

## 核子碰撞截面的介质修正对多重碎裂的影响\*

邢永忠<sup>1,2,3</sup> 刘建业<sup>1,2</sup> 郭文军<sup>2</sup> 左维<sup>1,2</sup> 李希国<sup>1,2</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)

3(天水师范学院物理系 甘肃 天水 741000)

**摘要** 利用同位旋相关的量子分子动力学模型研究了中能重离子碰撞过程中,同位旋相关的核子碰撞截面的介质修正对于多重碎裂的影响.结果表明:在包括动量相关作用在内的软势的情况下,介质修正明显地提高了自由核子的发射和中等质量碎片的多重性对于核子碰撞截面的同位旋依赖的敏感性.但对于原子核阻止敏感地依赖于核子碰撞截面的同位旋效应而不敏感地依赖于对称势的形式这一性质的影响并不明显,因此,原子核阻止对于核子碰撞截面的同位旋依赖的敏感性主要决定于自由核子碰撞截面的同位旋相关性.

**关键词** 同位旋相关性 核子碰撞截面 介质修正 多重碎裂

同位旋相关的中能重离子碰撞已成为物理学的一个重要研究领域,人们对于这一领域进行广泛研究的主要目的不仅在于认识重离子碰撞过程中相变、多重碎裂等现象的特征和动力学机制,而且在于由此来获取非对称核物质状态方程以及两体碰撞截面的知识.实际上,正是由于中能重离子碰撞过程中核子之间相互作用的复杂性使得平均场、两体碰撞以及泡利阻塞起着同样重要的作用.因而,目前我们还不能完全了解碰撞过程中核子之间的相互作用的确切形式和它们对某一物理量的确定作用.最近,人们已通过理论研究找到了一些可以充当中能重离子碰撞的动力学过程中某一性质探针的可观测物理量,由于这些物理量要么仅对同位旋相关的平均场的形式敏感而对于碰撞截面不敏感,要么对后者敏感而对于前者不敏感,即平均场探针或截面探针.例如:Li Bao-an<sup>[1]</sup>等研究指出,可以将中能重离子碰撞中的质子-中子微分流作为一个探针来研究同位旋相关的核物质状态方程;刘建业等系统地研究了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-核子碰撞截面的依赖

性,指出:动量相关作用明显地提高了原子核阻止对于核子-核子碰撞截面的同位旋效应的灵敏性.因此,在考虑动量相关作用的情况下原子核阻止可以作为提取同位旋相关的核子-核子碰撞截面的一个探针<sup>[2]</sup>.我们最近的研究结果表明:中能重离子碰撞过程中的自由核子发射和中等质量碎片的多重性均可以用作探测介质中核子-核子碰撞截面的同位旋效应的探针<sup>[3]</sup>,亦即自由核子发射和中等质量碎片的多重性具有对于介质中核子-核子碰撞截面的同位旋效应敏感而对于对称势的形式不敏感的性质.那么,介质效应在决定这些性质时,起着什么样的作用呢?

我们研究介质效应在上述同位旋相关的核子-核子碰撞截面探针中所起的作用,即研究同位旋相关的核子-核子碰撞截面的介质效应对于核子发射、中等质量碎片和原子核阻止的影响.为此,仍然用同位旋相关的量子分子动力学模型(IQMD)进行计算,并选定为包含动量相关作用在内的软势状态方程,该模型中各种相互作用势的具体形式和相关参数请参阅文献[2—4].这里我们只给出本文计算

2002-07-08 收稿

\* 国家重点基础研究发展规划(G2000077407),国家自然科学基金(10175080,10004012),中国科学院百人计划和中国科学院知识创新工程重点方向性项目(KJCX2-SW-N02)资助

中所选取的对称势形式:

$$U_1 = cF_1(u)\delta\tau_z, \quad (1)$$

$$U_2 = cF_2(u)(\delta\tau_z + \frac{1}{2}\delta^2), \quad (2)$$

其中  $F_1(u) = u, F_2(u) = u^2, u \equiv \rho/\rho_0; \tau_z$  是核子同位旋的第三分量, 其值对于质子为  $-1$ , 对 neutron 为  $+1$ . 取对称势的强度  $c = 32\text{MeV}$  或  $0$ , 后者表示不考虑对称势 (在图中用  $U_0$  标志).  $\delta = \frac{\rho_n - \rho_p}{\rho_n + \rho_p} = \frac{\rho_n - \rho_p}{\rho_0}$  为相对中子过剩, 其中的  $\rho, \rho_0, \rho_n$  和  $\rho_p$  分别表示核密度、饱和核密度、中子和质子分布的密度.

实际上, 介质效应对核子-核子碰撞截面的影响, 是重离子碰撞过程中一个十分关键而且一直被物理学家所探讨的重要课题<sup>[4]</sup>. 1993 年, D. Klakow<sup>[5]</sup> 在研究集体流的性质时, 将介质中核子-核子碰撞截面展开为核子分布密度的函数

$$\sigma_{NN}^{\text{med}} = \sigma_{NN}^{\text{free}}(1 + \alpha \frac{\rho}{\rho_0}). \quad (3)$$

其中  $\alpha = \rho_0 \frac{\partial}{\partial \rho} \left\{ \ln \sigma_{NN}^{\text{med}} \right\} \Big|_{\rho=\rho_0}, \sigma_{NN}^{\text{free}}$  为通过实验数目的拟合而给出的自由核子-核子碰撞截面<sup>[6]</sup>:

$$\sigma_{np}^{\text{free}} = \begin{cases} 381.0(\text{mb}) & E \leq 25(\text{MeV}) \\ \frac{5067.4}{E^2} + \frac{9069.2}{E} + 6.9466(\text{mb}) & 25 \leq E \leq 40(\text{MeV}) \\ \frac{239380}{E^2} + \frac{1802.0}{E} + 27.147(\text{mb}) & 40 < E \leq 310(\text{MeV}) \\ 34.5(\text{mb}) & 310 \leq E \leq 800(\text{MeV}); \end{cases} \quad (4)$$

$$\sigma_{nn}^{\text{free}} = \sigma_{pp}^{\text{free}} = \begin{cases} 80.6(\text{mb}) & E \leq 25(\text{MeV}) \\ -\frac{1174.8}{E^2} + \frac{3088.5}{E} + 5.3107(\text{mb}) & 25 \leq E \leq 40(\text{MeV}) \\ \frac{93074}{E^2} - \frac{11.148}{E} + 22.429(\text{mb}) & 40 < E \leq 310(\text{MeV}) \\ \frac{887.37}{E} + 0.05331E + 3.5475(\text{mb}) & 310 \leq E \leq 800(\text{MeV}). \end{cases} \quad (5)$$

这里  $E$  为实验室系中核子的入射能. 约在  $400\text{MeV}/u$  以下的能区, 由其给出的 n-p 的碰撞截面一般约为 p-p 或 n-n 的碰撞截面的 3 倍. Klakow 的研究发现在  $\alpha = -0.2$  时, 理论计算所给出的流参数值可以很好

地与实验值相符合。

根据上述模型公式, 我们分别在有无介质效应的两种情况下, 对质量对称的碰撞系统  $^{76}\text{Kr} + ^{76}\text{Kr}$  和  $^{112}\text{Xe} + ^{112}\text{Sn}$  以及质量不对称碰撞系统  $^{112}\text{Sn} + ^{40}\text{Ca}$  进行了计算, 其计算结果分别在下列各图中给出. 由于在文献[2—4]的研究中已经指出, 虽然自由核子发射、中等质量碎片的多重性以及原子核阻止对于介质中核子碰撞截面的同位旋效应敏感, 但敏感性对于不同的碰撞系统和不同的入射条件 (入射能量、碰撞参数等), 其表现形式有所不同, 能使某一系统的上述敏感性表现得明显的入射条件并不一定也能使另一系统明显地表现出这一敏感性. 另一方面, 由于实验上无法给出某一确定的碰撞参数下的实验数值, 而是各种不同的碰撞参数共同起作用的结果. 因此, 我们分别在不同的碰撞参数下做了详细计算, 并将相关的物理量对碰撞参数进行了平均.

用  $N_L(U_1, \sigma^{\text{med}}, \alpha = -0.2)$  (或  $N_L(U_1, \sigma^{\text{noiso}}, \alpha = -0.2)$ ) 表示考虑介质效应 ( $\alpha = -0.2$ ), 取对称势为  $U_1$ 、考虑 (或不考虑) 核子碰撞截面的同位旋相关性时自由核子发射数目对于碰撞参数的平均值, 那么, 由核子碰撞截面的同位旋效应所引起的自由核子平均发射数目之差可以写为

$$\Delta N_L(U_1, \Delta\sigma, \alpha = -0.2) = N_L(U_1, \sigma^{\text{med}}, \alpha = -0.2) - N_L(U_1, \sigma^{\text{noiso}}, \alpha = -0.2), \quad (6)$$

它表示在取对称势为  $U_1$ 、考虑介质修正的条件下, 核子-核子碰撞截面的同位旋效应对核子发射的影响; 相应地, 在不考虑上述截面的介质修正 ( $\alpha = 0.0$ ) 时, 由核子碰撞截面的同位旋效应所引起的自由核子的平均发射数目之差

$$\Delta N_L(U_1, \Delta\sigma, \alpha = 0) = N_L(U_1, \sigma^{\text{med}}, \alpha = 0) - N_L(U_1, \sigma^{\text{noiso}}, \alpha = 0), \quad (7)$$

则表示不考虑介质效应时, 核子碰撞截面的同位旋效应对核子发射的影响。

图 1 是根据 (6)、(7) 式得到的对系统  $^{76}\text{Kr} + ^{76}\text{Kr}$  和  $^{112}\text{Sn} + ^{40}\text{Ca}$  的碰撞过程中  $\Delta N_L$  随时间变化的计算结果, 左右边两图分别对应于对称势  $U_1$  和  $U_2$ , 图中实线与虚线分别表示考虑 ( $\alpha = -0.2$ ) 和不考虑 ( $\alpha = 0.0$ ) 核子碰撞截面的介质修正的情况下所得到的计算结果. 从图中可以看出: 1) 在大约  $150\text{fm}/c$ , 即反应达到平衡之后,  $\Delta N_L$  均达到了饱和, 其值分别约为  $6(\alpha = -0.2)$  和  $4(\alpha = 0.0)$ , 这表明不论有无介质修正, 也不论取对称势  $U_1$  还是  $U_2$ , 碰撞截面的同位旋效应均能引起较大的自由核子的平均发射数

目之差  $\Delta N_L$ ; 2) 左右两图的对比可以看到不论  $\alpha = -0.2$  还是  $\alpha = 0.0$ , 由不同的对称势形式所引起的发射数目之差 (左右两图中相应曲线之差) 相对于  $\Delta N_L$  为一小量, 这显示出了自由核子发射对于核子碰撞截面的同位旋效应敏感而对于对称势的形式不敏感的性质; 3) 从图 1 中实线与虚线之间的间隙  $\Delta N_L(U_1, \Delta\sigma^{iso}, \Delta\alpha) = \Delta N_L(U_1, \Delta\sigma, \alpha = -0.2) - N_L(U_1, \Delta\sigma, \alpha = 0)$  (8) 及其  $\Delta N_L(U_1, \Delta\sigma^{iso}, \Delta\alpha) > 0$  反映出介质修正提高了自由核子发射对于核子碰撞截面的同位旋依赖的敏感性.

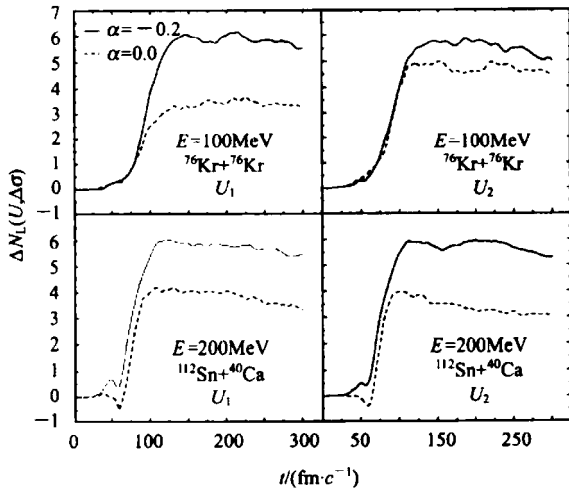


图 1 不同条件下, 由核子碰撞截面的同位旋效应所引起的自由核子发射数目对碰撞参数的平均值之差随时间的变化

为了考察这种影响随入射能量的变化, 图 2 中给出了两系统碰撞过程中  $\Delta N_L(U_1, \Delta\sigma^{iso}, \Delta\alpha)$  随能量的变化情况. 从图中可以看出, 在入射能量从 50 到 300 MeV 的能区内, 一直保持着介质修正提高上述敏感性的特征, 在这两个总质量均为 152 的碰撞系统中, 这一特征在质量对称的系统中更加明显.

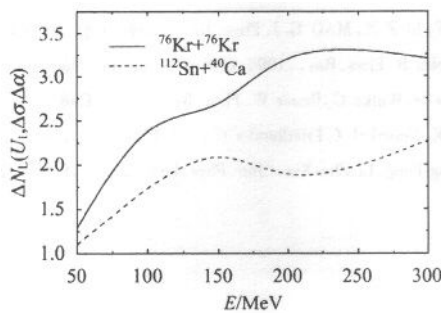


图 2 不同入射能量下, 介质修正所引起的自由核子发射数目对于核子碰撞截面的同位旋依赖性的变化

我们以前的研究结果还表明<sup>[2-4]</sup>: 中能重离子碰撞过程中, 中等质量碎片的多重性对于核子碰撞截面的同位旋效应的依赖性具有与自由核子的发射数目一样的灵敏性, 那么, 介质修正对于这一特征的影响如何呢? 图 3 给出了在考虑与不考虑介质修正的情况下, 上述碰撞系统在反应达到平衡后 ( $t = 200\text{fm}/c$  时), 中等质量碎片的多重性对于碰撞参数的平均值  $\langle N_{mf} \rangle_b$  随入射能量的变化曲线. 其中中等质量碎片的电荷数  $Z$  取在  $2 < Z < 14$  区间内. 图中带有实心标记的 3 条曲线是在考虑了核子碰撞截面的同位旋效应的情况下, 不计及对称势 ( $U_0$ )、以及分别取第一种形式和第二种形式的对称势 (即  $U_1$  和  $U_2$ ) 时,  $\langle N_{mf} \rangle_b$  随入射能量的变化; 而带有空心标记的二条曲线是在不考虑核子碰撞截面的同位旋依赖性和取第一种形式、第二种形式的对称势时, 不同入射能量下的  $\langle N_{mf} \rangle_b$ . 通过此图可以看到: 1) 由于  $\alpha = -0.2$  时核子碰撞截面小于  $\alpha = 0.0$  时的值, 故考虑了核子碰撞截面的介质修正时,  $\langle N_{mf} \rangle_b$  的值小于不考虑介质修正时的相应值; 2) 不论是否计及核子碰撞截面的介质修正,  $\langle N_{mf} \rangle_b$  对于核子碰撞截面的同位旋效应敏感而对于对称势的形式不敏感的这一特征仍然保持 (实心标记线与空心标记线间的距离大于实心标记线之间或空心标记线之间的距离); 3) 在确定的能量和对称势下, 左图中实心标记线与空心标记线间的距离大于右图中相应两线之距, 表明介质修正增强了中等质量碎片的多重性对于核子碰撞截面的同位旋依赖的敏感性.

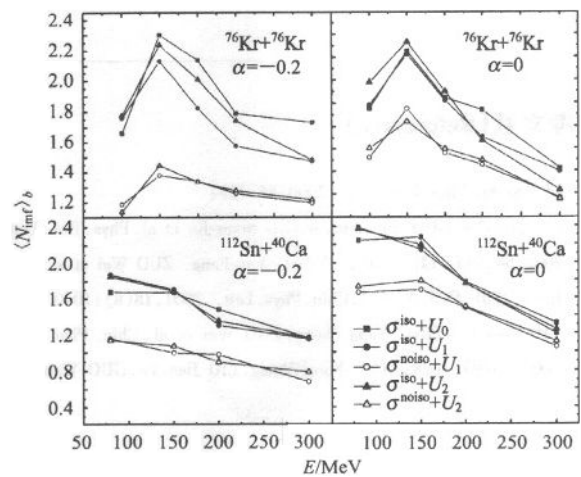


图 3 中等质量碎片的多重性对于碰撞参数的平均值  $\langle N_{mf} \rangle_b$  随入射能量的变化

在中能重离子碰撞中, 原子核阻止:

$$R = \frac{2}{\pi} \frac{\sum_i |P_-(i)|}{\sum_i |P_+(i)|}, \quad (9)$$

$$P_{\pm}(i) = \sqrt{P_x^2(i) + P_y^2(i)},$$

由于原子核阻止,对于核子碰撞截面的同位旋效应灵敏而对于不同对称势的形式不灵敏,故可以作为提取介质中同位旋相关的核子-核子碰撞截面的一个探针<sup>[2]</sup>.最近,李庆峰<sup>[7]</sup>等研究了核子碰撞截面的不同形式的介质修正和不同核物质状态方程对于中能重离子碰撞过程中原子核阻止的影响,指出原子核阻止明显地依赖于不同的介质修正形式和核物质状态方程.这里,我们研究在核物质状态方程选定为软势,并包含动量相关作用的条件下,介质修正所引起的原子核阻止对于核子碰撞截面的同位旋依赖性的变化.图4给出了<sup>112</sup>Sn + <sup>40</sup>Ca 系统碰撞过程中,原子核阻止对于碰撞参数的平均值随入射能量的变化.图中分别给出  $\alpha = -0.2$  和  $\alpha = 0.0$  的情形下,原子核阻止对于碰撞参数的平均值  $R_b$  随入射能量的变化.从图中可以看出,在  $\alpha = 0.0$  的情形下,仍然保持着原子核阻止对于核子碰撞截面的同位旋效应灵敏,而对于不同对称势的形式不灵敏的性质,但与核子的发射和中等质量碎片的多重性相比,介质修正对于原子核阻止的这一性质的影响较弱.为了检验结论的正确性,我们对入射能量在 50 到 200 MeV 的 <sup>76</sup>Kr + <sup>76</sup>Kr 系统和 <sup>112</sup>Xe + <sup>112</sup>Sn 碰撞系统进行了计算,得到了同样的结论.因此,就本文所选取的碰撞系统和能区可以看出,原子核阻止对于核子碰撞截面的同位旋效应有灵敏的依赖性,而对于对

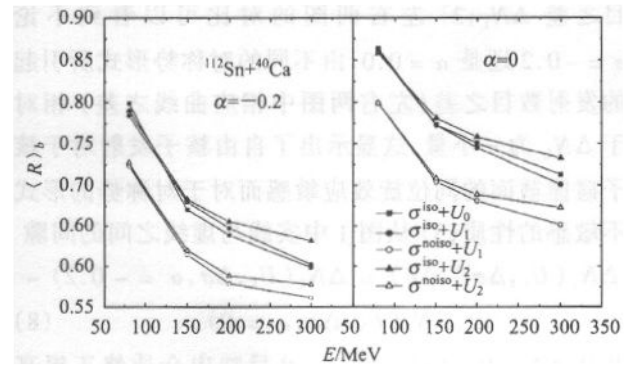


图4 原子核阻止对于碰撞参数的平均值随入射能量的变化

称势并不灵敏的性质,这主要来自于自由核子碰撞截面的同位旋效应,而介质效应对这一性质的影响并不明显.

总之,本文分别研究了中能重离子碰撞中,核子碰撞截面的介质修正对于自由核子的发射、中等质量碎片的多重性以及原子核阻止对于核子碰撞截面的同位旋依赖性的影响,结果表明:在包括动量相关作用在内的软势的情况下,介质修正明显地增强了自由核子的发射和中等质量碎片的多重性对于核子碰撞截面的同位旋依赖的敏感性;而原子核阻止对于核子碰撞截面的同位旋效应敏感而对于对称势并不敏感的这一性质,主要决定于自由核子碰撞截面的同位旋依赖性.同时,我们还可看到,通过考察上述(7),(8)式所定义的  $\Delta N_L(U_{1(2)}), \Delta \sigma^{\text{iso}}, \Delta \alpha$ , 可以获得核子碰撞截面的介质修正的同位旋依赖性.

## 参考文献 (References)

1. LI Bao-An. Phys. Rev. Lett., 2000, **85**:4221
2. LIU Jian-Ye, GUO Wen-Jun, WANG Shun-Jin et al. Phys. Rev. Lett., 2001, **86**:975; LIU Jian-Ye, YANG Yan-Fang, ZUO Wei et al. Phys. Rev., 2001, **C63**:054612; Chin. Phys. Lett., 2001, **18**(8):1040
3. LIU Jian-Ye, XING Yong-Zhong, ZUO Wei et al. Chin. Phys. Lett., 2002, **19**(8):1078; XING Yong-Zhong, LIU Jian-Ye, GUO Wen-Jun et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2003, **27**(2):130 (in Chinese) (邢永忠, 刘建业, 郭文军等. 高能物理与核物理, 2003, **27**(2):130)
4. LI Q F, LI Z X, MAO G J. Phys. Rev., 2000, **C62**:014606; LI G. Q, Machleidt R. Phys. Rev., 1994, **C49**:566; and the references therein
5. Klakow D, Welke G, Bauer W. Phys. Rev., 1993, **C48**:1982
6. Chen K, Fraenkel Z, Friedlander G et al. Phys. Rev., 1968, **166**:949
7. LI Qing-Feng, LI Zhu-Xia. Chin. Phys. Lett., 2002, **19**(3):321

## Influence of Medium Correction of Nucleon-Nucleon Cross Section on Fragmentation

XING Yong-Zhong<sup>1,2,3</sup> LIU Jian-Ye<sup>1,2</sup> GUO Wen-Jun<sup>1,2</sup> ZUO Wei<sup>1,2</sup> LI Xi-Guo<sup>1,2</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)

3(Department of Physics, Tianshui Normal College, Gansu Tianshui 741000, China)

**Abstract** The influence of medium correction of isospin-dependent nucleon-nucleon (NN) cross section on fragmentation in heavy ion collisions at intermediate energies is studied by using the isospin-dependent quantum molecular dynamical model. The results show that the medium correction of isospin-dependent nucleon-nucleon cross section enhances the sensitivity of the free nucleons emission and multiplicity of intermediate mass fragments on the isospin effects of NN cross section. The character of nuclear stopping that depends strongly on the isospin effect of NN cross section and weakly on the different forms of symmetry potential is not affected by the medium correction of NN cross section. And hence this character of nuclear stopping stems mainly from the isospin effects of free nucleon-nucleon cross section.

**Key words** isospin dependence, nucleon-nucleon cross section, medium correction, fragmentation

Received 8 July 2002

\* Supported by Major State Basic Research Development Program(G2000077407), National Natural Science Foundation of China(10175080, 10004012), One Hundred Person Project of Chinese Academy of Sciences and CAS Knowledge Innovation Project (KJ CX2 - SW - N02)