文章编号：1007-4627(2012)01-0021-04

密度分布对原子核阻止同位旋效应的影响

张 凡，郭文军，张霄吉，倪 晟
（上海理工大学理学院，上海 200093）

摘要：利用同位旋相关的量子分子动力学(IQMD)模型，分析了中能重离子碰撞过程中相对论平均场和 Skyrme Hartrere-Fork 等核结构模型给出的核密度分布对原子核阻止的影响。研究表明，从费米能到 100 MeV/u 的较大能量范围内，无论小质量体系还是大质量体系，原子核阻止对同位旋相关的核子-核子碰撞截面都非常灵敏，而不同模型给出的核密度分布对原子核阻止影响不大。这说明原子核阻止作为提取同位旋相关核子-核子碰撞截面的灵敏探针是与原子核结构模型无关的。

关键词：原子核阻止；密度分布；IQMD
中图分类号：O571.6　　**文献标志码**：A

1 引言

近年来，由于放射性束的应用和发展，国际上对同位旋非对称核物质状态方程进行了深入的研究。人们可以通过对同位旋的研究，进一步了解非对称核物质状态方程的相关信息。由于目前对同位旋相关的平均场、密度在 $\rho \geqslant 2\rho_0$ 时丰中子核的对称势和介质中核子-核子碰撞截面的相关信息还不明确，因此需要通过系统地研究中能重离子碰撞过程中各种物理观测量随碰撞系统同位旋自由度的演化规律和机制，以便找到提取同位旋相关平均场、介质中核子-核子碰撞截面和对称势的灵敏探针，并系统地与实验数据相比较，从而进一步完善核物质的状态方程。通过对同位旋相关信息的不断了解，有助于人们建立同位旋非对称核物质的状态方程和核子-核子碰撞截面的相关知识。这些知识不仅对于了解原子核的相关性质非常重要，而且对于研究天体演化过程至关重要[1-10]。例如，利用丰中子核物质的状态方程估计出了万有引力定律在中子星中的失效程度，其计算结果与现有的实验观测相一致[11]。但中能重离子碰撞过程中由于多种因素的共同影响，对提取相关信息的探针提出了苛刻的要求。经过多年不懈的努力，现在已经发现同位旋分馏是提取对称势的灵敏探针[12]；原子核阻止和核子发射数是提取核子-核子碰撞截面的灵敏探针[13-14]。

其中，原子核阻止作为提取中能重离子碰撞信息的重要探针，在过去的研究中已经取得了很多重要的结果。例如，Bauer 等[15]、Busza[16]、Li 等[17]和 Bertsch 等[18]在研究中能重离子碰撞时发现，原子核阻止是由平均场和介质中核子-核子碰撞截面共同决定的。在上述研究的基础上进一步发现，原子核阻止对同位旋相关的核子-核子碰撞截面很灵敏，在能量从费米能到 150 MeV/u 的范围内，可以作为探针用于提取介质中同位旋相关核子-核子碰撞截面的信息[13]。但是，在已有的研究中没有涉及到不同密度分布对原子核阻止的影响。本文对不同密度分布情况下的原子核阻止进行了研究，试图发现原子核阻止对不同密度分布的依赖关系。

2 理论模型

原子核阻止

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

其中：$A=A_p+A_t$ 为弹靶系统总质量，而 A_p 和 A_t 分别表示为弹核和靶核的质量；平行分量和垂直分

收稿日期：2011-06-27；　**修改日期**：2011-08-31
基金项目：国家自然科学基金资助项目(10905041)；上海市教育委员会科研创新项目(09YZ207)
作者简介：张凡(1986－)，男，山西长治人，硕士研究生，从事核理论研究；E-mail：zhangfanduan@sina.com
通讯联系人：郭文军，E-mail：impgwj@126.com

量分别表示为 $P_{\parallel}(i)=P_z(i)$，$P_{\perp}(i)=[P_x(i)^2+P_y(i)^2]^{1/2}$。

为了能够更好地描述同位旋对重离子碰撞过程的影响，量子分子动力学(QMD)模型应该做适当的修改[19]。密度依赖的平均场应该包括同位旋依赖的对称势和库仑势，其次介质中的核子-核子碰撞截面应该区分中子-中子，质子-质子和中子-质子的碰撞截面。最后泡利阻塞计算时应该区分中子和质子。通过上述修改得到同位旋相关的(IQMD)模型[20-21]，其势能表达式如下：

$$U=U^{\mathrm{Sky}}+U^{\mathrm{Yuk}}+U^{\mathrm{Coul}}+U^{\mathrm{MDI}}+U^{\mathrm{Pauli}}+U^{\mathrm{Sym}}, \tag{1}$$

式中：U^{Sky} 是密度依赖的 Skyrme 势；U^{Coul} 是库仑势；U^{Yuk} 表示有限表面效应的势；U^{Pauli} 是泡利势；U^{MDI} 是动量相关势；U^{Sym} 是对称势。

在计算中，考虑了对称势和介质中核子-核子碰撞截面两种主要的同位旋效应，其中对称势选取为[1]

$$U_1^{\mathrm{Sym}}=32F_1(u)\delta\tau_z(\mathrm{MeV}), \tag{2}$$

式中：$F_1(u)=u$，$u\equiv\rho/\rho_0$；对中子 $\tau_z=1$，对质子 $\tau_z=-1$；相对中子过剩

$$\delta=\frac{\rho_{\mathrm{n}}-\rho_{\mathrm{p}}}{\rho_{\mathrm{n}}+\rho_{\mathrm{p}}}=\frac{\rho_{\mathrm{n}}-\rho_{\mathrm{p}}}{\rho}, \tag{3}$$

式中 ρ，ρ_{n} 和 ρ_{p} 分别是核密度、中子密度和质子密度。

同位旋相关的介质中核子-核子碰撞截面使用公式(4)，是近年来通过中能重离子碰撞集体流研究的结果[22-23]。

$$\sigma^{\mathrm{iso}}=\sigma^{\mathrm{free}}\left(1+\gamma\frac{\rho}{\rho_0}\right), \tag{4}$$

式中：$\gamma=-0.2$；σ^{free} 为自由核子-核子碰撞截面，其具体形式为[24]

$$\sigma_{\mathrm{np}}^{\mathrm{free}}=\begin{cases}-\dfrac{5\,067.4}{E^2}+\dfrac{9\,069.2}{E}+6.946\,6\ \mathrm{mb}, & E\leqslant 40\ \mathrm{MeV}\\ \dfrac{239\,380}{E^2}+\dfrac{1\,802.0}{E}+27.147\ \mathrm{mb}, & 40<E\leqslant 400\ \mathrm{MeV}\\ 34.5\ \mathrm{mb}, & 400<E\leqslant 800\ \mathrm{MeV}\end{cases} \tag{5}$$

$$\sigma_{\mathrm{nn}}^{\mathrm{free}}(\sigma_{\mathrm{pp}}^{\mathrm{free}})=\begin{cases}-\dfrac{1\,174.8}{E^2}+\dfrac{3\,088.5}{E}+5.310\,7\ \mathrm{mb}, & E\leqslant 40\ \mathrm{MeV}\\ \dfrac{93\,074}{E^2}-\dfrac{11.148}{E}+22.429\ \mathrm{mb}, & 40<E\leqslant 310\ \mathrm{MeV}\\ \dfrac{887.37}{E}+0.053\,31E+3.547\,5\ \mathrm{mb}, & 310<E\leqslant 800\ \mathrm{MeV}\end{cases} \tag{6}$$

从上述式子可以看出，介质效应使核子-核子碰撞截面变小。现在已经知道在自由的情况下，当能量低于 400 MeV/u 时，中子-质子碰撞截面大约是中子-中子、质子-质子碰撞截面的 3 倍。因此，介质中同位旋相关核子-核子碰撞截面满足 $\sigma_{\mathrm{np}}>\sigma_{\mathrm{pp}}=\sigma_{\mathrm{nn}}$，而同位旋无关的情况下 $\sigma_{\mathrm{nn}}=\sigma_{\mathrm{pp}}=\sigma_{\mathrm{np}}$。在本文的计算中介质中同位旋无关的核子-核子碰撞截面采用下式表示：

$$\sigma^{\mathrm{noiso}}=\left(\frac{\sigma_{\mathrm{nn}}^{\mathrm{free}}+\sigma_{\mathrm{np}}^{\mathrm{free}}}{2}\right)\left(1+\gamma\frac{\rho}{\rho_0}\right)。 \tag{7}$$

3 计算结果与讨论

从以前的工作知道，中能重离子碰撞中原子核阻止可以作为探针用于提取介质中同位旋相关核子-核子碰撞截面的信息。为了了解上述特性在不同模型给出的密度分布情况下是否成立，下面利用 IQMD 模型计算了原子核阻止对不同密度分布的依赖情况。在计算中，考虑到问题的普遍性，选用了密度分布差别最大的 3 种密度参数和不同质量的碰撞系统。

图 1 给出了 ^{76}Kr 在相对论平均场的 NL2、NLSH 密度参数和 Skyrme Hartrere-Fork 的 SKM* 密度参数情况下的中子和质子密度分布。从图中可以看出，在核的中心区域密度分布相差较大。计算时还发现，在半径很大的区域，密度分布也有明显的不同，这种差别会对反应结果造成大的影响。

图 2 给出了 $E=60$ MeV/u 和 $b=0$ fm 情况下，碰撞系统 ^{76}Kr+^{76}Kr 的原子核阻止随时间的演化。其中，σ^{iso} 和 σ^{noiso} 分别表示考虑和不考虑同位旋相关核子-核子碰撞截面。从图中可以看出，时间从 100 fm/c 开始，反应基本达到平衡。原子核阻止分为两

组，上面一组考虑同位旋相关核子-核子碰撞截面，下面一组不考虑同位旋相关核子-核子碰撞截面。

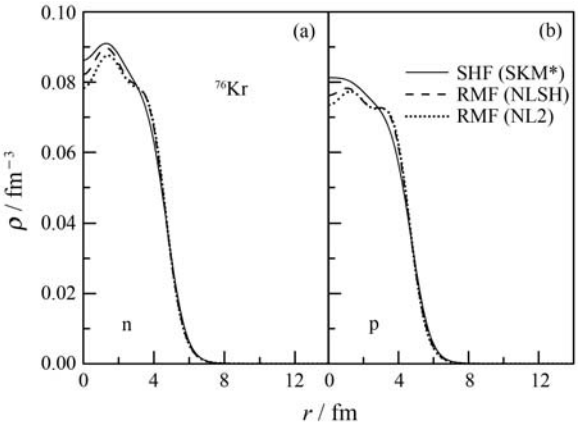

图 1　^{76}Kr 的中子和质子在不同密度参数下的分布情况

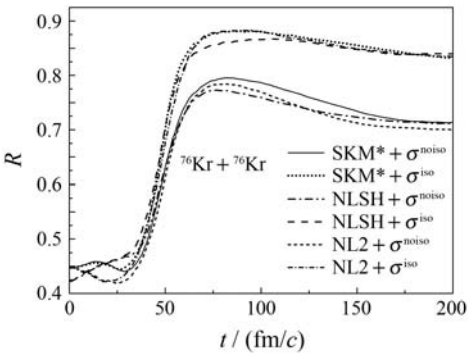

图 2　碰撞系统^{76}Kr+^{76}Kr 的原子核阻止随时间的演化

每组曲线中的 3 条线分别考虑的密度分布来自于相对论平均场的 NL2、NLSH 密度参数和 Skyrme Hartrere-Fork 的 SKM* 密度参数。从图中还可以看到，原子核阻止强烈地依赖同位旋相关核子-核子碰撞截面，而较弱地依赖不同的密度分布。图中考虑同位旋相关核子-核子碰撞截面的原子核阻止大于不考虑同位旋相关核子-核子碰撞截面的原子核阻止。因为，同位旋相关的核子-核子平均碰撞截面大于同位旋无关的核子-核子平均碰撞截面，而大的核子-核子碰撞截面会导致大的两体耗散。所以，考虑同位旋相关核子-核子碰撞截面的原子核阻止要大一些。

图 3 给出了在 $b=0$ fm 情况下，碰撞系统^{76}Kr+^{76}Kr 的原子核阻止随能量的演化。从图中可以看出，在低能区不能体现同位旋效应的影响，主要是因为泡利阻塞效应相对较强，发生碰撞的核子数目少而致。而在能量大于费米能时，图中的 6 条曲线分为两组，它们之间的区别与图 2 的相同。图中原子核阻止随入射能量的增加而减小，这主要是因为随着能量的增加，核子的穿透能力加强，所以原子核阻止反而减小。

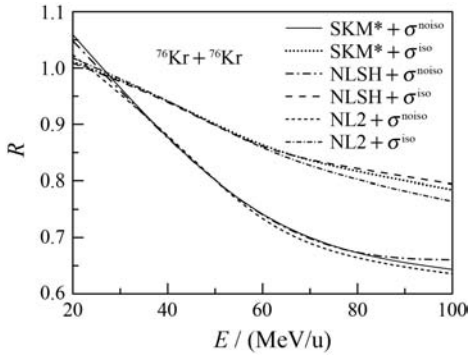

图 3　碰撞系统^{76}Kr+^{76}Kr 的原子核阻止 R 随能量的演化

图 4 给出了 $E=100$ MeV/u 和 $b=0$ fm 情况下，碰撞系统^{40}Ca+^{40}Ca、^{76}Kr+^{76}Kr 和^{112}Sn+^{112}Sn的原子核阻止随碰撞系统质量的演变。图中选用缺中子系统主要是考虑到缺中子系统具有更多的 np 碰撞数，对碰撞截面的同位旋依赖性更大。从图中可以看到，在从 80 到 224 系统质量的区间，原子核阻止都灵敏地依赖同位旋相关的核子-核子碰撞截面。也就是说，无论对于小质量碰撞系统还是大质量碰撞系统，原子核阻止对不同密度分布的依赖的灵敏程度很低。在图中，原子核阻止随系统质量的增加而增加，这是因为在相同入射能量的情况下，随着碰撞系统质量的增加，碰撞系统总的碰撞截面也相应地增加，从而造成了更大的两体耗散，原子核阻止因此而增加。

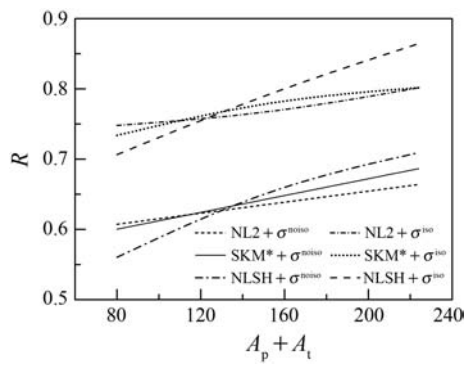

图 4　入射能量为 100 MeV/u 的原子核阻止随系统质量的演变

4　结论

本文通过 IQMD 模型，计算了缺中子系统中原子核阻止在不同密度分布情况下随入射能量、时间

和系统质量的演变。其中，不同的密度分布分别是通过相对论平均场的 NL2、NLSH 密度参数和 Skyrme Hartrere-Fork 的 SKM* 密度参数得到的。结果发现，在较广的能量和系统质量范围内，原子核阻止都强烈地依赖同位旋相关的核子-核子碰撞截面，而较弱地依赖不同的密度分布。对丰中子系统的计算，也得到了相同的结果。从而说明原子核阻止是提取介质中核子-核子碰撞截面的灵敏探针，而且它是与原子核结构模型无关的。

参考文献(References)：

[1] LI B A, KO C M, BAUER W. Int J Mod Phys, 1998, **E7**: 147.

[2] PARK R, BENENSON W, BJARK O, *et al*. Phys Rev Lett, 1997, **78**: 1022.

[3] XU H. Phys Rev Lett, 2000, **85**: 716.

[4] TSANG M B. Phys Rev Lett, 2001, **86**: 5023.

[5] LI Bao'an. Phys Rev, 2001, **C64**: 054604.

[6] LI Bao'an, KO Cheming, REN Zhongzhou, *et al*. Phys Rev Lett, 1997, **78**: 1644.

[7] PARK R. Phys Rev Lett, 1997, **78**: 1026.

[8] COLONNA M, DI T M. Phys Rev, 1998, **C57**: 1410.

[9] DI T M. Nucl Phys, 2001, **A681**: 426C.

[10] XIAO Zhigang, LI Bao'an, CHEN Liewen, *et al*. Phys Rev Lett, 2009, **102**: 062502.

[11] WEN Dehua, LI Bao'an, CHEN Liewen. Phys Rev Lett, 2009, **103**: 211102.

[12] LIU Jianye, GUO Wenjun, XING Yongzhong. Nucl Phys, 2003, **A726**: 123.

[13] LIU Jianye, GUO Wenjun, WANG Shunjin, *et al*. Phys Rev Lett, 2001, **86**(6): 975.

[14] LIU Jianye, GUO Wenjun, XING Yongzhong, *et al*. Phys Lett, 2002, **B540**: 213.

[15] BAUER W. Phys Rev Lett, 1988, **61**: 2534.

[16] BUSZA W, LEDOUX R J. Annu Rev Nucl Part Sci, 1988, **38**: 119.

[17] LI Bao'an, WONG C Y. Phys Scr, 1993, **V47**: 151.

[18] BERTSCH G F, BROWN G E, KOCH V, *et al*. Nucl Phys, 1988, **A490**: 745.

[19] PEILERT G, ROSENHAUER A, AICHELIN J, *et al*. Phys Rev, 1989, **C39**: 1402.

[20] HARTNACK C, PURI RAJEEV K, AICHELIN J, *et al*. Eur Phys J, 1998, **A1**: 151.

[21] CHEN Liewen, ZHANG Fengshou, JIN Genming. Phys Rev, 1998, **C58**: 2283.

[22] ALKAHZOV G. Nucl Phys, 1977, **A280**: 365.

[23] KLAKOW D, WELKE G, BAUER W. Phys Rev, 1993, **C48**: 1982.

[24] CHEN K, FRAENKEL Z, FRIEDLANDER G, *et al*. Phys Rev, 1968, **166**: 949.

Influence of Density Distribution on Nuclear Stopping Isospin Effects

ZHANG Fan, GUO Wen-jun, ZHANG Xiao-ji, NI Sheng

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

Abstract: Influence of density distribution which is given by RMF and Skyrme-Hartrere-Fork et al. nuclear structure model on nuclear stopping in heavy-ion collisions at intermediate energies is studied by using isospin-dependent quantum molecular dynamics (IQMD) model. Research shows that in the range from the Fermi energy to the energy of 100 MeV/u, for both small and large mass system, nuclear stopping is found to be strongly dependent on the nucleon-nucleon cross sections, and weakly on different density distribution . This shows that nuclear stopping can be used as a probe to extract the information on the isospin dependence N-N cross sections and has no relationship with nuclear structure models.

Key words: nuclear stopping; density distribution; IQMD

Received date: 27 Jul. 2011; **Revised date**: 31 Aug. 2011

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(10905041); Innovation Program of Shanghai Municipal Education Commission(09YZ207)

Corresponding author: GUO Wen-jun, E-mail: impgwj@126.com