

核物质状态方程中动量相关作用可能的探针*

刘建业^{1)2)3)†} 郭文军⁴⁾

1)(天水师范学院物理系,天水 741000)

2)(中国科学院近代物理研究所,兰州 730000)

3)(重离子加速器国家实验室原子核理论中心,兰州 730000)

4)(上海理工大学理学院,上海 200093)

(2009 年 8 月 14 日收到;2010 年 1 月 14 日收到修改稿)

研究了动量相关作用对于中子-质子比动能谱 $r_b(E_k)$ 的效应,发现 $r_b(E_k)$ 灵敏的依赖于动量相关作用而弱的依赖于介质中核子-核子碰撞截面和对称势. 因此 $r_b(E_k)$ 是提取重离子碰撞中动量相关作用信息的可能探针. 同时,对于丰中子弹核和相同质量稳定弹核在相同入射道条件下,丰中子碰撞系统明显加强了动量相关作用对 $r_b(E_k)$ 的效应. 故两个碰撞系统 $r_b(E_k)$ 结果的比较为在重离子碰撞中提取动量相关作用的知识提供了另一个重要的判据.

关键词: 核子-核子碰撞截面, 对称势, 动量相关作用

PACC: 2570

1. 引 言

重离子碰撞中的核物质状态方程对于研究核反应动力学和原子核子结构是很重要的. 同样对于研究天体的演化过程,例如中子星和超新星的性质研究也是非常重要的. 而动量相关作用是核物质状态方程中的一个重要组成部分,故在核物质状态方程中必须仔细地确定动量相关作用. 至今动量相关作用和集体流、原子核阻止、同位素标度参数,重离子碎裂过程等的相关研究一直在进行^[1-10],理论计算中采用了各种形式的动量作用. 然而,对于动量相关作用的性质和正确形式并不很清楚. 故我们想努力研究和寻找仅对动量相关作用灵敏的物理观测量以确定提取动量相关作用的灵敏探针.

2. 同位旋依赖的量子分子动力学简介

为了合理地描述重离子碰撞中的同位旋相关性,量子分子动力学的平均场必须包含正确的同位旋相关项:例如对称势和 Coulomb 相互作用. 介质中

核子-核子碰撞截面对于中子-中子、质子-质子和中子-质子碰撞是不同的. Pauli 阻塞对于中子和质子应该正确加以区分. 量子分子动力学中碰撞核的初始密度分布应用 Skyrme-Halree-Fock 计算得到. 而同位旋相关量子分子动力学中碰撞核的初始数据,应用没有两体碰撞的初始程序计算得到. 计算中碰撞核的结合能和均方半径必须和实验数据符合. 这样同位旋依赖的量子分子动力学中相互作用的所有参数作为具有两体碰撞的动力学计算中的初始数据. 相互作用势^[1]为

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

Coulomb 势是 U^{Coul} , 密度相关的 Skyrme 势为

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

Yukawa 势为

$$U^{\text{Yuk}} = t_3 \exp\left(-\frac{\gamma_1 - \gamma_2}{m}\right) / \left(\frac{1}{m} \gamma_1 - \gamma_2\right), \quad (3)$$

Pauli 势为

$$U^{\text{Pauli}} = V_p \left(\frac{h}{p_0 q_0} \right)^3$$

* 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)和中国科学院知识创新工程重要方向项目(批准号:KJ951-A1-002)资助的课题.

† E-mail: liujy@lzb.ac.cn

$$\times \exp\left(-\frac{\gamma_i - \gamma_j}{2q_0^2} - \frac{(\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j)}{2\rho_0^2}\right) \delta_{\text{pipj}}, \quad (4)$$

$$\text{其中 } \delta_{\text{pipj}} = \begin{cases} 1 & (\text{中子 - 中子或质子 - 质子}) \\ 0 & (\text{中子 - 质子}) \end{cases}.$$

为了避免在反应过程形成非物理核,我们采用了RAM^[11]方法和量子分子动力学模型耦合形成物理上合理的原子核,对称势采用文献[5]中的形式.

$$U_1^{\text{sym}} = cF_1(u)\delta\tau_z, \quad (5)$$

$$U_2^{\text{sym}} = cF_2(u)\left[\delta\tau_z + \frac{1}{2}\delta^2\right], \quad (6)$$

$$\text{其中 } \tau_z = \begin{cases} 1 & (\text{中子}) \\ -1 & (\text{质子}) \end{cases}.$$

这里 c 是对称势的强度,采用 $c = 32 \text{ MeV}$. $F_1(u) = u$, $F_2(u) = u^2$ 和 $u = \frac{\rho}{\rho_0}$, δ 是相对中子过剩, $\delta = (\rho_n - \rho_p)/(\rho_n + \rho_p) = (\rho_n - \rho_p)/\rho$. 其中 ρ , ρ_0 , ρ_n 和 ρ_p 分别表示总的、基态的、中子和质子的密度分布. 动量相关作用 U^{MDI} 采用文献[2]中的形式和参数.

$$U^{\text{MDI}} = t_4 \ln^2 [t_5 (\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2)^2 + 1] \frac{\rho}{\rho_0}. \quad (7)$$

介质中核子-核子碰撞截面的经验表示式^[12]为

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

这里 $\alpha = -0.2$. 这种参数很好的符合实验上的集体流. 而 $\sigma_{NN}^{\text{free}}$ 是实验上核子-核子碰撞截面^[13]. 我们采用(8)式能够改虑核子-核子碰撞的介质效应. 本工作采用两种不同的同位旋无关的核子-核子碰撞截面 σ^{noiso1} 和 σ^{noiso2} , 它们分别表示如下:

$$\sigma^{\text{noiso1}} = \begin{cases} \hat{\sigma}_{pp} & (\text{中子 - 中子}) \\ \hat{\sigma}_{pp} & (\text{质子 - 质子}) \\ \hat{\sigma}_{pp} & (\text{中子 - 质子}) \end{cases}. \quad (9)$$

$$\sigma^{\text{noiso2}} = (1/2) \begin{cases} (\hat{\sigma}_{pp} + \hat{\sigma}_{np}) & (\text{中子 - 中子}) \\ (\hat{\sigma}_{pp} + \hat{\sigma}_{np}) & (\text{质子 - 质子}) \\ (\hat{\sigma}_{pp} + \hat{\sigma}_{np}) & (\text{中子 - 质子}) \end{cases}. \quad (10)$$

同位旋相关的核子-核子碰撞截面为

$$\sigma^{\text{iso}} = \begin{cases} \hat{\sigma}_{nn} & (\text{中子 - 中子}) \\ \hat{\sigma}_{pp} & (\text{质子 - 质子}) \\ \hat{\sigma}_{np} & (\text{中子 - 质子}) \end{cases}. \quad (11)$$

这里 $\hat{\sigma}_{np}$ 和 $\hat{\sigma}_{pp}$ 分别是中子-质子和质子-质子截面, 由(8)式令 $NN = np$ 和 pp 时得到.

3. 计算结果和讨论

中子-质子比动能谱 $r_b(E_k)$ 定义为碰撞时间 $t = 300 \text{ fm}/c$ 处同一动能 E_k 下中子和质子发射概率的比值. 因为 $t = 300 \text{ fm}/c$ 以后, 碰撞系统处于统计平衡. 并且对碰撞参数 $b = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 \text{ fm}$ 的结果作了平均. 这样计算结果可以与打在探测器上的 $r_b(E_k)$ 比较. 而介质中核子-核碰撞截面对 $r_b(E_k)$ 的效应被定义为同位旋相关截面 σ^{iso} 和同位旋无关截面 σ^{noiso1} 对应的两个 $r_b(E_k)$ 值之差; 或者同位旋相关截面 σ^{iso} 和同位旋无关截面 σ^{noiso2} 对应的两个 $r_b(E_k)$ 值之差. 同样, 对称势对 $r_b(E_k)$ 的效应定义为两个不同对称势 U_1^{sym} 和 U_2^{sym} 对应的两个 $r_b(E_k)$ 值之差.

3.1. 动量相关作用对 $r_b(E_k)$ 的明显效应

图1表示为两个丰中子反应系统 $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ 和 $^{94}\text{Kr} + ^{94}\text{Kr}$ 当束流能量 $E_{\text{lab}} = 20, 50, 80$ 和 200 MeV /核子条件下的 $r_b(E_k) - E_k$ 作图. 这里要特别提醒: $r_b(E_k)$ 是并非一般物理观测量的激发函数(光滑曲线). 因为对于不同的发射中子或不同的发射质子必然具有明显不同的发射动能 E_k . 同样, 对于不同的发射动能 E_k 将具有明显不同的发射中子概率和明显不同的质子发射概率. 因此总的效果是对于不同的核子发射动能 E_k 具有明显不同的 $r_b(E_k)$. 故在图1中的 $r_b(E_k) - E_k$ 曲线具有很多峰和谷, 从而表现为很多涨落. 因此必须注意分析和比较所有 $r_b(E_k) - E_k$ 曲线间平均效应的相对大小. 在图1中 $E_{\text{lab}} = 20, 50$ 和 80 MeV /核子时对于两个反应系统, 具有动量相关作用的实线明显低于和短于动量无关作用的短划线. 因为在这些较低束流能量区域. 在重离子碰撞中动量相关作用将核子动量偏向横向动量(6, 10, 14). 这个过程就产生了较大的动量耗散, 从而就导致碰撞核之间更多的耗散和碎裂. 因此具有动量相关作用的碰撞系统与动量无关作用碰撞系统比较, 就更容易达到系统平衡, 从而动量相关作用的碰撞系统发射中子概率对于发射质子发射概率之差减少. 最后使得动量相关作用碰撞系统的 $r_b(E_k)$ 和 E_k 与动量无关作用系统比较, 平均效应明显减少. 如已知动量相关作用对碰撞系统的效应随束流能量 E_{lab} 的增加而减小直至消失. 同样, 两个碰撞系统的力学不稳定区域和系统

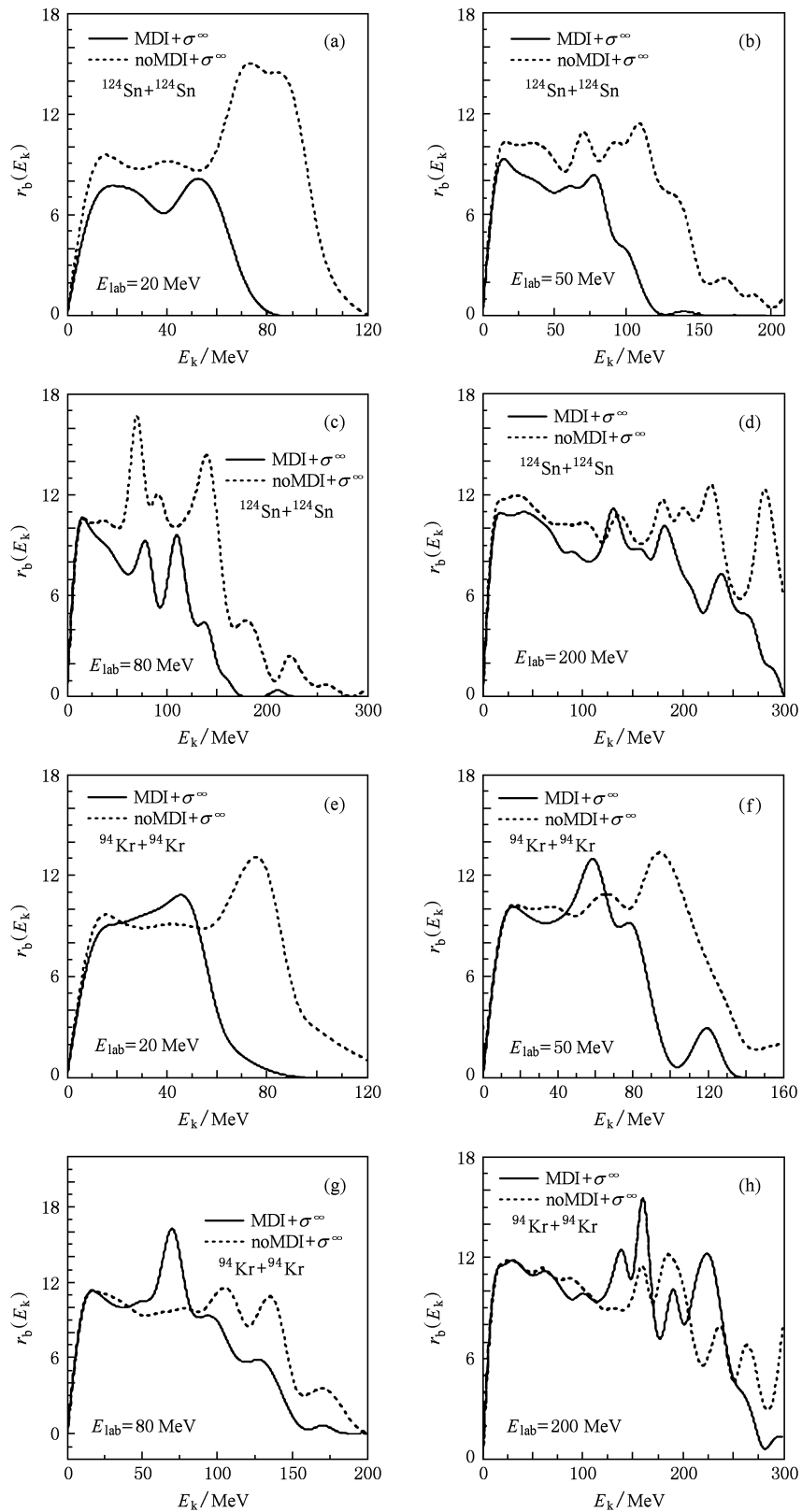


图 1 反应系统 $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ 和 $^{94}\text{Kr} + ^{94}\text{Kr}$ 和束流能量 $E_{\text{lab}} = 20, 50, 80$ 和 200 MeV/核子时动量相关作用对 $r_b(E_k)$ 的明显效应

平衡程度相互接近. 故随着束流能量 E_{lab} 的不断增加, 动量相关作用系统的实线逐渐接近于动量无关作用的短划线, 即就是前者的 $r_b(E_k)$ 随着束流能量 E_{lab} 的增加逐渐接近后者相应的 $r_b(E_k)$ 直至每个核子动能为 $E_{lab} = 200$ MeV 的情况.

3.2. $r_b(E_k)$ 与动量相关作用和对称势的关系

重离子碰撞同时由平均场和核子-核子碰撞截面所确定. 图 2 表示动量相关作用和对称势分别对于 $r_b(E_k)$ 的效应. 碰撞系统是 $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ 和 $^{94}\text{Kr} + ^{94}\text{Kr}$. 束流能量的核子动能为 $E_{lab} = 20, 50$ 和 80 MeV. 在相同对称势 U_1^{sym} 条件下动量相关作用的实线和动量无关作用的短划线之差明显大于在相同动量相关作用条件下具有对称势 U_1^{sym} 的实线和 U_2^{sym} 的点线之差. 前两曲线之差表示动量相关作用对

$r_b(E_k)$ 的效应. 后两曲线之差表示对称势对 $r_b(E_k)$ 的效应. 这就表明动量相关作用对 $r_b(E_k)$ 的效应明显大于对称势对 $r_b(E_k)$ 的效应. 即就是 $r_b(E_k)$ 灵敏地依赖于动量相作用而弱地依赖于对称势.

3.3. $r_b(E_k)$ 与动量相关作用和介质中核子-核子碰撞截面

图 3 表示在以上两种碰撞系统 $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ 和 $^{94}\text{Kr} + ^{94}\text{Kr}$ 及 3 种束流能量条件下动量相关作用和介质中核子碰撞截面对 $r_b(E_k)$ 效应的比较. 很明显, 在相同同位旋相关核子-核子碰撞截面 σ^{iso} 条件下, 具有动量相关作用的实线和动量无关作用的短划线之差明显大于在相同动量相关作用条件下同位旋相关核子-核子碰撞截面 σ^{iso} 的实线和同位旋无关核子-核子碰撞截面 σ^{noiso} 的点线之差. 同样也

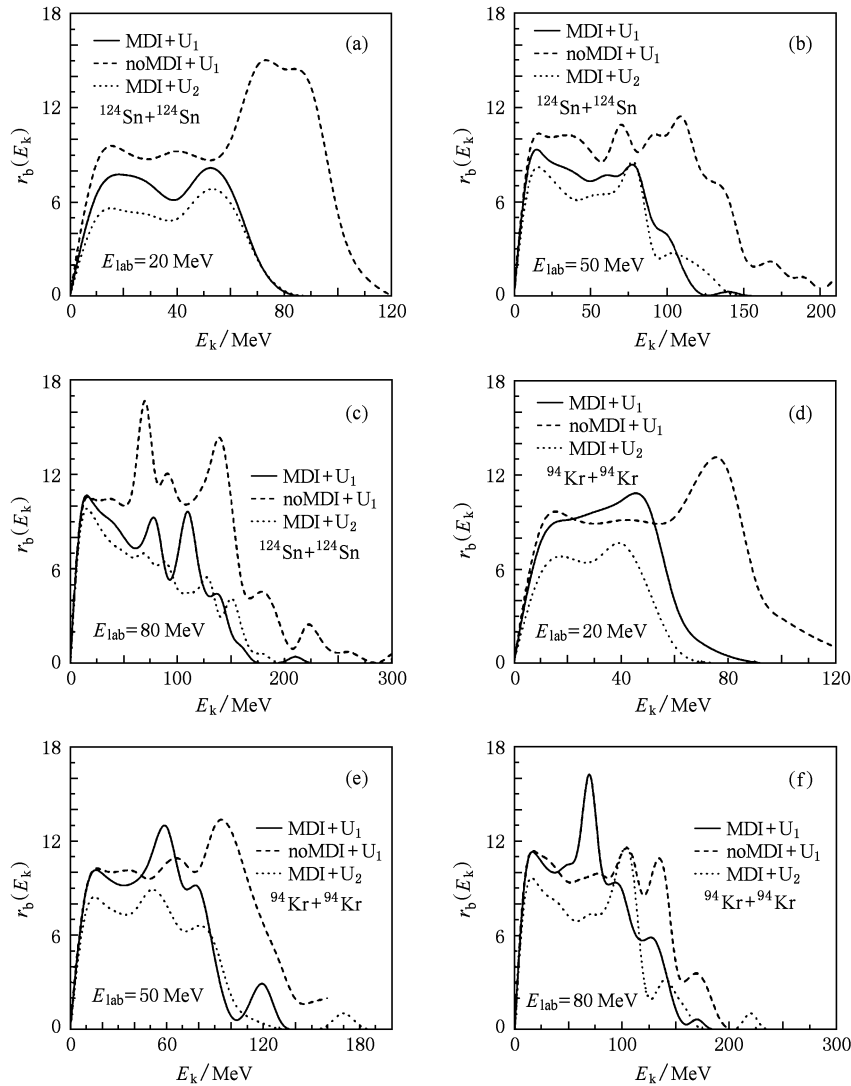


图 2 动量相关作用和对称势对 $r_b(E_k)$ 效应的比较

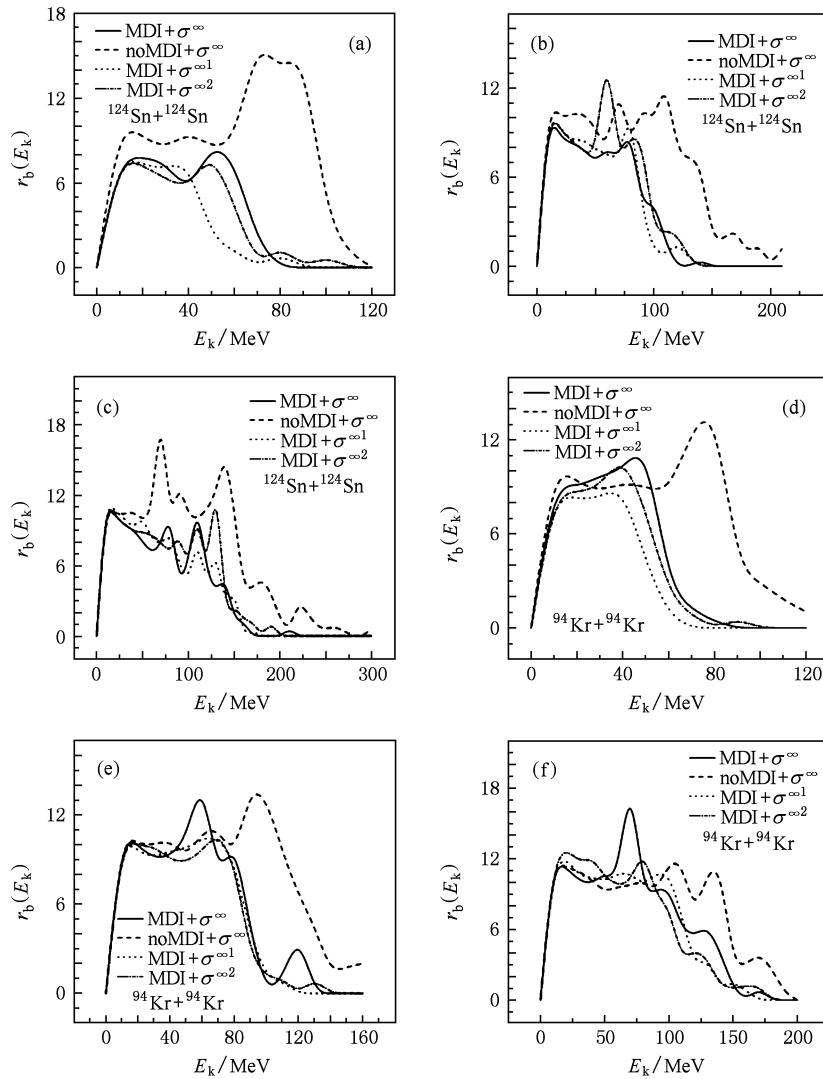


图3 动量相关作用和核子-核子截面对 $r_b(E_k)$ 效应的比较

大于 σ^{iso} 的实线和同位旋无关核子-核子碰撞截面 σ^{noiso2} 的点划线之差. 前面实线和短划线之差表示动量相关作用对 $r_b(E_k)$ 的效应. 后面实线和点线之差, 或者实线和点划线之差表示核子-核子碰撞截面对 $r_b(E_k)$ 的效应. 这些比较研究充分表明, 动量相关作用对 $r_b(E_k)$ 的效应明显大于介质中核子-核子碰撞截面对于 $r_b(E_k)$ 的效应.

因为 $r_b(E_k)$ 和动量相关作用都直接与核子的动量有关. 故 $r_b(E_k)$ 在碰撞过程中对动量相关作用非常灵敏. 但是介质中核子碰撞截面对称势仅对核子的密度相关. 故 $r_b(E_k)$ 在碰撞过程中与动量相关作用比较, 较弱地依赖于介质中核子碰撞截面对称势. 以上两类比较研究清楚地表明, $r_b(E_k)$ 灵敏地依赖于动量相关作用而弱地依赖于对称势和介质中核子-核子碰撞截面. 因此, $r_b(E_k)$ 是重离子

碰撞中提取动量相关作用信息的可能探针.

3.4. 与动量相关作用的重要判据

图4表示丰中子弹核 ^{94}Kr 和相同质量稳定弹核 ^{94}Mo 在相同入射道条件下动量相关作用对 $r_b(E_k)$ 效应的比较. 束流能量 $E_{lab} = 50 \text{ MeV/核子}$. 从图4曲线的比较可以看出, 丰中子碰撞系统 $^{94}\text{Kr} + ^{94}\text{Kr}$ 具有动量相关作用的实线和动量无关作用的短划线之差明显大于稳定核碰撞系统 $^{94}\text{Mo} + ^{94}\text{Kr}$ 动量相关作用的点线和动量无关作的点划线之差. 前面实线和短划线之差表示碰撞系统 $^{94}\text{Kr} + ^{94}\text{Kr}$ 动量相关作用对 $r_b(E_k)$ 的效应. 后面点线和点划线之差表示稳定核碰撞系统 $^{94}\text{Mo} + ^{94}\text{Kr}$ 动量相关作用对 $r_b(E_k)$ 的效应. 即在相同入射道条件下丰中子碰撞

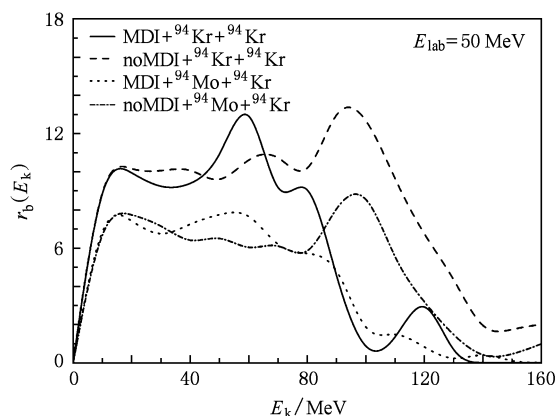


图4 丰中子弹核与相同质量稳定弹核在相同入射道条件下动量相关作用对 $r_b(E_k)$ 效应的比较

系统 $^{94}\text{Kr} + ^{94}\text{Kr}$ 的动量相关作用对 $r_b(E_k)$ 的效应明显大于稳定核碰撞系统 $^{94}\text{Mo} + ^{94}\text{Kr}$ 动量相关作用的效应. 这就表明丰中子碰撞系统加强了动量相关作用对于 $r_b(E_k)$ 的效应. 因为丰中子弹核的松散结构减小了核子的分离能导致更多的核子发射并具有

较高动能;加之,丰中子弹核的中子-质子比大于稳定弹核的中子-质子比,致使丰中子碰撞系统有更多中子发射. 所以,结果导致丰中子碰撞系统与具相同质量稳定碰撞系统比较,具有更大的 $r_b(E_k)$ 和发射动能 E_k . 这种比较研究结果无疑为在重离子碰撞中提取动量作用的信息提供了一个重要判据.

4. 结 论

以上计算结果得出的结论表明在相对较低束流能量区域丰中子碰撞系统的中子-质子比发射动能谱 $r_b(E_k)$ 灵敏地依赖于动量相关作用而弱的依赖于对称势和介质中核子-核子碰撞截面. 故 $r_b(E_k)$ 是重离子碰撞中提取动量相关作用信息的可能探针. 同时,丰中子弹核和相同质量稳定弹核在相同入射道条件下动量相关作用对 $r_b(E_k)$ 效应的比较研究结果对于提取动量相作用的知识提供了另一组重要的判据.

- [1] Li B A, Schroeder W U 2001 *Isospin Physics in Heavy-Ion Collisions at Intermediate Energies* (New York: Nova Science Publishers, Inc)
- [2] Aichelin J, Rosenhauer A, Peilert A G, Stoecker H, Greiner W 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 1926
- [3] Aichelin J, Peilert G, Bohnet A, Rosenhauer A, Stocker H, Greiner W 1988 *Phys. Rev. C* **37** 2451
- [4] Bertsch G F, Gupta D S 1988 *Phys. Rep.* **160** 189
- [5] Li B A, Ko C M, Bauer W 1998 *Int. J. Mod. Phys. E* **7** 147
- [6] Liu J Y, Guo W J, Xing Y Z, Zuo W, Lee X G 2003 *Phys. Rev. C* **37** 024608
- [7] Yang Y F, Liu J Y, Zou W, Guo W J, Zhao Q 2005 *Chin. Phys. Lett.* **18** 1040 (in Chinese) [杨富中、刘建业、左 维、郭文军、赵 强 2005 物理快报 **18** 1040]
- [8] Liu J Y, Guo W J, Xing Y Z, Lee X G 2005 *Chin. Phys. Lett.* **22** 65 (in Chinese) [刘建业、郭文军、邢永忠、李希国 2005 物理快报 **22** 65]
- [9] Liu J Y, Gou W J, Xing Y Z, Lee X G 2008 *Int. J. Mod. Phys. E* **17** 645
- [10] Liu H, Liu J Y, Li J Q 1996 *Z. Phys. A* **354** 311
- [11] Ngo C, Ngo V, Leray S, Spina E 1989 *Nucl. Phys. A* **499** 148
- [12] Klakow D, Welke G, Bauer W 1993 *Phys. Rev. C* **48** 1982
- [13] Alkhozov G, Bauer T, Bertini R, Bimbot L, Bing Q, Boudard A, Bruge G, Catz H, Chaumeaux A 1977 *Nucl. Phys. A* **280** 365
- [14] Liu J Y, Guo W J, Wang S J, Zuo W, Zhao Q, Yang Y F 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 975

Possible probe on the momentum dependent interaction in the equation of state of nuclear matter^{*}

Liu Jian-Ye^{1)2)3)†} Guo Wen-Jun⁴⁾

1) (*Physics Department of Tianshui Normal University, 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) (*Science College University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China*)

(Received 14 August 2009; revised manuscript received 14 January 2010)

Abstract

The effects of momentum dependent interaction on the kinetic energy spectrum of the neutron-proton ratio $r_b(E_k)$ in the equation of state of nuclear matter was investigated. We found that the kinetic energy spectrum of the neutron-proton ratio $r_b(E_k)$ depends sensitively on the momentum dependent interaction and weakly on the in-medium nucleon-nucleon cross section and symmetry potential so that the $r_b(E_k)$ is a sensitive physical probe for extracting the information of momentum dependent interaction in the heavy ion collisions. At the same time, the comparing investigate between $r_b(E_k)$ for the neutron-rich collision system and the same mass stable collision system gives a important judgment for extracting the information of momentum dependent interaction in the heavy ion collisions.

Keywords: nucleon-nucleon collision cross section, symmetry potential, momentum dependent interaction

PACC: 2570, 2587

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

[†] E-mail: liujy@lzb.ac.cn