第 55 卷 第 11 期 2006 年 11 月
1000-3290/2006/55(11)/5769-05

物 理 学 报
ACTA PHYSICA SINICA

Vol.55,No.11,November,2006
©2006 Chin. Phys. Soc.

利用中-质微分流探测对称能的高密行为*

张 芳[1)†] 左 维[2)3)] 雍高产[2)3)]

1)(兰州大学物理与技术科学学院,兰州 730000)
2)(中国科学院近代物理研究所,兰州 730000)
3)(中国科学院研究生院,北京 100049)

(2006 年 1 月 16 日收到;2006 年 3 月 31 日收到修改稿)

基于同位旋和动量依赖的强子输运模型 IBUU04,研究了 $^{132}Sn + ^{124}Sn$ 在三种不同碰撞能量、两种不同对称能作用下,中-质微分流随快度的变化关系. 发现中-质微分流的强度随碰撞能量的增大而增强. 在碰撞能量为 400 MeV 每核子时,中-质微分流对对称能最为敏感.

关键词:重离子碰撞,中-质微分流,对称能
PACC:2500,2570

1. 引 言

极端条件下的核物理是当今核物理的一个热门课题. 人们对核物质的研究已经扩展到了非对称核物质. 有关非对称核物质研究的一个基本问题是核物质状态方程的同位旋依赖性,特别是关于对称能的密度依赖性问题. 目前从原子核的巨共振研究和核反应中流的分析等可知,对称核物质的压缩系数约为 200—250MeV,但是人们对丰中子核物质状态方程的研究还很少. 观测中子星和超新星爆炸可以获得部分信息,但是这类事件毕竟太少. 最近放射性束物理的开展掀开了核科学的新篇章[1—4]. 中高能重离子碰撞提供了在实验室里研究高温高密核物质性质的唯一途径. 有关同位旋非对称核物质状态方程尤其是对称能密度依赖性的探索不仅有助于理解重核和不稳定核结构(如重核的中子皮厚度等),而且对于研究天体物理中的一些关键问题(如中子星的组分和冷却机理、中子星的质量-半径关系、中子星中的 Kaon 凝聚、超新星爆发机理、超新星形成过程中的核形成等等)至关重要. 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关系尤其是对称能的高密度行为仍存在着很大的差别. 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,从而找出对对称能较为敏感的物理可观测量. 目前理论上预言的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[5],同位旋相分化(fractionation)[6,7],同位旋扩散[8,9],π^-/π^+ 比率[4]以及中-质微分流[10]和质子微分椭圆流[11]等等. 另外,还需要知道各种敏感观测量在多大的入射能量下、能谱的哪个区域对对称能比较敏感等等. 本文的工作就是研究中-质微分流对对称能最为敏感的最佳入射能量范围. 我们发现在碰撞能量约为每核子 400 MeV 时,中-质微分流对于对称能最为敏感.

2. 理论模型

我们的研究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解,同时考虑了泡利阻塞的同位旋效应[12].

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[13]

* 国家自然科学重点基金(批准号:10575119,10235030),中国科学院知识创新工程重要方向性项目(批准号:KJCX2-SW-N02),国家重点基础研究发展规划项目(批准号:G2000077400),国家科技部重大前期研究专项基金(批准号:2002CAB00200)资助的课题.

† E-mail:zhangfang03@st.lzu.edu.cn

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

其中 $E(\rho,\delta=0)$ 是对称核物质的每核子能量；$E_{\rm sym}(\rho)$ 是对称能；$\rho=\rho_{\rm n}+\rho_{\rm p}$ 是重子数密度，$\rho_{\rm n}$ 和 $\rho_{\rm p}$ 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)[14]，即

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

其中 $f_\tau(\boldsymbol{r},\boldsymbol{p})$ 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：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 ± 4MeV 以及对称核物质在正常密度下的压缩系数 211MeV；并且使动量相关单粒子势 $U(\rho,\delta,\boldsymbol{p},\tau)$ 的同位旋标量部分符合 Gogny-Hartree-Fock 或者 Brueckner-Hartre-Fock 的理论预言. $A(x)$ 与 x 的关系式为

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

其中 $B=106.35$MeV，$\Lambda=p_0^{\rm F}$ 是对称核物质中核子的费米动量. $C_{\tau,\tau'}=-103.4$MeV，$C_{\tau,\tau}=-11.7$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 的引入是为了模拟由各种不同的微观或者唯象多体理论预言的对称能 $E_{\rm sym}(\rho)$ 对密度的依赖性. 改变单粒子势 $U(\rho,\delta,\boldsymbol{p},\tau)$ 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 $x=0$ 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关系. 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. 我们知道横向集体流主要是由于反应中心区的挤压效应导致的，而中-质微分流描述的是中子和质子集体流间的差异，与对称能直接相联系. 因而，本文选取中-质微分流做为研究对称能的敏感探针.

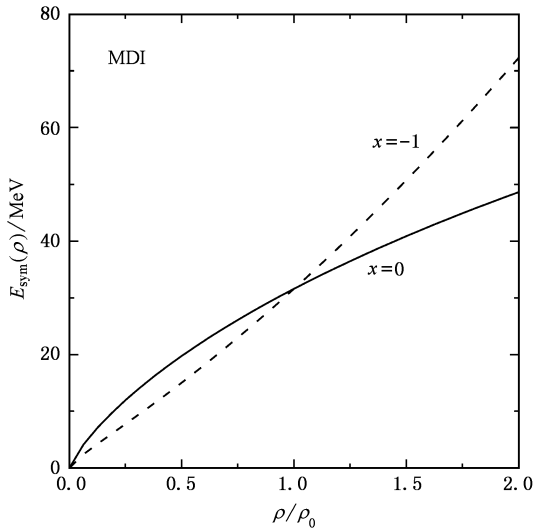


图 1 不同参数 x 对应的密度依赖核物质对称能(ρ_0 为正常核物质密度)

3. 结果与讨论

我们以 ^{132}Sn + ^{124}Sn 反应系统为例研究在 $x=0$ 和 $x=-1$ 两种不同对称能作用下中-质微分流($F_x^{\rm n-p}$)的强度随入射能的变化关系，以便了解中-质微分流对对称能的敏感程度以及利用中-质微分流研究对称能及其密度依赖性的较为合适的碰撞能量.

对称能是密度依赖的，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.

为了更好地研究中-质微分流，首先讨论一下核子横向流. 图 3(a)，(b)和(c)分别对应于入射能量为每核子 400 MeV，600 MeV 和 800 MeV 时的计算结果，且都考虑了参数 $x=0$ 和 $x=-1$ 两种情况. 首先可以看出：不论是对于软的对称能($x=0$)，还是对于硬的对称能($x=-1$)，质子横向流强度都大于中子流强度，这主要是因为质子受到较强的库仑势作用的缘故. 其次，在三种不同入射能情况下，软的

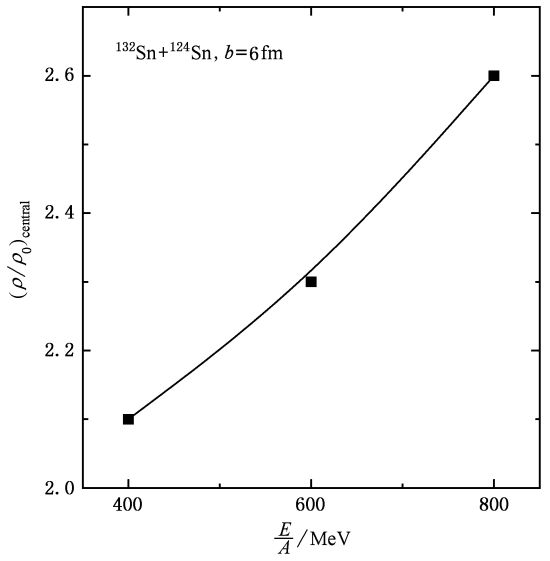


图 2　^{132}Sn + ^{124}Sn **反应系统在** $b = 6$ fm**，碰撞能量分别为每核子** 400 MeV**，** 600 MeV **和** 800 MeV **时对应的最大中心密度**

对称能($x = 0$)对应的质子流强度大于硬的对称能($x = -1$)对应的质子流强度. 这是因为在高密情况下硬的对称能($x = -1$)对应的对称势对质子的吸引力大于软的对称能($x = 0$)对应的对称势对质子的吸引力. 第三，不同对称能作用下的中子流和质子流强度在三种不同入射能情况下差别都很小，这是因为高密核物质的压强主要由核物质状态方程的同位旋对称部分产生，而非对称部分即状态方程的同位旋非对称修正部分相对较小，如方程(1)所示；另外，如图 1 所示，我们选取的两种对称能($x = 0$ 和 $x = -1$)的数值在高密情况下差别不是很大. 图 3 中结果还表明：两种对称能作用下的中子流和质子流强度均随能量增大而增强，这一点在中心快度区附近尤为明显. 我们知道，横向流的形成及其强度是平均场效应与核子-核子碰撞散射效应相互竞争的结果. 随着入射能量的增加，核子-核子碰撞越来越剧烈，核子-核子散射产生的排斥作用越大，所以核子流强度也越来越强；而平均场效应尤其是对称势效应随着入射能量的增加变得不再重要.

因为对称势$(U_n - U_p)/2\delta$ 与标量势$(U_n + U_p)/2$ 相比很小，所以研究同位旋依赖的状态方程所选择的敏感观测量最好使其对标量势的依赖性最小而对对称势的依赖性最大. 本文选取中-质微分流做为研究对象：

$$F_x^{n-p} = \frac{1}{N(y)} \sum_{i=1}^{N(y)} p_{x_i} \tau_i , \qquad (4)$$

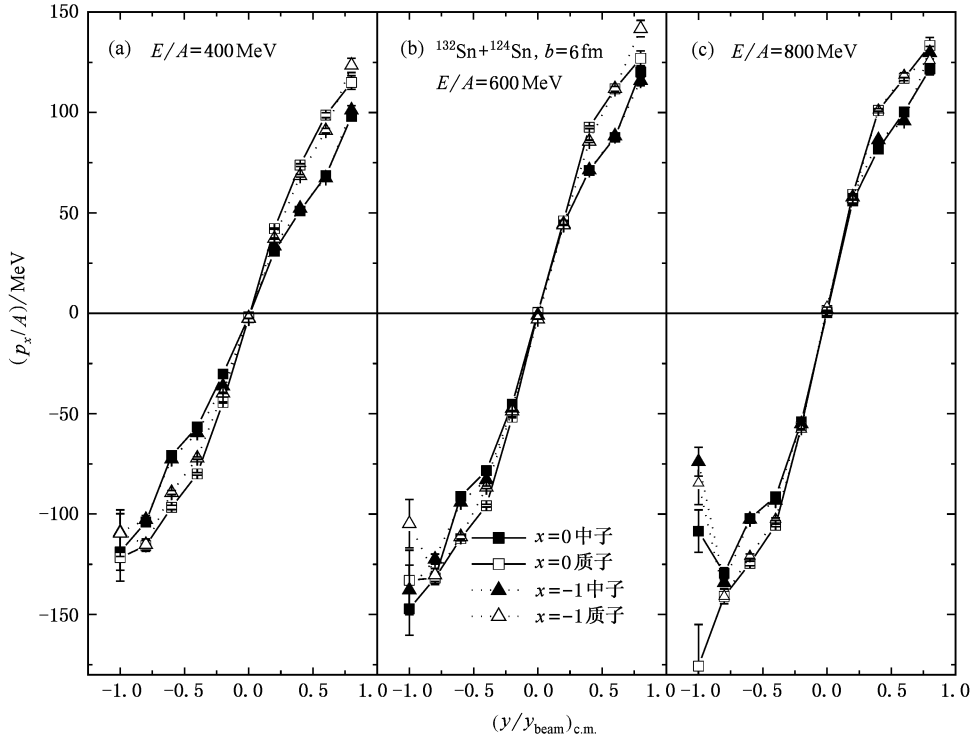


图 3　^{132}Sn + ^{124}Sn **反应系统在** $x = 0$ **和** $x = -1$ **两种情况下，** $b = 6$ fm**，碰撞能量分别为每核子** 400 MeV**，** 600 MeV **和** 800 MeV **时核子横向流随快度变化情况**

其中 $N(y)$ 是快度为 y 的总自由核子数，$\tau_i = 1$ 和 $\tau_i = -1$ 分别对应于中子和质子. 一方面，这种中-质微分流放大了对称势的贡献；另一方面，它又显著减弱了标量势的影响.

图 4 给出了在不同碰撞能量和两种对称势作用下中-质微分流随快度的变化关系. 由图 4 可以看出，在三种不同的入射能量下，采用硬的对称能(参数 $x = -1$)得到的中-质微分流强度均大于相应的采用软的对称能(参数 $x = 0$)得到的中-质微分流强度. 造成这种结果的原因很显然：硬的对称能具有较大的对称势，对中子(质子)具有较强的排斥力(吸引力)，因而给出的中-质微分流强度比较大. 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)，给出的中-质微分流强度比较小. 其次，当入射能量较高时，中-质微分流强度比较大，但是采用两种不同的对称能所得到的中-质微分流强度的差别较小. 由(4)式可知：中-质微分流是中子流与质子流强度之差引起的. 入射能量越高，对称势效应相对于核子碰撞散射越小，所以两种不同对称能下的中-质微分流强度差随入射能量增大而变小. 我们还计算了入射能量为每核子 200 MeV 和 300 MeV 的中-质微分流，发现对称能效应不比在入射能量为每核子 400 MeV 情况下明显. 这是因为当入射能量为 300 MeV 和 200 MeV 时，最大中心密度较小，由图 1 可知，高密情况下，两种对称能数值差随密度降低而变小，故而对称能效应不再明显. 所以利用中-质微分流探测对称能的高密行为，对于 $^{132}Sn + ^{124}Sn$ 反应系统而言，最佳碰撞能量大约为每核子 400 MeV. 这一结论与文献[15]是一致的.

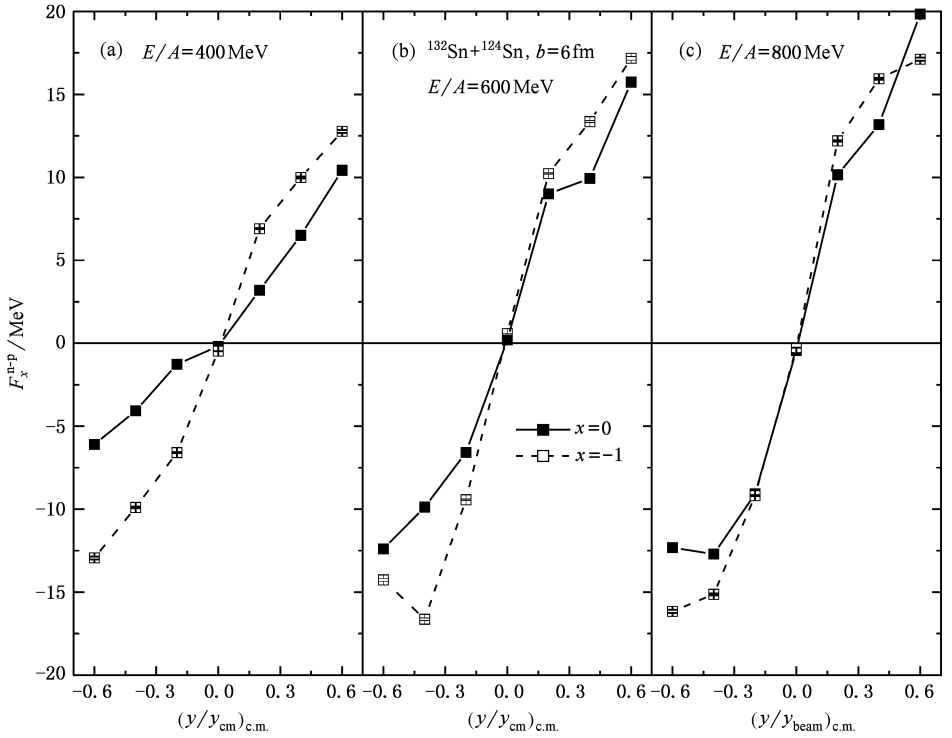


图 4 $^{132}Sn + ^{124}Sn$ 反应系统，在 $b = 6$ fm，碰撞能量分别为每核子 400 MeV，600 MeV 和 800 MeV 时中-质微分流随快度变化的关系

4. 结 论

利用同位旋-动量依赖的相对论强子输运模型 IBUU04，研究了 $^{132}Sn + ^{124}Sn$ 反应系统在 $b = 6$ fm，$E/A = 400$ MeV，600 MeV 和 800 MeV 三种入射能情况下中-质微分流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，在入射能量约为每核子 400 MeV 的情况下，中-质微分流对对称能最敏感.

[1] Lattimer J M, Prakash M 2000 *Phys. Rep.* **333** 121
[2] Toro M Di, Baran V, Colonna M 2001 *Nucl. Phys.* A **681** 426c
[3] Li B A, Ko C M, Bauer W 1998 *Topical Re. Koview, Int. Jour. Mod. Phys.* E **7** 147
[4] Li B A 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 192701
Li B A 2002 *Nucl. Phys.* A**708** 365
[5] Li B A, Ko C M, Ren Z Z 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 1644
[6] Tan W P, Li B A, Donangelo R *et al* 2001 *Phys. Rev.* C **64** 051901
[7] Xu H S, Tsang M B, Liu T X 2000 *Phys. Lett.* **85** 716
[8] Chen L W, Ko C M, Li B A 2004 *Phys. Rev.* C **68** 054606
[9] Shi L, Danielewicz P 2003 *Phys. Rev.* A **68** 064604
[10] Li B A 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 4221
[11] Li B A *Phys. Rev.* C **64** 054604
[12] Bertsch G F, Das Gupta S. 1988 *Phys. Reorts.* **160** 189
[13] Li B A, Chen L W, Ko C M *et al Talk given* at the 21st Winter Workshop on Nuclear Dynamics, 2005, USAFebruary 5—12
[14] Li B A, Champak B, Das Subal, Das Gupta, Charles Gale 2004 *Nucl. Phys.* A 563—584
[15] Li Q F, Li Z X, Stoecker Horst, nucl-th/0603050

Probing the high density behavior of the symmetry energy by using the neutron-proton differential flow*

Zhang Fang[1)†]　Zuo Wei[2)3)]　Yong Gao-Chan[2)3)]
1)(*Department of Physics and Technology, Lanzhou University, Lanzhou* 730000, *China*)
2)(*Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou* 730000, *China*)
3)(*Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)
(Received 16 January 2006; revised manuscript received 31 March 2006)

Abstract

Based on the isospin- and momentum-dependent transport model IBUU04, we investigated the neutron-proton differential flow in the $^{132}Sn + ^{124}Sn$ mid-central collisions at beam energies of 400MeV/A, 600MeV/A and 800MeV/A by adopting two different symmetry energies. It was found that the neutron-proton differential flow as a function of rapidity is very sensitive to the density dependence of symmetry energy, especially at incident energies around 400MeV/A.

Keywords: heavy ion collisions, neutron-proton differential flow, symmetry energy
PACC: 2500, 2570

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10575119, 10235030), the Chinese Academy of Science Knowledge Innovation Project (Grant No. KJCX2-SW-N02), the Major State Basic Research Development Program (Grant No. G2000077400) of China and the Chinese Ministry of Science and Technology (Grant No. 2002CAB00200).

† E-mail: zhangfang03@st.lzu.edu.cn