验上测得的所有  $\sigma_{\text{np}}$  在束流能量在 600 MeV 以下都比  $\sigma_{\text{pp}}$  大<sup>[10]</sup>. 从实验实测量得到  $\frac{\sigma_{\text{np}}}{\sigma_{\text{pp}}}$  作为入射核子的能量的函数<sup>[10, 11]</sup> 及利用 Bonn 势和 Dirac-Brueckner 方法在对称核物质中当密度为  $0.1\rho_0$  和  $2\rho_0$  时得到  $\frac{\rho_{\text{np}}}{\rho_{\text{pp}}}$  作为  $E_{\text{lab}}$  的函数<sup>[12]</sup> 表明: 介质中的核子-核子截面比自由核子-核子碰撞截面减小了, 而且  $\frac{\rho_{\text{np}}}{\rho_{\text{pp}}}$  随密度的增加而减小. 这就表明核子-核子碰撞截面的同位旋依赖性随密度的增加而减弱. 然而有几个微观理论计算结果却表现出相反的趋势<sup>[13-15]</sup>. 总之  $\sigma_{\text{np}}$  和  $\sigma_{\text{pp}}$  的大小及它们之间的相对大

\* 国家自然科学基金重点项目(批准号: 10435080), 国家自然科学基金(批准号: 10447006, 10575075), 中国科学院知识创新工程重要方向项目(批准号: KJ9X2-SW-N02)资助的课题.

† E-mail: liujy@lzb.ac.cn

小随  $E_{\text{lab}}$  和  $\rho$  的增加而变化. 所以相对于不同的同位旋无关核子-核子碰撞截面  $\sigma_{\text{NN}}^1(\alpha_m)$  和  $\sigma_{\text{NN}}^2(\alpha_m)$ , 同位素标度参数  $\alpha$  对于同位旋相关核子-核子截面  $\sigma_{\text{NN}}^{\text{med}}(\alpha_m)$  同位旋效应的研究是重要的, 因为它对于获得  $\alpha$  对于核子-核子碰撞截面  $\sigma_{\text{NN}}^{\text{med}}(\alpha_m)$  的同位旋效应和得到重离子碰撞中介质中同位旋相关核子-核子碰撞截面的知识是重要的. 所以除了已经研究了  $\alpha$  对于  $\sigma_{\text{NN}}^{\text{med}}(\alpha_m)$  的介质效应<sup>[16]</sup>外, 还研究相对于两种不同同位旋无关截面  $\sigma_{\text{NN}}^1(\alpha_m)$  和  $\sigma_{\text{NN}}^2(\alpha_m)$  条件下  $\alpha$  对于  $\sigma_{\text{NN}}^{\text{med}}(\alpha_m)$  的同位旋效应. 这里  $\alpha$  对于核子-核子碰撞的同位旋效应定义为同位旋相关核子-核子截面  $\sigma_{\text{NN}}^{\text{med}}(\alpha_m)$  和同位旋无关截面  $\sigma_{\text{NN}}^1(\alpha_m)$  或  $\sigma_{\text{NN}}^2(\alpha_m)$  的  $\alpha$  值之间的差额. 计算结果表明, 相对于  $\sigma_{\text{NN}}^{\text{med}}(\alpha_m)$  和  $\sigma_{\text{NN}}^1(\alpha_m)$  的同位旋效应很明显. 然而  $\alpha$  相对于  $\sigma_{\text{NN}}^{\text{med}}(\alpha_m)$  和  $\sigma_{\text{NN}}^2(\alpha_m)$  的同位旋效应很小. 为此我们基于同位旋相关的量子分子动力学 (IQMD), 就两对重离子中心碰撞系统:  $^{40}\text{C} + ^{40}\text{Ca}$  和  $^{60}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$  以及  $^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$  和  $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$  在核子能量  $E_{\text{lab}}$  从 40 到 60 MeV 的能区同位素标度参数  $\alpha$  对于核子-核子碰撞过程同位旋效应进行了研究.

## 2. IQMD 的介绍

为了恰当地描述 IQMD 的同位旋效应<sup>[17-19]</sup>, 密度相关的平均场应当包括正确的同位旋项目, 即对称势和库仑势.  $\sigma_{\text{NN}}^{\text{med}}(\alpha_m)$  对于中子-中子, 质子-质子和中子-质子碰撞是不同的. 泡里阻塞应区分质子和中子. 考虑以上因素后由同位旋无关的 QMD 得到 IQMD. 而碰撞核的初始密度分布用 Skyrme-Hartree-Fock 模型计算得到, 碰撞核的初始坐标和动量由不含两体碰撞的 IQMD 的初始程序计算得到, 在此计算中必须保持碰撞核的均方半径和结合能与实验数据一致. 由此计算确定相互作用的参数作为包含两体碰撞的 IQMD 计算的输入数据. IQMD 的相互作用如下:

$$U(\rho) = U^{\text{Sky}} + U^{\text{Coul}} + U^{\text{sym}} + U^{\text{MDI}} + U^{\text{Yuk}} + U^{\text{Pauli}}, \quad (2)$$

$U^{\text{Sky}}$ ,  $U^{\text{Coul}}$ ,  $U^{\text{Yuk}}$ ,  $U^{\text{Sym}}$ ,  $U^{\text{MDI}}$  和  $U^{\text{Pauli}}$  分别是 Skyrme 势, 库仑势, Yukawa 势, 对称势, 动量相关作用和 Pauli 势<sup>[20, 21]</sup>.

$$\delta = \frac{(\rho_n - \rho_p)}{(\rho_n + \rho_p)} = \frac{(\rho_n - \rho_p)}{\rho}, \text{ 这里 } \rho \text{ 是总的核子}$$

密度;  $\rho_0$  是基态核子密度分布, 而  $\rho_n$  和  $\rho_p$  分别是中子密度分布和质子密度分布. 介质中核子-核子碰撞截面  $\sigma_{\text{NN}}^{\text{med}}(\alpha_m)$  采用下面经验表示式<sup>[22]</sup>:

$$\sigma_{\text{NN}}^{\text{med}}(\alpha_m) = \left(1 + \alpha_m \frac{\rho}{\rho_0}\right) \sigma_{\text{NN}}^{\text{free}}. \quad (3)$$

在本计算中  $\alpha_m = -0.2$  可以重现集体流的实验数据. 其中  $\sigma_{\text{NN}}^{\text{free}}$  是文献 [10] 实验中得到的核子-核子碰撞截面数值. 我们采用 (3) 式即可得到核子-核子碰撞的介质效应.

## 3. 结果和讨论

### 3.1. 用 IQMD 可以再现重离子碰撞中同位素标度行为

图 1 表示在给定束流核子能量  $E_{\text{lab}} = 50$  MeV 两个中心碰撞系统  $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$  和  $^{60}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$  产生的同位素产额比  $R_{21}(N, Z)$  作为中子数  $N$  的函数, 并具有不同的质子数  $Z$  线. 每一条  $Z$  线上的质子数相等, 并在图中线上有明确标注. 从图 1 明显看到  $R_{21}(N, Z)$  对于中子数  $N$  呈现出明显的指数依赖关系. 表明我们采用 IQMD 可以像利用反对称量子分子动力学 (AQMD)<sup>[23]</sup> 和量子分子动力学<sup>[41]</sup> 同样可以得到重离子碰撞中的同位素标度行为.

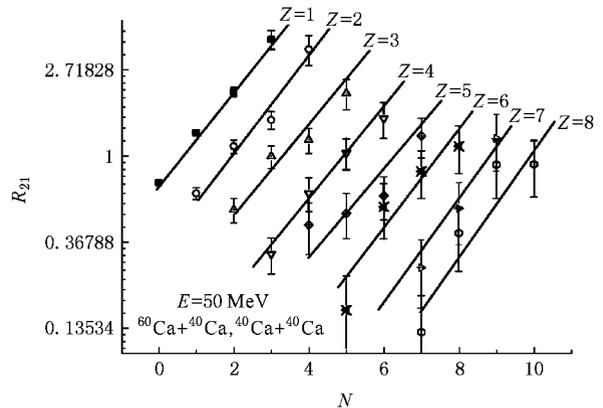


图 1  $R_{21}(N, Z)$  作为同位素中子数  $N$  的函数

### 3.2. 同位素标度参数 $\alpha$ 对于核子-核子碰撞截面 $\sigma_{\text{NN}}^{\text{med}}(\alpha_m)$ 的同位旋效应

图 2 表示同位素标度参数  $\alpha$  对于同位旋相关截面  $\sigma_{\text{NN}}^{\text{med}}(\alpha_m)$  和同位旋无关截面  $\sigma_{\text{NN}}^1(\alpha_m)$  及  $\sigma_{\text{NN}}^2(\alpha_m)$  的同位旋效应随束流能量  $E_{\text{lab}}$  的演化, 两对重离子

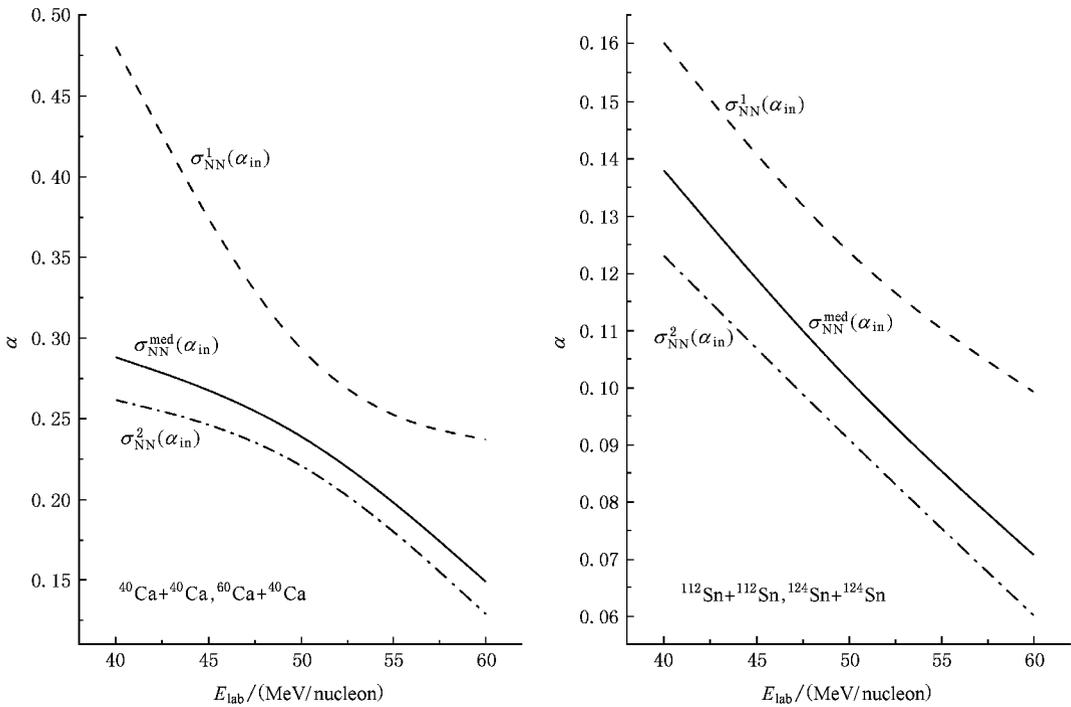


图 2 三种核子-核子碰撞截面条件下的同位素标度参数  $\alpha$  随束流能量  $E_{\text{lab}}$  的演化

碰撞系统为  $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$  和  $^{60}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$  以及  $^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$  和  $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ , 对束流核子能量  $E_{\text{lab}}$  从 40 MeV 到 60 MeV 的能区进行计算. 图中  $\alpha$  值是对应于各种  $Z$  线的不同  $\alpha$  值的平均值. 对应于  $\sigma_{\text{NN}}^{\text{med}}(\alpha_m)$ ,  $\sigma_{\text{NN}}^1(\alpha_m)$  和  $\sigma_{\text{NN}}^2(\alpha_m)$  的三条曲线图中都有明确标注. 从图 2 可以清楚地看到, 在整个能区的两对反应系统中, 实线 ( $\sigma_{\text{NN}}^{\text{med}}(\alpha_m)$ ) 均明显地比虚线 ( $\sigma_{\text{NN}}^1(\alpha_m)$ ) 低, 即  $\alpha$  对于  $\sigma_{\text{NN}}^1(\alpha_m)$  和  $\sigma_{\text{NN}}^{\text{med}}(\alpha_m)$  的同位旋效应明显降低了  $\alpha$  的值, 表明  $\alpha$  对应于 ( $\sigma_{\text{NN}}^{\text{med}}(\alpha_m)$ ) 和  $\sigma_{\text{NN}}^1(\alpha_m)$  的同位旋效应很明显; 然而, 实线都比点虚线 ( $\sigma_{\text{NN}}^2(\alpha_m)$ ) 略高. 表明在此条件下  $\alpha$  对于  $\sigma_{\text{NN}}^{\text{med}}(\alpha_m)$  和  $\sigma_{\text{NN}}^2(\alpha_m)$  的同位旋效应仅使  $\alpha$  略微提高. 即  $\alpha$  对于  $\sigma_{\text{NN}}^{\text{med}}(\alpha_m)$  和  $\sigma_{\text{NN}}^2(\alpha_m)$  的同位旋效应很小. 我们根据文献 [3] 中得到的下面公式对以上两种  $\alpha$  的同位旋效应机理进行解释.

$$\alpha = 4C_{\text{sym}} \left[ \left( \frac{Z}{A} \right)_1^2 - \left( \frac{Z}{A} \right)_2^2 \right] / T. \quad (4)$$

这里  $\left[ \left( \frac{Z}{A} \right)_1^2 - \left( \frac{Z}{A} \right)_2^2 \right]$  是电荷-质量比的平方之差,  $C_{\text{sym}}$  是对称能参数,  $T$  是碰撞系统的温度.  $\alpha$  对于  $\sigma_{\text{NN}}^{\text{med}}(\alpha_m)$  和  $\sigma_{\text{NN}}^1(\alpha_m)$  的同位旋效应从方程 (4) 可以看到同位素标度参数  $\alpha$  一方面线性地依赖于  $C_{\text{sym}}$  和

$\left[ \left( \frac{Z}{A} \right)_1^2 - \left( \frac{Z}{A} \right)_2^2 \right]$  另一方面线性地依赖于  $\frac{1}{T}$ . 如文献 [24] 中所指出的在重离子碰撞过程中, 从初始纵向动量向横向动量的耗散和转移主要是由核子-核子碰撞产生的. 从 (3) 式可以看出在  $E_{\text{lab}} = 50$  MeV 处  $\sigma_{\text{NN}}^{\text{med}}(\alpha_m)$  明显大于  $\sigma_{\text{NN}}^1(\alpha_m)$ . 因为同位旋无关的核子-核子碰撞截面  $\sigma_{\text{NN}}^1(\alpha_m)$  是由公式  $\sigma_{\text{np}} = \sigma_{\text{nn}} = \sigma_{\text{pp}}$  定义, 即  $\sigma_{\text{NN}}^1(\alpha_m) = 3\sigma_{\text{pp}}$ . 如我们所知, 在核子束流能量  $E_{\text{lab}} < 600$  MeV 的能区  $\sigma_{\text{np}}$  都远大于  $\sigma_{\text{nn}} = \sigma_{\text{pp}}$ , 这里  $\sigma_{\text{nn}}$ ,  $\sigma_{\text{pp}}$  和  $\sigma_{\text{np}}$  分别是中子-中子、质子-质子和中子-质子碰撞截面. 它们根据 (3) 式分别由  $\text{NN} \equiv \text{nn}$ ,  $\text{pp}$  和  $\text{np}$  表示, 而  $\sigma_{\text{NN}}^{\text{med}}(\alpha_m)$  同样根据 (3) 式分别由  $\text{NN} \equiv \text{nn}$ ,  $\text{pp}$  和  $\text{np}$  表示. 也就是说  $\sigma_{\text{NN}}^{\text{med}}(\alpha_m) = \sigma_{\text{nn}} + \sigma_{\text{pp}} + \sigma_{\text{np}}$  明显大于  $\sigma_{\text{NN}}^1(\alpha_m) = 3\sigma_{\text{pp}}$ . 同样在重离子碰撞中由核子-核子碰撞引起的核子动量耗散和转移的增加也引起了碰撞系统温度  $T$  的增加. 因此大的核子-核子截面的温度  $T$  大于小的核子-核子截面的温度  $T$ , 或者说对应于大的核子-核子截面的温度倒数  $\frac{1}{T}$  必然小于小的核子-核子截面的  $\frac{1}{T}$ . 同样对应于  $\sigma_{\text{NN}}^{\text{med}}(\alpha_m)$  的  $\frac{1}{T}$  必然小于  $\sigma_{\text{NN}}^1(\alpha_m)$  的  $\frac{1}{T}$ . 对称能参数  $C_{\text{sym}}$  正如文献 [25] 中所指出的, 它是随激发能的增加而

下降. 激发能随束流能量  $E_{lab}$  和核子-核子碰撞截面的增加而增加, 但是在给定束流能量处, 激发能随核子-核子碰撞截面的增加得到有限的增加. 即大核子-核子碰撞截面对应的  $C_{sym}$  必然小于小的核子-核子碰撞截面对应的  $C_{sym}$ , 因此对应  $\sigma_{NN}^{med}(\alpha_m)$  的  $C_{sym}$  小于  $\sigma_{NN}^1(\alpha_m)$  对应的  $C_{sym}$ . 基于(4)式这就同样导致  $\alpha$  的减小. 这里  $\left[\left(\frac{Z}{A}\right)_1^2 - \left(\frac{Z}{A}\right)_2^2\right]$  是确定的. 故依据(4)式  $\alpha$  相对于  $\sigma_{NN}^{med}(\alpha_m)$  和  $\sigma_{NN}^1(\alpha_m)$  的同位旋效应明显地引起  $\alpha$  的减小.

从图 2 同样可以清楚的看到, 实线 ( $\sigma_{NN}^{med}(\alpha_m)$ ) 比点虚线 ( $\sigma_{NN}^2(\alpha_m)$ ) 略微高一些. 这就意味着  $\alpha$  对应于  $\sigma_{NN}^{med}(\alpha_m)$  和  $\sigma_{NN}^2(\alpha_m)$  的同位旋效应引起  $\alpha$  略微增加. 这种同位旋效应的机理同样可以依据(4)式和核子-核子碰撞截面起主导作用来解释. 因为同位旋无关核子-核子碰撞截面  $\sigma_{NN}^2(\alpha_m)$  定义为  $\sigma_{np} = \sigma_{nn} = \sigma_{pp} = \frac{1}{2}(\sigma_{np} + \sigma_{pp})$ , 也就是  $\sigma_{NN}^2(\alpha_m) = \frac{3}{2}(\sigma_{np} + \sigma_{pp})$  比  $\sigma_{NN}^{med}(\alpha_m) = \sigma_{np} + \sigma_{nn} + \sigma_{pp}$  略微大一些, 如上所述: 1) 在束流核子能量在 600 MeV 以下能区  $\sigma_{pp}$  总是比  $\sigma_{np} = \sigma_{nn}$  大. 2) 对应于大核子-核子碰撞截面的  $C_{sym}$

和  $\frac{1}{T}$  都分别小于对应于小的核子-核子碰撞截面的  $C_{sym}$  和  $\frac{1}{T}$ . 而  $\left[\left(\frac{Z}{A}\right)_1^2 - \left(\frac{Z}{A}\right)_2^2\right]$  是确定的, 依据(4)式, 即对应于  $\sigma_{NN}^2(\alpha_m)$  的  $\alpha$  必然略小于对应于  $\sigma_{NN}^{med}(\alpha_m)$  的  $\alpha$ , 也就是  $\alpha$  被  $\sigma_{NN}^{med}(\alpha_m)$  和  $\sigma_{NN}^2(\alpha_m)$  之间的同位旋效应略微增加.

### 3.3. 同位旋标度参数 $\alpha$ 对于核子-核子碰撞截面的同位旋效应机理的进一步解释

可以借助原子核阻止  $R$  同位旋效应的机理进一步理解同位素标度参数  $\alpha$  在不同同位旋无关核子-核子碰撞截面  $\sigma_{NN}^1(\alpha_m)$  和  $\sigma_{NN}^2(\alpha_m)$  条件具有明显不同的同位旋效应, 因为原子核阻止  $R$  的同位旋效应如我们在文献 [24] 中指出的, 同样是由核子-核子碰撞决定的.

图 3 表示以上四个反应系统  $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ ,  $^{60}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ ,  $^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$  和  $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$  在束流能量  $E_{lab} = 50$  MeV/核子时的原子核阻止  $R$  随碰撞时间  $t$  的演化. 原子核阻止  $R$  是由碰撞系统核子动量的横向-纵向比来定义, 即

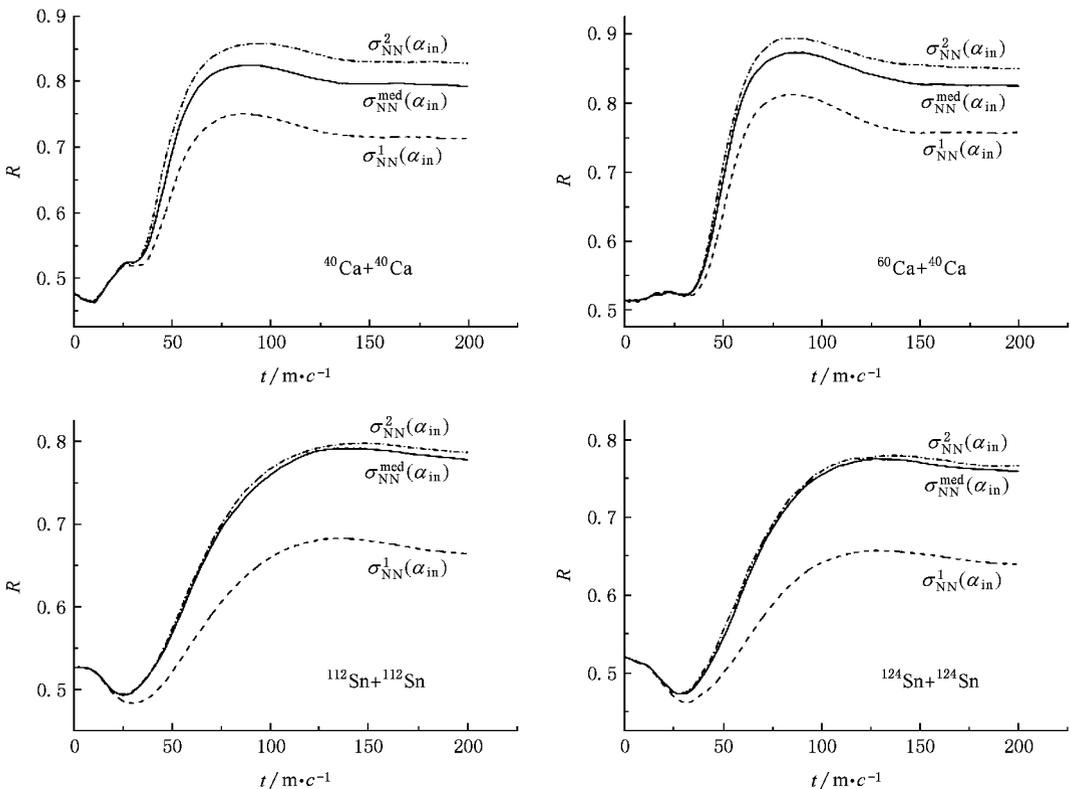


图 3 四个反应系统在三种核子-核子碰撞截面条件下的原子核阻止  $R$  随碰撞时间  $t$  的演化

$$R = \left( \frac{2}{\pi} \right) \left( \sum_i^A |P_{\perp}(i)| \right) / \left( \sum_i^A |P_{\parallel}(i)| \right).$$

这里碰撞系统的总质量  $A$  是弹核质量  $A_p$  和靶核质量  $A_t$  之和,第  $i$  个核子的横向动量和纵向动量分别是  $P_{\perp}(i)$  和  $P_{\parallel}(i)$ ,其中

$$P_{\perp}(i) = \sqrt{P_x^2(i) + P_y^2(i)}, P_{\parallel}(i) = P_z(i).$$

三种核子-核子碰撞截面  $\sigma_{NN}^{\text{med}}(\alpha_m)$ ,  $\sigma_{NN}^1(\alpha_m)$  和  $\sigma_{NN}^2(\alpha_m)$  相应的三条曲线图中都有明确标注.从图 3 清楚地看出  $\sigma_{NN}^{\text{med}}(\alpha_m)$  和  $\sigma_{NN}^1(\alpha_m)$  相应的  $R$  之间的差值明显大于相应于  $\sigma_{NN}^{\text{med}}(\alpha_m)$  和  $\sigma_{NN}^2(\alpha_m)$  的  $R$  之间的差值.即前者的同位旋效应明显大于后者的同位旋效应.而相应于  $\sigma_{NN}^2(\alpha_m)$  的  $R$  是最大的.究其原因,由于  $\sigma_{NN}^{\text{med}}(\alpha_m)$  和  $\sigma_{NN}^1(\alpha_m)$  之差明显大于  $\sigma_{NN}^{\text{med}}(\alpha_m)$  和  $\sigma_{NN}^2(\alpha_m)$  之差,而  $\sigma_{NN}^2(\alpha_m)$  是最大的,因为原子核阻止  $R$  主要由核子-核子碰撞决定,而且原子核阻止  $R$  随核子-核子碰撞截面的增加而增加.

对比图 2 和图 3,同位素标度参数  $\alpha$  对于核子-核子碰撞的同位旋效应类似于原子核阻止  $R$  对于核子-核子碰撞的同位旋效应,然而原子核阻止  $R$  随核子-核子碰撞截面的增加而增加,相反,同位素标度参数  $\alpha$  则随核子-核子碰撞截面的增加而减小.

## 4. 结 论

从以上结果和讨论可以结论如下:在中能重离子碰撞中利用同位旋有关的量子分子动力学同样可以计算得到同位素标度行为.特别是同位素标度参数  $\alpha$  对于核子-核子碰撞的同位旋效应是明显的.然而对不同的同位旋无关截面具有明显不同的同位旋效应,这种  $\alpha$  明显不同的同位旋效应的机理主要是由核子-核子碰撞截面的相互关系来得到解释.以上研究对于得到介质中同位旋相关的核子-核子碰撞截面的知识是重要的.

- [ 1 ] Xu H S, Tsang M B, Liu T X, Liu X D, Lynch W G, Tan W P, Vander Molen A, Verde G, Wagner A, Xi H F, Gelbke C K, Beaulieu L, Davin B, Larochelle Y, Lefort T, de Souza R T, Yanez R, Viola V E, Charity R J, Sobotka L G 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 716
- [ 2 ] Tsang M B, Friedman W A, Gelbke C K, Lynch W G, Verde G, Xu H S 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 5023
- [ 3 ] Tsang M B, Gelbke C K, Liu X D, Lynch W G, Tan W P, Verde G, Xu H S 2001 *Phys. Rev. C* **64** 054615
- [ 4 ] Ma Y G, Wang K, Cai X Z, Chen J G, Chen J H, Fang D Q, Guo W, Ma C W, Ma G L, Shen W Q, Su Q W, Tian W D, Wei Y B, Yan T Z, Zhong C, Zhou X F, Zuo T X 2005 *Phys. Rev. C* **72** 064603
- [ 5 ] Dorso C O, Escudero C R, Json M, Lopez J A 2006 *Phys. Rev. C* **73** 044601
- [ 6 ] Souliotis G A, Shetty D V, Eeselsky M V, Chubarian G, Trache L, Keksis A, Martin E, Yennello S J 2003 *Phys. Rev. C* **68** 024605
- [ 7 ] Souliotis G A, Shetty D V, Kekis A, Bell E, Jandel M, Veselsky M, Yennello S T 2006 *Phys. Rev. C* **73** 024606
- [ 8 ] Veselsky M, Souliotis G A, Jandel M 2004 *Phys. Rev. C* **69** 044607
- [ 9 ] Machner H, Aschman D G, Baruth-Ram K, Carter T, Cowley A A, Goldenbaum F, Nangu B M, Pilcher T V, Sideras-Haddad E, Sellschop T P F, Smit F D, Spoelstra B, Steyn D 2006 *Phys. Rev. C* **73** 044606
- [ 10 ] Alkhozov G D, Bauer T, Bertini R, Bimbot L, Bing O, Boudard A, Bruge G, Catz H, Chaumeaux A, Couvert P, Fontaine J M, Hibou F, Igo G J, Lugol J C, Matoba M 1977 *Nucl. Phys. A* **280** 365
- [ 11 ] Bol A, Devescovi P, Leleux P, Lipnik P, Macq P, Meulders J P 1985 *Phys. Rev. C* **32** 623
- Grundies V, Franz J, Rössle E, Schmitt H 1985 *Phys. Lett. B* **158** 15
- Lisowski P W, Shamu R E, Auchampaugh G F, King N S P, Moore M S, Morgan G L, Singleton T S 1982 *Phys. Rev. Lett.* **49** 255
- Charagi S K, Gupta S K 1990 *Phys. Rev. C* **41** 1610
- [ 12 ] Li G Q, Machleit R 1998 *Phys. Rev. C* **48** 11702
- [ 13 ] Giansiracusa G, Lombardo U, Sandulescu N 1996 *Phys. Rev. C* **53** R1478
- [ 14 ] Kohno M, Higashi M, Watanabe Y, Kawai M 1998 *Phys. Rev. C* **57** 3495
- [ 15 ] Li Q F, Li Z X, Mao G J 2002 *Phys. Rev. C* **62** 014606
- [ 16 ] Liu J Y, Huo H F, Zuo W, Lee X G 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]
- [ 17 ] Bertsch G F, Das G S 1988 *Phys. Rep.* **160** 1991
- [ 18 ] Aichelin J, Rosenhauer A, Peilert G, Stoecker H, Greiner W 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 1926
- [ 19 ] Aichelin J, Peilert G, Bohnet A, Rosenhauer A, Stöcker H, Greiner W 1988 *Phys. Rev. C* **37** 2451
- [ 20 ] Li B A, Ko C M, Bauer W 1998 *Int. J. Mod. Phys. E* **7** 147
- [ 21 ] Li B A, Wöder Udo Schr 2001 *Isospin Physics in Heavy-Ion Collisions at Intermediate Energies* (Nova Science Publishers, Inc. Huntington, New York)
- [ 22 ] Klakow D, Welke G, Bauer W 1993 *Phys. Rev. C* **48** 1982
- [ 23 ] Ono A, Danielewicz P, Friedman W A, Lynch W G, Tsang M B 2003 *Phys. Rev. C* **68** 051601(R)

- [ 24 ] Liu J Y , Guo W J , Wang S J , Zuo W , Zhao Q , Yang Y F [ 25 ] Tian W D , Ma Y G , Cai X Z , Fang D Q , Guo W , Shen W Q ,  
2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 975 Wang K , Wang H W 2007 *Phys. Rev. C* **76** 024607

## Isospin effect of nucleon-nucleon cross section on the isoscaling parameter $\alpha$ <sup>\*</sup>

Liu Jian-Ye<sup>1,2,3,†</sup> Guo Wen-Jun<sup>4)</sup> Zuo Wei<sup>2,3)</sup> Lee Xi-Guo<sup>2,3)</sup>

1  $\checkmark$  College of Mathematics-Physics and Information , Tianshui Normal University , Tianshui 741000 , China )

2  $\checkmark$  Institute of Modern Physics , Chinese Academy of Sciences , Lanzhou 730000 , China )

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

4  $\checkmark$  Science College , University of Shanghai for Science and Technology , Shanghai 200093 , China )

( Received 8 December 2007 ; revised manuscript received 27 January 2008 )

### Abstract

The isospin effects of isoscaling parameter  $\alpha$  on the nucleon-nucleon cross section are investigated for two couples of central nuclear reactions  $^{40}\text{C} + ^{40}\text{Ca}$  with  $^{60}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$  and  $^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$  with  $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$  within an isospin dependent quantum molecular dynamics. It is found that the isospin effect of isoscaling parameter  $\alpha$  on the isospin dependent nucleon-nucleon cross section  $\sigma_{\text{NN}}^{\text{med}}(\alpha_m)$  compared with that on the isospin independent nucleon-nucleon cross sections  $\sigma_{\text{NN}}^{\text{l}}(\alpha_m)$  is very obvious. However , the isospin effect of isoscaling parameter  $\alpha$  on  $\sigma_{\text{NN}}^{\text{med}}(\alpha_m)$  compared with that on the isospin independent nucleon-nucleon cross section  $\sigma_{\text{NN}}^{\text{h}}(\alpha_m)$  is small. The mechanisms for the above difference are investigated in detail.

**Keywords :** isospin effect , nucleon-nucleon cross section , mechanism , isoscaling

**PACC :** 2570 , 2587 , 0260

\* Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 10435080 ) and the National Natural Science Foundation of China ( Grant Nos. 10447006 , 10575075 ) , the Main Direction Program of Knowledge Innovation of the Chinese Academy of Sciences ( Grant No. KJCX2-SW-N02 ).

† E-mail : liujy@lzb.ac.cn