

# 动量相关作用对同位旋相关 平均场的重要性\*

郭文军<sup>2</sup> 刘建业<sup>1,2</sup> 杨艳芳<sup>2</sup> 左维<sup>1,2</sup> 赵强<sup>2</sup>

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,通过原子核阻止研究了中能重离子碰撞中动量相关作用对于同位旋相关的平均场(对称势)的重要性.计算结果表明动量相关作用同时加强了原子核阻止对于对称势和核子-核子碰撞截面同位旋效应的灵敏性.但相对而言核子-核子碰撞截面对于原子核阻止的作用远大于对称势对于它的作用,等价于动量相关作用提高了原子核阻止对于核子-核子碰撞截面同位旋效应的灵敏性,而减弱了原子核阻止对于对称势的灵敏性.这样就把原子核阻止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 对称势 重离子碰撞

## 1 引言

从近年来国内、外的科研进展中,可以看到建立原子核同位旋非对称状态方程和提取介质中同位旋相关的核子-核子碰撞截面的知识不仅对于了解原子核的性质是重要的,同时对于研究宇宙和天体演化过程也是非常重要的<sup>[1]</sup>.这就要求从理论方面选择中能重离子碰撞过程中主要只对对称势  $U^{\text{sym}}$  或者主要只对介质中同位旋相关核子-核子碰撞截面  $\sigma^{\text{sym}}$  灵敏的物理观测量作为探针来提取关于  $U^{\text{sym}}$  或者  $\sigma^{\text{sym}}$  的知识.

我们以前的工作表明<sup>[2-4]</sup>,原子核阻止是同位旋相关核子-核子碰撞截面  $\sigma^{\text{sym}}$  的灵敏探针,因为在小碰撞参数下,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,要得到这种性质,其中动量相关作用(MDI)起了重要作用.本文主要通过原子核阻止来讨论动量相关作用对对称势的影响,并与核子-核子碰撞截面的作用进行比较.

2001-07-30 收稿

\* 国家重大基础研究发展规划(G2000077400),中国科学院百人计划基金,国家自然科学基金(10004012,10175080,19847002)和中国科学院基金(KJ951-A1-410)共同资助

对称势对中子是排斥作用,对质子是吸引作用.这使得更多的中子处于非束缚状态,同时自由中子比质子获得更高的能量.从而导致了在有 MDI 条件下,对称势加剧了一体耗散的过程.计算表明考虑了对称势的原子核阻止要大于未考虑对称势的原子核阻止,两者的差值在考虑 MDI 时要大于未考虑 MDI 时的差值.也就是说 MDI 对对称势的作用有明显影响.但重要的一点是这种影响远小于 MDI 对核子-核子同位旋效应的影响.相比较而言,总的效果等价于 MDI 加大了原子核阻止对两体耗散的敏感性,而减弱了原子核阻止对一体耗散的敏感性.

## 2 理论模型和有关参数

在计算过程中,我们使用了同位旋相关的量子分子动力学模型(IQMD)<sup>[5,6]</sup>,选取的相互作用势

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

以上各种势具体表达形式及选用势参数参考文献[5—10],其中动量相关势<sup>[9]</sup>

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

在目前的计算中,我们选用了 3 种不同的对称势<sup>[10]</sup>:

$$U_1^{\text{sym}} = 32 F_1(u) \delta \tau_z, \quad (3)$$

$$U_2^{\text{sym}} = 32 F_2(u) (\delta \tau_z + \delta^2/2), \quad (4)$$

$$U_3^{\text{sym}} = 32 F_3(u) (\delta \tau_z - \delta^2/4), \quad (5)$$

其中  $F_1(u) = u$ ,  $F_2(u) = u^2/(1+u)$ ,  $F_3(u) = u^{1/2}$ ,  $u \equiv \rho/\rho_0$ ; 对中子  $\tau_z = 1$ , 对质子  $\tau_z = -1$ ; 对称势的强度为 0 时,即不考虑对称势  $U_0^{\text{sym}}$ . 相对中子过剩  $\delta = \frac{\rho_n - \rho_p}{\rho_n + \rho_p} = \frac{\rho_n - \rho_p}{\rho}$ ,  $\rho$ ,  $\rho_0$ ,  $\rho_n$  和  $\rho_p$  分别是核密度、饱和密度、中子密度和质子密度. 在计算中,核的密度分布由参数化的 Skyrme-Hartree-Fock 模型给出<sup>[10]</sup>. 介质中核子-核子碰撞截面使用经验公式(6). 这是近年来,通过对中能重离子碰撞集体流研究的结果<sup>[11]</sup>:

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

这里  $\sigma^{\text{free}}$  是实验上自由核子-核子碰撞截面<sup>[12]</sup>, 由  $\gamma = -0.2$ . 可以看出介质效应使核子-核子碰撞截面变小<sup>[11,13,14]</sup>

## 3 计算结果和讨论

原子核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:

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

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,  $A = A_p + A_t$ . 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 (NOMDI) 和动量相关的状态方程 (MDI). 我们分别用这两种方程研究对称势对原子核阻止的影响. 为了突出原子核阻止同位旋的效应, 选取了两组反应系统: 质量非对称系统  $^{76}\text{Zn} + ^{40}\text{Ar}$  和  $^{76}\text{Kr} + ^{40}\text{Ca}$ , 中子 - 质子比分别为 1.42 和 1.07; 质量对称系统  $^{76}\text{Zn} + ^{76}\text{Zn}$  和  $^{76}\text{Kr} + ^{76}\text{Kr}$ , 中子 - 质子比分别为 1.53 和 1.11.

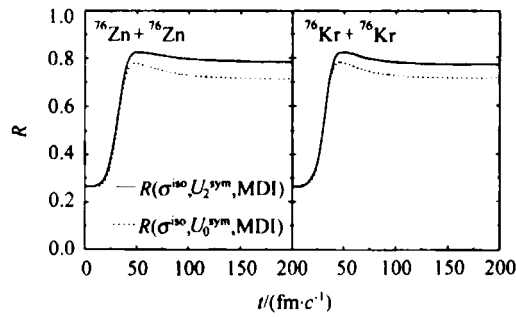


图 1 碰撞系统  $^{76}\text{Zn} + ^{76}\text{Zn}$  和  $^{76}\text{Kr} + ^{76}\text{Kr}$  在  $E = 150\text{MeV/u}$ ,  $b = 0.0\text{fm}$ , 不同对称势  $U_2^{\text{sym}}$  (实线) 和  $U_0^{\text{sym}}$  (虚线) 的情况下, 原子核阻止随时间的演化

首先计算了不同对称势对原子核阻止的影响, 图 1 是考虑了 MDI 情况下系统  $^{76}\text{Zn} + ^{76}\text{Zn}$  (左边) 和  $^{76}\text{Kr} + ^{76}\text{Kr}$  (右边) 在入射能量  $E = 150\text{MeV/u}$ , 碰撞参数  $b = 0.0\text{fm}$  时, 原子核阻止随时间的演化. 其中  $U_2^{\text{sym}}$  和  $U_0^{\text{sym}}$  分别表示考虑与不考虑对称势作用的原子核阻止. 可以看出无论是丰中子系统, 还是缺中子系统对称势的作用都加强了原子核的阻止, 而且从图中考虑与不考虑对称势间的相对大小可以看出, 丰中子系统对称势使原子核阻止得到更多的加强, 这主要是对称势对

中子是斥力, 从而加快了平均场的耗散, 即加大了原子核的阻止. 我们进一步计算了 MDI 对对称势作用的影响, 图 2 是碰撞系统  $^{76}\text{Zn} + ^{76}\text{Zn}$  (下面) 和  $^{76}\text{Kr} + ^{76}\text{Kr}$  (上面) 在入射能量依次为  $E = 50, 150, 300\text{MeV/u}$ ,  $b = 0.0\text{fm}$  时, 考虑对称势  $U_2^{\text{sym}}$  (在这里和以下的计算中我们都计算了  $U_1^{\text{sym}}$  和  $U_3^{\text{sym}}$  的情况, 都具有相同的结论) 和不考虑对称势  $U_0^{\text{sym}}$  的原子核阻止的差值

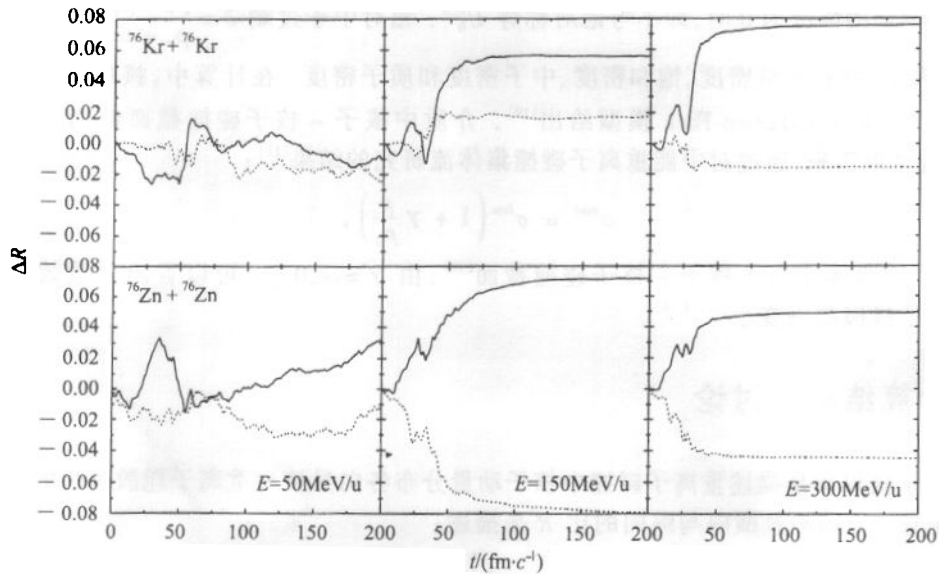


图 2 碰撞系统  $^{76}\text{Zn} + ^{76}\text{Zn}$  (下面) 和  $^{76}\text{Kr} + ^{76}\text{Kr}$  (上面) 在不同入射能量 ( $b = 0.0\text{fm}$ ) 时, 选取不同对称势  $U_2^{\text{sym}}$  与  $U_0^{\text{sym}}$ , 原子核阻止的差值  $\Delta R$  在 MDI (实线) 和 NOMDI (虚线) 条件下随时间演化

$\Delta R$  在考虑动量相关作用 MDI(实线)和不考虑动量相关作用 NOMDI(虚线)的条件下随着时间的演化. 可以明显地看出,考虑 MDI 后的原子核阻止来自不同对称势的差值  $\Delta R$  大于 NOMDI 的原子核阻止的差值  $\Delta R$ . 也就是说动量相关作用对对称势有较强的影响.

图 2 中只考虑了 MDI 对质量对称系统一体耗散的影响,接下来我们考虑 MDI 对非对称系统一体耗散的影响. 图 3 显示的是在  $E = 150\text{MeV/u}$ ,  $b = 0.0\text{fm}$  时,碰撞系统  $^{76}\text{Kr} + ^{40}\text{Ca}$ (左边)和  $^{76}\text{Zn} + ^{40}\text{Ar}$ (右边)的原子核阻止在 MDI 和 NOMDI 时考虑对称势影响和不考虑对称势影响下的差值  $\Delta R$  随时间的演化. 可以看出,虽然质量对称系统和非对称系统具有不同的压缩和不同的激发能,但其结论与图 2 相同.

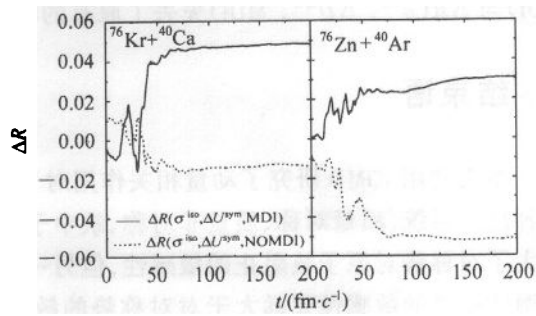


图 3 在  $E = 150\text{MeV/u}$ ,  $b = 0.0\text{fm}$  时,质量非对称碰撞系统的原子核阻止的差值  $\Delta R$  随时间的演化

由我们以前的工作可以知道<sup>[15]</sup>,动量相关作用对原子核阻止中的一体耗散和两体耗散都有着很大影响,但哪一种的影响更大呢? 图 4 显示的是考虑了 MDI 情况下  $E = 150\text{MeV/u}$ ,碰撞系统  $^{76}\text{Zn} + ^{76}\text{Zn}$  在有对称势  $U_2^{\text{sym}}$  和无对称势  $U_0^{\text{sym}}$  时原子核阻止的差值  $\Delta R(\sigma^{\text{iso}}, \Delta U^{\text{sym}}, \text{MDI})$ 和考虑与不考虑核子-核子碰撞同位旋效应的原子核阻止的差值  $\Delta R(\Delta\sigma, U^{\text{sym}}, \text{MDI})$  的比较,可以看出在小碰撞参数情况下,  $\Delta R(\Delta\sigma, U^{\text{sym}}, \text{MDI})$  都远大于  $\Delta R(\sigma^{\text{iso}}, \Delta U^{\text{sym}}, \text{MDI})$ ,这说明在有 MDI 条件下原子核阻止对两体碰撞同位旋效应更加敏感,相对比较而言,总效果等价于 MDI 加强

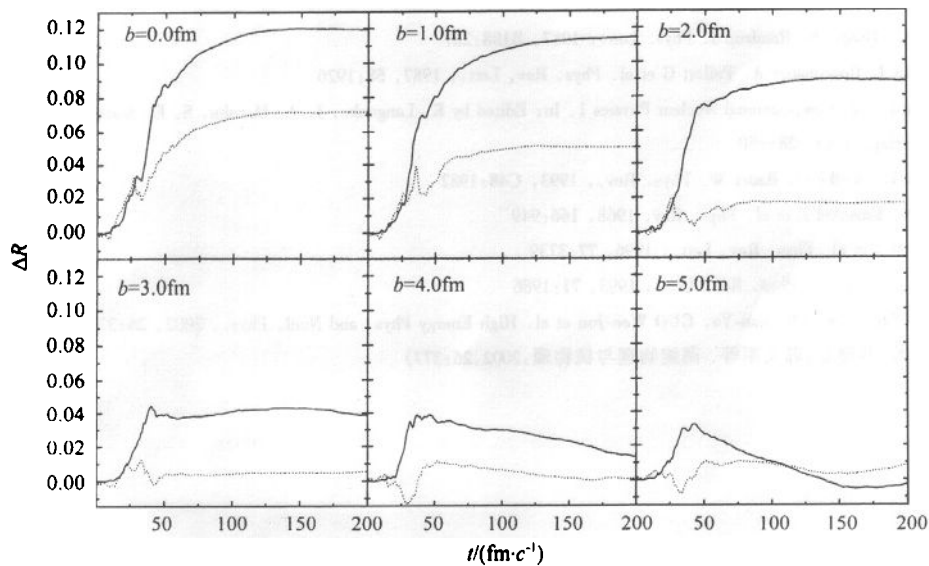


图 4  $150\text{MeV/u}$ ,  $^{76}\text{Zn} + ^{76}\text{Zn}$  系统,在碰撞参数  $b = 0, 1, 2, 3, 4, 5\text{fm}$  时,原子核阻止基于两体耗散同位旋效应之差(实线)与一体耗散同位旋效应之差(虚线)的比较

了原子核阻止对两体碰撞同位旋效应的敏感性,而减弱了原子核阻止对对称势的敏感,这也就是我们建议<sup>[2-4]</sup>的只有在考虑 MDI 情况下,才能选取原子核阻止作为提取核子-核子碰撞截面同位旋效应的灵敏探针.但从图 4 看出在大碰撞参数条件下, $\Delta R(\Delta\sigma, U^{*m}, MDI)$ 与 $\Delta R(\sigma^{*m}, \Delta U^{*m}, MDI)$ 失去了原有的特征.

## 4 结束语

本文利用 IQMD 研究了动量相关作用对于对称势(一体耗散)的影响.结果表明对于各种反应系统(质量对称、质量非对称、缺中子和丰中子反应系统)而言,动量相关作用都加大了对称势对原子核阻止的敏感性,但另一方面,在考虑了动量相关作用下原子核阻止对两体碰撞的敏感性要远大于对对称势的敏感性.因此我们得出结论:只有在有动量相关作用条件下,原子核阻止灵敏的依赖于介质中核子-核子碰撞截面,而较弱的依赖于对称势,故我们选取动量相关作用下的原子核阻止作为提取重离子碰撞中同位旋相关的核子-核子碰撞截面的一个探针.

## 参考文献(References)

- 1 LI Bao-An, Ko CheMing et al. *Inter. Jour. Mod. Phys.*, 1998, **E7**(2):147
- 2 LIU Jian-Ye, GUO Wen-Jun, WANG Shun-Jin et al. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, **86**:975
- 3 LIU Jian-Ye, YANG Yan-Fang, ZUO Wei et al. *Phys. Rev.*, 2001, **C63**:054612
- 4 YANG Yan-Fang, LIU Jian-Ye, ZUO Wei et al. *Chinese Physics Letter.*, 2001, **18**(8):1040
- 5 Aichelin J, Peilert G, Bohnet A et al. *Phys. Rev.*, 1988, **C37**:2451
- 6 Peilert G, Stocher H, Greiner W. *Phys. Rev.*, 1989, **C39**:1402
- 7 LIU Hang, LIU Jian-Ye. *Z. Phys.*, 1996, **A345**:311
- 8 Dorso C, Duarte S, Randrup J. *Phys. Lett.*, 1987, **B188**:287
- 9 Aichelin J, Rosenhauer A, Peilert G et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**:1926
- 10 Reinhard P G. *Computational Nuclear Physics 1*. In: Edited by K. Langanke, J. A. Maruhn, S. E. Koonin. Germany: Springer-Verlag, 1991. 28—50
- 11 Klakow D, Welke G, Bauer W. *Phys. Rev.*, 1993, **C48**:1982
- 12 Chen K, Fraenkel Z et al. *Phys. Rev.* 1968, **166**:949
- 13 Huang M J et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **77**:3739
- 14 Westfall G D et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, **71**:1986
- 15 YANG Yan-Fang, LIU Jian-Ye, GUO Wen-Jun et al. *High Energy Phys. and Nucl. Phys.*, 2002, **26**:377(in Chinese)  
(杨艳芳,刘建业,郭文军等.高能物理与核物理,2002,26:377)

## Importance of Momentum Dependence Interaction on the Isospin Dependence of the Mean Field \*

GUO Wen-Jun<sup>2</sup> LIU Jian-Ye<sup>1,2</sup> YANG Yan-Fang<sup>2</sup> ZUO Wei<sup>1,2</sup> ZHAO Qiang<sup>2</sup>

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 stoppings coming from the isospin dependence of the mean field (one-body dissipation) is studied by using the isospin dependence quantum molecular dynamics (IQMD). A detail study indicates that the difference between the nuclear stoppings coming from the isospin dependence of the mean field (symmetry potential) and the isospin independence of the mean field in the presence of momentum dependence interaction is larger than that without momentum dependence interaction. But the important point is that the enhancement of the difference between nuclear stoppings from the isospin dependence of two-body dissipation is larger than that from the isospin dependence of one-body dissipation in the presence of momentum dependence interaction. Namely in comparison with each other, the momentum dependence equation of state enhances the sensitivity of nuclear stopping on the isospin dependence of in-medium nucleon-nucleon cross section and reduces the sensitivity of the nuclear stopping on the symmetry potential, leading to that the nuclear stopping depends strongly on the isospin dependence of nucleon-nucleon cross section and weakly on the symmetry potential. In this case, one can make use of the nuclear stopping as a probe for extracting the information of in-medium N-N cross section in HIC if MDI is taken into account.

**Key words** stopping, symmetry potential, heavy ion collision

---

Received 30 July 2001

\* Supported by Major State Basic Research Development Project (G2000077400), 100 Talent Programme of Chinese Academy of Sciences, National Natural Science Foundation of China (10004012, 10175080, 19847002) and Foundation of Chinese Academy of Sciences (KJ951-A1-410)