

质子椭圆流与对称能的密度依赖性*

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 IBUU04 模型, 研究了 $^{132}\text{Sn}+^{124}\text{Sn}$ 碰撞系统中的质子椭圆流对对称能的敏感关系. 研究发现入射能量从每核子 400MeV 到 800MeV 时质子椭圆流在低横动量端对对称能的敏感性高于高横动量端, 同时发现随着入射能量的增大, 质子椭圆流对对称能的敏感性在降低. 在研究入射能量范围内, 当入射能量为每核子 400MeV 左右时质子椭圆流对对称能最为敏感.

关键词 对称能 椭圆流 输运模型

1 引言

迄今为止, 人们对于高温高密核物质尤其是丰中子核物质性质知道还是很少. 同位旋依赖的核物质状态方程对丰中子核物质性质的研究非常重要. 非对称核物质状态方程, 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形成等等, 然而不同的微观(唯象)理论所预言的对称能在低密、尤其是在高密情况下有着很大的差别. 重离子碰撞, 尤其是放射性核束引起的碰撞, 为研究对称能的密度依赖性提供了一个良好的机遇^[1, 2]. 对对称能敏感的探针理论上已经确定的有: 前平衡核子发射的中-质比^[3], 同位旋相分化^[4, 5], 同位旋扩散^[6, 7], π^-/π^+ 比率^[8] 以及中-质微分流^[9] 和质子微分椭圆流^[10] 等等. 李宝安等人分别研究了在高端^[11, 12] (入射能量为每核子几个 GeV) 和低端^[13] (入射能量为每核子几十个 MeV) 的质子微分椭圆流与状态方程的关系. 研究发现非中心碰撞中重离子碰撞产生的粒子各向异性角向流(即椭圆流)敏感

于状态方程. 在本文中, 将研究椭圆流在不同碰撞情况下对对称能的依赖关系.

2 理论模型

我们的研究是建立在同位旋依赖的输运模型 IBUU04 基础上, 主要考虑了单粒子势尤其是对称势的动量相关性. 其中的粒子不但包括核子, 也包括 Δ , N^* , π 介子. 弹靶的质子和中子初始密度分布由相对论平均场理论计算得出, 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, 同时考虑了泡利阻塞^[14], 以及单粒子势的同位旋依赖性.

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^[15]

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

$E(\rho, \delta = 0)$ 是对称核物质中单核子能量, $E_{\text{sym}}(\rho)$ 是对称能. $\rho = \rho_n + \rho_p$ 是重子密度, ρ_n, ρ_p 分别是中子和质子密度. 参数化的单粒子势^[16] (MDI) 为:

2006-07-27 收稿, 2007-03-28 收修改稿

* 中国科学院知识创新工程重要方向性项目 (KJ951-A1-20-02), 国家重点基础研究发展规划项目 (G2000077400), 国家自然科学基金 (10575119, 10235030) 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

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

$\tau = 1/2 (-1/2)$ 分别对应于中子和质子, 且 $\sigma = 4/3$. $f_{\tau}(\mathbf{r}, \mathbf{p})$ 是相空间分布函数, 参数 $A_u, A_l, C_{\tau, \tau'}, C_{\tau, \tau}$ 和 Λ 的选取要使动量依赖的 $U(\rho, \delta, \mathbf{p}, \tau)$ 适合 Gogny Hartree-Fock 或者 Brueckner-Hartree-Fock 的计算, 以及对对称核物质饱和点的性质和正常核物质密度 (ρ_0) 下大约 32MeV 的对称能以及对称核物质在正常密度下的压缩系数 211MeV, x 参数的引入是为了模拟不同的微观或者唯象多体理论对密度依赖的对称能 $E_{\text{sym}}(\rho)$ 的不同预言. $A(x)$ 与 x 的关系式为

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

$B = 106.35\text{MeV}$, $\Lambda = p_0^{\text{F}}$ 是核子在对称核物质中的费米动量. $C_{\tau, \tau'} = -103.4\text{MeV}$, $C_{\tau, \tau} = -11.7\text{MeV}$, 这两项是描述具有同位旋为 τ 的核子在与同位旋为 τ' 或者为 τ 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. 从单粒子势 $U(\rho, \delta, \mathbf{p}, \tau)$ 可以获得矢量势 (也即对称势) $(U_n - U_p)/2\delta$. 改变单粒子势 $U(\rho, \delta, \mathbf{p}, \tau)$ 中的参数 x , 就能得到不同密度依赖的对称能. 本文中选用两个参数, 分别是 $x=0$ 和 $x=-1$. 图 1 是不同参数对应的密度依赖的对称能. 从图 1 可以看出, 两种对称能在正常核物质密度时具有相同的值, 这是由单粒子势参数化所满足的条件所确定的. 我们还可以看出随着密度的增加两种对称能的差别越来越大.

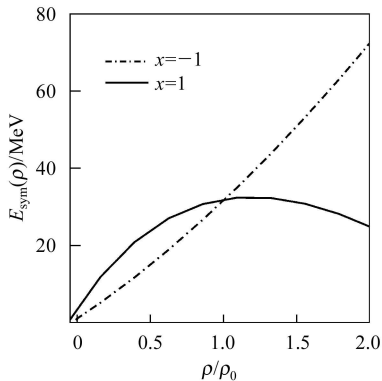


图 1 不同参数 x 对应的密度依赖核物质对称能 (ρ_0 为正常核物质密度)

3 结果和讨论

基于输运理论, 研究对称能的高密行为是通过研究对对称能敏感的观测量来实现的. 本文的工作是利用椭圆流来研究对称能的高密行为. 在核-核碰撞形成高密核物质后, 核子间的短程相互作用会使产生的粒子形成某种集体运动, 这种集体运动就是集体流. 一般来说, 中能重离子碰撞中的集体流主要受到平均场和核子散射两种作用. 随着入射能量的增大, 核子散射作用越来越强, 同时, 平均场效应会变小. 椭圆流是集体流中的一种, 它又叫方位异性流, 发生于重离子的非中心碰撞, 是由压缩核物质早期的垂直反应平面的挤压发射与晚些时候“旁观者”走后的平面内发射二者的竞争造成的. 由于垂直反应平面的挤压发射与平面内发射哪个占优势取决于高密核物质压缩膨胀时间与“旁观者”经过反应区二者时间的比较, 故入射能的大小不同造成椭圆流的正负不同. 取碰撞参数方向为 x 轴方向, 入射束流方向为 z 轴方向, 椭圆流一般定量的表示为 $\langle \cos 2\varphi \rangle^{[17]}$, $\varphi (\tan \varphi = p_y/p_x)$ 是横平面内的相对于 x 轴的方位角, 椭圆流可以等价的表示为

$$\langle v_2 \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{p_{ix}^2 - p_{iy}^2}{p_{it}^2}, \quad (4)$$

p_{ix} 和 p_{iy} 以及 p_{it} 是发射粒子的横动量在 x, y 方向上的分量及横动量大小. N 是总发射粒子数. 椭圆流一般在中间快度内计算, 这是因为大快度包括了较多的“旁观者”粒子, 中间快度才反应了“参加者”的挤压发射. 当 $\langle v_2 \rangle$ 为负值时表示平面外发射占优势, 为正值时表示平面内发射占优势.

我们把局域密度小于正常核物质密度的 ($\rho_0/8$) 质子定义为自由质子. 为了更好的了解椭圆流对对称能的敏感性, 首先来研究一下中心快度区的自由质子的分布. 图 2 是以参数 $x=-1$ 为例, 自由质子在不同入射能量时中心快度区的分布. 从图中可以看出中心快度区的自由质子发射数是随着入射能量的增大而增多的.

图 3 是 $b=6\text{fm}$, $^{132}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ 碰撞系统在碰撞能量分别为每核子 400MeV, 600MeV 和 800MeV 质子发射方位角的在两种对称能作用下的分布. 从图 3 中可以看出中心快度区自由质子发射在 90° 和 270° 有增强, 这说明垂直反应平面的质子发射占优势. 另外, 软的对称能 ($x=1$) 对质子的弱吸引作用造成垂直反应平面的质子发射数比硬的对称能 ($x=-1$) 多. 除此之外从

图3中还可以看出随着入射能量的增大, 垂直反应平面的质子发射数增多. 这是因为入射能量越大, 产生的核物质的中心密度越大, 对称能效应越大, 软的对称能对质子的吸引越弱. 另外入射能量越大, 核-核碰撞时核子散射越多, 所以核子发射数就增多.

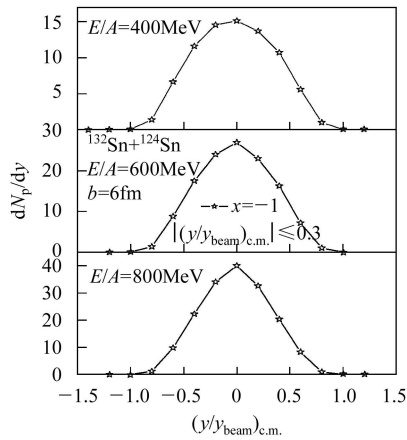


图 2 $^{132}\text{Sn}+^{124}\text{Sn}$ 碰撞系统在 $b=6\text{fm}$, 3 种入射能量情况时自由质子在中心快度区的分布

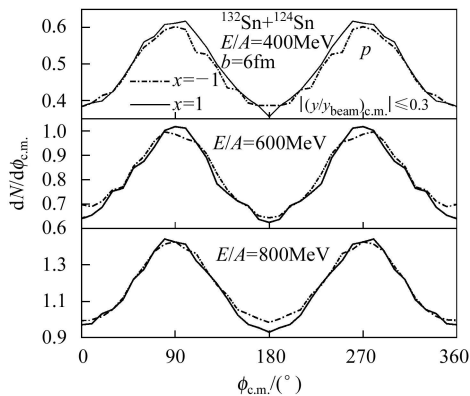


图 3 不同对称能作用下, $^{132}\text{Sn}+^{124}\text{Sn}$ 碰撞系统在 3 种碰撞能量时质子发射的方位角分布

前面已经讨论了自由质子发射随快度和方位角的变化关系, 现在图 4 中给出了在不同入射能量和两种对称势作用下, 碰撞参数 $b=6\text{fm}$ 时, $^{132}\text{Sn}+^{124}\text{Sn}$ 碰撞系统的质子椭圆流随横动量的变化关系. 从图 4 中可以看出 3 种碰撞能量时, 中心快度区的质子椭圆流在低横动量端对对称能都很敏感. 首先, 硬的对称能

($x = -1$) 对应的质子椭圆流小于软的对称能 ($x = 1$) 对应的质子椭圆流. 这是由硬的对称能对质子的强吸引造成的. 其次, 质子椭圆流基本上都是负值, 即垂直反应平面核子发射占优势. 随着入射能量的增大, 质子椭圆流值变小. 这是因为随着入射能量的增加粒子发射的异性度减小 ($R=N_{90}/N_{180}$, R 从 1.5 到 1.4) 造成的, 如图 3. 最后, 质子椭圆流对对称能的敏感程度随着入射能量的增大而降低. 这是因为随着入射能量的增大, 核子散射逐渐占优势, 而平均场作用逐渐减小. 对称势作用也逐渐减小, 所以质子椭圆流随着入射能量的增大变得对对称能不再敏感. 由于平均场效应在高能情况下不明显, 因此研究入射能量低于 $400\text{MeV}/A$ 时的对称能效应更为合适.

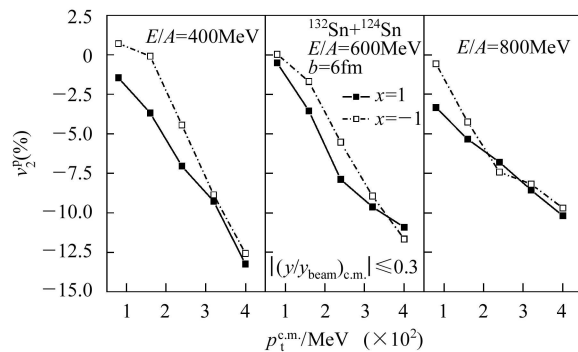


图 4 $^{132}\text{Sn}+^{124}\text{Sn}$ 碰撞系统, $b=6\text{fm}$, 两种对称能作用下的质子椭圆流在不同碰撞能量时随横动量的分布

4 结论

利用同位旋和动量相关的强子运输模型 IBUU04, 在 3 种不同入射能量情况下研究了 $\text{Sn}+\text{Sn}$ 碰撞系统中的质子椭圆流在中心快度区随横动量的变化关系, 研究发现, 质子椭圆流非常敏感于对称能, 且质子椭圆流对对称能的敏感性随入射能量的增大而减低 (在我们的入射能量研究范围内), 在入射能量为每核子 400MeV 左右时对对称能最为敏感. 这样质子椭圆流就成为在中能重离子碰撞中探测对称能的高密行为的一个有力探针.

参考文献(References)

- 1 LI B A, Ko C M, Bauer W. Int. Jour. Mod. Phys., 1998, **E7**: 147
- 2 LI B A. Phys. Rev. Lett., 2002, **88**: 192701; Nucl. Phys., 2000, **A708**: 365
- 3 LI B A, Ko C M, REN Z Z. Phys. Rev. Lett., 1997, **78**: 1644
- 4 TAN W P, LI B A, Donangelo R. Phys.Rev., 2001, **C64**: 051905
- 5 XU H S, Tsang M B, LIU T X et al. Phys. Rev. Lett., 2000, **85**: 716
- 6 CHEN L W, Ko C M, LI B A. Phys. Rev., 2004, **C68**: 054606
- 7 SHI L, Danielewicz P. Phys. Rev., 2003, **A68**: 064604
- 8 LI B A. Phys. Rev. Lett., 2002, **88**:192701; Nucl. Phys., 2002, **A708**: 365
- 9 LI B A. Phys. Rev. Lett., 2000, **85**: 4221
- 10 LI B A. Phys. Rev., 2001, **C64**: 054604
- 11 LI B A. Phys. Rev. Lett., 1999, **82**: 5004
- 12 LI B A. Phys. Rev., 1999, **C60**: 011901
- 13 ZHENG Yu-Ming. Phys. Rev. Lett., 1999, **83**: 2534—2536
- 14 Bertsch G F, Gupta S D. Phys. Rep., 1988, **160**:189—233
- 15 ZUO W, Bombaci I, Lombardo U. Phys. Rev., 1999, **C60**: 024605
- 16 LI B A, Das C B, Gupta S D et al. Nucl. Phys., 2004, **A735**: 563—584
- 17 Denielewicz P, Lacey R, Lynch W G. Science, 2002, **298**: 22

Probing the High Density Behavior of the Symmetry Energy by Using Proton Elliptic Flow^{*}

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 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 University, Lanzhou 730000, China)

Abstract Based on the isospin- and momentum-dependent transport model IBUU04, we calculated the reaction of the $^{132}\text{Sn}+^{124}\text{Sn}$ systems in semi-central collisions at beam energies of 400/AMeV, 600/AMeV and 800/AMeV by adopting two different density dependent symmetry energies. It was found that the proton differential elliptic flow as a function of transverse momentum is quite sensitive to the density dependence of symmetry energy, especially for the considered beam energy range. Therefore the proton differential elliptic flow may be considered as a robust probe for investigating the high density behavior of symmetry energy in intermediate energy heavy ion collisions.

Key words symmetry energy, proton differential elliptic flow, transport model

Received 27 July 2006, Revised 28 March 2007

^{*} Supported by Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences (KJCX3-SYW-N2), Major State Basic Research Development Program (G2000077400), National Natural Science Foundation of China (10575119, 10235030) and Chinese Ministry of Science and Technology (2002CAB00200)

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