

# 重离子碰撞中原子核阻止的同位旋效应\*

杨艳芳<sup>2</sup> 刘建业<sup>1,2</sup> 左维<sup>1,2</sup> 郭文军<sup>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** 利用含有 3 种对称势形式的同位旋相关的量子分子动力学,研究了中能重离子碰撞中原子核阻止的同位旋效应和随入射道条件的系统演化过程. 计算结果表明,原子核阻止灵敏地依赖束流能量、碰撞参数、碰撞系统的质量和核子-核子碰撞截面的同位旋相关性,而 3 种对称势和碰撞系统的中质比对它的影响不很明显,但在大约费米能量以下能区,原子核阻止同时依赖于介质中核子-核子碰撞截面和对称势. 故认为在费米能量以上能区直至 150MeV/u,原子核阻止是提取介质中核子-核子碰撞截面的一个新的物理观测量.

**关键词** 原子核阻止 重离子碰撞 同位旋相关性

## 1 引言

由稳定核或不同中子-质子比的放射性核引起的中能重离子碰撞中,可以产生各种不同同位旋非对称的热激发和压缩核态. 这类核态的性质和反应产物灵敏地依赖于入射道条件、对称势和核子-核子碰撞截面的同位旋相关性. 因此在大跨度同位旋自由度范围内核物质直至纯中子物质,通过理论计算与实验数据的比较可以提取和建立同位旋非对称核物质状态方程<sup>[1-5]</sup>. 原子核阻止是描述重离子碰撞中核子动量分布各向异性<sup>[6-8]</sup>和决定反应终态产物的重要物理观测量<sup>[9,10]</sup>. W. Bauer<sup>[8,11]</sup>指出,在中能重离子碰撞中,原子核阻止是通过平均场和介质中核子-核子碰撞截面两者来决定的,但他们当时的平均场不包括对称势. S. A. Bass 等<sup>[4,12-18]</sup>认为同位旋平衡过程是探索重离子碰撞中原子核阻止性质的一种方法. 我们通过中能重离子碰撞中原子核阻止的入射道同位旋效应,将原子核阻止作为探针来研究和提取介质中核子-核子碰撞截面的知识. S. A. Bass<sup>[12]</sup>利用输运模型计算原子核阻止,结果表明原子核阻止强烈地依赖介质中核子-核子碰撞截面. 但原子核阻止如何依赖对称势还未研究.

我们在前一篇文章中<sup>[19]</sup>研究了原子核阻止作为提取重离子碰撞中介质中核子-核子

2000-09-06 收稿

\* 中国科学院百人计划,国家自然科学基金(19775057,19847002 和 19775020)和中国科学院九五重大基础性项目(KJ951-A1-410)资助

碰撞截面的可能性,但研究仅采用了一种简单形式的对称势,若采用其它形式的对称势后以前的结论是否不变,这还有待进一步探讨.特别是原子核阻止如何依赖于碰撞系统的中子-质子比尚未研究.本文主要目的是利用包括 Pauli 势和动量相关相互作用在内的量子分子动力学(IQMD),在较宽的束流能量范围内(15—150MeV/u),研究具有不同中质比的碰撞系统原子核阻止对于3种对称势和介质中核子-核子碰撞截面的同位旋的依赖性.

## 2 理论模型和有关参数

同位旋相关的 IQMD,我们计算利用的相互作用势

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

其中密度相关的 Skyrme 势  $U^{\text{Sky}}$  为

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

$U^{\text{Coul}}$  是库仑势. 表示有限核表面效应的 Yukawa 势  $U^{\text{Yuk}}$  为

$$\exp(m/r_{ij}) \operatorname{erfc}(\sqrt{L}/m + r_{ij}/\sqrt{4L}),$$

式中  $\operatorname{erfc}$  是误差函数. 动量相关势  $U^{\text{MDI}}[14]$  为

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

泡里势  $U^{\text{Pauli}}$  为

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

式中  $\delta_{\rho_i \rho_j} = \begin{cases} +1 & \text{中子-中子或质子-质子} \\ 0 & \text{中子-质子} \end{cases}$ ; 对称势  $U^{\text{sym}}$  取如下3种形式:

$$U_1^{\text{sym}} = CF_1(u) \delta\tau_3,$$

$$U_2^{\text{sym}} = CF_2(u) \delta\tau_3 + \frac{1}{2} CF_2(u) \delta^2 \quad \tau_3 = \begin{cases} +1 & \text{中子} \\ -1 & \text{质子} \end{cases} \quad (6)$$

$$U_3^{\text{sym}} = CF_3(u) \delta\tau_3 - \frac{1}{4} CF_3(u) \delta^2$$

对称势的强度取  $C = 32 \text{MeV/u}$ ,  $F_1(u) = u$ ,  $F_2(u) = u^2$ ,  $F_3(u) = u^{1/2}$ , 其中  $u = \frac{\rho}{\rho_0}$ , 中子过剩

$$\delta \equiv \frac{\rho_n - \rho_p}{\rho_n + \rho_p} = \frac{\rho_n - \rho_p}{\rho}, \quad (7)$$

其中  $\rho$ ,  $\rho_0$ ,  $\rho_n$  和  $\rho_p$  分别是核密度、饱和密度、中子密度和质子密度. 由 Skyrme-Hartree-Fock 模型在抽取原子核初态性质中确定的各势参数如表 1 所示.

表 1 由 Skyrme-Hartree-Fock 模型确定的势参数

C/MeV	$\alpha$ /MeV	$\beta$ /MeV	$\gamma$	$t_3$ /MeV	$t_4$ /MeV	$t_5$ /MeV <sup>-2</sup>	$V_p$ /MeV	$p_0$ /(MeV·c <sup>-1</sup> )	$q_0$ /fm
32	-390.1	320.3	1.6667	7.5	1.57	$5 \times 10^{-4}$	30	400	5.64
0	-382	320.3	1.6667	7.5	1.57	$5 \times 10^{-4}$	30	400	5.64

介质中核子-核子碰撞截面为

$$\sigma^{\text{med}} = \sigma^{\text{free}} \left( 1 + \gamma \frac{\rho}{\rho_0} \right), \quad (8)$$

这里  $\sigma^{\text{free}}$  是实验上的自由核子-核子碰撞截面,  $\gamma = -0.2$ .

### 3 计算结果和讨论

原子核的阻止可用动量四极矩( $Q_{xx}$ )和动量横向与纵向的比( $R$ )两种方法描述,

$$Q_{xx} = \sum_i^A (2p_x(i)^2 - p_y(i)^2 - p_z(i)^2), \quad (9)$$

$$R = \frac{2}{\pi} \frac{|p_{\perp}|}{|p_{\parallel}|} = \frac{2}{\pi} \frac{\sum_i^A (p_x^2(i) + p_y^2(i))^{1/2}}{\sum_i^A |p_z(i)|} \quad (10)$$

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,  $A = A_p + A_t$  是碰撞系统质量. 我们利用含有动量相关作用和 Pauli 势的 IQMD, 对 3 个不同中子-质子比的碰撞系统 ( $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$ ,  $^{58}\text{Cr} + ^{58}\text{Cr}$  和  $^{80}\text{Zn} + ^{80}\text{Zn}$ , 中子-质子比分别为  $N/Z = 1.07, 1.42$  和  $1.67$ ), 在较宽能量 ( $E = 15, 20, 45, 100$  和  $150\text{MeV/u}$ ) 范围内计算了重离子对心碰撞在 4 种条件下, 以上 3 个碰撞系统在  $t = 200\text{fm/c}$  时  $Q_{xx}$  随能量的演化过程如图 1 所示: (1) 对称势  $U_1^{\text{sym}}$  和介质中同位旋相关的核子-核子碰撞截面  $\sigma^{\text{iso}}$  (在  $300\text{MeV/u}$  以下能区, n-p 的碰撞截面一般约为 n-n 或 p-p 碰撞截面的 3 倍, 从而丰中子系统的碰撞几率较小), 表示为  $U_1^{\text{sym}} + \sigma^{\text{iso}}$ ; (2) 对称势  $U_1^{\text{sym}}$  和介质中同位旋无关的核子-核子碰撞截面  $\sigma^{\text{noniso}}$  (n-p 的碰撞截面与 n-n 或 p-p 的碰撞截面相等, 则它对丰中子和缺中子系统的碰撞几率的影响相同), 表示为  $U_1^{\text{sym}} + \sigma^{\text{noniso}}$ ; (3)  $U_2^{\text{sym}}$  和同位旋相关截面  $\sigma^{\text{iso}}$ , 表示为  $U_2^{\text{sym}} + \sigma^{\text{iso}}$ ; (4)  $U_3^{\text{sym}}$  和同位旋相关截面  $\sigma^{\text{iso}}$ , 表示为  $U_3^{\text{sym}} + \sigma^{\text{iso}}$ . 计算结果明显地表明, 对所有碰撞系统而言, 原子核阻止随束流能量的降低而增加 ( $Q_{xx}$  的减小就是原子核阻止的增加). 图中的实线、点线与虚线之间的距离比它们与点划线之间距离小得多. 也就是说原子核阻止强烈地依赖于介质中核子-核子碰撞截面的同位旋相关性, 而不同对称势形式的改变对原子核阻止的影响不明显. 但是, 从  $\text{Cr}^{58} + \text{Cr}^{58}$  系统图左上角放大的小图可以看出, 在费米能量以下, 随束流能量的降低, 各条曲线交织在一起, 表明原子核阻止同时依赖于介质中核子-核子碰撞截面的同位旋相关性和对称势. 图 2 是  $E = 100\text{MeV/u}$  的  $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$  系统在与图 1 相同的 4 种条件下的  $Q_{xx}$  随时间的演化过程. 从图中可以看出, 不管在何种情况下, 在  $t = 200\text{fm/c}$  时, 系统都已达稳定.

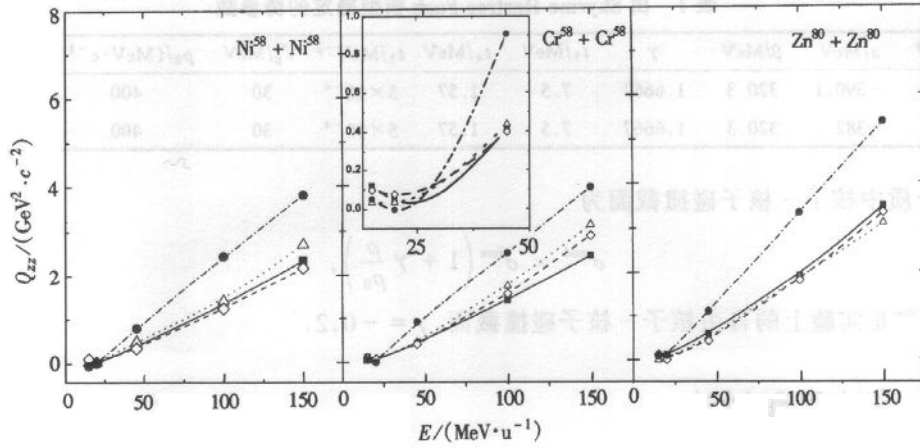


图 1 3 个碰撞系统在对心碰撞的 4 种条件下,  $t = 200\text{fm}/c$  时原子核阻止随能量的演化  
 —■—  $U_1^{\text{sym}} + \sigma^{\text{iso}}$ , ..... $\Delta$ .....  $U_2^{\text{sym}} + \sigma^{\text{iso}}$ , --- $\diamond$ ---  $U_3^{\text{sym}} + \sigma^{\text{iso}}$ , -·-·-  $U_1^{\text{sym}} + \sigma^{\text{noiso}}$ .

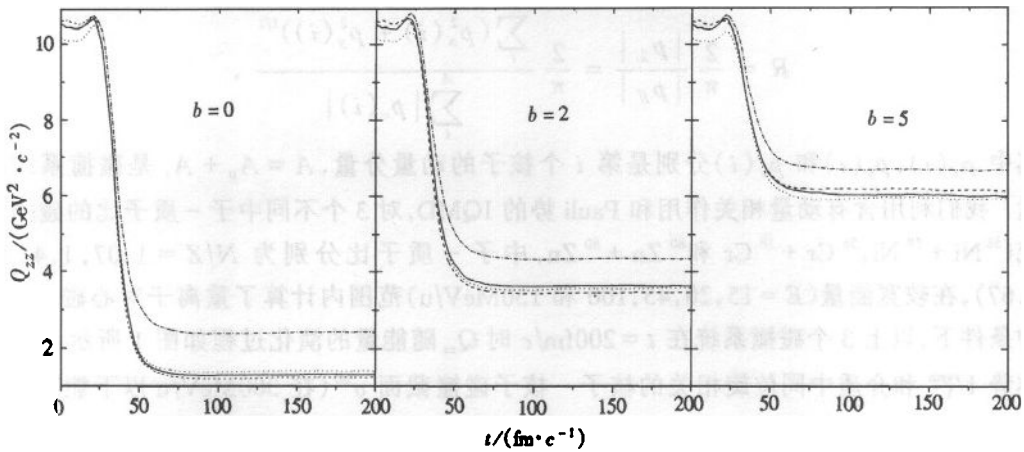


图 2  $E = 100\text{MeV}/u$ ,  $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$  ( $b = 0, 2, 5\text{fm}$ ) 在与图 1 相同的 4 种情况下,  
 原子核阻止随时间的演化  
 —■—  $U_1^{\text{sym}} + \sigma^{\text{iso}}$ , ..... $U_2^{\text{sym}} + \sigma^{\text{iso}}$ , ---  $U_3^{\text{sym}} + \sigma^{\text{iso}}$ , -·-·-  $U_1^{\text{sym}} + \sigma^{\text{noiso}}$ .

图 3 是 5 个碰撞系统  $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$ ,  $^{40}\text{Ar} + ^{68}\text{Zn}$ ,  $^{76}\text{Zn} + ^{76}\text{Zn}$ ,  $^{80}\text{Zn} + ^{80}\text{Zn}$ ,  $^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$  在对心碰撞情况下和  $E = 100\text{MeV}/u$  时  $Q_{zz}$  在与图 1 相同的 4 种情况下随碰撞系统质量的变化, 同样可从中得出上述结论. 从图 3 中也可看出, 原子核阻止随碰撞系统质量的增加而增加.

图 4 是  $E = 100\text{MeV}/u$  的  $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$  系统在与图 1 相同的 4 种情况下,  $Q_{zz}$  和  $R$  随碰撞参数的变化, 可以看出在  $t = 200\text{fm}/c$  时,  $Q_{zz}$  随碰撞参数的变化与图 1 的对心碰撞显示相同的结论, 即原子核阻止强烈地依赖于介质中核子-核子碰撞截面的同位旋依赖性, 而不同的对称势对于原子核阻止并不明显.  $Q_{zz}$  随着碰撞参数增加而增加,  $R$  随着碰撞参数

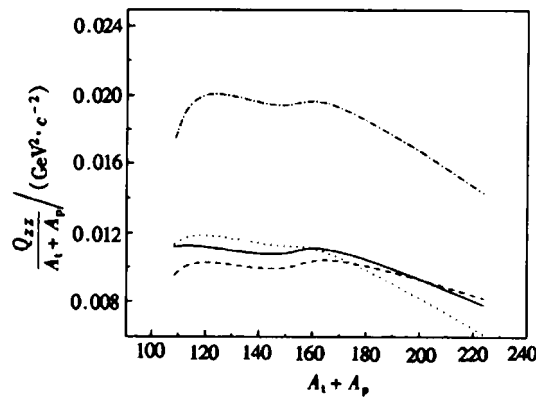


图 3 5 个碰撞系统在  $E = 100\text{MeV/u}$  时对心碰撞中原子核阻止随碰撞系统的质量的变化  
曲线说明同图 2.

的增加而减小,但是对于有些碰撞系统,如 $^{80}\text{Zn} + ^{80}\text{Zn}$ 随着碰撞参数的增加,近心碰撞中所表现的特征消失. 但对于所有的碰撞系统的近心碰撞而言,图 1 的结论保持不变. 由图 4 还可以看出,原子核阻止随着  $b$  的减小而增加,因  $b$  减小时核子之间碰撞变得激烈,核子之间的碰撞和动量交换率增加.

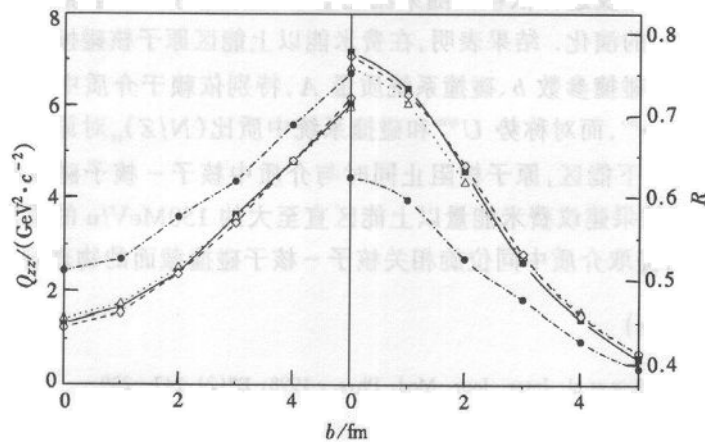


图 4  $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$  ( $E = 100\text{MeV/u}$ ) 在  $t = 200\text{fm}/c$  时原子核阻止随碰撞参数的变化  
曲线说明同图 1.

图 5 是 5 个碰撞系统 $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$ ,  $^{58}\text{Fe} + ^{58}\text{Fe}$ ,  $^{58}\text{Cr} + ^{58}\text{Cr}$ ,  $^{76}\text{Zn} + ^{76}\text{Zn}$ ,  $^{80}\text{Zn} + ^{80}\text{Zn}$  ( $E = 100\text{MeV/u}$ ,  $t = 200\text{fm}/c$ ,  $b = 0\text{fm}$ ) 在与图 1 相同的 4 种条件下,每核子  $Q_{zz}$  随碰撞系统中子-质子比的变化. 可以看出,尽管原子核阻止随碰撞系统的中质比的增加变化不明显,中子系统和质子系统对于从纵向动量向横向动量的耗散几率相差不大,但介质中同位旋相关核子-核子碰撞截面对原子核阻止有相当明显的影响.

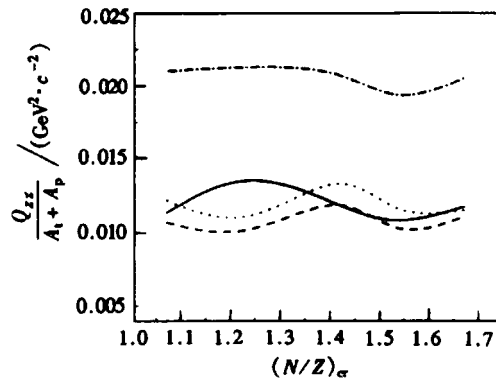


图 5 5 个碰撞系统在  $E = 100\text{MeV/u}$  的对心碰撞中原子核阻止随碰撞系统中子-质子比的变化  
曲线说明同图 2.

#### 4 结束语

本文利用有 Pauli 势和动量相关相互作用的 IQMD, 在束流能量范围内 (15—150MeV/u) 研究了原子核阻止对于 3 种对称势  $U^{\text{sym}}$  和介质中核子-核子碰撞截面的同位旋相关性  $\sigma^{\text{iso}}$  的依赖性, 及这种依赖性随束流能量  $E$ 、碰撞参数  $b$ 、碰撞系统质量  $A$  和碰撞系统中质比  $(N/Z)_\alpha$  的演化. 结果表明, 在费米能以上能区原子核碰撞过程中原子核阻止依赖于束流能量  $E$ 、碰撞参数  $b$ 、碰撞系统质量  $A$ , 特别依赖于介质中核子-核子碰撞截面的同位旋相关性  $\sigma^{\text{iso}}$ , 而对称势  $U^{\text{sym}}$  和碰撞系统中质比  $(N/Z)_\alpha$  对原子核阻止的影响不明显, 在费米能量以下能区, 原子核阻止同时与介质中核子-核子碰撞截面和对称势相关. 根据以上计算结果建议费米能量以上能区直至大约 150MeV/u 的重离子近心碰撞中的原子核阻止作为提取介质中同位旋相关核子-核子碰撞截面的物理观测量.

#### 参考文献 (References)

- 1 LI Bao-An, KO Che-Ming et al. Inter. Jour. Mod. Phys., 1998, E7(2):147—229
- 2 YANG L B et al. Phys. Rev., 1999, C60:041602
- 3 LI B A, KO C M. Phys. Rev., 1998, C57:2065
- 4 LI B A, Yennello S J. Phys. Rev., 1995, C52:1746
- 5 Hussein M S, Rego R A, Bertulani C A. Phys. Rep., 1991, 201:279
- 6 LI B A, KO C M. Nucl. Phys., 1996, A601:457
- 7 Videbaek F, Hansen O. Phys. Rev., 1995, C52:2684
- 8 Bauer W. Phys. Rev. Lett., 1998, 61:2534
- 9 Busza W, Ledoux R. Annual Review of Nuclear and Particle Science, 1998, 38:119
- 10 LI B A, WONG C Y. Phys. Scr., 1993, 47:151
- 11 Bertsch G F, Brown G E, Koch V et al. Nucl. Phys., 1988, A490:745
- 12 Bass S A, Konopka J, Bleicher M et al. GSI Scientific Report, 1994, 66
- 13 Johnston H, Winger J, White T et al. Phys. Lett., 1996, B371:186

- 14 Peilert G, Rosenhauer A, Aichelin J et al. *Phys. Rev.*, 1989, **C39**:1402
- 15 Ono A, Horiuchi H. *Phys. Rev.*, 1996, **C53**:2958
- 16 Farine M, Sami T, Remand B et al. *Z. Phys.*, 1991, **A339**:363
- 17 Johnston H, White T et al. *Phys. Rev.*, 1997, **C56**:1972
- 18 Yennello S J, Young B, Yee J et al. *Phys. Lett.*, 1994, **B321**:15
- 19 LIU Jian-Ye, GUO Wen-Jun, ZHAO Qiang et al. *High Energy Phys. and Nucl. Phys.*, 2001, **25**(4):336(in Chinese)  
(刘建业,郭文军,赵强等. *高能物理与核物理*, 2001, **25**(4):336)

## Entrance Channel Dependence of the Isospin Effects of the Nuclear Stopping in Intermediate Energy Heavy Ion Collisions\*

YANG Yan-Fang<sup>2</sup> LIU Jian-Ye<sup>1,2</sup> ZUO Wei<sup>1,2</sup> GUO Wen-Jun<sup>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 entrance channel dependence on the isospin effects of the nuclear stopping in intermediate energy heavy ion collisions was studied by using the isospin-dependent quantum molecular dynamics with three forms of the symmetry potential. It shows that the nuclear stopping is sensitive to the beam energy, the impact parameter and the mass of the colliding system, especially very sensitive to the isospin dependence of in-medium nucleon-nucleon cross section, but insensitive to the symmetry potentials and the ratio of neutron to proton of colliding system. From this investigation, we propose that nuclear stopping can be used as a new probe to extract information on the isospin dependence of in-medium nucleon-nucleon cross section in intermediate energy heavy ion collisions.

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

---

Received 6 September 2000

\* Supported by 100 Talent Programm of CAS, NSFC(19775057, 19847002, 19775020) and Science Foundation of The Chinese Academy of Sciences