

同位旋非对称核物质状态方程*

刘建业^{1)†)} 郭文军³⁾ 左 维^{2)†)} 李希国^{2)†)}

1) 天水师范学院数理信息学院, 天水 741000)

2) 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

3) 上海理工大学, 上海 200093)

4) 中国科学院兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心, 兰州 730000)

(2008 年 3 月 24 日收到, 2008 年 7 月 24 日收到修改稿)

为了确定同位旋非对称核物质状态方程, 利用同位旋有关的量子分子动力学理论计算和寻找实验上对于中能重离子碰撞中核子-核子碰撞截面或者对称势非常灵敏的物理观测量——探针, 结果发现了几种分别对于核子-核子碰撞截面或者对称势非常灵敏的物理观测量, 并对这些探针的机理进行了仔细研究, 对以上研究结果进行小结和讨论, 并为今后继续深入研究工作提出展望.

关键词: 对称势, 核子-核子碰撞截面, 同位旋依赖性, 机理

PACC: 2570

1. 引 言

中能重离子碰撞中同位旋非对称核物质状态方程对于确定和了解同位旋非对称核物质的性质和放射性原子核的结构非常重要. 它不仅对于了解原子核性质, 同样对于认识天体演化过程, 例如中子星和超新星等的性质很重要. 在这些研究中, 放射性原子核引起的核反应为揭示和确定同位旋非对称核物质状态方程提供了唯一的机会^[1-3]. 为了确定同位旋非对称状态方程, 我们对于研究和寻找提取同位旋非对称核物质状态方程中的核子-核子碰撞截面和对称势知识的灵敏探针作了系统而大量研究工作, 并取得了一定的进展. 例如发现同位旋分馏等是提取对称势的灵敏探针; 而原子核阻止和核子发射数等是提取核子-核子碰撞截面的灵敏探针, 并对它们的机理进行了仔细研究^[4-25].

虽然以上研究对于认识同位旋非对称状态方程取得了一定的进展, 然而由于重离子碰撞的复杂性, 以前研究结果对于定量确定同位旋非对称核物质状态方程仍然存在明显的不确定性. 特别是介质中核子-核子碰撞截面的知识非常有限. 对称势的强度和

原子核碰撞密度的依赖形式很多. 为了定量地确定介质中核子-核子碰撞截面和对称势的强度和密度依赖形式, 必须进一步从实验和理论的结合上继续由各种弹核, 通过实验与理论系统对比, 研究和寻找各种对于提取以上知识灵敏的物理观测量, 从而定量地确定同位旋非对称核物质状态方程.

2. 同位旋依赖的量子分子动力学 (QMD)

在对 QMD^[26-28] 中的同位旋相关平均场, 两体碰撞包括泡利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 (IQMD), 而 IQMD 中的相互作用如下:

$$U(\rho) = U^{\text{sky}} + U^{\text{Coul}} + U^{\text{skm}} + U^{\text{Yuk}} + U^{\text{MDI}} + U^{\text{Pauli}}, \quad (1)$$

其中, U^{sky} , U^{Coul} , U^{MDI} , U^{Yuk} , U^{Pauli} 分别为 Skyrme 势, 库仑势, 动量相关作用, Yukawa 势和泡利势. U^{sym} 是对称势^[7], 对称势的形式有很多种, 我们的工作使用了三种常用的对称势, 即

$$U_1^{\text{sym}} = cF_1(u)\delta\tau_z, \quad (2)$$

* 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:10575075), 中国科学院知识创新工程重要方向项目(批准号:KJ951-A1-001)资助的课题.

† E-mail: liujy@lzb.ac.cn

$$U_2^{\text{sym}} = cF_2(u) \left[\delta\tau_z + \frac{1}{2}\delta^2 \right], \quad (3)$$

$$U_3^{\text{sym}} = cF_3(u) \left[\delta\tau_z - \frac{1}{4}\delta^2 \right], \quad (4)$$

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, $u \equiv \rho/\rho_0$; $F_1(u) = u$, $F_2(u) = U^2$ 和 $F_3(u) = U^{1/2}$; δ 是相对中子过剩 即

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

ρ , ρ_0 , ρ_n , ρ_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^[29]:

$$\sigma_{\text{NN}}(\alpha) = \left(1 + \alpha \frac{\rho}{\rho_0} \right) \sigma_{\text{NN}}(0), \quad (5)$$

这里参数取 $\alpha = -0.2$ 发现与集体流的实验数据得到很好地符合, $\sigma_{\text{NN}}(0)$ 是实验核子-核子碰撞截面^[30]. 运用(5)式可以得到核子-核子碰撞的介质效应. IQMD 更具体的公式和数值计算可参看文献[7, 8, 26—30].

3. 小结和评论

3.1. 原子核阻止可以作为核子-核子碰撞截面大小的灵敏探针^[12—14]

Bass, Yennello, Li^[1, 2] 和他们的合作者建议同位旋趋向平衡的程度为原子核阻止提供了有关机理的探针, 即原子核阻止表示同位旋非对称重离子碰撞中同位旋趋向平衡的程度, 但不清楚原子核阻止对于核子-核子碰撞截面和对称势的依赖关系如何? 我们计算表明原子核阻止灵敏的依赖核子-核子碰撞截面, 而对于对称势不灵敏, 故可作为提取核子-核子碰撞截面大小的灵敏探针. 原子核阻止为

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

其中 $P_{\perp}(i)$ 和 $P_{\parallel}(i)$ 分别是 $P_{\perp}(i) = \sqrt{p_x(i)^2 + p_y(i)^2}$ 和 $p_{\parallel}(i) = p_z(i)$, A 是弹核质量 A_p 与靶核质量 A_t 之和. 原子核阻止的另一种定义为

$$Q_z = \frac{1}{A} \sum_i^A (2P_z^2(i) - P_x^2(i) - P_y^2(i)).$$

原子核阻止对核子-核子碰撞截面的同位旋依赖性

定义为同位旋有关核子-核子碰撞截面 σ^{iso} 和同位旋无关核子-核子碰撞截面 σ^{noiso} 对应的原子核阻止之差. 同位旋有关核子-核子碰撞截面为

$$\sigma^{\text{so}} = \hat{\sigma}_{\text{np}} + \hat{\sigma}_{\text{pp}} + \hat{\sigma}_{\text{nn}}.$$

而同位旋无关核子-核子碰撞截面 σ^{noiso} 定义为

$$\sigma_{\text{no}} = \sigma_{\text{pp}} = \sigma_{\text{nn}} = \hat{\sigma}_{\text{pp}},$$

所以 $\sigma^{\text{noiso}} = 3\hat{\sigma}_{\text{pp}}$. 而 $\hat{\sigma}_{\text{np}}$, $\hat{\sigma}_{\text{pp}}$ 和 $\hat{\sigma}_{\text{nn}}$ 均由(5)式中 NN \equiv np, pp 和 nn 所表示, 即为介质中中子-质子, 质子-质子和中子-中子碰撞截面. 由实验已知在核子束流能量低于 500 MeV 以下能区, 自由核子-核子碰撞截面 $\sigma_{\text{np}}(0)$ 远大于 $\sigma_{\text{pp}}(0)$ 这里 $\sigma_{\text{pp}}(0) = \sigma_{\text{nn}}(0)$, 故 σ^{iso} 在 500 MeV 以下能区均大于 σ^{noiso} .

图 1(a)(b) 分别表示每核子的 Q_{ZZ} 和 R 对碰撞参数 b 的平均值随碰撞系统质量 $A = A_p + A_t$ 的演化. 这里七种情况在图中均已标明, 即

$$c = 0 + \sigma^{\text{iso}}, \quad c = U_1^{\text{sym}} + \sigma^{\text{iso}},$$

$$c = U_2^{\text{sym}} + \sigma^{\text{iso}}, \quad c = U_3^{\text{sym}} + \sigma^{\text{iso}},$$

$$c = U_1^{\text{sym}} + \sigma^{\text{noiso}}, \quad c = U_2^{\text{sym}} + \sigma^{\text{noiso}},$$

$$c = U_3^{\text{sym}} + \sigma^{\text{noiso}}.$$

五个碰撞系统包括: $^{20}\text{Ne} + ^{20}\text{Ne}$, $^{40}\text{Ar} + ^{40}\text{Ar}$, $^{80}\text{Zn} + ^{80}\text{Zn}$, $^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$ 和 $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$, 束流能量 $E_{\text{lab}} = 100 \text{ MeV/核子}$. 由图 1 清楚的看出 R 和 Q_{ZZ} 灵敏地依赖于介质中核子-核子碰撞截面; 而对于对称势不灵敏. 同时可以看出 Q_{ZZ} 随 A 的增加而减小, 而 R 随 A 的增加而增加. R 的增加和 Q_{ZZ} 的减小均意味着原子核阻止的增加.

图 2 表示 R 作为束流能量 E_{lab} 的函数, 各曲线同样在图中均已标明. 反应系统为 $^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$ 和 $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$. 从图 2 可以得到与图 1 同样的结论. 从图 1 和图 2 中原子核阻止作为 A 和 E_{lab} 的函数得出以下碰撞动力学的图像, 即碰撞动力学主要由核子-核子碰撞截面的碰撞数来决定. 碰撞数是指核子-核子碰撞的次数, 其中包括中子-中子, 质子-质子和中子-质子之间的碰撞次数, 碰撞数反映原子核阻止对于核子-核子碰撞截面强度的依赖性, 而平均场的作用是非常次要的. 故原子核阻止 R 和 Q_{ZZ} 可作为提取介质中核子-核子碰撞截面大小的灵敏探针. 但不足以分离核子-核子碰撞截面的大小和它的同位旋效应. 因为核子-核子碰撞截面的碰撞数主要反映核子-核子碰撞截面的大小, 然而碰撞数不能分离截面的大小和同位旋效应.

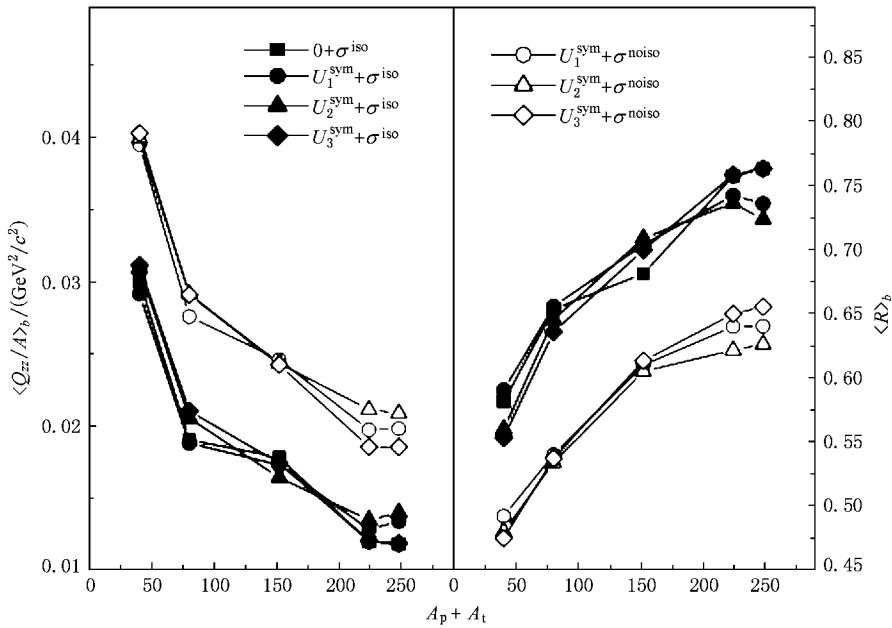


图 1 原子核阻止对碰撞参数 b 的平均值 $Q_{zz, b}$ 和 R_b 在束流能量 $E_{lab} = 100$ MeV/核子处作为碰撞系统质量 $A_p + A_t$ 的函数

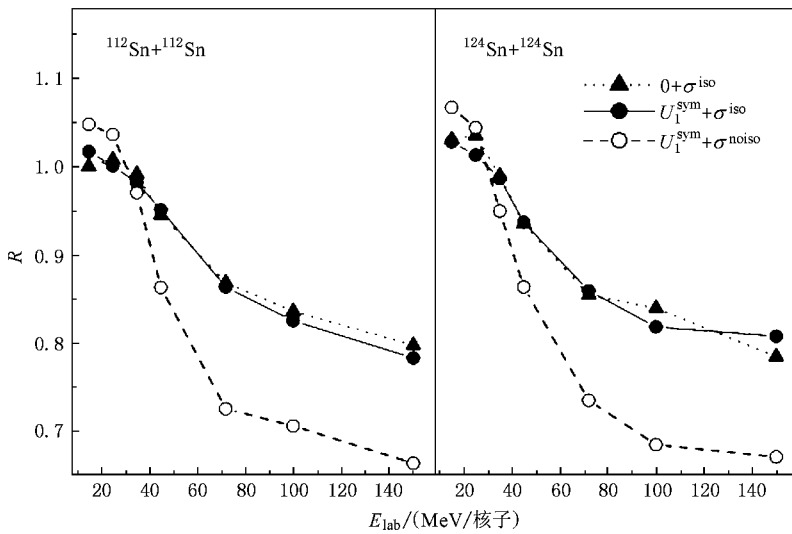


图 2 两个核碰撞 $^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$ 和 $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ 的原子核阻止 R 随束流能量 E_{lab} 的演化

3.2. 中子发射数 N_n 和质子发射数 N_p 可作为核子-核子碰撞截面的灵敏探针^[15, 16]

与原子核阻止类似，缺中子碰撞系统引起的重离子碰撞中的中子发射数 N_n 和质子发射数 N_p 可作为提取核子-核子碰撞截面的灵敏探针。

图 3 表示 N_n (上图) 和 N_p (下图) 对碰撞参数 b 的平均值 $N_{n, b}$ 和 $N_{p, b}$ 作为束流能量的函数，碰

撞系统包括 $^{76}\text{Kr} + ^{40}\text{Ca}$ 和 $^{76}\text{Kr} + ^{76}\text{Kr}$ ，各曲线的含意在图中均已标明。即 $U_1^{sym} + \sigma^{iso}$ ， $U_0^{sym} + \sigma^{iso}$ ， $U_2^{sym} + \sigma^{iso}$ ， $U_1^{sym} + \sigma^{noiso}$ ， $U_2^{sym} + \sigma^{noiso}$ 。从图 3 清楚地看出，具有相同 σ^{iso} 或 σ^{noiso} 而不同对称势 U_0^{sym} ， U_1^{sym} 和 U_2^{sym} 的曲线之间间隙是很小的，然而具有不同截面 σ^{iso} 和 σ^{noiso} 但相同对称势之间的间隙是明显大，即 N_n (N_p) 灵敏地依赖于核子-核子碰撞截面，而对于对称势不灵敏。故缺中子碰撞系统在较高能区的

$N_n(N_p)$ 可作为核子-核子碰撞截面的灵敏探针.

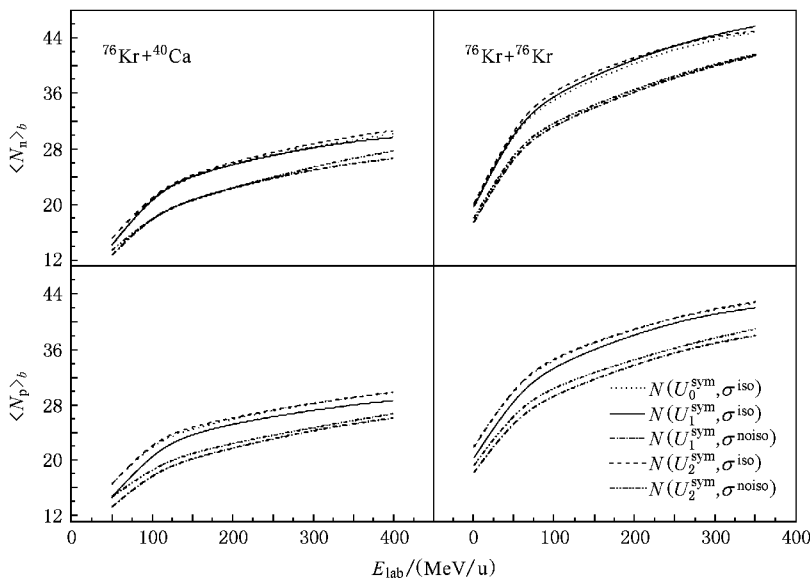


图3 中子发射数和质子发射数对碰撞参数 b 的平均值 N_n 和 N_p 随束流能量 E_{lab} 的演化

3.3. 同位旋分馏 $\left(\frac{n}{p}\right)_g / \left(\frac{n}{p}\right)_l$ 可作为对称势的灵敏探针^[17-19]

重离子碰撞中的同位旋分馏定义为气相中子-质子比对液相中子-质子比的比值 $\left(\frac{n}{p}\right)_g / \left(\frac{n}{p}\right)_l$, 它表示重离子碰撞中同位旋分馏的程度. 为了得到重离子碰撞中同位旋不对称核物质中对称势的知识, 图4表示同位旋分馏对碰撞参数 b 的平均值 $\left(\frac{n}{p}\right)_g / \left(\frac{n}{p}\right)_l$ 对于束流能量 E_{lab} 的函数. 碰撞系统是 $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$. 各条曲线的意义在图中有所

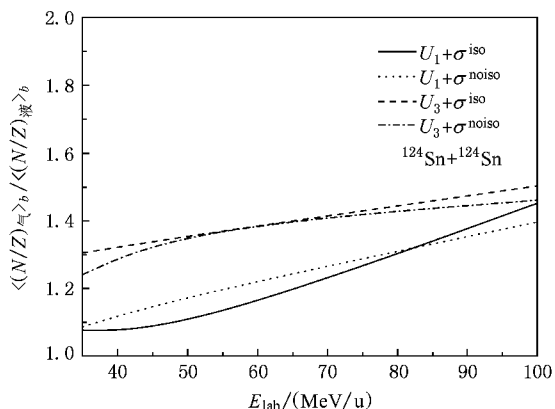


图4 同位旋分馏对碰撞参数 b 的平均值 $\left(\frac{n/p}\right)_g / \left(\frac{n/p}\right)_l$ 随束流能量 E_{lab} 的演化

明示, 即 $U_1^{sym} + \sigma^{iso}$, $U_1^{sym} + \sigma^{noiso}$, $U_3^{sym} + \sigma^{iso}$ 和 $U_3^{sym} + \sigma^{noiso}$.

从图4可以看出, 在束流能量低于90 MeV/核以下较低能区, 具有相同 σ^{iso} 或 σ^{noiso} 而不同对称势 U_1^{sym} 和 U_3^{sym} 的曲线之间的间隙明显大于具有相同对称势 U_1^{sym} 或 U_3^{sym} 和不同截面 σ^{iso} 和 σ^{noiso} 的曲线之间的间隙, 即同位旋分馏灵敏地依赖于对称势, 而对于核子-核子碰撞截面不灵敏.

图5表示 $\left(\frac{n}{p}\right)_g / \left(\frac{n}{p}\right)_l$ 作为具有相等质量碰撞系统中子-质子比 N/Z 的函数, 碰撞系统包括 $^{94}\text{Kr} +$

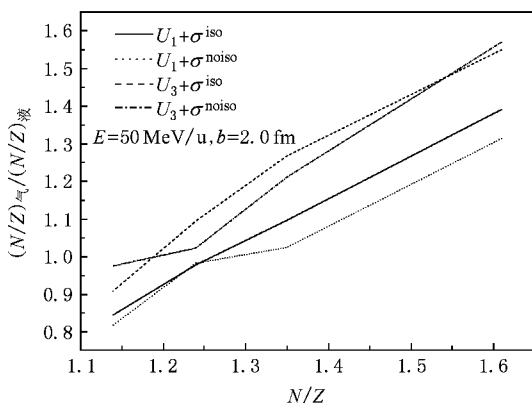


图5 同位旋分馏 $\left(\frac{n}{p}\right)_g / \left(\frac{n}{p}\right)_l$ 随碰撞系统中子-质子比 N/Z 的演化

^{94}Kr , ^{94}Zr + ^{94}Zr , ^{94}Mo + ^{94}Mo 和 ^{94}Ru + ^{94}Ru 束流能量和碰撞参数 b 分别为 50 MeV/核子和 2 fm. 曲线意义与图 4 相同, 从图 5 可以看出在 $\frac{N}{Z}$ 大于 1.3 即丰中子碰撞系统以上区域曲线之间关系和结论与图 4 相同.

图 6 表示 $\left(\frac{n}{p}\right)_{\text{气}} / \left(\frac{n}{p}\right)_{\text{液}}$ 作为系统质量 A 的函数, 同时所有碰撞系统具有大体相同的中子-质子比 $\frac{N}{Z}$. 碰撞系统包括 ^{64}Fe + ^{64}Fe , ^{89}Kr + ^{89}Kr 和 ^{124}Sn + ^{124}Sn . 束流能量和碰撞参数分别为 50 MeV/核子和 2 fm. 各曲线的意义与图 4 相同, 各曲之间关系和结论与图 4 相同.

即从图 4 图 5 和图 6 可以清楚地看出丰中子碰撞系统的 $\left(\frac{n}{p}\right)_{\text{气}} / \left(\frac{n}{p}\right)_{\text{液}}$ 灵敏地依赖于对称势, 而对于核子-核子碰撞截面不灵敏. 故同位旋分馏是较低能区丰中子弹核重离子碰撞中提取对称势的灵敏探针.

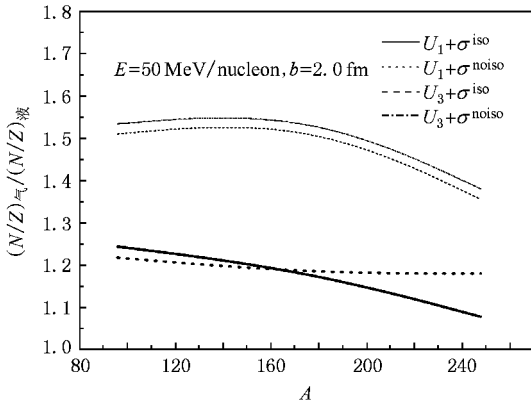


图 6 同位旋分馏 $\left(\frac{n}{p}\right)_{\text{气}} / \left(\frac{n}{p}\right)_{\text{液}}$ 随碰撞系统质量 $A = A_p + A_t$ 的演化

3.4. 库仑作用和动量相关作用对于同位旋分馏和原子核阻止作为两个灵敏探针的影响^[20-22]

图 7 表示 $\left(\frac{n}{p}\right)_{\text{气}} / \left(\frac{n}{p}\right)_{\text{液}}$ 作为具有相同质量 A 而不同中子-质子比 $\frac{N}{Z}$ 碰撞系统的函数. 碰撞系统包括 ^{94}Kr + ^{94}Kr , ^{94}Zr + ^{94}Zr , ^{94}Mo + ^{94}Mo 和 ^{94}Ru + ^{94}Ru . 图 7 中的八条曲线分别表示 $U_1^{\text{sym}} + \sigma^{\text{iso}} + U^{\text{Coul}}$, $U_1^{\text{sym}} + \sigma^{\text{noiso}} + U^{\text{Coul}}$, $U_3^{\text{sym}} + \sigma^{\text{iso}} + U^{\text{Coul}}$, $U_3^{\text{sym}} + \sigma^{\text{noiso}} + U^{\text{Coul}}$, $U_1^{\text{sym}} + \sigma^{\text{iso}}$, $U_1^{\text{sym}} + \sigma^{\text{noiso}}$, $U_3^{\text{sym}} + \sigma^{\text{iso}}$ 和 $U_3^{\text{sym}} + \sigma^{\text{noiso}}$. 束流能量和碰撞参数分别是 50 MeV/核子和 2.0 fm. 曲线

意义在图中已有标明. 从图 7 可以清楚地看出具有相同对称势 U_1^{sym} 或者 U_3^{sym} 而不同核子-核子碰撞截面 σ^{iso} 和 σ^{noiso} 的 $\left(\frac{n}{p}\right)_{\text{气}} / \left(\frac{n}{p}\right)_{\text{液}}$ 的曲线之间的间隙明显小. 然而, 具有相同的 σ^{iso} 或 σ^{noiso} 而不同的 U_1^{sym} 和 U_3^{sym} 的曲线之间的间隙明显大. 即丰中子弹核碰撞系统在较低束流能区的 $\left(\frac{n}{p}\right)_{\text{气}} / \left(\frac{n}{p}\right)_{\text{液}}$ 尽管被库仑作用从四条粗线降低到四条细线, 但并不影响 $\left(\frac{n}{p}\right)_{\text{气}} / \left(\frac{n}{p}\right)_{\text{液}}$ 灵敏地依赖对称势而弱地依赖核子-核子碰撞截面的性质. 也就是库仑作用并不影响 $\left(\frac{n}{p}\right)_{\text{气}} / \left(\frac{n}{p}\right)_{\text{液}}$ 作为提取对称势的灵敏探针.

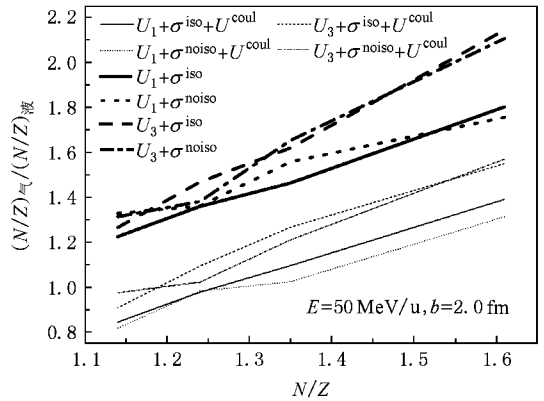


图 7 在有、无库仑相互作用条件下 $\left(\frac{n}{p}\right)_{\text{气}} / \left(\frac{n}{p}\right)_{\text{液}}$ 作为碰撞系统中子-质子比 $\frac{N}{Z}$ 的函数

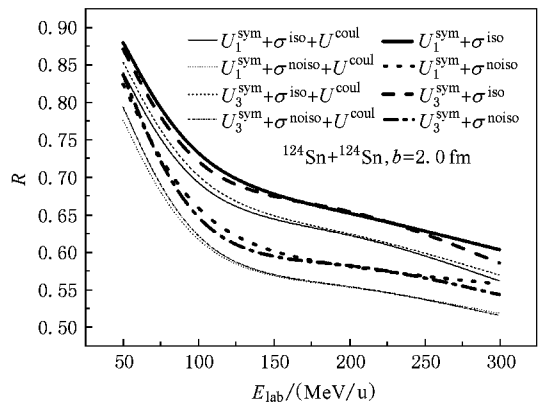


图 8 原子核阻止 R 在有、无库仑作用条件下随束流能量 E_{lab} 的演化

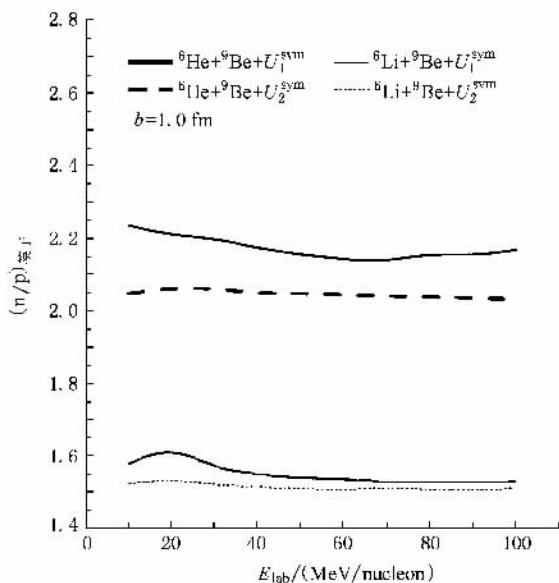
图 8 表示原子核阻止 R 作为束流能量的函数, 碰撞系统为 ^{124}Sn + ^{124}Sn , 碰撞参数为 2.0 fm. 图中 8 条曲线含义与图 7 相同. 但曲线之间关系正好与图

7 相反,即具有不同的对称势 U_1^{sym} 和 U_3^{sym} 以及相同的核子-核子碰撞截面 σ^{iso} 或 σ^{noiso} 的 R 曲线之间的间隙明显小,而具有不同的核子-核子碰撞截面 σ^{iso} 和 σ^{noiso} 和相同对称势 U_1^{sym} 或者 U_3^{sym} 的 R 曲线之间的间隙明显大.即 R 灵敏地依赖于核子-核子碰撞截面而弱地依赖于对称势,尽管库仑作用将 R 从四条粗线降低到相应的四条细线,但不影响 R 作为提取核子-核子碰撞截面的灵敏探针.

研究结果^[31,32]同样表明,动量相关作用同样明显加强了这些探针对于对称势或核子-核子碰撞截面的效应,但并不改变它们作为灵敏的探针.

3.5. 利用中子晕弹核和相等质量稳定弹核之间的比较研究提供了确定同位旋非对称核物质状态方程的另一个判据^[23-25]

图 9 表示两对反应 ${}^6\text{He} + {}^9\text{Be}$, ${}^6\text{Li} + {}^9\text{Be}$; ${}^8\text{He} + {}^9\text{Be}$ 和 ${}^8\text{Li} + {}^9\text{Be}$ 中发射核子的中子-质子比 $\left(\frac{n}{p}\right)_{\text{核子}}$ 作为束流能量 E_{lab} 的函数.碰撞参数为 1 fm.粗线和细线分别表示中子晕核引起的反应 ${}^6\text{He} + {}^9\text{Be}$, ${}^8\text{He} + {}^9\text{Be}$ 和稳定核引起的反应 ${}^6\text{Li} + {}^9\text{Be}$, ${}^8\text{Li} + {}^9\text{Be}$; 而实线和虚线分别对应于对称势 U_1^{sym} 和 U_3^{sym} .两对核反应的入射道条件完全相同.从图 9 很清楚地看到,对应于中子晕核碰撞系统的两条粗线之间的间隙明显大于对应于稳定核碰撞系统的两条细线之间的间隙.即中子晕核明显加强了 $\left(\frac{n}{p}\right)_{\text{核子}}$ 对于对称势的效应.



这种对比研究为提取对称势提供了一个重要的判据.

图 10 表示原子核阻止 R 作为束流能量 E_{lab} 的函数.两对核反应系统分别为 ${}^6\text{He} + {}^{40}\text{Ca}$, ${}^6\text{Li} + {}^{40}\text{Ca}$; ${}^8\text{He} + {}^{40}\text{Ca}$, ${}^8\text{Li} + {}^{40}\text{Ca}$.图 10 中(a)(b)和(c)分别表示核子-核子碰撞截面(5)式中的介质参数分别表示 $\alpha = 0, -0.2$ 和 -0.4 .即不同的介质效应. σ^{iso} 和 σ^{noiso} 的定义与前面相同.从图 10 可清楚地看出,在不同介质条件下,所有的粗线都低于相应的细线.由于与相同质量稳定核相比,中子晕核碰撞系统是缺中子系统,故中子-质子碰撞数小于相应稳定核碰撞系统.因为在 500 MeV 核子能区, $\hat{\sigma}_{np}$ 均大于 $\hat{\sigma}_{pp} = \hat{\sigma}_{nn}$.而 $\sigma^{iso} = \hat{\sigma}_{np} + \hat{\sigma}_{pp} + \hat{\sigma}_{nn}$ 和 $\sigma^{noiso} = 3\hat{\sigma}_{pp}$.故在该能区 σ^{iso} 均大于 σ^{noiso} .由于原子核阻止 R 主要是由核子-核子碰撞产生的,故对应于中子晕核碰撞系统的原子核阻止都低于相应的稳定核碰撞系统.这样为中子晕核和相应稳定核两类碰撞系统的比较研究提供了一个提取核子-核子碰撞截面的主要判据.

4. 结论和展望

1. 从以上结果和讨论可以得出以下结论:

1) 原子核阻止灵敏地依赖于核子-核子碰撞截面而弱地依赖于对称势,故可作为提取重离子碰撞中核子-核子碰撞截面大小的灵敏探针.但原子核阻止不能分离核子-核子碰撞截面的大小和它的同位

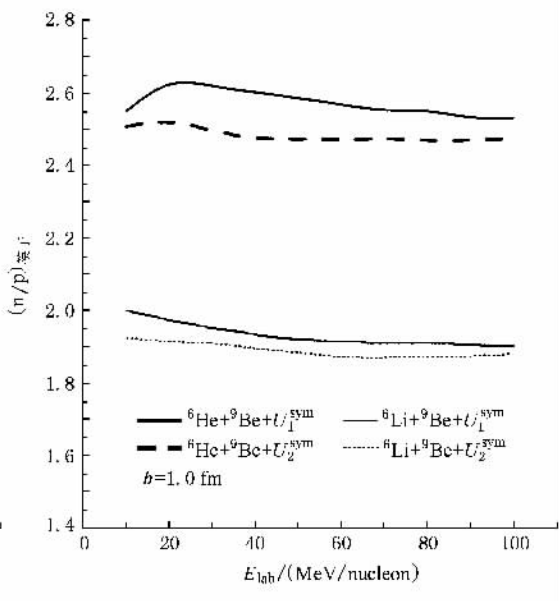


图 9 发射核子中子-质子比 $\left(\frac{n}{p}\right)_{\text{核子}}$ 作为束流能量 E_{lab} 的函数

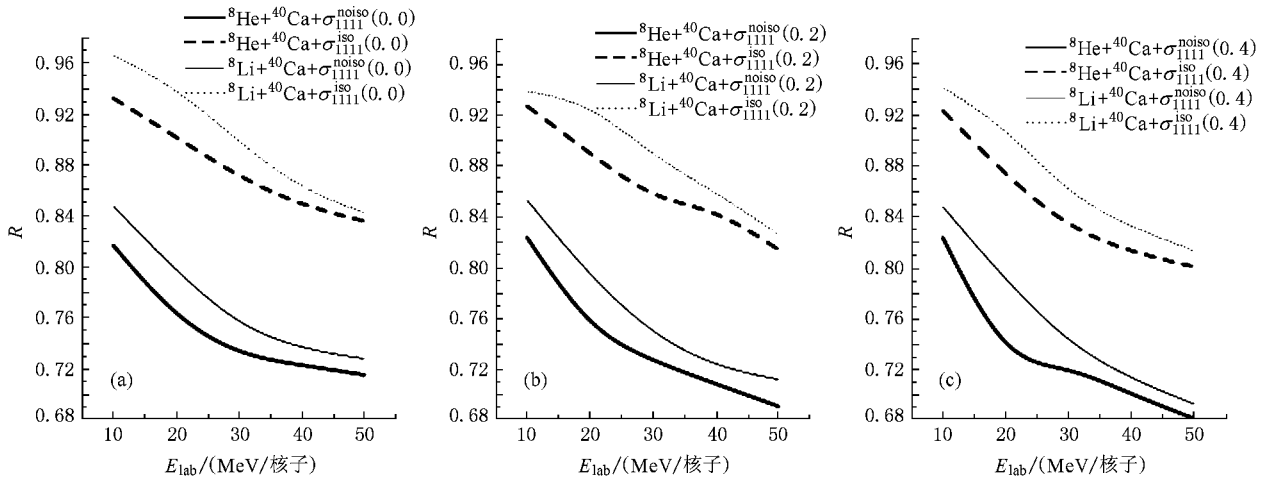


图 10 在同位旋有关截面 σ_{iso} 和同位旋无关截面 σ_{noiso} 和三种介质 $\alpha=0.0$ (a), $\alpha=0.2$ (b) 和 $\alpha=0.4$ (c) 条件下原子核阻止 R 随速流能量 E_{lab} 的演化

旋效应。

2) 缺中子碰撞系统中核子发射数同样灵敏地依赖于核子-核子碰撞截面而弱地依赖于对称势, 故可作为提取重离子碰撞中核子-核子碰撞截面的灵敏探针。

3) 与上面情况相反, 较低能区丰中子碰撞系统中的同位旋分馏灵敏地依赖于对称势而弱地依赖于核子-核子碰撞截面, 故可作为提取重离子碰撞中对称势的灵敏探针。

4) 中子晕弹核和相等质量稳定弹核轰击相同靶核的物理量观测量之间比较研究为提取核子-核子碰撞截面和对称势的知识提供了有力的判据。

5) 库仑作用和动量相关作用除对以上物理观测量的数值相对移动外, 并不改变这些物理观测量作为灵敏的探针。

2. 理论的不确定性和展望。

通过我们对于同位旋非对称核物质状态方程的研究, 虽已取得一定的进展, 然而对称势和核子-核子碰撞截面至今仍然存在很大的不确定性。

1) 核子-核子碰撞截面的同位旋效应和介质效应。

当前对核子-核子碰撞截面介质效应的知识了解的甚少, 一般认为介质中核子-核子碰撞截面小于自由核子-核子碰撞截面, 但是有些作者的微观理论计算结果表明介质中核子-核子碰撞截面比自由核

子-核子碰撞截面大^[33-35]。后者通过有效核子质量与自由核子质量比反映截面的介质效应, 如何进一步判断和利用更为正确的介质效应中核子-核子碰撞截面公式, 寻找能够分离和确定介质中核子-核子碰撞截面的大小和它的同位旋效应, 并寻找仅对核子-核子碰撞截面灵敏但对对称势不灵敏的物理观测量, 通过系统的计算和与实验数据比较来逐步提取和确定介质效应中核子-核子碰撞截面, 尽管李宝安等在分离核子-核子碰撞截面的大小和它的同位旋效应方面作了尝试^[36], 但他们的计算结果至今未能与实验数据很好的比较, 不足以定量分离核子-核子碰撞截面的大小和它的同位旋效应。

2) 对称能和相应的对称势。

同样对称能或者相应的对称势存在着更大的不确定性, 不可压缩系数在正、负 400 MeV 之间取值, 当前理论计算中采用各种形式和不同强度的对称势, 特别是在高密度区对称势更为灵敏地依赖于原子核密度, 不同的对称势计算的物理观测量非常不同^[37, 38], 尤其是模型依赖性很强, 因此如何区分这些模型计算结果的正确性? 当前的研究结果还不足以精确地区分和确定这个问题, 故高密度区域对称能或者相应的对称势的行为和机理成为当前研究的热点, 通过系统的理论计算与实验数据比较来逐步提取和确定对称势的信息, 最后建立同位旋非对称核物质中的状态方程。



- [1] Bass S A ,Konopka J ,Bleicher M ,Stocher H ,Greiner W in GSI Annual Report. 1994 p. 66.
- [2] Li B A ,Yennello S 1995 *J Phys. Rev. C* **52** 1746
- [3] Johnston H ,Wigner T ,White T ,Harst B ,Kelly D O ,Yennello S J 1996 *Phys. Lett. B* **37** 1186
- [4] Yennello S J ,Veslesky R ,Laforest R ,Rowland D *et al* 2001 *Nucl. Phys. A* **68** 1317C
- [5] Toro M D ,Baran V ,Colonna M ,Maccarone S ,Zielinska-Pfabe M ,Wolter H H 2001 *Nucl. Phys. A* **68** 1426c
- [6] Schroder W U ,Toke 2001 *J Nucl. Phys. A* **68** 1418c
- [7] Li B A ,Ko C M ,Bauer W 1998 *Int. J. Mod. Phys. E* **7** 147
- [8] Li B A ,Schroeder W U 2001 *Isospin Physics in Heavy-Ion Collisions at Intermediate Energies* (Inc. Huntington ,New York :Nova Science Publishers)
- [9] Li B A ,Sustich Andrew T ,Zhang B 2001 *Phys. Rev. C* **64** 054604
- [10] Li B A ,Ko C M ,Ren Z Z 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 1644
- [11] 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 ,Beaulieu C K L ,Davin B ,Larochelle Y ,Lefort S T ,de Souza R T ,Yanez R ,Viola V E ,Charity R J ,Sobotka L G 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 716
- [12] Liu J Y ,Guo W J ,Wang S J ,Zuo W ,Zhao Q ,Yang Y F 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 975
- [13] Liu J Y ,Zhao Q ,Wang S J ,Zuo W ,Guo W J 2001 *Nucl. Phys. A* **687** 475
- [14] Yang Y F ,Liu J Y ,Zuo W ,Guo W J ,Zhao Q 2001 *Chin. Phys. Lett.* **18** 1040
- [15] Liu J Y ,Guo W J ,Xing Y Z ,Zuo W ,Lee X G 2002 *Phys. Lett. B* **540** 213
- [16] Liu J Y ,Xing Y Z ,Guo W J 2003 *Chin. Phys. Lett.* **20** 643
- [17] Liu J Y ,Guo W J ,Xing Y Z ,Liu H 2003 *Nucl. Phys. A* **726** 123
- [18] Liu J Y ,Xing Y Z ,Liu H ,Guo W J ,Lee X G 2005 *Inter. Jour. Mod. Phys. E* **14** 587
- [19] Liu J Y ,Guo W J ,Xing Y Z ,Lee X G 2005 *Chin. Phys. Lett.* **22** 65
- [20] Liu J Y ,Guo W J ,Xing Y Z ,Lee X G 2004 *Phys. Rev. C* **70** 034610
- [21] Guo W J ,Liu J Y ,Xing Y Z 2004 *Chin. Phys. Lett.* **21** 1495
- [22] Liu J Y ,Guo W J ,Xing Y Z 2003 *Chin. Phys. Lett.* **21** 1914
- [23] Liu J Y ,Guo W J ,Ren Z Z ,Xing Y Z ,Zuo W ,Lee X G 2005 *Phys. Lett. B* **61** 724
- [24] Liu J Y ,Xiao G Q ,Zuo W ,Lee X G 2006 *Chin. Phys. Lett.* **23** 2710
- [25] Liu J Y ,Xiao G Q ,Guo W J ,Ren Z Z ,Zuo W ,Lee X G 2007 *Chin. Phys. Lett.* **24** 660
- [26] Bertsch G F ,Das. Gupta S 1988 *Phys. Rep.* **16** 0189
- [27] Aichelin J ,Rosenhauer A ,Peilert G ,Stoecker H ,Greiner W 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 1926
- [28] Aichelin J ,Peilert G ,Bohnet A ,Rosenhauer A *et al* 1988 *Phys. Rev. C* **37** 2451
- [29] Klakow D ,Welke G ,Bauer W 1993 *Phys. Rev. C* **48** 1982
- [30] Alkhozov G ,Bauer T ,Bertini R ,Bimbot L ,Bing Q ,Boudard A ,Bruge G ,Catz H ,Chaumeaux A 1977 *Nucl. Phys. A* **280** 365
- [31] Liu J Y ,Guo W J ,Xing Y Z ,Zou W ,Lee X G 2004 *Phys. Rev. C* **67** 0246082
- [32] Liu J Y ,Xing Y Z ,Guo W J ,Zou W ,Lee X G 2002 *Chin. Phys. Lett.* **19** 1078
- [33] Giansiracusa G ,Lombardo U ,Sandulescu N 1996 *Phys. Rev. C* **53** R1478
- [34] Kohno M ,Higashi M ,Watanabe Y ,Kawai M 1998 *Phys. Rev. C* **57** 3495
- [35] Li Q F ,Li Z X ,Mao G J 2000 *Phys. Rev. C* **62** 014606
- [36] Li B A ,Daniewicz P ,Lynch W G 2005 *Phys. Rev. C* **71** 054603
- [37] Cugnon J ,Deney P ,Lejeune A 1987 *Z. Phys.* **328** 409
- [38] Bombaci I ,Lombardo U 1991 *Phys. Rev. C* **44** 1892

The equation of state of the isospin asymmetrical nuclear matter^{*}

Liu Jian-Ye^{1,2,4)†} Guo Wen-Jun³⁾ Zuo Wei^{2,4)} Li Xi-Guo^{2,4)}

1) *College of Mathematics-Physics and Information ,Tianshui Normal University ,Tianshui 741000 ,China)*

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

3) *Science College ,University of Shanghai for Science and Technology ,Shanghai 200093 ,China)*

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

(Received 24 March 2008 ; revised manuscript received 24 July 2008)

Abstract

In order to determine the equation of state in the isospin asymmetrical nuclear matter ,we have been engaged in find an experimental observable which sensitively shows the information of the nucleon-nucleon cross section and the symmetry potential in the intermediate energy heavy ion collision by using the isospin dependent quantum molecular dynamics in recent years . As a result , we have found several sensitive probes for extracting the information of the in-medium nucleon-nucleon cross section and the symmetry potential in the equation of state of the isospin asymmetrical nuclear matter . The mechanism of the above probes are investigated in detail . A brief summary and comments on the above results and the prospect of finding more probes in the future are presented .

Keywords : symmetric potential , nucleon-nucleon cross section , isospin dependence , mechanism

PACC : 2570

^{*} 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 No. 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