

同位旋相关的核子碰撞截面的不同形式 与核子的集体流*

朱玉兰¹⁾ 王艳艳¹⁾ 邢永忠^{2)†}

1) (陕西师范大学物理学与信息技术学院, 西安 710062)

2) (天水师范学院物理与信息科学学院, 天水 741000)

(2011年8月23日收到; 2011年12月28日收到修改稿)

在详细比较同位旋相关的核子-核子碰撞截面的几种常用形式的基础上, 利用 IBUU 模型, 分别对具有相同质量的 $^{60}\text{Ca}+^{60}\text{Ca}$ 和 $^{60}\text{Ni}+^{60}\text{Ni}$ 的中能重离子碰撞进行了模拟计算, 定量地分析了碰撞过程中不同形式的同位旋相关的核子-核子碰撞截面对于核子的快度分布和集体流的影响. 结果显示: 不同形式的核子碰撞截面, 可以给出相差较大的核子的快度分布和横向流, 但在同一种截面形式下, 对称势的变化对横向流的影响较小. 这表明在新的动量相关的对称势下, 中能重离子碰撞中集体流对于截面的敏感性依然成立; 同时表明, 在相同的碰撞截面和对称势形式下, 当入射能量在平衡能附近时, 入射粒子的中质比对核子在平面流的影响较大, 反之, 影响较小.

关键词: 核子-核子碰撞截面, 快度分布, 横向流, 平衡能

PACS: 25.75.Ld, 24.10.-i

1 引言

研究重离子碰撞的目的在于揭示微观粒子的组成及其基本相互作用规律. 现阶段, 人们正在通过对中高能区重离子碰撞的研究来认识原子核的构成及其在极端条件下核物质所表现出来的性质. 介质中核子-核子间的碰撞截面 $\sigma_{\text{NN}}^{\text{med}}$ 是决定核子间相互作用的重要物理量之一, 多年来人们已经从理论和实验两个方面对 $\sigma_{\text{NN}}^{\text{med}}$ 进行了一系列研究^[1-6]. 但到目前为止, 对 $\sigma_{\text{NN}}^{\text{med}}$ 的认识还存在着很大的不确定因素^[7]. 要对重离子碰撞过程有更细致的认识, 就需要通过对碰撞过程的数值模拟来分析反应动力学, 输运模型就是这一分析方法的重要工具. 为了完成对碰撞过程的模拟, 必须事先设定或选用核子-核子间的碰撞截面 $\sigma_{\text{NN}}^{\text{med}}$ 的具体形式.

因此, 探索或提取有关 $\sigma_{\text{NN}}^{\text{med}}$ 的知识仍是核物理界目前最为活跃的研究课题之一.

放射性束流所引起的重离子碰撞已成为核物理领域的一个十分活跃的课题, 就理论研究而言, 其主要目的在于揭示同位旋相关的核物质状态方程 (EOS) 和提取同位旋相关的核子-核子碰撞截面的有关信息. 近年来人们已经对于同位旋相关^[8]的核物质中相互作用进行了大量的研究, 特别是李保安等^[9-12]在对称势的研究方面取了很大进展. 然而, 正如文献^[13]所指出的, 与对称能相比较, 人们对同位旋相关的核子-核子碰撞截面的性质研究的较少. 其实, 同位旋相关的核子-核子碰撞截面已经具有不少的形式而且分别应用于不同形式的输运模型中, 每一种形式可以正确地给出反应过程中某一方面的特征. 然而, 对于同一观测量, 不同形式的核子-核子碰撞截面会引起怎样的差别呢?

* 国家自然科学基金 (批准号: 10575075, 10447006, 10435080) 资助的课题.

† E-mail: yzxing@tsnc.edu.cn

当然, 要回答这样的问题, 需要做更加系统而全面的研究. 本文首先在考虑有关对称势最新研究结论的前题下, 利用 IBUU 模型, 通过对同位旋对称与非对称的具体碰撞系统的模拟计算来分析在新的对称能形式下, 中能重粒子碰撞中同位旋相关的核子碰撞截面的不同形式对于核子输运特征的影响.

本文第二部分首先对中能区核子 - 核子碰撞的同位旋相关截面的几种表达式的特征做一简要比较; 第三部分简介 IBUU 模型与动量相关的对称势; 第四部分中, 通过对具体反应系统的模拟计算, 分

析同位旋相关的核子碰撞截面的不同形式对于核子输运特征的影响.

2 几种同位旋相关的核子 - 核子碰撞截面的特征比较

1968 年, Chen 等^[14] 根据实验数据拟合出了自由空间中, 中子 - 质子和中子 - 中子 (或质子 - 质子) 的碰撞截面分别为^[14-16] (称之为第一组截面公式 CS- I)

$$\sigma_{np}^{\text{free}} = \begin{cases} \frac{5067.4}{E^2} + \frac{9069.2}{E} + 6.9466(\text{mb}) & E \leq 40(\text{MeV}) \\ \frac{239380}{E^2} + \frac{1802.0}{E} + 27.147(\text{mb}) & 40 < E \leq 310(\text{MeV}) \\ 34.5(\text{mb}) & 310 \leq E \leq 800(\text{MeV}) \end{cases}, \quad (1)$$

$$\sigma_{nn}^{\text{free}} = \sigma_{pp}^{\text{free}} = \begin{cases} -\frac{1174.8}{E^2} + \frac{3088.5}{E} + 5.3107(\text{mb}) & E \leq 40(\text{MeV}) \\ \frac{93074}{E^2} - \frac{11.148}{E} + 22.429(\text{mb}) & 40 < E \leq 310(\text{MeV}) \\ \frac{887.37}{E} + 0.05331E + 3.5475(\text{mb}) & 310 < E \leq 800(\text{MeV}) \end{cases}, \quad (2)$$

这里 E 为实验室系中核子的入射能约在 400 MeV/nucleon 以下的能区, 由其给出的 n-p 的碰撞截面一般约为 p-p 或 n-n 的碰撞截面的 3 倍.

介质效应对核子 - 核子碰撞截面的影响不仅来自核多体的静态性质, 而且来自于核子碰撞的动力学性质. 前者反映在核子、介子等粒子的质量要受到周围粒子的影响, 后者则表现在碰撞过程中核子所能到达的中间态和终态要受的泡利原理的限制. 因此, 核子 - 核子碰撞截面的介质修正要涉及到碰撞过程中核子间的两体碰撞项、碰撞核子所感受到的平均场以及它们之间的耦合. 1993 年, Klakow 等^[17,18] 在研究集体流的性质时发现, 介质中核子 - 核子碰撞截面要小于自由空间中核子 - 核子碰撞截面, 可以将介质中核子 - 核子碰撞截面展开为核子分布密度的函数:

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

其中

$$\alpha = \rho_0 \frac{\partial}{\partial \rho} \{ \ln \sigma_{NN}^{\text{med}} \} |_{\rho=0}, \quad (4)$$

并发现在 $\alpha = -0.2$ 时, 对于流的理论计算结果能很好地与实验值相符合.

大约与 Klakow 同时, Li 和 Machleidt^[19,20] 从描述两核子碰撞的相对论单玻色子交换势出发, 应用 Dirac-Brueckner 方法, 研究了入射能量在 300 MeV 以下的介质中核子间的碰撞截面 (称之为第二组截面公式 CS- II):

$$\sigma_{pp}(E, \rho) = [23.5 + 0.0256(18.2 - E^{0.5})^{4.0}] \times \frac{1.0 + 0.1667E^{1.05}\rho^3}{1.0 + 9.70\rho^{1.2}}, \quad (5)$$

$$\sigma_{np}(E, \rho) = [31.5 + 0.092\text{abs}(20.2 - E^{0.53})^{2.9}] \times \frac{1.0 + 0.0034E^{1.51}\rho^2}{1.0 + 21.55\rho^{1.34}}, \quad (6)$$

E 为实验室系中核子的入射能, ρ 为核子的分布密度. 这一表达式显示介质中核子 - 核子碰撞截面随密度的增加而减小.

在 (5) 与 (6) 式的基础上, Cai 等^[21,22] 通过拟合核反应总截面的实验数据, 将能量和密度依赖加入到自由空间中的核子 - 核子碰撞截面中, 提出了

一个新的描述介质中核子-核子碰撞截面的半经验公式(称之为第三组截面公式 CS-III):

$$\sigma_{nn}(E, \rho) = [13.73 + 15.04\beta^{-1} + 8.76\beta^{-2} + 68.67\beta^4] \times \frac{1.0 + 7.772E^{0.06}\rho^{1.48}}{1.0 + 18.01\rho^{1.46}}, \quad (7)$$

$$\sigma_{np}(E, \rho) = [-70.67 - 18.18\beta^{-1} + 25.26\beta^{-2} + 113.85\beta] \times \frac{1.0 + 20.88E^{0.04}\rho^{2.02}}{1.0 + 35.86\rho^{1.90}}, \quad (8)$$

其中 $\beta = \sqrt{1.0 - \frac{1.0}{\gamma^2}}$, $\gamma = \frac{E}{931.5} + 1.0$, E 为实验室系中核子的入射能量, ρ 为核子的分布密度. (7) 和 (8) 式的第一部分描述自由空间的核子-核子碰撞截面, 其余部分反映了在介质中截面随入射能

量和核物质密度的变化关系. 从这组公式中也可以看出, 介质中核子-核子碰撞截面随着核物质密度的提高而下降, 介质效应的引入导致了截面的下降, 它在整个中能区都具有很重要的影响.

图 1 给出了上述三组截面公式在自由空间中随能量的变化曲线. 在本文所考虑的能区(如图 1 所示)内, 这三组截面随能量的变化各不相同. 应当指出的是由 Li 和 Machleidt 给出的截面公式 CS-II 仅适应于能量 $0 < E < 350$ MeV 的能区. 在这里为了比较方便, 我们同其他两组公式一样, 画出了能量在 $0 < E < 1000$ MeV 内的值, 当然这丝毫不影响本文中的其他计算与讨论. 对于第一与第三组截面, 在能量区间 $0 < E < 500$ MeV 内, 中子-质子碰撞截面大于质子-质子(或中子-中子)碰撞截面, 而第二组却相反.

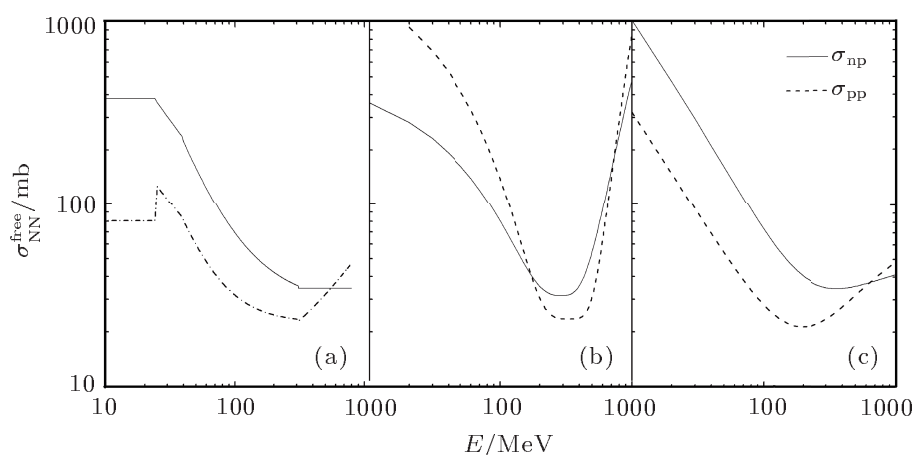


图 1 自由核子-核子碰撞截面随能量的变化 (a) CS-I 计算结果; (b) CS-II 计算结果; (c) CS-III 计算结果

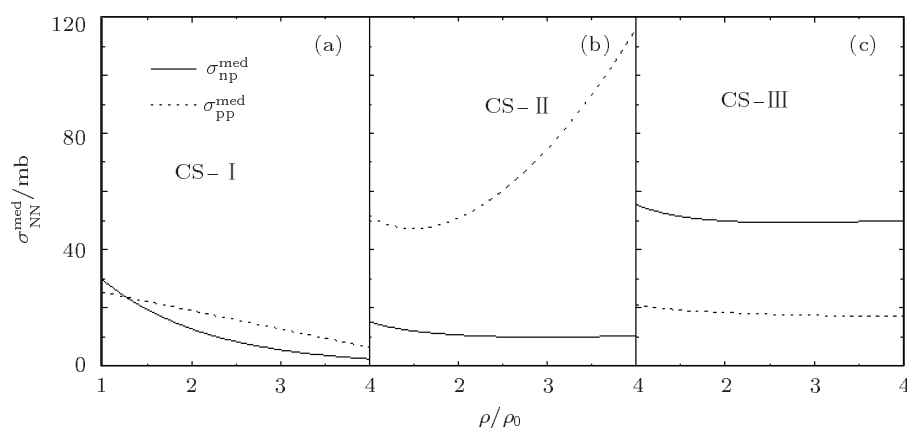


图 2 在 $E = 100$ MeV 的能量下, 核子-核子碰撞截面随核物质密度的变化

比较上述三组截面公式, 明显可以看出, 除了它们所反映的自由核子 - 核子碰撞截面对于能量的依赖关系有所不同之外, 在公式的表达形式上, 各自对于核物质密度的依赖关系也有明显的差别. 为了清楚起见, 我们在图 2 中给出了在确定的能量下 ($E = 100 \text{ MeV}$), 三组截面随核物质密度的变化. 从图 2 可见, 这三组公式所表示的截面随核物质密度的变化相差甚远, 除不同密度下的截面值的大小差别之外, CS-I 公式在约 $\rho = 1.2\rho_0$ 时 ($\rho_0 = 0.168 \text{ fm}^{-3}$), 中子 - 质子碰撞截面大于质子 - 质子碰撞截面, 在 $1.2\rho_0 < \rho < 4\rho_0$ 内, 中子 - 质子碰撞截面小于质子 - 质子碰撞截面; CS-II 公式在直至四倍于核物质饱和密度 ($\rho_0 = 0.168 \text{ fm}^{-3}$) 的区间内, 质子 - 质子碰撞截面大于中子 - 质子碰撞截面的结果; 而 CS-III 公式给出的结果却是质子 - 质子碰撞截面总是小于中子 - 质子碰撞截面.

3 同位旋相关的 BUU 模型及对称势

2004 年, Li 等 [23] 在同位旋相关的 BUU 输运模型的基础上计入了对称能的动量相关性, 建立了 IBUU04 输运模型, 利用此模型对由放射性束流引起的重离子碰撞过程的模拟计算表明: 对称能的动量相关性在研究同位旋非对称核物质的状态方程中起着重要作用. 值得一提的是, 在此之前的研究中, 人们并没有注意到这一特征而只涉及了对称能的密度依赖性. 因此, 在这种情况下所得到的有关核物质的状态方程的探针, 如中质比、中子 - 质子微分流、中子 - 质子关联函数等并不能很好地反映同位旋非对称核物质的状态方程的全面性质. 基于 Gongny 有效作用, 通过 Hartree-Fock 方法计算而得的新的单粒子势可以参数化为如下形式 [24]:

$$\begin{aligned}
 U(\rho, \delta, \mathbf{p}, \tau) = & A_u(x) \frac{\rho_{\tau'}}{\rho_0} + A_l(x) \frac{\rho_{\tau}}{\rho_0} \\
 & + B \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{\sigma} (1 - x\delta^2) \\
 & - 8\tau x \frac{B}{\sigma + 1} \frac{\rho^{\sigma-1}}{\rho_0^{\sigma}} \delta \rho_{\tau'} \\
 & + \frac{2C_{\tau, \tau}}{\rho_0} \int d^3 p' \frac{f_{\tau}(\mathbf{r}, \mathbf{p}')}{1 + (\mathbf{p} - \mathbf{p}')^2 / \Lambda^2} \\
 & + \frac{2C_{\tau, \tau'}}{\rho_0} \int d^3 p' \frac{f_{\tau'}(\mathbf{r}, \mathbf{p}')}{1 + (\mathbf{p} - \mathbf{p}')^2 / \Lambda^2},
 \end{aligned} \quad (9)$$

其中对中子 (质子) $\tau = 1/2$ ($-1/2$) 且 $\tau \neq \tau'$, $\sigma = \frac{4}{3}$, $f_{\tau}(\mathbf{r}, \mathbf{p}')$ 是核子 τ 的相空间分布函数, 参数 $A_u(x)$, $A_l(x)$ 为

$$\begin{aligned}
 A_u(x) &= -95.98 - x \frac{2B}{\sigma + 1}, \\
 A_l(x) &= -120.57 + x \frac{2B}{\sigma + 1},
 \end{aligned} \quad (10)$$

x 是为模拟各种微观、微象多体理论对密度依赖对称能的不同预言而引入的一个参数, 对于不同的 x 值, 可以得到不同密度依赖的对称能而保持其他的性质不变; $B = 106.35 \text{ MeV}$, $\Lambda = p_F^0$, 其中 p_F^0 是对称核物质中核子的费米动量; $C_{\tau, \tau'}$ 和 $C_{\tau, \tau}$ 项描述的是具有同位旋为 τ 的核子在与同位旋为 τ' (或者 τ) 的背景场中的核子作用时获得的单粒子势的动量相关部分, $C_{\tau, \tau'} = -103.4 \text{ MeV}$ 和 $C_{\tau, \tau} = -11.7 \text{ MeV}$. 因此, 对称势 $(U_n - U_p)/2\delta$ 就是动量、密度的二元函数.

4 分析与讨论

如前所述, 探测核物质 EOS 与提取介质中核子 - 核子碰撞截面的信息一直是重离子碰撞中的主要研究任务. 特别是针对放射性束流所引起的重离子碰撞的研究过程中, 人们已经得到一系列可以反映同位旋非对称核物质中 EOS 和 σ_{NN}^{med} 的信息可观测量, 即所谓的 EOS 或 σ_{NN}^{med} 截面“探针” [25–30]. 其中, 核子的集体流被视为介质中核子碰撞截面的灵敏探针 [30]. 最近, 为了能够从实验数据和理论模拟的对比中提取重离子反应的动力学性质, Kuma 等 [31] 通过人为地修改核子 - 核子碰撞截面的大小而找到了与实验值相符合的平衡能. 实际上, 反应过程中集体流或平衡能 [32–36] 的大小几乎决定于反应系统的全部属性和所有入射道条件, 不仅决定于反应的入射能量、碰撞参数, 而且决定于碰撞系统的质量、入射粒子的中质比、反应中核子 - 核子碰撞的截面和决定核子演化的平均场. 那么在相同的条件下, 常用的几种截面形式所给出的在平面流会有多大的差别呢? 另一方面, 李保安, 陈列文等 [37] 在确定放射性核素所引起的重离子碰撞中, 在核物质的状态方程方面取得了重要进展, 提出了动量相关的对称势, 那么在考虑了这样的动量相关对称势的情况下, 应用上述三种不同

截面所得到的集体流会发生怎样的变化呢? 为此, 本文中我们在确定系统质量和入射能量的情况下, 分别计算上述不同形式的截面下, 反应末态核子的分布与在平面流. 为了保证两个系统具有相同的质量, 同时为能明确地考察对称势的影响, 我们选择 $^{60}\text{Ca}+^{60}\text{Ca}$ 和 $^{60}\text{Ni}+^{60}\text{Ni}$ 作为模拟对象进行计算与分析.

图 3 给出了 $E = 100A \text{ MeV}$, $b = 4.0 \text{ fm}$ 时, $^{60}\text{Ca}+^{60}\text{Ca}$ 碰撞系统反应末态自由核子的快度分布, 计算中取了 $X = -1$ 的对称势, 其中左图和右图分别为自由质子与自由中子的快度分布. 从图中

可以看出, 中心快度区域的核子分别在三种不同截面下存在明显的差异, 截面 CS-I 和截面 CS-II 对应的核子数相差较大. 结合图 1 与图 2 知, 当 $E = 100A \text{ MeV}$ 时, 随着碰撞过程中核物质密度的增大, 上述三种不同截面中, CS-II 对应的核子-核子碰撞截面 (包括 pp 碰撞与 np 碰撞) 最大, 所以与之对应的单位快度区间内的自由核子数最多. 与此相反, 截面 CS-I 最小, 对应的核子数最少, 而截面 CS-III 变化并不大, 对应的碰撞核子数变化也平缓. 比较图 3(a) 与 (b) 图可知, 中子的快度分布比质子的快度分布受碰撞截面的影响更强烈 [38].

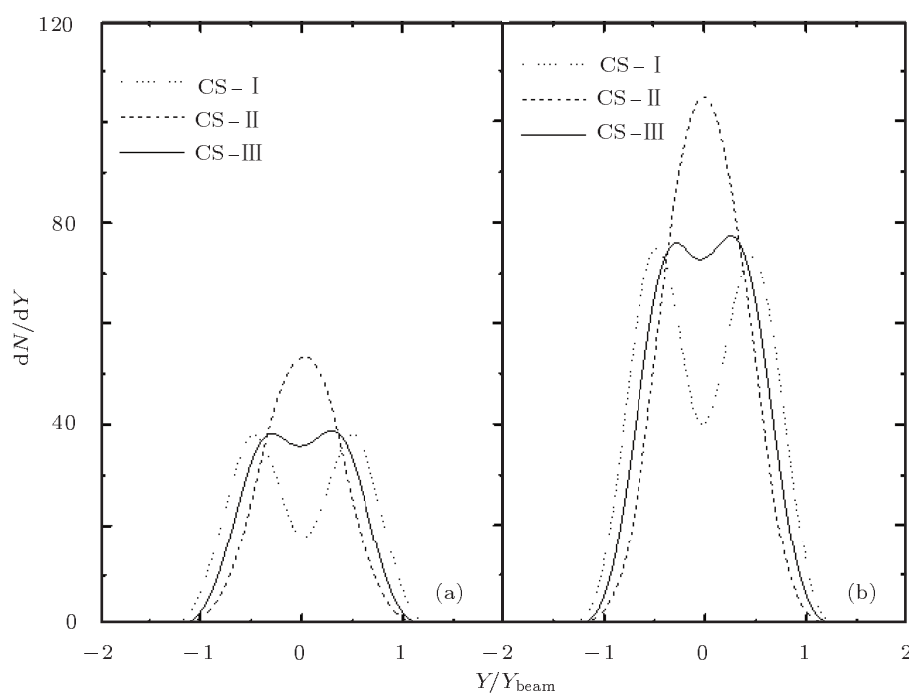


图 3 $^{60}\text{Ca}+^{60}\text{Ca}$ 碰撞系统中自由质子和中子的快度分布

图 4 给出了 $E = 100A \text{ MeV}$, $b = 4.0 \text{ fm}$ 时, $^{60}\text{Ca}+^{60}\text{Ca}$ 和 $^{60}\text{Ni}+^{60}\text{Ni}$ 碰撞系统在三种不同截面下, 平均每核子横动量 $\langle p_x \rangle$ 随快度分布的变化曲线 (实线). 从图可以看出, 三种不同截面对应的横向流有明显的差别: 截面 CS-II 与截面 CS-I 分别对应着正与负斜率的横向流, 截面 CS-III 对应的横向流的斜率近似为零. 结合图 1 与图 2 知, 在 $E = 100A \text{ MeV}$ 时, 随着碰撞过程中核物质密度的变化, 相对于其他两种截面形式而言, 截面 CS-II 所对应的核子-核子碰撞截面最大, 核子间相互作用的排斥性强于吸引力, 所以对应于正向的横向流. 与此

相反, 截面 CS-I 最小, 其对应于反向横向流. 由于 ^{60}Ca 是中质比为 2 的核素, 为了便于对比, 我们在此图中同时给出了在相同入射道条件下, 质量数为 60 而中质比近似为 1 的核素 ^{60}Ni 所引起的反应中核子的横向流 (虚线). 比较实线与虚线, 显示出上述三种形式的截面所引起的横向流的差异, 在丰中子核素的碰撞系统 $^{60}\text{Ca}+^{60}\text{Ca}$ 与稳定核素的碰撞系统 $^{60}\text{Ni}+^{60}\text{Ni}$ 中具有相同的表现, 两碰撞系统间的微小差别仅在于 ^{60}Ca 中的中子数略多于 ^{60}Ni , 因而前者给出的横向流斜率略大于后者.

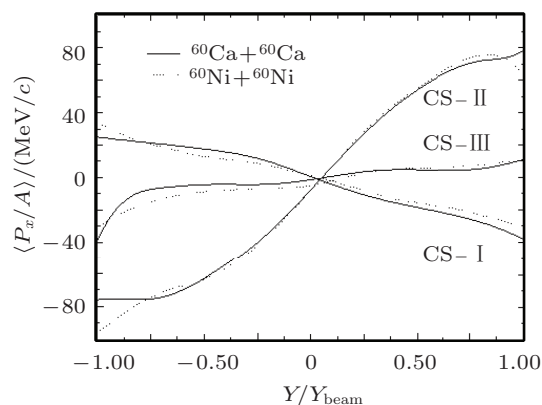


图4 $^{60}\text{Ca}+^{60}\text{Ca}$ 和 $^{60}\text{Ni}+^{60}\text{Ni}$ 在不同碰撞截面下平均每核子横动量 $\langle p_x/A \rangle$ 的快速分布

在对称势 (9) 式中, 参量 X 的不同取值对应不同硬度的核物质状态方程. 为了考察对称势的影响, 我们针对上述三种不同截面, 分别在 $X = 1, 0, -1$ 的情况下, 计算了 $E = 100A \text{ MeV}$, $b = 4.0 \text{ fm}$ 时, $^{60}\text{Ca}+^{60}\text{Ca}$ 和 $^{60}\text{Ni}+^{60}\text{Ni}$ 碰撞系统的平面流. 所得结果显示: 在给定的截面形式下, 参量 X 的不同取值所引起的平面流的变化很小, 这表明 (9) 式所示的动量相关的对称势并不改变平面流对于截面敏感而对于对称势不敏感的性质. 有意义的是, 不论是哪种截面形式, 也不论核物质状态方程的软硬程度如何, 在同一条件下, 两种不同中质比的碰撞系统所给出的结果相差并不明显. 正如李保安等在文献 [39] 中所指出的一样, 要在中能重离子碰撞中得到能够反映核子碰撞的同位旋效应的可观测量, 还需要做进一步的研究.

如前所述, 平衡能是一个几乎决定于反应过程中全部入射条件和粒子间相互作用的可观测物理量. 为探索重离子碰撞中可观测量对于同位旋自由度的依赖性, 我们就上述两种不同中质比的碰撞系统在完全相同的反应条件下的平衡能做了比较, 所得结果如图 5.

由图 5 可见: 1) 对于同一碰撞系统, 截面的不同形式对应的平衡能相差较大, 其中截面值较大者对应于较小的平衡能; 2) 在相同的对称势参量 X 和相同的截面形式下, 中质比较小的碰撞系统 $^{60}\text{Ni}+^{60}\text{Ni}$ 的平衡能要大于中质比较大碰撞系统 $^{60}\text{Ca}+^{60}\text{Ca}$, 这是由于在中子-质子间的碰撞截面大于质子-质子(或中子-中子间)碰撞截面的

情况下, 反应系统中的中子数越多, 则总的碰撞几率越大, 因而平衡能越小; 3) 相对而言, 截面形式 CS-III 所对应的平衡能在 $X = 0$ 的情况下与文献 [40—42] 给出的平衡能最为接近. 另外, 由于截面 CS-II 的值远比 CS-I 和 CS-III 的值大(参见图 1 和图 2), 在碰撞参数 $b = 4.0 \text{ fm}$ 的条件下所确定的平衡能很小, 故未在图中标出.

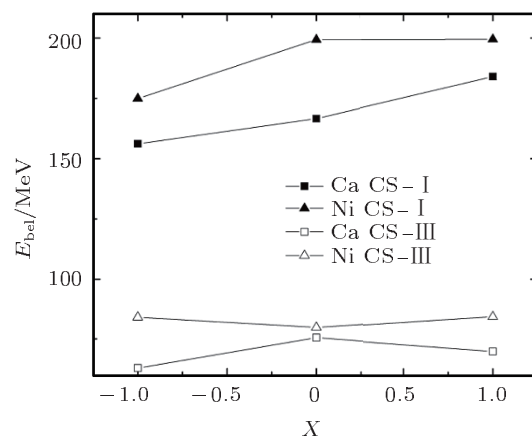


图5 不同对称势参量 X 和不同截面形式下, 碰撞系统在碰撞参数 $b = 4.0 \text{ fm}$ 时的平衡能

5 总结

本文在详细比较同位旋相关的核子-核子碰撞截面的三种常用形式的基础上, 利用 IBUU04 模型计算了不同截面形式下中能重离子碰撞中核子的快速分布和横向流. 通过比较相同的入射道条件下, 由不同中质比核素所引起的碰撞系统中核子的快速分布和横向流的差别, 说明了动量相关的对称势并不改变核子在平面流对于碰撞截面大小敏感的性质. 然而, 不论是哪种截面形式, 也不论核物质状态方程的软硬程度如何, 在相同的条件下, 当入射能量远离平衡能时, 两种不同中质比的碰撞系统所给出的横向流相差并不明显; 但当入射能量在平衡能附近时, 两种碰撞系统所给出的横向流有较明显的差别, 因而两种碰撞系统的平衡能差别较大. 这一结论对于我们通过对重离子碰撞的研究来提取介质中核子-核子碰撞截面的同位旋效应具有一定的指导意义.

- [1] Li B A 1993 *Phys. Rev. C* **48** 2415
- [2] Li Q F, Li Z X, Mao G J 2000 *Phys. Rev. C* **62** 014606
- [3] Li Q F, Li Z X, Zhao E G 2004 *Phys. Rev. C* **69** 017601
- [4] Westfall G D, Bauer W, Craig D, Cronqvist M 1993 *Phys. Rev. Lett.* **71** 1986
- [5] Xu H M 1991 *Phys. Rev. Lett.* **67** 2769
- [6] Xu H M 1992 *Phys. Rev. C* **46** R389
- [7] Zhao Q, Chen B, Liu J Y, Zhang F S, Wang S J, Chen L W, Zuo W 2000 *High Energy Physics And Nuclear Physics* **24** 426 (in Chinese) [赵强, 陈波, 刘建业, 张丰收, 王顺金, 陈列文, 左维 2000 高能物理与核物理 **24** 426]
- [8] Liu J Y, Guo W J, Zuo W, Li X G 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5458 (in Chinese) [刘建业, 郭文军, 左维, 李希国 2008 物理学报 **57** 5458]
- [9] Li B A, Das C B, Gupta S D 2004 *Phys. Rev. C* **69** 011603
- [10] Chen L W, Ko C M, Li B A 2004 *Phys. Rev. C* **69** 054606
- [11] Yong G C, Li B A, Chen L W, Zuo W 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5166 (in Chinese) [雍高产, 李宝安, 陈列文, 左维 2006 物理学报 **55** 5166]
- [12] Liu J Y, Guo W J 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 6933 (in Chinese) [刘建业, 郭文军 2010 物理学报 **59** 6933]
- [13] Li B A, Chen L W, Ko C M 2008 *Phys. Rep.* **464** 113
- [14] Li B A, Ko C M, Baur W 1998 *Int. J. Mod. Phys. E* **7** 147
- [15] Chen K, Fraenkel Z, Friedlander G, Grover 1968 *Phys. Rev.* **166** 949
- [16] Chen L W, Zhang X D, Ge L X 1996 *High Energy Physics and Nuclear Physic* **20** 1091 (in Chinese) [陈列文, 张晓东, 葛凌霄 1996 高能物理与核物理 **20** 1091]
- [17] Klakow D, Welke G, Bauer W 1993 *Phys. Rev. C* **48** 1982
- [18] Zhang F S, Li W F, Jin G M 2001 *Progress in Physics* **21** 469 (in Chinese) [张丰收, 李文飞, 靳根明 2001 物理学进展 **21** 469]
- [19] Li G Q, Machleidt R 1993 *Phys. Rev. C* **48** 1702
- [20] Li G Q, Machleidt R 1994 *Phys. Rev. C* **49** 566
- [21] Cai X Z, Feng J, Shen W Q, Ma Y G 1998 *High Energy Physics and Nuclear Physics* **22** 830 (in Chinese) [蔡翔舟, 冯军, 沈文庆, 马余刚 1998 高能物理与核物理 **22** 830]
- [22] Cai X Z, Shen W Q 2001 *Progress in Physics* **21** 278 (in Chinese) [蔡翔舟, 沈文庆 2001 物理学进展 **21** 278]
- [23] Li B A, Das C B, Gupta S D, Gale C 2004 *Phys. Rev. C* **69** 011603
- [24] Das C B, Gupta S D, Gale C, Li B A 2003 *Phys. Rev. C* **67** 034611
- [25] Yong G C, Chen L W, Li B A, Zuo W 2006 *High Energy Physics and Nuclear Physics* **30** 642 (in Chinese) [雍高产, 陈列文, 李宝安, 左维 2006 高能物理与核物理 **30** 642]
- [26] Chen L W, Zhang F S, Zeng X H, Jin G M 1998 *High Energy Physics and Nuclear Physics* **22** 1035 (in Chinese) [陈列文, 张丰收, 曾祥华, 靳根明 1998 高能物理与核物理 **22** 1035]
- [27] Li B A, Ren Z Z, Ko C M, Yennello S J 1996 *Phys. Rev. Lett.* **76** 4492
- [28] Liu J Y, Guo W J, Wang S J 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 975
- [29] Kumar S, Kumar S 2010 *Phys. Rev. C* **81** 014601
- [30] Chen J Y 2006 *Ph. D. Dissertation* (Lanzhou: Lanzhou University) (in Chinese) [陈继延 2006 博士学位论文 (兰州: 兰州大学)]
- [31] Kumar S, Chugh R 2010 *arXiv*: 1009. 5464 v1 [Nucl-th]
- [32] Zhang Y X, Li Z X, Danielewicz P 2007 *Phys. Rev. C* **75** 034615
- [33] Kumar S, Rajni J, Kumar S 2010 *arXiv*: 1009. 5470 v1 [Nucl-th]
- [34] Sood A D, Puri R K 2004 *Phys. Rev. C* **69** 054612
- [35] Sood A D, Puri R K, Aichelin J 2004 *Phys. Lett. B* **594** 260
- [36] Sood A D, Puri R K 2009 *Phys. Rev. C* **79** 064618
- [37] Chen L W, Zhang F S, Jin G M 1998 *Phys. Rev. C* **58** 2283
- [38] Li Q F, Li Z X, Soff S 2006 *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* **32** 407
- [39] Li B A, Danielewicz P, Lynch W G 2005 *Phys. Rev. C* **71** 054603
- [40] Gautam S 2011 *arXiv*: 1105. 0526 v1 [Nucl-th]
- [41] Pak R, Li B A, Benenson W 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 1026
- [42] Pak R, Benenson W, Bjarki O 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 1022

Isospin-dependent nucleon-nucleon cross section and the collective flow of nucleons in heavy-ion collision at intermediate energy*

Zhu Yu-Lan¹⁾ Wang Yan-Yan¹⁾ Xing Yong-Zhong²⁾†

1) (College of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

2) (Department of Physics, Tianshui Normal University, Tianshui 741000, China)

(Received 23 August 2011; revised manuscript received 28 December 2011)

Abstract

In this paper, the influences of the different forms of nucleon-nucleon (NN) cross sections on the rapidity distributions and the in-plane flows of nucleons in reactions $^{60}\text{Ca}+^{60}\text{Ca}$ and $^{60}\text{Ni}+^{60}\text{Ni}$ are studied by using IBUU04 transport model with the moment-dependent symmetry potential. The calculation results indicate that (1) the discrepancies of the rapidity distributions and in-plane flows corresponding to different forms of NN cross sections are large, (2) the sensitivity of the in-plane flow to the NN cross section still holds when the new form of moment-dependent symmetry energy is adopted, and (3) the influence of the N/P ratio of reaction systems on the transverse flow calculated with a certain NN cross section is more obvious when the incident energy is near the balance energy.

Keywords: nucleon-nucleon cross section, rapidity distribution, transverse flow, balance energy

PACS: 25.75.Ld, 24.10.-i

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10575075, 10447006, 10435080).

† E-mail: yzxing@tsnc.edu.cn