

文章编号: 1007-4627(2012)03-0230-05

# 从能谱中提取核子-核子碰撞截面的信息

张霄吉, 郭文军, 张凡, 倪晟

(上海理工大学理学院, 上海 200093)

**摘要:** 用同位旋相关的量子分子动力学(IQMD)模型计算了入射能量在 30~200 MeV/u 内, 不同中质比的反应系统( $^{76}\text{Zn}+^{76}\text{Zn}$ ,  $^{76}\text{Ge}+^{76}\text{Ge}$ ,  $^{76}\text{Se}+^{76}\text{Se}$  和  $^{76}\text{Kr}+^{76}\text{Kr}$ )碰撞产生的原子核阻止和反应产物能谱。发现原子核阻止和不同方向的动能比值有很强的关联性, 且可以用垂直方向和平行方向的碎片总动能比值的平方根近似地代替原子核阻止, 用来提取同位旋相关介质中的核子-核子碰撞截面的信息。在核反应实验中, 很容易测量到该物理量, 它是一个较好的探针。

**关键词:** 能谱; 核子-核子碰撞截面; 原子核阻止; 量子分子动力学模型

**中图分类号:** O571.6      **文献标志码:** A

## 1 引言

早期的实验表明, 核力具有电荷无关性, 质子和质子、中子和中子及质子和中子之间的核力几乎相等。质子和中子的质量几乎相等, 因此可以把它们看成同一种粒子的两种不同状态, 它们的同位旋第三分量不同。随着理论研究和实验技术的不断发展, 人们发现核力的大小与同位旋有关。近年来, 放射性束流的产生和应用使得人们能够对同位旋核物理进行研究。国内外的学者从实验和理论两个方面对同位旋非对称核物质性质进行了许多研究<sup>[1-7]</sup>。他们通过研究中能重离子碰撞中同位旋效应, 来提取重离子碰撞过程中同位旋相关的平均场与核子-核子碰撞截面的知识, 这些知识对于了解原子核的性质是重要的, 对于研究和了解天体演化过程, 比如超新星爆炸和中子星的冷却速率<sup>[1-2, 8-10]</sup>也具有重要意义。

但到目前为止, 密度相关的平均场(对称能)和同位旋相关的介质中核子-核子碰撞截面, 无论实验上和理论上都很难确定。为了研究这些同位旋效应, 人们找到了一些灵敏的物理观测量: 例如, 对同位旋相关核子-核子碰撞截面灵敏的原子核阻止<sup>[11]</sup>、核子发射数<sup>[12]</sup>等; 对同位旋相关平均场灵敏的有同位旋分馏<sup>[13]</sup>、中质比和  $\pi^-/\pi^+$  比<sup>[14]</sup>等。

Li 等<sup>[15]</sup>计算发现, 在中能重离子碰撞过程中, 会产生丰中子的气相和缺中子的液相, 气相的中质比与液相的中质比之间的比值敏感地依赖于同位旋相关的平均场。Liu 等<sup>[4]</sup>研究发现, 在碰撞能量较低的区域, 中子晕结构带来强烈的同位旋效应, 在中子晕参与的重离子碰撞中, 中子晕结构会产生更多的碎片和更小的原子核阻止。他们还研究了中能重离子碰撞产生的自由中质比的能谱, 发现在 20~80 MeV/u 的碰撞能量范围内, 动量相关作用也是一个同位旋相关的物理量<sup>[5]</sup>。卞宝安等<sup>[6]</sup>用同位旋相关的重离子输运模型研究了较重原子核对心碰撞产生的径向膨胀流, 发现了径向膨胀流阈能的同位旋效应, 它和对称能有明显的关系, 可作为提取对称能信息的灵敏探针。我们以前的工作表明, 在中能重离子碰撞中, 动量相关作用和 Skyrme 势有明显的同位旋效应, 它们减弱了同位旋分馏过程<sup>[7]</sup>。

在以前的研究中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, 它对密度相关的平均场不灵敏, 因此原子核阻止可以作为提取核子-核子碰撞截面信息的探针<sup>[11]</sup>。然而, 实验室中直接测量原子核阻止比较困难, 需要用到对测量动量比较灵敏的  $4\pi$  探测器, 而且实验过程中会产生大量的数据, 对这些数据的实时处理也非常困难。为了

收稿日期: 2011-09-04; 修改日期: 2011-09-29

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: 张霄吉(1986—), 男, 上海宝山人, 硕士研究生, 从事原子核理论研究; E-mail: zhangxin02st@163.com

通信作者: 郭文军, E-mail: impgwj@126.com

解决这个问题, 我们找到了一个新的物理量  $\sqrt{e_{\perp}/e_{\parallel}}$ ,  $e_{\perp}$  和  $e_{\parallel}$  分别表示垂直方向和水平方向上单位面积的核子总动能。通过测量  $e_{\perp}$  和  $e_{\parallel}$  的比值, 就可以从实验数据中计算原子核阻止的大小和提取同位旋相关的核子-核子碰撞截面的信息。

## 2 理论模型

### 2.1 同位旋相关的量子分子动力学 (IQMD) 模型

描述重离子碰撞的量子分子动力学 (QMD)<sup>[18-19]</sup> 模型包含 3 个主要因素: 密度相关的平均场、介质中核子-核子碰撞截面和泡利阻塞。为了描述同位旋效应, 需要对 QMD 模型进行修正, 在密度相关的平均场中考虑了和同位旋有关的对称势  $U^{\text{sym}}$  和库仑势  $U^{\text{Coul}}$ 。介质中核子-核子碰撞截面需要区分质子-质子(中子-中子)的碰撞截面与质子-中子的碰撞截面。在泡利阻塞中考虑质子和中子之间的区别, 泡利阻塞只在同种核子之间发生。在我们使用的 IQMD 模型中, 反应前原子核的核子在相空间的分布由具有参数 SKM\*<sup>[20]</sup> 的 Skyrme-Hartree-Fock 方法和蒙特卡罗方法计算得到, 在初始过程中区分了质子和中子。

IQMD 模型中的相互作用势可表示为

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

其中:  $U^{\text{Sky}}$  是密度相关的 Skyrme 势(相当于体积能)

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

$U^{\text{Coul}}$  是库仑势(相当于电磁作用);  $U^{\text{Yuk}}$  是 Yukawa 势(相当于表面能)

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

$U^{\text{MDI}}$  是动量相关作用

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

$(\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2)$  是两个核子之间的相对动量;  $U^{\text{Pauli}}$  是泡利势(由泡利不相容原理产生的排斥势能)

$$U^{\text{Pauli}} = V_p \left( \frac{\hbar}{q_0 p_0} \right)^3 \times$$

$$\exp \left( - \frac{(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j)^2}{2q_0^2} - \frac{(\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j)^2}{2p_0^2} \right) \delta_{p_i p_j},$$

$$\delta_{p_i p_j} = \begin{cases} 1, & n-n(p-p) \\ 0, & n-p \end{cases}; \quad (5)$$

$U^{\text{sym}}$  是对称势, 本文使用了 3 种常用的对称势<sup>[1, 11-13]</sup>

$$U_1^{\text{sym}} = cu \delta \tau_z, \quad U_2^{\text{sym}} = cu^2 \left[ \delta \tau_z + \frac{1}{2} \delta^2 \right],$$

$$U_3^{\text{sym}} = cu^{1/2} \left[ \delta \tau_z - \frac{1}{2} \delta^2 \right]. \quad (6)$$

使用  $c = 32 \text{ MeV}$  表示对称能强度系数;  $\tau_z$  取  $\pm 1$ , 分别表示中子和质子;  $u = \rho/\rho_0$  是原子核的归一化密度, 其中  $\rho_0 \approx 0.16 \text{ fm}^{-3}$  是原子核的饱和密度。相对中子过剩

$$\delta = \frac{\rho_n - \rho_p}{\rho_n + \rho_p} = \frac{\rho_n - \rho_p}{\rho}.$$

自由核子-核子碰撞截面可以用能量相关的经验公式来表示<sup>[21]</sup>:

$$\sigma_{np}^{\text{free}} = \begin{cases} -\frac{5\,067.4}{E^2} + \frac{9\,069.2}{E} + 6.946\,6 \text{ mb}, & E \leq 40 \text{ MeV} \\ \frac{239\,380}{E^2} + \frac{1\,802.0}{E} + 27.147 \text{ mb}, & 40 < E \leq 400 \text{ MeV}; \\ 34.5 \text{ mb}, & 400 < E \leq 800 \text{ MeV}; \end{cases} \quad (7)$$

$$\sigma_{nn}^{\text{free}} (\sigma_{pp}^{\text{free}}) = \begin{cases} -\frac{1\,174.8}{E^2} + \frac{308\,8.5}{E} + 5.310\,7 \text{ mb}, & E \leq 40 \text{ MeV} \\ \frac{93\,074}{E^2} - \frac{11.148}{E} + 22.429 \text{ mb}, & 40 < E \leq 310 \text{ MeV}; \\ \frac{887.37}{E} + 0.053\,31E + 3.547\,5 \text{ mb}, & 310 < E \leq 800 \text{ MeV}. \end{cases} \quad (8)$$

式(7)表示自由中子-质子碰撞截面, 式(8)表示中子-中子(质子-质子)碰撞截面。从上面的截面公式可以看出, 当反应能量小于 400 MeV 时, 中子-质子碰撞截面大约是中子-中子(质子-质子)的 3 倍。反应能量大于 400 MeV 时, 这两个截面几乎相等。

介质中的核子-核子碰撞截面可以用密度相关的经验公式来表示<sup>[22]</sup>：

$$\sigma_{NN}^{\text{med}} = \left(1 + \alpha \frac{\rho}{\rho_0}\right) \sigma_{NN}^{\text{free}}. \quad (9)$$

当参数  $\alpha$  约等于  $-0.2$  时<sup>[23]</sup>，与集体流的实验数据符合。本文考虑了 2 种截面：

$$\begin{aligned} \sigma^{\text{iso}} : \sigma_{np} &\neq \sigma_{nn} = \sigma_{pp}, \\ \sigma^{\text{noiso}} : \sigma_{np} &= \sigma_{nn} = \sigma_{pp}, \end{aligned} \quad (10)$$

其中： $\sigma^{\text{iso}}$  表示同位旋相关截面； $\sigma^{\text{noiso}}$  表示同位旋无关截面。

### 2.2 垂直-平行动能比与原子核阻止的关系

原子核阻止可以写成  $R = \frac{2}{\pi} \frac{\sum_i^A p_{\perp}(i)}{\sum_i^A p_{\parallel}(i)}$ ，它表示总动量的垂直分量与水平分量的比值。在相对论情况下，动量与能量的关系  $p = \sqrt{2m_0 E + E^2}$ 。把原子核阻止的表达式里的动量用能量来表示，并进行了一些近似：

$$\begin{aligned} R &= \frac{2}{\pi} \frac{P_{\perp}}{P_{\parallel}} = \frac{2}{\pi} \frac{\sum_{\theta=0^{\circ}}^{180^{\circ}} |\mathbf{p}_{\theta}| \sin \theta}{\sum_{\theta=0^{\circ}}^{180^{\circ}} |\mathbf{p}_{\theta}| |\cos \theta|} \\ &= \frac{2}{\pi} \frac{\sum_{\theta=0^{\circ}}^{180^{\circ}} \sqrt{2m_0 E_{\theta} + E_{\theta}^2} \sin \theta}{\sum_{\theta=0^{\circ}}^{180^{\circ}} \sqrt{2m_0 E_{\theta} + E_{\theta}^2} |\cos \theta|} \\ &= \frac{2}{\pi} \frac{\sum_{\theta=0^{\circ}}^{180^{\circ}} \sqrt{E_{\theta}} \sqrt{2m_0 + E_{\theta}} \sin \theta}{\sum_{\theta=0^{\circ}}^{180^{\circ}} \sqrt{E_{\theta}} \sqrt{2m_0 + E_{\theta}} |\cos \theta|} \\ &\approx \frac{2}{\pi} \frac{\sum_{\theta=0^{\circ}}^{180^{\circ}} \sqrt{E_{\theta}} \sin \theta}{\sum_{\theta=0^{\circ}}^{180^{\circ}} \sqrt{E_{\theta}} |\cos \theta|} \\ &\approx \frac{2}{\pi} \frac{\sum_{\theta=85^{\circ}}^{95^{\circ}} \sqrt{E_{\theta}}}{\sum_{\theta=0^{\circ}}^{15^{\circ}} \sqrt{E_{\theta}} + \sum_{\theta=165^{\circ}}^{180^{\circ}} \sqrt{E_{\theta}}} \\ &\approx \frac{2}{\pi} \frac{\sum_{\theta=85^{\circ}}^{95^{\circ}} \sqrt{E_{\theta}}}{2 \sum_{\theta=0^{\circ}}^{15^{\circ}} \sqrt{E_{\theta}}} \approx \frac{1}{\pi} \frac{\sqrt{E_{\perp}}}{\sqrt{E_{\parallel}}}. \end{aligned} \quad (11)$$

式中： $E_{\perp}$  是垂直方向 ( $85^{\circ}$  到  $95^{\circ}$ ) 的核子总动能； $E_{\parallel}$  是水平方向 ( $0^{\circ}$  到  $15^{\circ}$ ,  $165^{\circ}$  到  $180^{\circ}$ ) 的核子总

能； $E_{\theta}$  表示  $\theta$  角附近所有粒子的总动能。在式(11)中做的近似是因为所研究能区， $E_{\theta}$  远小于  $2m_0$ ，所以分子和分母中的  $\sqrt{2m_0 + E_{\theta}}$  近似相等，可以约掉。因为  $\theta$  在  $0^{\circ}$  或  $180^{\circ}$  附近时， $\sin \theta$  约等于 0， $\theta$  在  $90^{\circ}$  附近时， $|\cos \theta|$  约等于 0，所以式(11)可以做如上近似。为了计算单位面积内的动能，将垂直方向总动能和平行方向总动能除以对应面积：

$$R_e \approx \frac{1}{\pi} \frac{\sqrt{E_{\perp}} / S_{85 \sim 95}}{\sqrt{E_{\parallel}} / S_{0 \sim 15}} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{e_{\perp}}{e_{\parallel}}}, \quad (12)$$

式中： $e_{\perp} = E_{\perp} / S_{85 \sim 95}$  表示垂直方向单位面积的核子总动能； $e_{\parallel} = E_{\parallel} / S_{0 \sim 15}$  表示平行方向单位面积的核子总动能。原子核阻止可以近似地用  $\sqrt{e_{\perp} / e_{\parallel}}$  的函数来表示，因为式(12)做了很大的近似，所以把原子核阻止用  $\sqrt{e_{\perp} / e_{\parallel}}$  的多项式展开：

$$\begin{aligned} R_e &= a_0 + a_1 \times \sqrt{\frac{e_{\perp}}{e_{\parallel}}} + a_2 \times \frac{e_{\perp}}{e_{\parallel}} \\ &\quad + a_3 \times \left(\frac{e_{\perp}}{e_{\parallel}}\right)^{3/2} + \dots, \end{aligned} \quad (13)$$

$R_e$  表示从能谱计算得到的原子核阻止。通过大量的模拟和拟合，可以确定  $a_0, a_1, a_2$  等的值。

### 3 计算结果与讨论

我们对中等质量的反应系统 ( $^{76}\text{Zn} + ^{76}\text{Zn}$ ,  $^{76}\text{Ge} + ^{76}\text{Ge}$ ,  $^{76}\text{Se} + ^{76}\text{Se}$  和  $^{76}\text{Kr} + ^{76}\text{Kr}$ ) 在不同能量 ( $E = 30 \sim 200 \text{ MeV/u}$ ) 下的反应进行了研究。选取了 4 个总质量数相同，但中质比不相同的系统计算的原因，是为了消除系统质量对所研究物理量带来的影

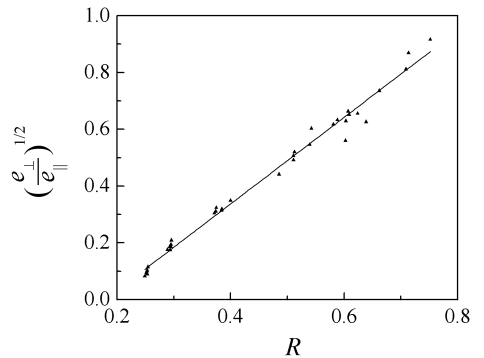


图 1 动能比值的平方根与原子核阻止的关系

响。4 个系统中中质比分别是 1.11, 1.24, 1.38 和 1.53。图 1 给出了上述反应系统碰撞产生的原子核

阻止与垂直-平行动能比的平方根  $\sqrt{e_{\perp}/e_{\parallel}}$  间的关系。从图中可以明显看出，原子核阻止和不同方向动能比值间有很强的线性相关性。图 1 的结果可以近似地用一次函数  $R_e = -0.27 + 1.53\sqrt{e_{\perp}/e_{\parallel}}$  来表示。因为  $\sqrt{e_{\perp}/e_{\parallel}}$  与原子核阻止有这样的线性关系，所以可用  $R_e$  来提取核子-核子碰撞截面的信息。

图 2 给出了上述 4 个碰撞系统产生的碎片在反应达到平衡后的原子核阻止  $R$  (细线) 和从能谱计算的原子核阻止  $R_e$  (粗线)。从图 2 可明显地看到，考虑同位旋相关的核子-核子碰撞截面后，原子核阻止增加，这说明它是探测核子-核子碰撞截面的灵敏探针。还可看到，原子核阻止随着系统中质比的增大而减小，这和文献[4]所得结论一致。这是因为随着系统中质比的增大，中子和质子之间的碰撞数减少，总截面相应减少，所以原子核阻止被降低。

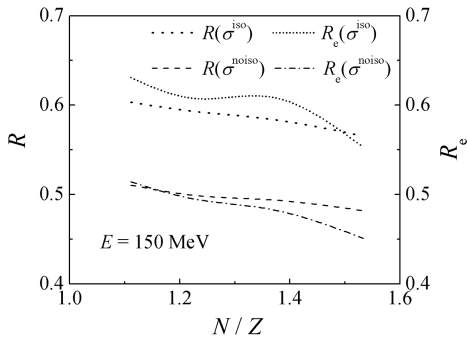


图 2 原子核阻止  $R$ ，从能谱计算的原子核阻止  $R_e$  与反应系统中质比的关系

图 3 给出了  $^{76}\text{Kr} + ^{76}\text{Kr}$  反应系统，在考虑同位旋相关的核子-核子碰撞截面和不考虑同位旋相关碰撞截面产生的原子核阻止  $R$  的比值 (实线)，以及从能谱计算得到的原子核阻止  $R_e$  相应的比值 (虚线)。

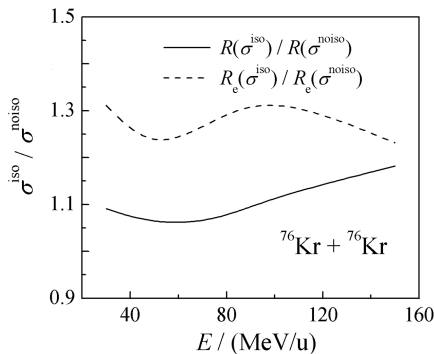


图 3 考虑  $\sigma^{\text{iso}}$  与  $\sigma^{\text{noiso}}$  时原子核阻止比值与入射能量的关系

考虑同位旋相关截面产生的原子核阻止比不考虑同位旋截面产生的原子核阻止  $R$  或  $R_e$  更大。说明  $R$  和  $R_e$  都对截面很灵敏。从图 3 中还看出， $R_e$  比  $R$  更大，这是因为计算  $R_e$  时只考虑水平方向和垂直方向附近的核子动能，它们对同位旋很灵敏；原子核阻止在计算时，考虑各个方向的动量，包括对同位旋不灵敏的角度上的动量，造成总的灵敏度下降。所以  $R_e$  对同位旋相关的核子-核子碰撞截面更灵敏。

图 4 给出了反应系统  $^{76}\text{Kr} + ^{76}\text{Kr}$ ，反应能量  $E = 200 \text{ MeV/u}$  产生的碎片在反应达到平衡以后时，从能谱计算的原子核阻止  $R_e$  与碰撞参数  $b$  的关系。可以发现，当碰撞参数  $b=0$  的时候， $R_e$  的同位旋效应比较明显；当碰撞参数较大时，核子-核子碰撞截面对  $R_e$  的影响不是很大。这是因为对称系统在对心碰撞时，几乎所有的核子都参与了碰撞，有足够多的 n-p 碰撞数，所以  $b=0$  时， $R_e$  对截面很灵敏。碰撞参数  $b$  增大时，只有一部分核子参与碰撞，更多的核子向水平方向运动，所以动能比值的平方根

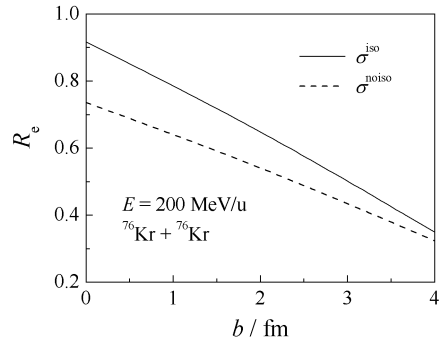


图 4 从能谱计算的原子核阻止  $R_e$  与碰撞参数的关系

减少，相应的  $R_e$  对同位旋的灵敏度减弱。综上所述，用  $R_e$  这个探针探测介质中的核子-核子碰撞截面，适用的条件是碰撞参数  $b$  不是很大。当碰撞参数  $b$  很大时，这个探针不是很灵敏。

## 4 小结

用 IQMD 模型研究了中等质量、不同中质比和不同入射能量的碰撞系统。发现了从不同方向碎片的动能计算得到的  $R_e$  与原子核阻止  $R$  之间有很强的关联性，原子核阻止可以近似地用这个物理量来表示。它和原子核阻止都敏感地依赖同位旋相关的介质中核子-核子碰撞截面，并且它比原子核阻止更容易在核反应实验中测量到，所以  $R_e$  可以作为提取核子-核子碰撞截面信息的一个探针。

## 参考文献 (References):

- [1] LI B A, KO C M, Bauer W. *Int J Mod Phys E*, 1998, **7**: 147.
- [2] LI Bao'an, SCHRÖDER W U. *Isospin Physics in Heavy-Ion Collisions at Intermediate Energies*[M]. New York: Nova Science Publishers, 2001: 257.
- [3] LI B A, Chen L W, KO C M. *Phys Rep*, 2008, **464**: 113.
- [4] LIU J Y, GUO W J, REN Z Z. *Phys Lett B*, 2005, **617**: 24.
- [5] LIU Jianye, GUO Wenjun. *Chin Phys Lett*, 2010, **27**(6): 062503.
- [6] BIAN Bao'an, ZHOU Hongyu, ZHANG Fengshou. *Acta Phys Sin*, 2007, **56**(3): 1334(in Chinese).  
(卞宝安, 周宏余, 张丰收. *物理学报*, 2007, **56**(3): 1334.)
- [7] GUO Wenjun, SUN Chang'an, LIU Jianye. *Acta Phys Sin*, 2009, **58**(2): 871(in Chinese).  
(郭文军, 孙长安, 刘建业. *物理学报*, 2009, **58**(2): 871.)
- [8] DANIELEWICZ P, LACEY R, Lynch W G. *Science*, 2002, **298**: 1592.
- [9] LATTIMER J M, PRAKASH M. *Phys Rep*, 2000, **333**: 121.
- [10] LATTIMER J M, PRAKASH M. *Science*, 2004, **304**: 536.
- [11] LIU J Y, GUO W J, WANG S J, *et al.* *Phys Rev Lett*, 2001, **86**: 975.
- [12] LIU J Y, GUO W J, XING Y Z, *et al.* *Phys Lett B*, 2002, **540**: 213.
- [13] LIU J Y, GUO W J, XING Y Z, *et al.* *Nucl Phys A*, 2003, **726**: 123.
- [14] LI B A, YONG G C, ZUO W. *Phys Rev C*, 2005, **71**: 014608.
- [15] LI B A. *Phys Rev Lett*, 2000, **85**: 4221.
- [16] BERTSCH G F, GUPTA S D. *Phys Rep*, 1988, **160**: 189.
- [17] CASSING W, METAG V, MOSEL U, *et al.* *Phys Rep*, 1990, **188**(6): 363.
- [18] AICHELIN J, PEILERT G, BOHNET A, *et al.* *Phys Rev C*, 1988, **37**(6): 2451.
- [19] AICHELIN J. *Phys Rep*, 1991, **202**: 233.
- [20] REINHARD P G. *Computational Nuclear Physics*, 1991, **1**: 28.
- [21] CHEN K, Z FRAENKEL, G FRIEDLANDER, *et al.* *Phys Rev*, 1968, **166**: 949.
- [22] KLAKOW D, WELKE G, BAUER W. *Phys Rev C*, 1993, **48**: 1982.
- [23] ALKHAZOV G, ALKHAZOV G D, BAUER T. *Nucl Phys A*, 1977, **280**: 365.

## Extracting Information of Nucleon-nucleon Cross Section from Energy Spectrum

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

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

**Abstract:** The collision of different neutron/proton ratio, intermediate mass reaction systems( $^{76}\text{Zn}+^{76}\text{Zn}$ ,  $^{76}\text{Ge}+^{76}\text{Ge}$ ,  $^{76}\text{Se}+^{76}\text{Se}$  and  $^{76}\text{Kr}+^{76}\text{Kr}$ ) at the beam energy of 30~200 MeV/u are studied by using isospin-dependent quantum molecular dynamics(IQMD) model. It is found that there exists a strong relationship between nuclear stopping and the ratio of different direction kinetic energy, and nuclear stopping can be replaced by the square root of the ratio of perpendicular and parallel total kinetic energy of fragments, and it can be used to extract information of isospin-dependent in medium nucleon-nucleon cross section. This physical quantity can be easily measured in nuclear reaction experiments, and it is a better probe.

**Key words:** kinetic energy spectrum; nucleon-nucleon cross section; nuclear stopping; quantum molecular dynamics model

Received date: 4 Sep. 2011; Revised date: 29 Sep. 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 :impwgj@126.com