

利用自由中-质比研究对称能的高密行为^{*}

张芳^{1,2;1)} 左维^{1,2,3,4} 雍高产^{1,3}

1 (中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

2 (兰州大学物理科学与技术科学学院 兰州 730000)

3 (中国科学院研究生院 北京 100049)

4 (兰州大学理论物理与交叉学科研究中心 兰州 730000)

摘要 基于同位旋和动量依赖的强子输运模型 IBUU04, 采用两种具有不同密度依赖的对称能研究了 $^{132}\text{Sn}+^{124}\text{Sn}$ 反应系统在 400MeV/A, 600MeV/A, 800MeV/A 三种不同碰撞能量下中快度发射核子中-质比随横动量的变化关系. 发现发射核子中-质比在低横动量端非常敏感于对称能, 发射核子中-质比的强度随碰撞能量的降低而增强. 并且发射核子中-质比对对称能的敏感性随着碰撞能量的增大而降低, 在高横动量端尤为明显, 在碰撞能量为 400MeV/A 时, 自由核子中-质比对对称能的敏感性最为明显.

关键词 输运模型 IBUU04 发射核子中-质比 对称能

1 引言

物理学的许多领域, 从宇宙演化、超新星爆发、中子星的性质到天体里的重元素产生都会涉及到核物质的核态方程. 经过许多人三十多年的艰苦努力, 对称核物质状态方程已得到较好的认识^[1], 如基态核物质的压缩系数约为 200—250MeV. 但遗憾的是我们对非对称核物质状态方程的认识仍非常不足. 近年来, 次级束流线的相继建造 (如德国的 GSI 和美国的 RIA) 使得放射性核物理 (重离子物理) 成为了一个新的领域^[2, 3]. 次级束流线的发展使得开展对非对称核物质状态方程同位旋相关性的研究成为可能. 非对称核物质状态方程的探索尤其是密度依赖的对称能的探索有助于研究不稳定核结构和天体物理中的一些关键问题, 如中子星里的 Kaon 凝聚、超新星爆发机制、超新星形成过程中的核合成、原子核的奇异结构等等^[4—6]. 目前, 不同的微观 (唯象) 理论模型所预言的对称能的密度依赖性尤其是在高密情况下仍存在很大的差别. 重离子碰撞一个最重要的特点就是能产生极端条件下的核物质, 为了利用重离子碰撞提取有关

对称能密度依赖性的信息, 首先需要通过输运理论对重离子碰撞动力学过程进行模拟, 从而找出在实验上对对称能比较敏感的物理观测量. 目前理论上预言的在实验上对对称能较为敏感的探针主要有: 前平衡核子发射的中-质比^[7], 同位旋相分化^[8, 9], 同位旋扩散^[10, 11], π^-/π^+ 比率^[12] 以及中-质微分流^[13] 和质子微分椭圆流^[14] 等等. 除此之外, 还需要知道各种敏感观测量在多大的入射能量下、能谱的哪个区域内对对称能比较敏感等等. 本工作就是研究前平衡核子发射中-质比对对称能最为敏感的最佳入射能量. 研究发现, 在碰撞能量约为每核子 400MeV 时, 中-质比对对称能最为敏感.

2 理论模型

本工作是建立在同位旋相关的输运模型 IBUU04 基础上, 该模型的一个明显改进是考虑了单粒子势尤其是对称势的动量相关性. 这一理论模型中所考虑的粒子不仅包括核子, 还包括 Δ , N^* , π 介子. 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

2006 - 07 - 31 收稿, 2007 - 02 - 07 收修改稿

^{*} 国家自然科学基金重点基金 (10575119, 10235030), 中国科学院知识创新工程重要方向性项目 (KJ951-A1-01-01), 国家重点基础研究发展规划项目 (G2000077400) 和国家科技部重大前期研究专项基金 (2002CAB00200) 资助

1) E-mail: zhangfang03@st.lzu.edu.cn

解, 同时考虑了费米子泡利阻塞的同位旋效应^[15].

密度为 ρ 、同位旋非对称度为 $\delta = (\rho_n - \rho_p) / (\rho_n + \rho_p)$ 的非对称核物质状态方程可以写为^[16]

$$E(\rho, \delta) = E(\rho, \delta = 0) + E_{\text{sym}}(\rho)\delta^2 + O(\delta^4), \quad (1)$$

其中 $E(\rho, \delta = 0)$ 是对称核物质的每核子能量; $E_{\text{sym}}(\rho)$ 是对称能; $\rho = \rho_n + \rho_p$ 是重子数密度, ρ_n 和 ρ_p 分别表示中子和质子数密度. 我们采用的单粒子势是参数化的动量相关的单粒子势 (MDI)^[17], 即

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

其中 $f_{\tau}(\mathbf{r}, \mathbf{p}')$ 是相空间分布函数, $\tau = 1/2(-1/2)$ 对应于中子(质子), 且 $\sigma = 4/3$. 参数 A_u , A_l , $C_{\tau, \tau'}$, $C_{\tau, \tau}$ 和 Λ 的选取要求满足下述条件: 能够给出对称核物质的经验饱和点性质和正常核物质密度处对称能的经验值 $30 \pm 4 \text{ MeV}$ 以及对称核物质在正常密度下的压缩系数 211 MeV ; 并且使动量相关单粒子势 $U(\rho, \delta, \mathbf{p}, \tau)$ 的同位旋标量部分符合 Gogny-Hartree-Fock 或者 Brueckner-Hartree-Fock 的理论预言. $A(x)$ 与 x 的关系式为

$$A_u = -95.98 - x \frac{2B}{\sigma+1}, \quad A_l = -120.57 + x \frac{2B}{\sigma+1}, \quad (3)$$

其中 $B = 106.35 \text{ MeV}$, $\Lambda = p_0^F$ 是对称核物质中核子的费米动量. $C_{\tau, \tau'} = -103.4 \text{ MeV}$, $C_{\tau, \tau} = -11.7 \text{ MeV}$. 方程 (2) 右端后两项是描述具有同位旋为 τ 的核子在与背景场中同位旋为 τ 和 τ' 的核子相互作用时获得的单粒子势的动量相关部分. 参数 x 的引入是为了模拟不同的微观或者唯象多体理论预言的对称能 $E_{\text{sym}}(\rho)$ 对密度的依赖性. 改变单粒子势 $U(\rho, \delta, \mathbf{p}, \tau)$ 中的参数 x , 就能得到具有不同密度依赖的对称能. 本文计算中选用两个参数, 分别是 $x = 1$ 和 $x = -1$. 图 1 给出了上述两个不同参数值所对应的对称能的密度依赖性. 从图 1 可以看出, 两种对称能在正常核物质密度处具有相同的值, 这是由单粒子势参数化所满足的条件所确定的. 探测对称能的密度依赖性需要探索敏感于对称能的物理观测量. 本文中所用探测对称能的探针是前平

衡发射核子中-质比. 前平衡核子发射是指在反应达到热平衡前核-核碰撞所发射的所有自由核子.

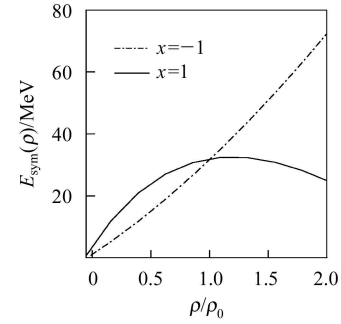


图 1 不同参数 x 对应的密度依赖的对称能 (ρ_0 为正常核物质密度)

3 结果与讨论

我们的研究是以 $^{132}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ 反应系统为例在 $x = 1$ 和 $x = -1$ 两种不同对称能情况下自由中-质比随入射能的变化关系, 以便了解自由中-质比对对称能的敏感程度以及给出利用自由中-质比研究对称能密度依赖性的较为合适的碰撞能量.

研究对称能首先要知道碰撞系统在反应过程中能够达到的最大密度. 图 2 是以参数 $x = -1$ 为例在不同入射能情况下所能达到的最大中心密度. 由图 2 中可以看出, 对于我们所考虑的入射能量范围, 最大中心密度均大于 2 倍的正常核物质密度; 而且最大中心密度随入射能增大而增大. 这是因为入射能越高, 核物质在反应区压缩得越厉害, 最大中心密度就会越高. 此外, 还可以看出, 高密区的持续时间随着入射能的增大而减小, 这是因为入射能越高, 核反应过程就越迅速.

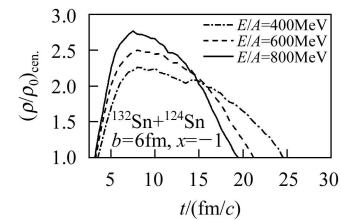


图 2 $^{132}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ 反应系统在 $b = 6 \text{ fm}$, 碰撞能量分别为每核子 400 MeV , 600 MeV 和 800 MeV 时对应的最大中心密度

将局域密度小于 $1/8$ 正常核物质密度的核物质定义为自由核子. 图 3 是 $^{132}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ 碰撞系统在碰撞参数 $b = 6 \text{ fm}$, 入射能量分别为每核子 400 MeV , 600 MeV , 800 MeV 的自由核子随快度的变化关系. 首先, 可以看出中快度自由中子发射数较敏感于对称能, 而自由质子数在 3 种入射能情况下均不敏感于对称能. 这是因

为质子受到的库仑作用弱化了对称势的作用. 其次, 中快度发射自由中子数在硬的对称能 ($x = -1$) 情况下要比软的对称能情况 ($x = 1$) 下大. 这是因为在高密情况下, 对称能越硬, 中子受到的排斥力越强, 所以越硬的对称能越导致中子更容易发射. 最后, 自由中子、质子数随着入射能量的增高而增加. 这是因为入射能量越高, 如图2所示核物质在压缩区的最大中心密度越大, 核-核压缩越厉害, 所以中快度发射核子数越多.

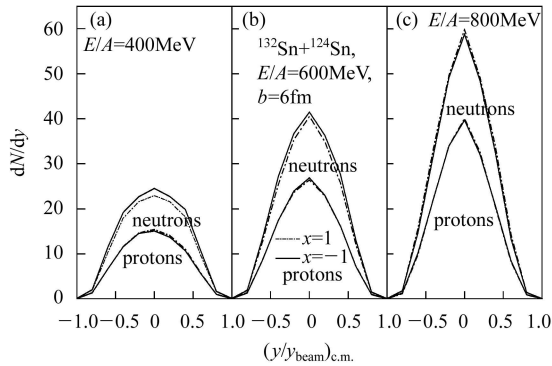


图3 $^{132}\text{Sn}+^{124}\text{Sn}$ 反应系统在 $b=6\text{fm}$, 碰撞能量分别为每核子 400MeV , 600MeV 和 800MeV 时发射的自由中子、质子的快度分布

图4给出了在3种碰撞能量和两种对称势作用下中快度中-质比随横动量的变化关系. 从图上可以看出, 在3种入射能量情况下, 低横动量发射核子中-质比均高于高横动量发射核子中-质比, 同时还可以看出低横动量端的发射核子中-质比对对称能的敏感性高于高横动量端的发射核子中-质比. 这是由于发射质子受到库仑作用, 自由质子相对于中子将移向高横动量端, 使得低横动量端自由中-质比很高. 同时, 由于对称势的动量依赖性, 使得高横动量端自由中-质比相对于低横动量端自由中-质比对对称能的敏感性降低. 我们在文献[17]中知道对称势是随着核子动量的增大而降低, 这一点是与从核子-核子散射数据中提取出来的 lane 势是一致的. 当然, 对称势也是密度依赖的, 一般来说, 高横动量核子来自于对称势较强的高密区. 然而, 如果对称势的动量依赖性大于它的密度依赖性时, 低横动量的核子相对于高横动量的核子更敏感于对称势, 就如我们观察到的一样. 其次, 在3种不同入射能量情况下, 硬的对称能 ($x = -1$) 情况下发射核子中-质比强度大于软的对称能 ($x = 1$) 情况下的发射核子中-质比, 这是因为硬的对称能对应的对称势对中

子(质子)具有较强的排斥力(吸引力), 因而导致较大的发射核子中-质. 软的对称能具有较小的对称势, 对中子(质子)具有较弱的排斥力(吸引力), 给出的发射核子中-质比较小. 第三, 当入射能量较高时, 两种对称能对应的发射核子中-质比差别在高横动量端的差别很小而在低横动量端比较大(即发射核子中-质比对对称能的敏感性较高). 这主要是由于如前所述的对称势的动量依赖性造成的. 另一方面, 中能重离子碰撞过程实际上是一个非常复杂的动力学过程, 平均场和同位旋相关的核子-核子碰撞散射是中能重离子反应动力学中两个基本动力学因素. 入射能量越高, 对称势效应相对于核子碰撞散射效应越小, 所以两种不同对称能作用下的核子发射中-质比强度差随入射能量的增大而变小. 图4中的一些涨落是由于统计误差造成的.

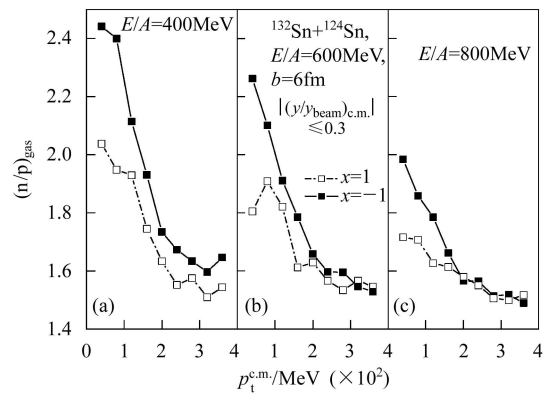


图4 $^{132}\text{Sn}+^{124}\text{Sn}$ 反应系统, 在 $b=6\text{fm}$, 碰撞能量分别为每核子 400MeV , 600MeV 和 800MeV 时中快度中-质比的横动量分布

4 结论

利用同位旋-动量依赖的相对论强子运输模型 IBUU04, 研究了 $^{132}\text{Sn}+^{124}\text{Sn}$ 反应系统在 $b=6\text{fm}$, $E/A=400\text{MeV}$, 600MeV 和 800MeV 3种入射能情况下发射核子中-质比对于对称能的依赖关系. 我们发现, 在探测对称能的高密行为时, 低横动量端的自由核子中-质比对对称能的敏感性高于高横动量端的核子, 高横动量端的自由核子中-质比对对称能的敏感性随入射能量的增大而降低, 在入射能量约为每核子 400MeV 的情况下, 发射核子中-质比对对称能最敏感.

参考文献(References)

- 1 Danielewicz P, Lacey R, Lynch W G. *Science*, 2002, **298**: 1592
- 2 Lattimer J M, Prakash M. *Phys. Rep.*, 2000, **333**: 121
- 3 Toro M Di et al. *Nucl. Phys.*, 2001, **A681**: 426c
- 4 Prakash M et al. *Phys. Rep.*, 1997, **280**: 1
- 5 Myers W D, Swiatecki W J. *Nucl. Phys.*, 1996, **A81**: 1
- 6 Pomorski K, Dudek J. *Phys. Rev.*, 2003, **C67**: 044316
- 7 LI B A, KO C M, REN Z Z. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, **78**: 1644
- 8 TAN W P et al. *Phys. Rev.*, 2001, **C64**: 051905
- 9 XU H S et al. *Phys. Lett.*, 2000, **85**: 716
- 10 CHEN L W, KO C M, LI B A. *Phys. Rev.*, 2004, **C68**: 054606
- 11 SHI L, Danielewicz P. *Phys. Rev.*, 2003, **A68**: 064604
- 12 LI B A. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, **88**: 192701; *Nucl. Phys.*, 2002, **A708**: 365
- 13 YONG G Ch. *Chin. Phys. Soc.*, 2005, **14**: 1549
- 14 LI B A. *Phys. Rev.*, 2000, **C64**: 054604
- 15 Bertsch G F. Subal Das Gupta. *Phys. Reorts.*, 1988, **160**(4): 189—233
- 16 LI B A et al. Talk Given at the 21st Winter Workshop on Nuclear Dynamics. USA February 5—12, 2005
- 17 LI B A, Champak B. Das Subal Das Gupta and Charles Gale. *Nucl. Phys.*, 2004, **A563—584**

Probing the High Density Behavior of the Symmetry Energy by Using the Free Neutron-Proton Ratio *

ZHANG Fang^{1,2,1)} ZUO Wei^{1,2,3,4} YONG Gao-Chan^{1,3}

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

2 (Department of Physics and Technology of Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

3 (Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

4 (Center of Theoretical Physics and Interdisciplinary Physics, Lanzhou 730000, China)

Abstract Based on the isospin- and momentum-dependent transport model IBUU04, the transverse momentum distributions of the free neutron-proton ratio in the $^{132}\text{Sn}+^{124}\text{Sn}$ reaction system at mid-central collisions with beam energies of 400/A MeV, 600/A MeV and 800/A MeV are studied by using two different symmetry energies. It is found that the free neutron-proton ratio as a function of the transverse momentum at the mid-rapidity is very sensitive to the density dependency of the symmetry energy especially at incident energies around 400/A MeV.

Key words isospin- and momentum-dependent transport model IBUU04, free neutron-proton ratio, symmetry energy

Received 31 July 2006, Revised 7 February 2007

* Supported by NSFC (10575119, 10235030), Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences (KJXC3-SYW-N2), Major State Basic Research Development Program (G2000077400) and Ministry of Science and Technology of China (2002CAB00200)

1) E-mail: zhangfang03@st.lzu.edu.cn