

动量相关作用对两体耗散同位旋效应的重要性*

杨艳芳² 刘建业^{1,2} 郭文军² 左维^{1,2} 赵强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)

摘要 利用同位旋相关的量子分子动力学,研究了中能重离子碰撞中动量相关的状态方程对原子核阻止基于两体耗散的同位旋效应的影响.计算结果表明原子核阻止对同位旋相关和同位旋无关的核子-核子碰撞截面(两体耗散)的差值强烈地依赖于动量相关势,即在有动量相关势的情况下原子核阻止对同位旋相关和同位旋无关的核子-核子碰撞截面的差值大于没有动量相关势的情况.这就意味着动量相关作用明显地提高了原子核阻止对于核子-核子碰撞截面的灵敏性.因此,在考虑动量相关势的情况下,原子核阻止可以更准确地作为提取同位旋相关的核子-核子碰撞截面的一个探针.

关键词 原子核阻止 重离子碰撞 同位旋相关性 同位旋无关性

1 引言

同位旋非对称核物质状态方程的知识不仅与核物理密切相关,而且对于了解天体物理问题也是非常重要的^[1].近年来,人们对同位旋对称核物质的动量相关的状态方程对物理量的影响做了许多研究^[2-5];但对非对称核物质状态方程方面的知识了解甚少.我们以前的工作表明^[6-8],原子核阻止可以作为探针去提取中能重离子碰撞介质中同位旋相关的核子-核子碰撞截面的知识,因为在小碰撞参数下,原子核阻止在费米能以上能区直至150MeV/u下强烈地依赖于介质中核子-核子碰撞截面的同位旋相关性,而对对称势的影响不明显^[6-8].本文是利用同位旋相关的量子分子动力学(IQMD)模型,仔细研究了动量相关势(MDI)对原子核阻止的影响,即发现在考虑动量相关势的情况下,原子核阻止可以更准确地作为提取同位旋相关的核子-核子碰撞截面的一个探针.因为在碰撞的开始阶段,两个具有相对大动量的原子核互相穿透时,MDI的影响是较强的.此时考虑了

2001-06-26 收稿

* 国家重大基础研究发展规划项目(G2000077400),中国科学院百人计划,国家自然科学基金(10004012,19847002和KJ951-A1-410),中国科学院基金和中国科学院知识创新工程重点方向项目(KJCX2-SW-N02)共同资助

动量相关作用的粒子在传播的横向方向上被加速. 因此与没有动量相关作用(NOMDI)时相比, 原子核阻止明显增加. 同时在 300MeV/u 以下能区, 中子-质子的碰撞截面(σ_{np})一般约为中子-中子(σ_{nn})或质子-质子碰撞截面(σ_{pp})的 3 倍^[9], 所以具有同位旋相关的核子-核子碰撞截面(即 $\sigma_{np} \neq \sigma_{nn} = \sigma_{pp}$)的原子核阻止大于同位旋无关的核子-核子碰撞截面(即 $\sigma_{np} = \sigma_{nn} = \sigma_{pp}$)的原子核阻止, 而且动量相关作用造成核子从束流方向到横向方向的额外增加, 产生了更多的横动量. 最终在有 MDI 的情况下原子核阻止对同位旋相关和同位旋无关的核子-核子碰撞截面的差值大于在 NOMDI 的情况下的差值. 从而 MDI 提高了原子核阻止对于同位旋相关核子-核子碰撞截面的灵敏性, 因此我们认为, 在考虑动量相关势的情况下, 原子核阻止可以更准确地作为提取同位旋相关的核子-核子碰撞截面的一个探针.

2 理论模型和有关参数

采用的 IQMD 模型^[10,11], 包括以下相互作用势:

$$U = U^{\text{Sky}} + U^{\text{Coul}} + U^{\text{Yuk}} + U^{\text{Pauli}} + U^{\text{MDI}} + U^{\text{sym}}$$

其中密度相关的 Skyrme 势

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

U^{Coul} 是库仑势; 表示有限核表面效应的 Yukawa 势^[10]

$$U^{\text{Yuk}} = \frac{1}{2} t_3 \sum_{i \neq j} \frac{1}{r_{ij}} \exp(L/m^2) \left[\exp(-m/r_{ij}) \operatorname{erfc}(\sqrt{L}/m - r_{ij}/\sqrt{4L}) - \exp(m/r_{ij}) \operatorname{erfc}(\sqrt{L}/m + r_{ij}/\sqrt{4L}) \right],$$

式中 erfc 是误差函数; 动量相关势^[12]

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

泡利势^[12,13]

$$U^{\text{Pauli}} = V_p \left(\frac{\hbar}{\rho_0 q_0} \right)^3 \exp \left(- \frac{(r_i - r_j)^2}{2q_0^2} - \frac{(\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j)^2}{2p_0^2} \right) \delta_{p_i p_j},$$

式中 $\delta_{p_i p_j} = \begin{cases} +1 & \text{中子-中子或质子-质子} \\ 0 & \text{中子-质子} \end{cases}$

对称势

$$U^{\text{sym}} = C \frac{\rho_n - \rho_p}{\rho_0} \tau_3,$$

其中 $\tau_3 = \begin{cases} +1 & \text{中子} \\ -1 & \text{质子} \end{cases}$. 对称势的强度一般取 $C = 32 \text{MeV/u}$. 其中, ρ, ρ_0, ρ_n 和 ρ_p 分别是核

的密度、饱和密度、中子密度和质子密度. 在 IQMD 模型中, 初始核的密度分布由具有参数 SKM*^[14] 的 Skyrme-Hartree-Fock 模型得到, 在抽取原子核初态性质中确定各势参数如表 1 所示.

表 1 用 Skyrme-Hartree-Fock 模型在抽取原子核初态性质中的各种势参数

C /MeV	α /MeV	β /MeV	γ /MeV	t_3 /MeV	t_4 /MeV	t_5 /MeV ⁻²	V_p /MeV	p_0 /(MeV·c ⁻¹)	q_0 /fm
32	-390.1	320.3	1.1667	7.5	1.57	5×10^{-4}	30	400	5.64

近年来,通过对中能重离子碰撞集体流研究表明,介质效应使核子-核子碰撞截面变小^[15-17],经验的介质中核子-核子碰撞截面为^[17]

$$\sigma^{med} = \sigma^{free} \left(1 + \gamma \frac{\rho}{\rho_0} \right), \tag{7}$$

这里 σ^{free} 是实验的自由核子-核子碰撞截面^[9], $\gamma = -0.2$.

3 计算结果和讨论

原子核的阻止是描述重离子碰撞中核子动量分布各向异性和重离子耗散过程的重要物理观测量. 可用动量横向与纵向的比(R)来描述,

$$R = \frac{2}{\pi} \frac{|p_{\perp}|}{|p_{\parallel}|} = \frac{2}{\pi} \frac{\sum_i^A (p_x^2(i) + p_y^2(i))^{1/2}}{\sum_i^A |p_z(i)|}, \tag{8}$$

其中 $p_x(i)$, $p_y(i)$ 和 $p_z(i)$ 分别是第 i 个核子的动量分量, $A = A_p + A_t$, A_p , A_t 分别是碰撞系统、弹核和靶核和质量. 原子核阻止的模拟可以用不同状态方程来完成, 即静态状态方程和动量相关的状态方程. 为了使两体耗散的同位旋效应(同位旋相关和同位旋无关的两体碰撞)的原子核阻止在重离子碰撞中更为突出, 我们利用 IQMD 模型, 研究了具有相同质量的弹核和靶核的两组反应系统, 包括丰中子和缺中子逆反应系统 $^{76}\text{Zn} + ^{40}\text{Ar}$ 和 $^{76}\text{Kr} + ^{40}\text{Ca}$, 中子-质子比分别为 1.42 和 1.07; 丰中子和缺中子的对称系统 $^{76}\text{Zn} + ^{76}\text{Zn}$ 和 $^{76}\text{Kr} + ^{76}\text{Kr}$, 中子-质子比分别为 1.53 和 1.11. 因此在相同的人射能量和碰撞参数条件下, 原子核阻止对每一组反应系统其结果的不同主要是由于同位旋效应的缘故.

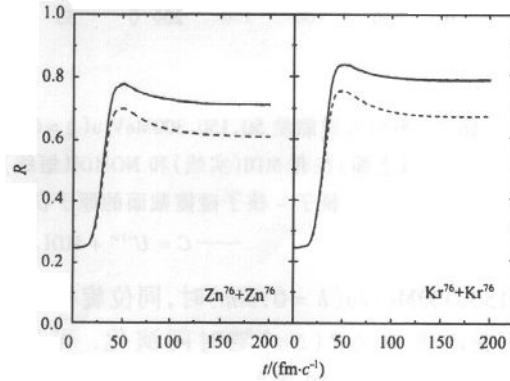


图 1 碰撞系统 $^{76}\text{Zn} + ^{76}\text{Zn}$ 和 $^{76}\text{Kr} + ^{76}\text{Kr}$ 在 $E = 150\text{MeV/u}$, $b = 0.0\text{fm}$ 下, 原子核阻止随时间的演化
—— $C = U^{77m} + \sigma^{iii}$, $C = U^{77m} + \sigma^{nnn}$.

图 1 是两个碰撞系统 $^{76}\text{Zn} + ^{76}\text{Zn}$ 和 $^{76}\text{Kr} + ^{76}\text{Kr}$ 在 $E = 150\text{MeV/u}$, $b = 0.0\text{fm}$ 下, 原子核阻止随时间的演化. 在每一个图中的实线和虚线分别表示在有 MDI 的情况下, 同位旋相关和同位旋无关的核子-核子碰撞截面的原子核阻止. 这两条线的不同主要是由两体耗散

的同位旋效应造成的. 由图还可以看出, 同位旋相关的核子-核子碰撞截面的原子核阻止大于同位旋无关下的原子核阻止.

图 2 是碰撞系统 $^{76}\text{Zn} + ^{76}\text{Zn}$ 和 $^{76}\text{Kr} + ^{76}\text{Kr}$ 在有 MDI 和 NOMDI 的条件下, 不同入射能量

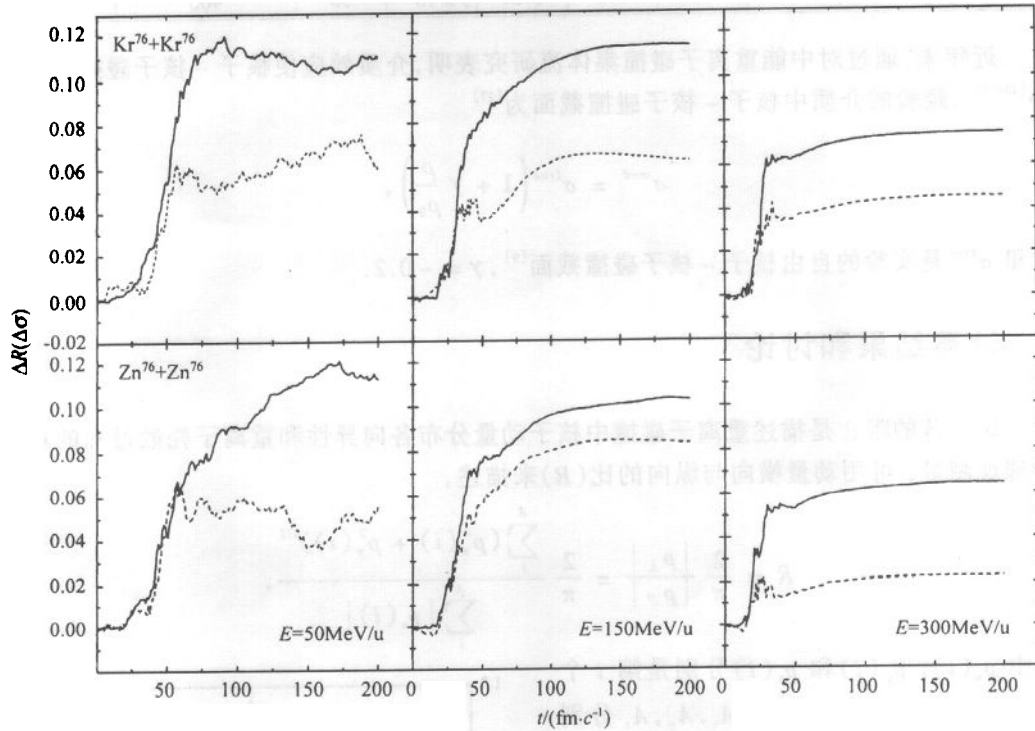


图 2 不同入射能量 50, 150, 300 MeV/u ($b = 0.0\text{fm}$) 的碰撞系统 $^{76}\text{Zn} + ^{76}\text{Zn}$ (下面) 和 $^{76}\text{Kr} + ^{76}\text{Kr}$ (上面) 在有 MDI (实线) 和 NOMDI (短线) 条件下, 同位旋相关和同位旋无关的核子-核子碰撞截面的原子核阻止的差值 $\Delta R(\Delta\sigma)$ 随时间演化

$$\text{—} C = U'' + \text{MDI}, \text{---} C = U'' + \text{NOMDI}.$$

50, 150, 300 MeV/u ($b = 0.0\text{fm}$) 时, 同位旋相关和同位旋无关的核子-核子碰撞截面的原子核阻止的差值 $\Delta R(\Delta\sigma)$ 随时间演化. 可以明显地看出有 MDI 的原子核阻止的差值 $\Delta R(\Delta\sigma)$ 大于 NOMDI 的原子核阻止的差值 $\Delta R(\Delta\sigma)$. 因为 MDI 和同位旋相关的核子-核子碰撞截面破坏了核子之间初始的关联, MDI 在反应的初始阶段在横向方向加速了核子的传播. 所以与 NOMDI 相比, 有 MDI 的原子核阻止的差值明显增加. 即 MDI 明显地提高了原子核阻止对核子-核子碰撞截面同位旋相关性的灵敏性. 因此在小碰撞参数下, 原子核阻止在费米能以上能区直至 150 MeV/u 下强烈地依赖于介质中核子-核子碰撞截面的同位旋相关性, 而对对称势的影响不明显^[6,7]. 因而我们认为在考虑动量相关势的情况下, 原子核阻止可以更准确地作为提取同位旋相关的核子-核子碰撞截面的一个探针.

图 3 显示的是在 $E = 150\text{MeV/u}$, $b = 0.0\text{fm}$ 时, 碰撞系统 $^{76}\text{Kr} + ^{40}\text{Ca}$ 和 $^{76}\text{Zn} + ^{40}\text{Ar}$ 的原子核阻止在 MDI 和 NOMDI 时同位旋相关和同位旋无关的核子-核子碰撞截面的差值 $\Delta R(\Delta\sigma)$ 随时间的演化. 可以看出即使在相同的人射能量和相同的碰撞参数下, 对对称系

统和非对称系统具有不同的压缩和不同的激发能,但在图 3 中依然得到与图 2 具有相同的结论.

4 结束语

本文利用 IQMD 研究了 MDI 对于两体耗散同位旋效应的影响. 结果表明对于质量对称、质量非对称、缺中子和丰中子反应系统而言,在有 MDI 条件下,基于同位旋相关核子-核子碰撞截面和同位旋无关核子-核子截面的原子核阻止差值大于 NOMDI 条件下的差值. 也就是说,在有 MDI 时原子核阻止对于同位旋相关的核子-核子碰撞截面的灵敏度提高了. 根据此结果我们认为 MDI 的影响使原子核阻止可以更准确地作为提取 HIC 中同位旋相关的核子-核子碰撞截面的一个探针.

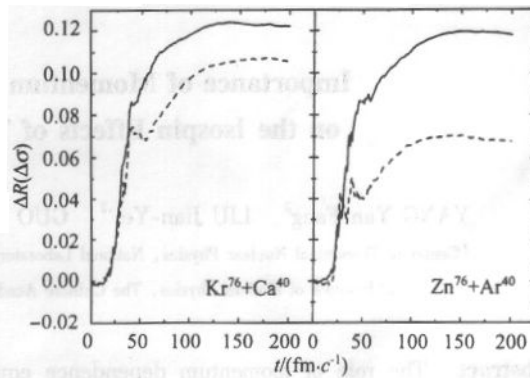


图 3 在 $E = 150\text{MeV/u}$, $b = 0.0\text{fm}$ 时,碰撞系统 $^{76}\text{Kr} + ^{40}\text{Ca}$ 和 $^{76}\text{Zn} + ^{40}\text{Ar}$ 的原子核阻止在 MDI 和 NOMDI 时同位旋相关和同位旋无关的核子-核子碰撞截面的差值 $\Delta R(\Delta\sigma)$ 随时间的演化
— $C = U^{(i)} + \text{MDI}$, $C = U^{(i)} + \text{NOMDI}$.

参考文献(References)

- 1 LI Bao-An, Ko Che-Ming et al. *Inter. Jour. Mod. Phys.*, 1998, **E7**(2):147
- 2 Aichelin J, Rosenhauer A, Peilert G et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**:1926
- 3 Gale C, Bertsch G, Gupta S Das. *Phys. Rev.*, 1987, **C35**:1666
- 4 Suneel Kumar, Puri Rajeev K. *Phys. Rev.*, 1999, **C60**:054607
- 5 Jaivir Singh, Suneel Kumar, Rajeev K Puri. *Phys. Rev.*, 2000, **C62**:044617
- 6 LIU Jian-Ye, GUO Wen-Jun, WANG Shun-Jin et al. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, **86**:975
- 7 LIU Jian-Ye, YANG Yan-Fang, ZUO Wei et al. *Phys. Rev.*, 2001, **C63**:054612
- 8 YANG Yan-Fang, LIU Jian-Ye, ZUO Wei et al. *Chinese Physics Letter*, 2001, **18**(8):1040
- 9 CHEN K, Fraenkel Z et al. *Phys. Rev.*, 1968, **166**:949
- 10 Aichelin J, Peilert G, Bohnet A et al. *Phys. Rev.*, 1988, **C37**:2451
- 11 Peilert G, Stocher H, Greiner W. *Phys. Rev.*, 1989, **C39**:1402
- 12 LIU Hang, LIU Jian-Ye. *Z. Phys.*, 1996, **A345**:311
- 13 Dorso C, Duarte S, Randrup J. *Phys. Lett.*, 1987, **B188**: 287
- 14 Reinhard P G. In *Computational Nuclear Physics 1*, edited by Langanke K, Maruhn J A, Koonin S E. Germany: Springer-Verlag, 1991. 28—50
- 15 HUANG M J et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **77**:3739
- 16 Westfall G D et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, **71**:1986
- 17 Klakow D, Welke G, Bauer W. *Phys. Rev.*, 1993, **C48**:1982

Importance of Momentum Dependence Interaction on the Isospin Effects of Two-Body Dissipation *

YANG Yan-Fang² LIU Jian-Ye^{1,2} GUO Wen-Jun² ZUO Wei^{1,2} ZHAO Qiang²

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

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

Abstract The role of momentum dependence equation of state on the nuclear stopping for the isospin dependence and the isospin independence of in-medium nucleon-nucleon cross section is studied by using the isospin dependence quantum molecular dynamics. The nuclear stopping depends strongly on the isospin dependence of in-medium nucleon-nucleon cross section and weakly on the isospin dependence of the mean field-symmetry potential from above the Fermi energy to about 150MeV/u for the small impact parameters. A detail study indicates that the difference between the nuclear stopping for the isospin dependence and the isospin independence of in-medium nucleon-nucleon cross section depends sensitively on the momentum dependence interaction, namely, the difference between the nuclear stopping for the isospin dependence and the isospin independence of in-medium nucleon-nucleon cross section in the present of momentum dependence interaction is larger than that without the momentum dependence interaction (MDI) for the mass symmetry and mass asymmetry reaction systems, neutron-rich and neutron-poor reaction systems. Namely, MDI increases the sensitivity of the nuclear stopping on the isospin dependence nucleon-nucleon cross section. Therefore, the knowledge on the isospin dependence of in-medium nucleon-nucleon cross section can be extracted more accurately from nucleon stopping as a probe if the momentum dependence interaction is taken into account.

Key words nuclear stopping, heavy ion collision, isospin dependence, isospin independence

Received 26 June 2001

* Supported by Major State Basic Research Development Program (G2000077400), 100 Talent Programme of The Chinese Academy of Sciences, National Natural Foundation of China (10004012, 19847002, KJ951-A1-410), The Chinese Academy of Sciences and Chinese Academy of Sciences Knowledge Innovation Project (KJ951-A1-410)