

同位旋和动量依赖的相互作用在重离子碰撞中的同位旋效应^{*}

刘建业^{1,2,3;1)} 郭文军² 邢永忠^{1,3} 李希国^{1,2}

1 (兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心 兰州 730000)

2 (中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

3 (天水师范学院基础物理研究所 甘肃 天水 741000)

摘要 引入同位旋自由度将同位旋无关的动量相关作用改造成同位旋和动量依赖的相互作用. 利用同位旋依赖的量子分子动力学理论研究了同位旋和动量依赖的相互作用对中能重离子碰撞中动量耗散和同位旋分馏的作用. 计算结果表明动量相关作用具有重要的同位旋效应, 尽管它没有明显地改变原子核阻止(动量耗散)对于两体碰撞截面和同位旋分馏强度对于对称势的灵敏依赖性, 但它对于以上两种灵敏性产生了明显的减弱作用. 故动量相关作用中同位旋效应研究对于定量的研究和确定同位旋非对称核物质状态方程是重要的.

关键词 动量相关作用 同位旋效应 重离子碰撞

1 引言

放射性原子核束的产生和应用使人们可以在很大同位旋自由度范围内研究原子核的结构性质和反应动力学. 进而研究和确定同位旋非对称核物质状态方程和介质中核子-核子碰撞截面. 这些研究不但对于研究原子核的性质是重要的, 也是研究宇宙和天体演化过程的重要物理基础. 近年来, 沿着以上两个领域从理论和实验两个方面开展了许多研究工作, 并取得了重要的进展^[1-12]. 但是由于中能重离子碰撞动力学过程的复杂性和困难, 至今对于同位旋非对称核物质状态方程和介质中核子-核子碰撞截面远未研究清楚. 其中中能重离子碰撞中的动量相关作用一直是个重要的研究课题, 但动量相关作用的同位旋效应一直未被研究. 近来 Das Gupta 和 Bao-Au Li 等人研究给出的 Boltzmann-Uehling-Uhlenbeck (BUU) 方程可用于实际计算的对称能的动量相关作用^[13,14]. 但如果将这个公式用于同位旋相关的

量子分子动力学理论 (IQMD)^[15-18] 中就会带来很大困难. 因为必须将公式中相空间几率从 BUU 方程中的 δ 函数型改为 IQMD 中的双高氏波包型, 数值计算量成数量级的增加, 目前一般计算机难以完成. 故我们基于 IQMD 中动量相关作用公式, 引入同位旋自由度改造成同位旋和动量依赖的相互作用, 即考虑了动量相关作用的同位旋效应, 并研究了它对中能重离子碰撞中原子核阻止(动量耗散)和同位旋分馏过程中的作用. 结果表明动量相关作用的同位旋效应是重要的, 有无同位旋自由度的动量相关作用得到明显不同的结果.

2 理论模型

2.1 IQMD^[2,15-18]

IQMD 模型中的相互作用如下所示:

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

2004-08-07 收稿

^{*} 国家重大基础研究发展规划项目 (G2000077400), 国家自然科学基金重点项目 (10435080), 国家自然科学基金 (10447006), 中国科学院知识创新工程重点方向项目 (KJ92-SW-No2) 资助

1) E-mail: liujy@lzb.ac.cn

$$+ U^{\text{MDI}} + U^{\text{sym}}, \quad (1)$$

U^{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^{Coul} 是库仑势; U^{Yuk} 表示 Yukawa 势

$$U^{\text{Yuk}} = t_3 \exp\left(\frac{|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|}{m} \right) / \left(\frac{|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|}{m} \right), \quad (3)$$

U^{MDI} 是动量相关作用

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

U^{Pauli} 是泡里势

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

$$\delta_{p_i, p_j} = \begin{cases} 1 & \text{中子 - 中子 (质子 - 质子)} \\ 0 & \text{中子 - 质子} \end{cases}. U^{\text{sym}} \text{是对称势,}$$

对称势的形式有很多种,在本文中,使用了两种常用的对称势^[1,2]:

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

$$U_2^{\text{sym}} = cu^{1/2}(\delta\tau - \delta^2/4),$$

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, $u \equiv \rho/\rho_0$; δ 是相对中子过剩 $\delta = \frac{\rho_n - \rho_p}{\rho_n + \rho_p} =$

$\frac{\rho_n - \rho_p}{\rho}$, ρ, ρ_0, ρ_n 和 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^[19]为

$$\sigma_{\text{NN}}^{\text{res}} = \left(1 + \alpha \frac{\rho}{\rho_0} \right) \sigma_{\text{NN}}^{\text{free}}, \quad (7)$$

这里参数取 $\alpha = -0.2$ 被发现与集体流的实验数据得到很好的符合, $\sigma_{\text{NN}}^{\text{free}}$ 是实验核子 - 核子碰撞截面^[20].

2.2 同位旋和动量依赖的相互作用

为了描述动量相关作用中的同位旋效应,我们引入了同位旋自由度,将同位旋无关的动量相关作用(4)式改造为以下两式

$$\begin{aligned} U_n^{\text{MDI}} &= t_4 \ln^2 [t_5 (\mathbf{p}_n - \mathbf{p}_2)^2 + 1] (C_{\text{nn}}\rho_n + C_{\text{np}}\rho_p) / \rho_0, \\ U_p^{\text{MDI}} &= t_4 \ln^2 [t_5 (\mathbf{p}_p - \mathbf{p}_2)^2 + 1] (C_{\text{pp}}\rho_p + C_{\text{pn}}\rho_n) / \rho_0, \end{aligned} \quad (8)$$

其中 p_n 和 p_p 分别代表中子和质子的动量, p_2 代表所有其他粒子的动量. U_n^{MDI} 和 U_p^{MDI} 分别表示中子和质子的同位旋和动量依赖的相互作用.

U_n^{MDI} 中 $C_{\text{nn}}\rho_n$ 相关项表示中子与其他中子之间的作用,而 $C_{\text{np}}\rho_p$ 相关项表示中子与所有其他质子之间的作用.类似地 U_p^{MDI} 中 $C_{\text{pp}}\rho_p$ 相关项表示质子与其他质子之间的作用,而 $C_{\text{pn}}\rho_n$ 相关项表示质子与其他中子之间的作用,其中 $C_{\text{nn}} = C_{\text{pp}} = C_{\text{nn}}, C_{\text{np}} = C_{\text{pn}} = C_{\text{pp}}$, 且 $\tau \neq \tau'$. C_{nn} 和 C_{pp} 为表征同位旋效应的两个参数.故可将 U_n^{MDI} 和 U_p^{MDI} 合并成一项,公式如下:

$$U_\tau^{\text{MDI}} = t_4 \ln^2 [t_5 (\mathbf{p}_\tau - \mathbf{p}_2)^2 + 1] (C_{\text{nn}}\rho_\tau + C_{\text{pp}}\rho_{\tau'}) / \rho_0, \quad (9)$$

这样就可以得到单粒子势

$$U_\tau^{\text{MDI}}(\rho, \kappa, \delta) = U^{\text{sky}} + U^{\text{sym}} + U^{\text{MDI}} \equiv U_\tau, \quad (10)$$

其中 $U^{\text{sky}} \equiv U^{\text{sky}}(\rho)$, $U^{\text{sym}} \equiv U^{\text{sym}}(\rho, \delta, \tau)$, $U_\tau^{\text{MDI}} = \sum_{\tau'} U_\tau^{\text{MDI}}(\rho, \kappa, \tau')$. 这里对 τ' 求和只对核子的动量进行,故 U^{MDI} 仍对粒子 τ 的动量是依赖的.

将单体势(10)式与 Gony 相互作用的多体理论得到的单粒子势^[13]进行拟合得到两个参数 C_{nn} 和 C_{pp} 分别为 0.5 和 1.5. 这就表明中子 - 质子之间的关联比中子 - 中子或质子 - 质子的关联强.

3 结果和讨论

3.1 同位旋和动量依赖的相互作用对原子核阻止的同位旋效应

为了描述重离子碰撞中的原子核阻止,即动量耗散,我们利用动量的横向对纵向比 $R = \frac{2}{\pi} \left(\sum_{i=1}^A |P_\perp(i)| \right) / \left(\sum_{i=1}^A |P_\parallel(i)| \right)$ 来表示. 其中碰撞系统的总质量 A 是弹核质量 A_p 和靶核质量 A_t 之和,第 i 个核子动量的横向分量和纵向分量分别为 $P_\perp(i) = \sqrt{P_x^2(i) + P_y^2(i)}$, $P_\parallel(i) = P_z(i)$. 定义同位旋相关核子 - 核子碰撞截面 σ^{iso} , 这时 $\sigma_{\text{np}} \neq \sigma_{\text{nn}} = \sigma_{\text{pp}}$, 同位旋无关核子 - 核子碰撞截面为 σ^{noi} , 这时 $\sigma_{\text{np}} = \sigma_{\text{nn}} = \sigma_{\text{pp}}$, 这里 $\sigma_{\text{np}}, \sigma_{\text{nn}}$ 和 σ_{pp} 分别为中子 - 质子, 中子 - 中子和质子 - 质子在介质中的碰撞截面.

图 1 表示原子核阻止 R 随碰撞时间 t 的演化,对 $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ 反应系统,取碰撞参数 $b = 0.0 \text{ fm}$. 图 1 中两条虚线表示采用了同位旋无关的动量相关作用 U^{MDI} , 对称势 U_1^{sym} 和两种不同的核子 - 核子截面 σ^{iso} 和 σ^{noiso} .

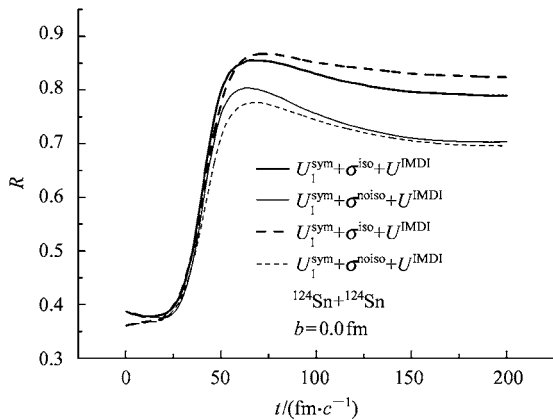


图 1 100MeV/u $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ 原子核阻止 R 随碰撞时间 t 的演化

而图 1 中两条实线表示与两条虚线对应的计算结果,但是包含了同位旋和动量依赖相互作用 U^{MDI} .从图 1 可以清楚地看到两条实线之差和两条虚线之差都很大,反映了原子核阻止灵敏地依赖核子-核子碰撞截面.这种差就表示两体碰撞在原子核碰撞动量耗散中的同位旋效应,与我们以前工作^[18]中结论一致.然而两条实线之差明显小于两条虚线之差.这意味着在 U^{MDI} 作用下原子核阻止对于两体碰撞的依赖性,但还不足以改变原子核阻止对于两体碰撞的依赖性.其原因在于原子核碰撞中的线性动量转移主要是由于两体碰撞引起的.为了检验以上性质在宽能量范围的变化情况,我们计算了与图 1 相同条件下原子核阻止 R 随束流能量的演化.

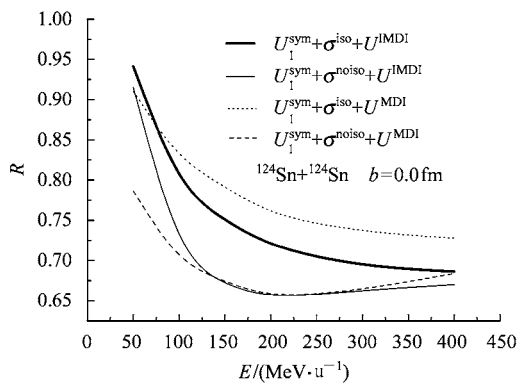


图 2 $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ 原子核阻止 R 随束流能量的演化

图 2 中 4 条曲线的含义与图 1 相同.可以看出在所研究的能区内两条实线之差都小于两条虚线之

差,即同样表现出 U^{MDI} 减弱了原子核阻止对两体碰撞同位旋效应的依赖.但束流能量在 100MeV/u 以下, R 对两体碰撞截面的依赖性逐渐消失.因为随着入射能量的减小,两体碰撞减弱而平均场占据主导地位.同时从图 2 看到 R 随束流能量的增加而减小,这些性质和原因均与我们以前的结果相同^[21].因为随入射能量的增加,原子核的透明性增加而阻止减小.

3.2 同位旋和动量依赖的相互作用对同位旋分馏中的同位旋效应

我们将中能重离子碰撞过程中气相中子-质子比 $\left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{gas}}$ 和液相中子-质子比 $\left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{liq}}$ 的不等分配称作同位旋分馏,称 $\left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{gas}} / \left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{liq}}$ 为同位旋分馏强度.其中 N 和 Z 分别是中子数和质子数.图 3 是反应系统 $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ 的同位旋分馏强度随时间演化的计算结果,束流能量 $E = 50\text{MeV/u}$ 和碰撞参数 $b = 0.0\text{ fm}$.

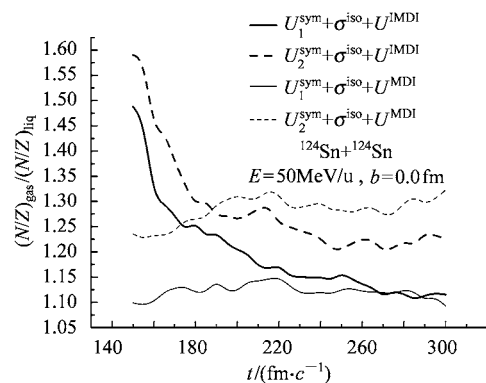


图 3 50MeV/u $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ 同位旋分馏强度随时间的演化

图 3 中 4 条曲线的含义与图 1 相同.即两粗线包括同位旋和动量依赖的相互作用 U^{MDI} 、两体碰撞截面 σ^{iso} 、两种不同的对称势 U_1^{Sym} 和 U_2^{Sym} .两条细线与两条粗线对应,但仅包括同位旋无关的动量相关作用 U^{MDI} .从图 3 可看出,同位旋分馏强度正好与原子核阻止情况相反,即灵敏地依赖对称势,而弱地依赖两体碰撞,因为两条实线之间或者两条虚线之间大的间隔都是由不同对称势造成的,与我们工作^[21]结论一致.同样可以看到两条实线之差小于两条虚线之差,即动量相关作用在考虑同位旋自由度后,减弱了同位旋分馏强度对于对称势的依赖,但是仍不足以改变这种性质.

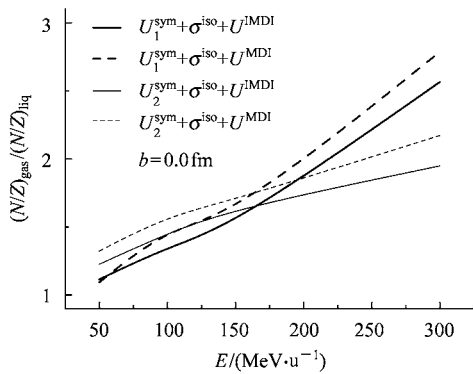


图 4 给出 $\left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{gas}} / \left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{liq}}$ 随束流能量的变化情况

为了进一步检验在宽能量范围内 $\left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{gas}} / \left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{liq}}$ 随束流能量的演化,图 4 给出在与图 3 相同条件下 $\left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{gas}} / \left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{liq}}$ 随束流能量的变化.可以明显地看到具有 U^{MDI} 的两条实线都比具有 U^{MDI} 相应的两条

虚线低,即 U^{MDI} 的作用是降低 $\left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{gas}} / \left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{liq}}$,结论与图 3 相同.至于 $\left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{gas}} / \left(\frac{N}{Z}\right)_{\text{liq}}$ 的数值随束流能量的增加而增加,与我们以前工作^[21]的结论相同,即随束流能量增加系统激发能也增加,从而加速了同位旋分馏过程.

4 小结

1) 动量相关作用引入同位旋自由度后 (U^{MDI}) 具有减弱原子核阻止对于核子-核子碰撞截面的依赖性,但不足以改变这种性质,即原子核阻止仍是提取核子-核子碰撞截面的探针.

2) U^{MDI} 同样具有减弱在 U^{MDI} 条件下同位旋分馏强度对于对称势依赖性的作用,但仍保持了它作为提取对称势知识的探针.故为了定量研究和确定介质中核子-核子碰撞截面和同位旋非对称核物质状态方程,应对动量相关作用的同位旋效应进行认真研究.

参考文献 (References)

- 1 LI B A, Ko C M, Bauer W. Int. J. Mod. Phys., 1998, **E7**:147
- 2 LI B. A, Schroder W Udo. Isospin Physics in Heavy-Ion Collisions at Intermediate Energies, New York: Nova Science Publishers, 2001
- 3 Wada R et al. Phys. Rev. Lett., 2003, **68**: 014608
- 4 Yennello S J et al. Phys. Lett., 1994, **B321**:14; Nucl. Phys., 2001, **A681**:317c
- 5 Pak R et al. Phys. Rev. Lett., 1997, **78**: 1022
- 6 Westfall G D. Nucl. Phys., 1998, **A630**: 27c; 2001, **A681**: 343c
- 7 Pak R, Benenson W, Bjarki O et al. Phys. Rev. Lett., 1997, **78**: 1022
- 8 Baran V, Colonna M, Toro M Di et al. Nucl. Phys., 2002, **A703**:603
- 9 Colonna M, Toro M Di et al. Phys. Rev., 1998, **C57**: 1410—1415; Toro M Di et al. Nucl. Phys., 2001, **A681**:426C
- 10 LIU Jian-Ye, GUO Wen-Jun, WANG Shun-Jin et al. Phys. Rev. Lett., 2001, **86**(6): 975—978
- 11 LIU Jian-Ye, ZHAO Qiang, WANG Shun-Jin et al. Phys. Rev., 2001, **C63**:054612; LIU Jian-Ye, GUO Wen-Jun, WANG Shun-Jin et al. Nucl. Phys., 2001, **A687**:475
- 12 LIU Jian-Ye, GUO Wen-Jun, XING Yong-Zhong et al. Physics Letters, 2002, **B540**: 213—219
- 13 Das C D, Gupta S Das, Gale C et al. Phys. Rev., 2003, **C68**:034611
- 14 LI Bao-An, Das C B, Gupta S Das et al. Phys. Rev., 2004, **C69**: 011603
- 15 Bertsch G F, Gupta S D. Phys. Rep., 1988, **160**:1991
- 16 Aichelin J et al. Phys. Rev. Lett., 1987, **58**: 1926
- 17 Aichelin J et al. Phys. Rev., 1988, **C37**: 2451
- 18 Reinhard P G et al. Computational Nuclear Physics, 1991, **1**:28—50
- 19 Klakow D, Welke G, Bauer W. Phys. Rev., 1993, **C48**: 1982
- 20 Alkazzov G et al. Nucl. Phys., 1977, **A280**:365
- 21 LIU Jian-Ye, GUO Wen-Jun, XING Yong-Zhong et al. Nucl. Phys., 2003, **A726**: 123—133

Isospin Effect of Momentum Dependent Interaction in Heavy Ion Collisions*

LIU Jian-Ye^{1,2,3;1)} GUO Wen-Jun² XING Yong-Zhong^{1,3} LI Xi-Guo^{1,2}

1 (Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy Ion Accelerator, Lanzhou 730000, China)

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

3(Department of Physics, Tianshui Normal College, Gansu Tianshui 741000, China)

Abstract We take the isospin degree of freedom in the momentum dependent interaction to obtain an isospin and momentum dependent interaction with a form practically usable in isospin dependent quantum molecular dynamics model. We investigate the isospin effect of momentum dependent interaction on the observable in the intermediate energy heavy ion collisions. It is found that momentum dependent interaction with and without isospin dependence, lead to significant different predictions on the nuclear stopping (momentum dissipation) and isospin fractionation ratio. In particular the momentum dependent interaction with the isospin degree of freedom induces reductions for the dependence of nuclear stopping on the two-body collisions and the dependence of isospin fractionation ratio on the symmetry potential. However it does not change obviously the features for the nuclear stopping and isospin fractionation ratio as the good probe of in-medium nucleon-nucleon cross section and symmetry potential. The isospin dependence of momentum dependent interaction is thus important for studying accurately the equation of state of isospin asymmetry nuclear matter.

Key words momentum dependent interaction, isospin effect, heavy ion collision

Received 7 August 2004

* Supported by the Major State Basic Research Development Program(C2000077400), the Key Project of the National Natural Science Foundation of China(10435080), National Natural Science Foundation of China (10447006), and the CAS Knowledge Innovation Project (KJ CX2-SW-No2)

1)E-mail: liujy@lzb.ac.cn