

# 利用双 n/p 比探测对称能的密度依赖性<sup>\*</sup>

雍高产<sup>1,2;1)</sup> 陈列文<sup>3</sup> 李宝安<sup>4</sup> 左维<sup>1</sup>

1 (中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

2 (中国科学院研究生院 北京 100049)

3 (上海交通大学理论物理所 上海 200240)

4 (Department of Chemistry and Physics, P.O.Box 419, Arkansas State University,  
State University, Arkansas 72467-0419, USA)

**摘要** 利用同位旋和动量相关的相对论强子输运模型 IBUU04, 以中心碰撞  $^{124}\text{Sn}+^{124}\text{Sn}$  ( $^{132}\text{Sn}+^{124}\text{Sn}$ ),  $^{112}\text{Sn}+^{112}\text{Sn}$  双反应系统在  $E/A = 50\text{MeV}$  ( $400\text{MeV}$ ) 为例, 在两种不同的对称能作用下, 研究了发射粒子谱中双 n/p 比随时间和动能的演化. 计算双 n/p 比的好处是它削弱了库仑效应与探测低能中子的低效率的影响. 计算结果表明, 无论是在高密还是低密情况下, 双 n/p 比的动能分布都敏感地依赖于对称能, 因此双 n/p 比是探测对称能的一个理想探针.

**关键词** 相对论强子输运模型 双 n/p 比 对称能

## 1 引言

尽管对称能对于研究核物理和天文物理起着至关重要的作用, 但是现今人们对对称能的密度依赖性的了解仍然是很有限的<sup>[1-6]</sup>, 放射性束物理为对称能的研究提供了前所未有的机遇. 基于输运理论模拟, 许多对对称能敏感的探针陆续被理论工作者提出, 理论与实验的比较也在进行. 这些比较使得我们对对称能的密度依赖性有了更为精确的认识. 比如通过利用输运模型 IBUU 以及自由空间核子-核子散射截面<sup>[7]</sup>与最近 MSU 关于同位旋扩散实验数据的比较, 在密度小于 1.2 倍正常核物质密度情况下, 人们得到的对称能随密度的变化关系为  $E_{\text{sym}}(\rho) \approx 31.6(\rho/\rho_0)^{1.1}$ <sup>[8, 9]</sup>. 而使用介质修正的核子-核子散射截面<sup>[10]</sup>, 通过与最近 MSU 关于同位旋扩散实验数据以及最近可接受的  $^{208}\text{Pb}$  中子皮厚实验数据的比较, 人们得到的对称能随密度的变化关系为  $E_{\text{sym}}(\rho) \approx 31.6(\rho/\rho_0)^{0.69}$ <sup>[10, 11]</sup>. 由于当前同位旋扩散数据不能很好地区分两种对称能的密度依赖性, 寻找其他的对对称能敏感的可观测量

依然显得很重要. 因为对称势对于中子、质子具有相反的作用并且相对于标量势是很小的, 目前绝大多数已经发现的可观测量都是基于重子、镜像核和介子的同位旋多重态的差或者比率来探测对称能的, 比如核子发射的中-质比<sup>[12]</sup>、中-质微分流<sup>[13]</sup>、中-质关联函数<sup>[14]</sup>、氦/氦比率<sup>[15, 16]</sup>、 $\pi^-/\pi^+$ <sup>[17-20]</sup>、 $\Sigma^-/\Sigma^+$ <sup>[21]</sup>、 $K^0/K^+$ <sup>[22]</sup> 等等. 在这些观测量当中核子发射的中-质比可能是对对称能最敏感的探针, 因为对称势直接作用到核子上面并且核反应中发射最多的粒子是中子与质子. 但是在测量前平衡发射的质子能谱时往往会受到与对称势竞争的库仑作用的影响, 而探测器在测量中子时由于它的电中性又很难精确地给出其能谱来. 因此核子发射的中-质比的测量往往具有较大的系统误差. 从理论上探索既能够削弱库仑作用的影响又能够减小探测低能中子的低效率性并且敏感于对称能的可观测量显得尤为重要, 最近 Lynch 等人<sup>[23]</sup> 提出用来自于两个反应系统的前平衡发射核子的双 n/p 比作为对对称能敏感的可观测量, 来从实验上探测对称能. 下面用  $^{124}\text{Sn}+^{124}\text{Sn}$  ( $^{132}\text{Sn}+^{124}\text{Sn}$ ),

2005-10-21 收稿

<sup>\*</sup> 中国科学院知识创新工程重要方向性项目(KJ9X2-SW-N02), 国家重点基础研究发展规划项目(G2000077400), 国家自然科学基金重点基金(10105008, 10575071, 10575119, 10235030), 国家科技部重大前期研究专项基金(2002CAB00200)和美国国家自然科学基金(PHY-0354572, PHY0456890)资助

1) E-mail: yonggaochan@impcas.ac.cn

$^{112}\text{Sn}+^{112}\text{Sn}$  双反应系统在  $E/A = 50\text{MeV}$  ( $400\text{MeV}$ ) 中心碰撞为例来研究其对对称能的敏感性.

## 2 理论模型

本研究是建立在著名的 BUU 输运模型基础上, 并同时考虑了同位旋和动量对单粒子势的影响. 其中不但包括核子, 而且还有  $\Delta$ ,  $N^*$  共振态粒子和 Pion 介子. 用相对论平均场理论计算初始弹靶核核子密度分布, 各种粒子间的反应截面直接由实验数据或者由细致平衡原理, Breit-Wigner 等共振态产生截面公式得出. 粒子相空间分布函数的计算采用试验粒子和网格法技术数值求解, 同时考虑了费米子同位旋依赖的泡利阻塞影响. 用修正的 Gogny 有效作用和 Hartree-Fock 方法计算出的参数化的单粒子表示为<sup>[24]</sup>

$$U(\rho, \delta, \mathbf{p}, \tau) = A_{\text{unlike}}(x) \frac{\rho_{\tau'}}{\rho_0} + A_{\text{like}}(x) \frac{\rho_{\tau}}{\rho_0} + B \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^{\sigma} (1 - x\delta^2) - 8x\tau \frac{B}{\sigma+1} \frac{\rho^{\sigma-1}}{\rho_0^{\sigma}} \delta\rho_{\tau'} + \frac{2C_{\text{like}}}{\rho_0} \int d^3\mathbf{p}' \frac{f_{\tau}(\mathbf{r}, \mathbf{p}')}{1 + (\mathbf{p} - \mathbf{p}')^2/\Lambda^2} + \frac{2C_{\text{unlike}}}{\rho_0} \int d^3\mathbf{p}' \frac{f_{\tau'}(\mathbf{r}, \mathbf{p}')}{1 + (\mathbf{p} - \mathbf{p}')^2/\Lambda^2}, \quad (1)$$

此式对质子还要加上库仑作用势. 其中对质子(中子)  $\tau = 1/2$  ( $-1/2$ ) 且  $\tau \neq \tau'$ ,  $\sigma = 4/3$ ,  $f_{\tau}(\mathbf{r}, \mathbf{p})$  是相空间分布函数. 参数  $A_{\text{like}}$ ,  $A_{\text{unlike}}$ ,  $B$ ,  $C_{\text{like}}$ ,  $C_{\text{unlike}}$  和  $\Lambda$  的选取要使  $U(\rho, \delta, \mathbf{p}, \tau)$  适合 Hartree-Fock 和 (或者) Brueckner-Hartree-Fock 计算<sup>[25]</sup>, 对称核物质饱和点特性以及正常核物质密度下大约  $30\text{MeV}$  的对称能. 对称核物质压缩系数取为  $211\text{MeV}$ <sup>[26-28]</sup>. 具体来说,  $B = 106.35\text{MeV}$ ,  $\Lambda = p_{\text{F}}^0$ ,  $p_{\text{F}}^0$  是对称核物质的核子费米动量,  $C_{\text{unlike}} = -103.4\text{MeV}$  和  $C_{\text{like}} = -11.7\text{MeV}$ .  $C_{\text{unlike}}$  和  $C_{\text{like}}$  项描述的是具有同位旋为  $\tau$  的核子在与同位旋为  $\tau'$  或者为  $\tau$  的背景场中的核子作用时获得的单粒子势的动量相关部分:

$$A_{\text{unlike}}(x) = A_{\text{unlike}}(0) - \frac{2B}{\sigma+1}x, \quad (2)$$

$$A_{\text{like}}(x) = A_{\text{like}}(0) + \frac{2B}{\sigma+1}x,$$

其中  $A_{\text{unlike}}(0) = -95.98\text{MeV}$ ,  $A_{\text{like}}(0) = -120.57\text{MeV}$ . 参数  $x$  的引入是为了模拟各种微观、唯象多体理论对密度依赖对称能的不同预言. 由于最近得出对称能对应的  $x$  值在  $0$  与  $-1$  之间<sup>[10]</sup>, 所以下面只考虑这两种情况, 如图 1 所示. 从图 1 可以看出在低密情况下  $x$  值为  $0$  与  $-1$  时对应的对称能的差别是很小的.

从单粒子势  $U(\rho, \delta, \mathbf{p}, \tau)$  获得的标量势  $(U_{\text{n}} + U_{\text{p}})/2$

非常接近于使用适合于核子-核子散射, 少体核束动能以及核物质饱和点特性的真实哈密顿量的变分多体计算<sup>[29]</sup>、三体力修正的 BHF 计算<sup>[25, 30, 31]</sup> 以及 DBHF 的结果<sup>[32]</sup>. 从单粒子势  $U(\rho, \delta, \mathbf{p}, \tau)$  获得的矢量势  $(U_{\text{n}} - U_{\text{p}})/2\delta$  也与 Lane 势<sup>[33]</sup> 符合得很好, 如图 2 所示. 在低密情况下软的对称能 ( $x = 0$ ) 具有较强的对称势, 而在高密情况下硬的对称能 ( $x = -1$ ) 具有较强的对称势, 这种对称势翻转现象是由于在高密与低密情况下对称能翻转造成的 (如图 1).

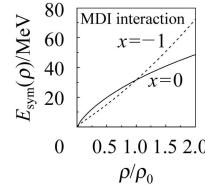


图 1  $x$  为  $0, -1$  时对应的对称能 ( $\rho_0$  为正常核物质密度)

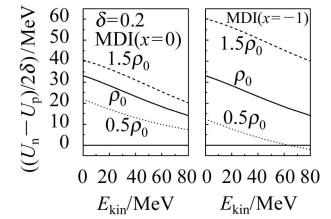


图 2  $x$  为  $0, -1$  时对应的密度、动量依赖的对称能

由单粒子势  $U(\rho, \delta, \mathbf{p}, \tau)$  可以得出核子有效质量,

$$\frac{m_{\tau}^*}{m_{\tau}} = \left[ 1 + \frac{m_{\tau}}{p} \frac{dU}{dp} \right]_{p_{\text{F}}}^{-1}. \quad (3)$$

介质修正的核子-核子弹性散射截面表示为

$$\sigma_{\text{med}} \approx \sigma_{\text{free}} \left( \frac{\mu_{\tau, \tau'}^*}{\mu_{\tau, \tau'}} \right)^2, \quad (4)$$

其中  $\mu$  是同位旋为  $\tau, \tau'$  的碰撞核子对的约化质量,  $\sigma_{\text{free}}$  是实验核子-核子弹性散射的自由截面, 该截面与最近用 DBHF 方法得出的结论基本一致<sup>[34]</sup>. 下面给出 IBUU 输运模型结合介质修正的核子-核子散射截面得出的双 n/p 比率随时间和横动量的演化.

## 3 结果与讨论

首先讨论  $^{124}\text{Sn}+^{124}\text{Sn}$ ,  $^{112}\text{Sn}+^{112}\text{Sn}$  双反应系统在中心碰撞情况下,  $E/A = 50\text{MeV}$  时的前平衡发射核子双中-质比对称能的依赖情况. 首先看两反应系统的单中-质比, 如图 3 所示.

图 3 所示为  $x$  为  $0, -1$  时两反应系统发射核子的中-质比随时间和动能的演化. 首先在大约  $100\text{fm}/c$  时, 两反应系统的发射核子的中-质比基本达到稳定, 丰中子反应系统  $^{124}\text{Sn}+^{124}\text{Sn}$  发射的核子尤其是快核子 (快核子中的质子受长程库仑作用的影响较小, 从而增加了对称势效应, 导致了较大的中-质比) 的中-质比更敏感于对称能, 这是由于丰中子反应系统  $^{124}\text{Sn}+^{124}\text{Sn}$  在反应过程中核子受到较强的对称势作用的缘故. 其次对于较硬的对称能 ( $x = -1$ ), 发射的

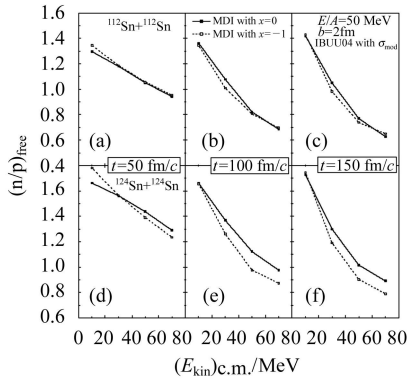


图3  $x$  为 0, -1 时两反应系统发射核子的中-质比随时间和动能的演化

核子(尤其是快核子)的中-质比较软的对称能 ( $x = 0$ ) 数值要小一些, 这是因为在低密情况下较硬的对称能 ( $x = -1$ ) (如图1) 具有较弱的对称势 (如图2), 而较软的对称能 ( $x = 0$ ) 具有较强的对称势. 从而在  $x = 0$  情况下中子/质子受到较强/弱的排斥力产生较多/少的自由中子/质子, 故发射核子的中-质比较  $x = -1$  的情况要大一些. 最后可以看出, 发射核子中-质比的一个很明显的特征, 即对于每一个反应的每一个阶段, 发射核子的中-质比都是低能大而高能小, 这是由于质子受到库仑势的作用而被推离反应的质心系, 在低能区有较少质子, 在高能区有较多质子的缘故. 两反应系统的双中-质比 (如图4) 是  $x$  为 0, -1 时, 两反应系统对应的发射核子的中-质比的比值.

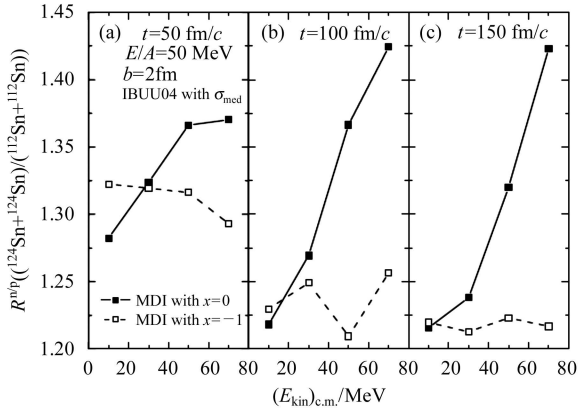


图4  $x$  为 0, -1 时两反应系统对应的发射核子的双中-质比随时间和动能的演化

当  $x$  为 0, -1 时, 两反应系统对应的发射核子的双中-质比在不同的反应阶段都是在高动能时比率大于或者基本等于低动能时比率, 这是由于双中-质比有效地除去了库仑作用的影响. 快核子的双中-质比更敏感于对称能而且敏感度与丰中子反应系统的单中-质比基本一样, 即大约为 10%—15%. 其次较硬的对称能 ( $x = -1$ ) 具有较小的双中-质比而较软的对称

能 ( $x = 0$ ) 具有较大的双中-质比. 同样地, 这也是由于它们对应的对称势具有不同的强弱性造成的. 由于快核子 (动能大于 50 MeV) 的双中-质比更敏感于对称能, 这样就绕开了探测器对低能中子的不敏感性, 只要中子探测器的阈能大于 50 MeV 就可以. 为了检验在高密情况下双中-质比对对称能的敏感性, 我们研究了  $^{132}\text{Sn}+^{124}\text{Sn}$ ,  $^{112}\text{Sn}+^{112}\text{Sn}$  双反应系统在  $E/A = 400\text{MeV}$ ,  $b = 1\text{fm}$  时的双中-质比随动能的分布情况 (假定在高密情况下对称能也在上面两种情况  $x = 0, -1$  之间), 如图5所示. 由于在 400 MeV 每核子入射能的情况下, 反应达到的中心密度接近于 2 倍的正常核物质密度, 而在高密情况下硬的对称能 ( $x = -1$ ) 具有较强的对称势, 软的对称能 ( $x = 0$ ) 具有较弱的对称势, 与在低密的情况正好相反 (如图2所示), 所以对于硬的对称能 ( $x = -1$ ) 双中-质比较大而对于软的对称能 ( $x = 0$ ) 双中-质比较小. 在高密与低密情况下还有一些对称势翻转的信号, 我们将另文报道. 低核子动能 (大约 50 MeV) 的双中-质比更敏感于对称能, 在高密与低密情况下我们研究了双中-质比对碰撞参数的依赖性问题, 发现在高密情况下大的碰撞参数使得双中-质比对对称能的敏感度下降而在低密情况下大的碰撞参数使得双中-质比对对称能的敏感度上升. 因为目前两种最有希望的对称能 ( $x = -1$  与  $x = 0$ ) 的差别很小, 造成了可观测量在这两种情况下也差别很小, 所以在实验上必须进行极为精确的测量.

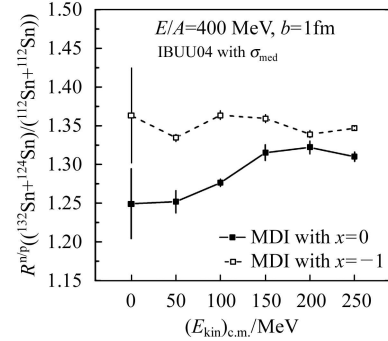


图5  $x$  为 0, -1 时  $^{132}\text{Sn}+^{124}\text{Sn}$ ,  $^{112}\text{Sn}+^{112}\text{Sn}$  双反应系统在  $E/A = 400\text{MeV}$ ,  $b = 1\text{fm}$  时的双中-质比随动能的分布情况

## 4 结论

利用同位旋和动量依赖的相对论强子输运模型, 研究了在高密与低密情况下两种不同对称能对应的发射粒子谱中的双中-质比随动能的分布. 无论在高密还是在低密情况下双中-质比的动能分布都敏感地依赖于对称能, 由于双  $n/p$  比率削弱了库仑效应与探测

低能中子的低效率的影响, 因此可以作为探测对称能硬度的一个敏感探针.

## 参考文献(References)

- 1 Lattimer J M, Prakash M. Phys. Rep., 2000, **333**: 121
- 2 Steiner A W et al. Phys. Rep., 2005, **411**: 325
- 3 RIA Theory Working Group. RIA Theory Bluebook, 2005. 32. www.orau.org/ria/RIATG
- 4 LI B A, KO C M, Bauer W. Int. J. of Modern Phys., 1998, **E7**: 147
- 5 LI B A, Udo Schröder W. Isospin Physics in Heavy-Ion Collisions at Intermediate Energies. New York: Nova Science Publishers, Inc, 2001. 1
- 6 Baran V et al. Phys. Rep., 2005, **410**: 335
- 7 LI B A et al. Phys. Rev., 2004, **C69**: 011603; Nucl. Phys., 2004, **A735**: 563
- 8 Tsang M B et al. Phys. Rev. Lett., 2004, **92**: 062701
- 9 CHEN L W, KO C M, LI B A. Phys. Rev. Lett., 2005, **94**: 032701
- 10 LI B A, CHEN L W. 2005. nucl-th/0508024
- 11 Steiner A W, LI B A. 2005. nucl-th/0505051
- 12 LI B A, KO C M, REN Z Z. Phys. Rev. Lett., 1997, **78**: 1644
- 13 LI B A. Phys. Rev. Lett., 2000, **85**: 4221
- 14 CHEN L W et al. Phys. Rev. Lett., 2003, **90**: 162701; Phys. Rev., 2003, **C68**: 014605
- 15 CHEN L W, KO C M, LI B A. Phys. Rev., 2003, **C68**: 017601; Nucl. Phys., 2003, **A729**: 809
- 16 ZHANG Y, LI Z. Phys. Rev., 2005, **C71**: 024604
- 17 LI B A. Phys. Rev. Lett., 2002, **88**: 192701; Nucl. Phys., 2002, **A708**: 365; Phys. Rev., 2003, **C67**: 017601
- 18 Gaitanos T et al. Nucl. Phys., 2004, **A732**: 24
- 19 LI B A, YONG G C, ZUO W. Phys. Rev., 2005, **C71**: 014608
- 20 LI Q F et al. Phys. Rev., 2005, **C72**: 034613
- 21 LI Q F et al. Phys. Rev., 2005, **C71**: 054607
- 22 Ferini G et al. 2005. nucl-th/0504032
- 23 Lynch W G, Sobotka L G, Tsang M B. private communications
- 24 Das C B et al. Phys. Rev., 2003, **C67**: 034611
- 25 Bombaci I, Lombardo U. Phys. Rev., 1991, **C44**: 1892
- 26 Youngblood D H et al. Phys. Rev. Lett., 1999, **82**: 691
- 27 Piekarewicz J. Phys. Rev., 2004, **C69**: 041301
- 28 Colo G et al. Phys. Rev., 2004, **C70**: 024307
- 29 Wiringa R B. Phys. Rev., 1988, **C38**: 2967
- 30 ZUO W, Bombaci I, Lombardo U. Phys. Rev., 1999, **C60**: 024605
- 31 ZUO W et al. Phys. Rev., 2005, **C72**: 014005
- 32 Sammarruca F, Barredo W, Krastev P. Phys. Rev., 2005, **C71**: 064306
- 33 Lane A M. Nucl. Phys., 1962, **A35**: 676
- 34 Sammarruca F, Krastev P. 2005. nucl-th/0506081

# Probing Density-Dependent Symmetry Energy by Using the Double n/p Ratio<sup>\*</sup>

YONG Gao-Chan<sup>1,2;1)</sup> CHEN Lie-Wen<sup>3</sup> LI Bao-An<sup>4</sup> ZUO Wei<sup>1</sup>

1 (Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Science, Lanzhou 730000, China)

2 (Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

3 (Institute of Theoretical Physics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

4 (Department of Chemistry and Physics, P.O.Box 419, Arkansas State University, State University, Arkansas 72467-0419, USA)

**Abstract** Based on a transport model IBUU04, the double n/p ratio is studied. It is found that the double n/p ratio has almost the same sensitivity to the density dependence of nuclear symmetry energy as the single n/p ratio does. Because the double n/p ratio of nucleon emissions taken from two reaction systems can reduce systemic errors effectively, it is thus more useful for constraining the density-dependent symmetry energy further.

**Key words** transport model, double n/p ratio, symmetry energy

Received 21 October 2005

<sup>\*</sup>Supported by Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Science (KJCX2-SW-N02), Major State Basic Research Development Program (G2000077400), National Natural Science Foundation of China (10105008, 10575071, 10575119, 10235030), Chinese Ministry of Science and Technology (2002CAB00200) and US National Science Foundation (PHY-0354572, PHY0456890)

1) E-mail: yonggaochan@impcas.ac.cn