

文章编号: 1007-4627(2009)02-0085-08

核物质对称能的高密行为研究^{*}

雍高产¹, 李宝安², 陈列文^{3,4}

(1 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000;

2 Department of Physics, Texas A&M University-Commerce, Commerce, Texas 75429-3011, USA;

3 上海交通大学理论物理研究所, 上海 200240;

4 兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 同位旋物理的主要任务之一是通过放射性核束引起的核反应来探索介质中有效核子-核子相互作用的同位旋依赖性, 尤其是同位旋相关的核物质状态方程, 即, 密度依赖的核物质对称能。由于对称能, 尤其是其高密行为, 对核物理学和天体物理学具有重要意义, 密度依赖的对称能在过去10年一直是中能重离子物理研究领域的主要焦点之一。近年来, 低密对称能的研究已经取得了重要进展, 而对称能的高密行为仍然很不确定。在理论方面, 人们提出了许多对高密对称能敏感的观测测量。实验方面, 关于对称能高密行为研究的实验计划已经展开, 世界各地正在建造的放射性核束装置为对称能的高密行为研究提供了新的机遇。基于IBUU输运模型综述了研究对称能高密行为的一些敏感观测测量及其最新进展, 以及所面临的挑战与机遇。

关键词: 核物质; 对称能; 高密行为

中图分类号: O571.42⁺³ **文献标识码:** A

1 引言

物理学的许多领域, 从凝聚态、天体物理到格点QCD都会涉及到核物质的性质, 与核物质性质相关的最基本和最重要的表述是核态方程^[1]。经过许多人近30年的艰苦努力, 通过对原子核巨共振^[2]、重离子碰撞中集体流数据^[3]以及K介子的阈下产生^[4]等的分析研究, 人们对对称核物质的状态方程已有了比较好的理解。然而, 对于同位旋非对称核物质的状态方程, 人们还知之甚少, 尤其是其高密行为。近年来随着日本的放射性核束工厂的建成, 德国耗资约10亿欧元的FAIR项目, 中国科学院近代物理研究所的HIRFL-CSR大科学工程、中国原子能科学研究所的BRIF二期工程, 以及美国的FRIB和NSCL/MSU的相继建设改造, 重离子物理开辟了一个崭新的领域, 即放射性核束物理。放射

性核束物理的发展, 极大地扩展了可进行研究的原子核的范围, 使得人们可以在极端同位旋条件下开展研究^[5]。非对称核物质状态方程, 尤其是其同位旋相关的部分, 即核物质的对称能, 是极端同位旋条件下核物理研究的一个重要研究方向, 其对研究星球的演化有重要意义。另外, 对称能对理解皮核、晕核的原子核奇异结构的产生机制也是十分关键的^[6-9]。

基于核多体理论, 人们可以给出非对称核物质状态方程的信息^[8]。然而, 不同的模型、甚至同一模型不同的参数给出十分不同的结果。特别是高密非对称核物质的对称能, 不同的模型甚至给出截然相反的趋势^[5]。例如, Zuo和Fuchs等人的理论模型显示, 对称能在高密情况下随密度的增加而增加, 而Wiringa和Krastev等人的理论则给出对称能在高

* 收稿日期: 2008-09-15; 修改日期: 2008-11-14

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10575071, 10575119, 10675082, 10710172); 上海启明星计划基金资助项目(06QA14024); 国家重点基础研究发展规划资助项目(2007CB815004); 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-05-0392); 教育部留学回国人员基金资助项目; US National Science Foundation Awards (PHY-0652548, PHY-0757839); Research Corporation under Award(7123); Texas Coordinating Board of Higher Education Award(003565-0004-2007)

作者简介: 雍高产(1974-), 男(汉族), 河南睢县人, 博士, 从事重离子核反应理论研究; E-mail: yonggaochan@impcas.ac.cn

密情况下会随着密度的增加会下降。这就促使实验与理论进行比较,以给非对称核物质状态方程提供信息,对理论模型提供约束。

核介质中强作用同位旋依赖性,尤其是对称能,对于研究不稳定核的结构具有重要意义,如重丰中子核 ^{208}Pb 的中子分布与中子皮的厚度明显地依赖于对称能^[9-12]。对称能也相应地影响重离子核反应的许多可观测量^[5, 13, 14],如 n/p , π^-/π^+ , $t/{}^3\text{He}$, 中等质量碎片的同位素产额比等等。一般来讲,对称能影响重离子核反应的观测量是重子、介子或者镜像核的同位旋多重性的比值或者差值^[15]。对称能还会影响到对称核物质压缩系数的精确研究^[16]。对称能对于天文学、宇宙学的研究,尤其是对于中子星的结构、演化以及超新星爆发,天体里的核合成研究等具有非常重要的意义^[17-23]。例如,对称能影响中子星里的中质比、中子星的冷却、演化机制,中子星的质量-半径关系。硬的对称能导致大的中质比、大的中子星半径、小的临界密度,易使中子星快冷却。

近年来,在饱和密度附近区域,对称能的研究已经取得了重要进展。中能重离子反应中同位旋弥散(isospin diffusion)数据的分析^[24-26]给出对称能的形式为: $E_{\text{sym}} \approx 31.6(\rho/\rho_0)^{0.69 \rightarrow 1.05}$ MeV。进一步的研究表明,这个约束与中能重离子反应中同位旋标度(isoscaling)数据^[27]以及关于Sn偶偶核巨单极共振的同位素相关性的实验数据^[28]是一致的。这些相互独立而又自洽的关于对称能的实验约束代表了目前人们关于对称能亚饱和密度行为的最新认识。当然,这些结论还需要进一步的更多独立的实验数据的检验,以便对对称能的饱和密度行为给出更精确的约束。

在高密区,对称能的密度依赖性依然很不确定,在高于2倍饱和密度的高密区不同微观唯象多体方法给出的对称能差别相对于低密区更大^[23]。FAIR/GSI, NSCL/MSU及FRIB/USA, RIKEN/JAPAN, CSR/LANZHOU等提供的放射性束流都可用于对称能的高密行为研究。最近,GSI企图利用双反应系统 ${}^{96}\text{Ru}+{}^{96}\text{Ru}$ 和 ${}^{96}\text{Zr}+{}^{96}\text{Zr}$ 在1.528 GeV/u的入射能时的 $(K^+/K^0)_{\text{Ru}}/(K^+/K^0)_{\text{Zr}}$ 来研究对称能的高密行为^[29],但由于真实的重离子碰撞模拟显示 $(K^+/K^0)_{\text{Ru}}/(K^+/K^0)_{\text{Zr}}$ 对对称能不敏感,该文献没有给出很有价值的关于对称能高密行

为的信息。

2 对称能高密行为的敏感观测量

以下关于对称能敏感观测量的研究回顾大都是基于强子输运模型IBUU04,该输运模型采用了最新的动量相关对称势和介质修正的核子-核子散射截面。参数化的单粒子势表示为^[30]

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

参数 A_{like} , A_{unlike} , B , C_{like} , C_{unlike} 和 Λ 的选取要使 $U(\rho, \delta, \mathbf{p}', \tau)$ 适合Hartree-Fock和(或者)Brueckner-Hartree-Fock计算,对称核物质饱和点特性以及正常核物质密度下大约32 MeV的对称能。对称核物质压缩系数取为211 MeV。对于核物质对称能的不确定性,单粒子势中引入了参数 x 。 $x=1, 0, -1, -2$ 时对应的对称能基本覆盖了不同的多体方法对对称能高密行为的预言范围。图1给出了不同 x 参数对应的密度依赖的对称能。模型的具体细节可参见文献^[25, 26, 31, 32]。

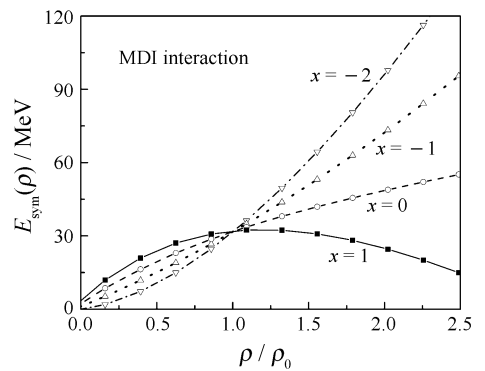


图1 不同 x 参数对应的密度依赖的对称能^[32]

研究对称能的密度依赖性,首先应研究反应过程中核物质达到的最大中心密度。在400 A MeV入射能的 ${}^{132}\text{Sn}+{}^{124}\text{Sn}$ 中心碰撞形成核物质的最大中心重子数密度大约是2倍的正常核物质密度^[32](更

高入射能情况下, 核核碰撞会形成更高密度的核物质), 并且这种压缩对对称能不敏感, 但是形成的高密核物质的同位旋非对称度对对称能比较敏感。软的对称能对应较大的同位旋非对称度, 而硬的对称能对应较小的同位旋非对称度。核反应形成的高密核物质到底是丰中子还是缺中子取决于对称能的硬度。

重离子碰撞的 π 介子产生已进行过广泛研究, 只是在最近几年李宝安等才将 π 介子的研究与非对称核物质状态方程联系起来, 并发现 π^-/π^+ 敏感于对称能的高密行为^[33]。在反应过程中, 由于 π 介子不断地产生、吸收和散射, π^-/π^+ 的计算应代之以 $(\pi^-/\pi^+)_{\text{like}}$, 表示为^[32]

$$(\pi^-/\pi^+)_{\text{like}} \equiv \frac{\pi^- + \Delta^- + \frac{1}{3}\Delta^0 + \frac{2}{3}N^{*0}}{\pi^+ + \Delta^{++} + \frac{1}{3}\Delta^+ + \frac{2}{3}N^{*+}}。$$

$(\pi^-/\pi^+)_{\text{like}}$ 在反应末期就自然变为 π^-/π^+ 。

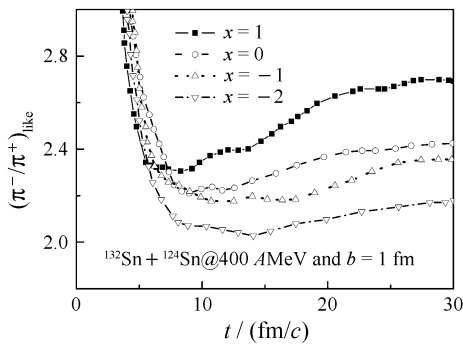


图2 $^{132}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ 碰撞 $(\pi^-/\pi^+)_{\text{like}}$ 的时间演化对对称能的依赖关系^[32]

从图2可以看出, 开始由于核-核间的中子皮重叠, 造成核表面大数目中子-中子散射, 又由于 π^- 介子主要来自中子-中子散射, 故 $(\pi^-/\pi^+)_{\text{like}}$ 在反应的初始阶段很大。随着时间演化, 不同对称能对应的 $(\pi^-/\pi^+)_{\text{like}}$ 迅速($t > 15 \text{ fm}/c$)达到饱和, 并且明显地分离开。对于较硬的对称能($x = -2$), 较多的中子在散射前由于被排斥而无缘碰撞, 从而产生较少的 π^- 介子, 使得 $(\pi^-/\pi^+)_{\text{like}}$ 较小。而软的对称能($x = 1$), 由于较弱的排斥中子则更多地聚集在高密核物质内部, 导致较多的中子-中子散射, 从而产生较多的 π^- 介子, 使得 $(\pi^-/\pi^+)_{\text{like}}$ 较大。这样就可以在反应末期通过测量 π^-/π^+ 并比较模型计算结

果得出对称能硬度的信息。当然也可以通过测量 π^-/π^+ 的动能或者横动量的分布来研究对称能的密度依赖性^[32]。

重离子碰撞中心区同位旋是否平衡或者穿透可以通过发射核子非对称度的快度分布来研究。发射的自由核子同位旋非对称度定义为 $\delta_{\text{free}} = (N_n - N_p)/(N_n + N_p)$, 此处 N_n, N_p 是发射的自由中子与质子^[34]。也可以通过测量轻的粒子碎块, 比如 $^3\text{H}/^3\text{He}$ ^[35], 近似推测出自由中子质子比。图3给出了发射核子非对称度的快度分布。可以看到, 中快度发射核子的同位旋非对称度对对称能非常敏感。随着对称能变软, 即 x 从 -2 增加到 1 , 发射核子的非对称度大约减小50%。此外, 对于不同的对称能, 前后非对称的同位旋非对称度表明已经发生了同位旋穿透。另外, 中快度发射自由核子的中质比也可以用来研究对称能的密度依赖性^[34]。

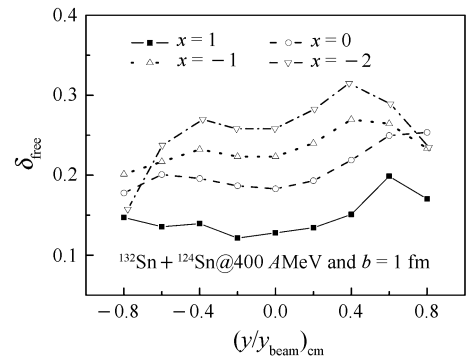


图3 $^{132}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ 碰撞中发射核子非对称度的快度分布^[34]

同样, 对称能效应还表现在同位旋的液气相分化中^[36], 如图4(a), 硬的对称能($x = -1$)对应较大的气相的中质比 $(n/p)_{\text{gas}}$ 。图4(b)为液相的中质比 $(n/p)_{\text{liq}}$, 与气相的中质比 $(n/p)_{\text{gas}}$ 刚好相反。图4(c)为同位旋相分化强度, 即气相中的质比 $(n/p)_{\text{gas}}/\text{液相中质比}(n/p)_{\text{liq}}$, 与气相的中质比 $(n/p)_{\text{gas}}$ 情况类似。

定向流是在反应平面内粒子离开束流轴方向发生前后边溅射的行为, 中心区域压缩激发的核物质易于从束流轴一侧空的区域发射出来形成边溅射。这种边溅射的能力与压强、核子-核子散射截面都有关系。由于定向流是一种边溅射行为(侧向挤压), 在一定的人射能量范围内, “硬的”核物质应具有较大的溅射角, 而“软的”核物质就只能有小的溅射角。故定向流应是对核物质压缩系数敏感的可

观测量。由于对称势对中子、质子有相反的作用，为

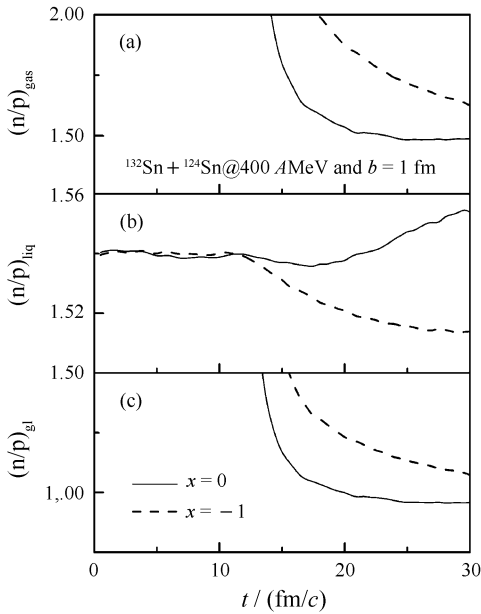


图4 $^{132}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ 碰撞同位旋气液相分化随时间的演化^[36]

了让定向流更敏感于非对称压缩系数即对称能，可以计算中质微分定向流^[37]，这种定向流把对称能

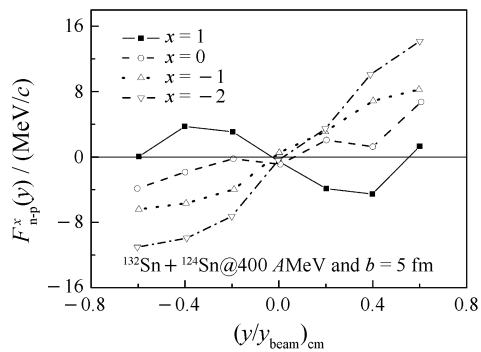


图5 中质微分流强度的对称能效应^[38, 39]

反流。这是因为硬的对称能具有较强的对称势强度，排斥中子、吸引质子的能力都很强，因而在反应平面内中子与质子的平均横向流差较大，导致较大的中质微分定向流数值^[38, 39]。

核子发射的中质比可能是对对称能最敏感的探针之一，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。但是在测量预

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。因此对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减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等提出用来自于两个反应系统的预平衡发射核子的双n/p比作为对对称能敏感的可观测量^[40]，来从实验上探测对称能。下面以 $^{132}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ 和 $^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$ 双反应系统为例来研究双系统观测量。

从图6可以看出， x 为0和-1时，两个反应系统发射核子的双中质比都是在高能时值大于或者基本等于低能时的值，这是由于双中质比有效地除去了库仑作用的影响。另外还可以看出，双中质比对对称能的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]。较硬的对称能($x = -1$)具有较大的双中质比，而较软的对称能($x = 0$)具有较小的双中质比。利用双中质比探测对称能，中心碰撞较半中心碰撞更有利于对称能的研究。最后，还可以看出，可以绕开探测器对低能中子的不敏感性，不顾及低能中子探测问题，直接探测质心系下50 MeV以上的质子、中子动能来研究对称能的密度依赖性问题^[15]。

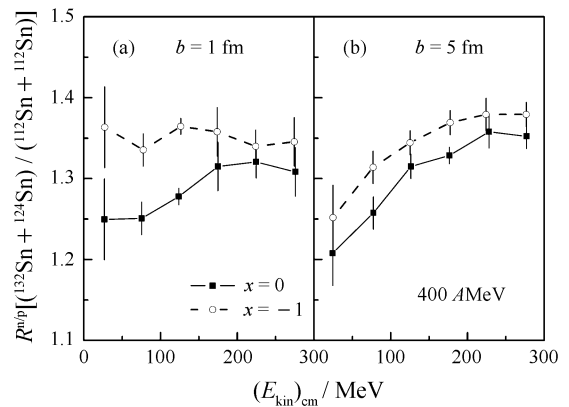


图6 双中质比的对称能效应^[15]

因为双反应系统给出的观测量既能减小库仑作用对对称势的干扰，又能减小系统误差，所以我们也特别地计算了双 π^- / π^+ 的对称能依赖性问题^[41]。图7给出了双 π^- / π^+ 的动能分布。不难看出，在库仑峰附近^[41]双 π^- / π^+ 依然敏感于对称能。软的对称能对应于大的双 π^- / π^+ ，而硬的对称能对应于小

的双 π^-/π^+ 。双 π^-/π^+ 的值随动能的变化而变化不大。这是由于双 π^-/π^+ 有效地减弱了库仑作用影响的缘故。比较图7与图6，可以看出，对称能呈现了相反的行为，即n/p探针硬的对称能是大值，而对于 π^-/π^+ ，软的对称能对应大值。我们可以这样理解，软的对称能在丰中子核重离子碰撞中产生高密核物质较丰中子，根据核子数守恒，气相的核子中的中子数要少，造成小的自由核子n/p。较丰中子的核物质，会有较多的中子-中子碰撞产生较多的 π^- 介子，从而对应大的 π^-/π^+ 。这样，我们就可以通过测量库仑峰附近丰中子、缺中子反应系统的双 π^-/π^+ 来研究对称能的高密行为。值得注意的是，库仑峰的位置依赖于反应系统、入射能量和碰撞参数。

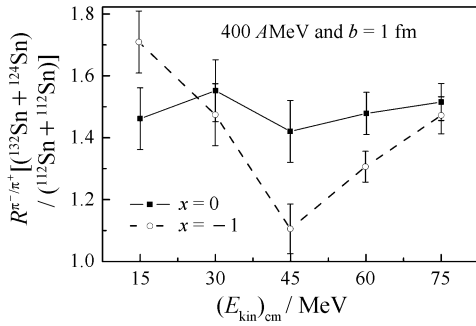


图7 双反应系统对应的双 π^-/π^+ 的动能分布的对称能效应^[41]

从理论上讲，由于核子-核子散射截面的不确定性，核子-核子碰撞的技术处理方法，单粒子势采用的不同，网格计算的格点尺寸大小，泡利阻塞的处理的不同等等，都会带来计算的系统误差^[42]。为了减小系统误差，我们研究了丰中子、缺中子两个反应系统 $^{132}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ 与 $^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$ 的中质微分流，并计算了它们的差。就是在每一快度点计算它们平均发射自由核子横动量的差。这个差值我们叫双中质微分流。由于缺中子反应系统 $^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$ 的中质微分流基本上没有对称能效应，而丰中子反应系统有明显的对称能效应，所以双中质微分流应该有对称能效应。图8给出了双中质微分流的快度分布。可以看出无论400 A MeV (a窗口)的入射能还是800 A MeV (b窗口)的入射能，双系统的双中质微分流都敏感于对称能。硬的对称能对应强排斥对称势，所以对应强的流值。软的对称能对应弱的排斥对称势，所以对应弱的流值。这样，我们就可以用双中

质微分流来研究对称能的高密行为。

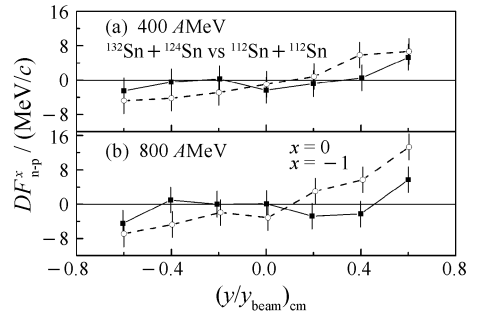


图8 双中质微分流的对称能效应^[42]

探测对称能的高密行为是很富有挑战性的一件事。因为在重离子碰撞中形成的高密核物质的存在时间是非常短的，在核物质演化过程中高密探针一般都要受到低密核物质的影响而减弱其对对称能的敏感性或者说会受到对称能低密行为的影响，结果反映的是对称能高密、低密行为的平均。因此探索高密对称能的探针，并且尽可能地少受低密对称能的影响，在理论上具有很重要的意义^[43]。图9给出了中快度核子发射n/p的横动量分布。可以清楚地

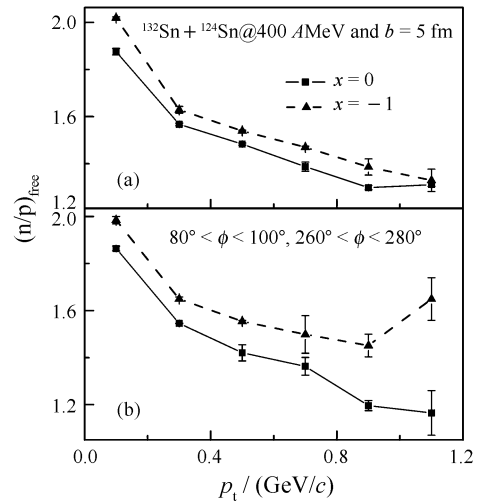


图9 中快度核子发射n/p的横动量分布
(a) 全立体角发射，(b) 垂直反应平面的挤压发射^[43]。

看出，半中心碰撞垂直于反应平面的挤出核子的n/p非常敏感于对称能的高密行为(敏感度40%)，尤其是在高横动量处。而非挤出核子n/p不太敏感于对称能。挤压发射核子的n/p直接来自于压缩核物质的高密区，基本不与低密区核子发生散射，反映了对称能的高密行为，不受对称核物质状态方程硬度的影响，敏感度很大，又优越于 π 和K等介子探

针,为对称能高密行为的研究提供了一个非常好的实验探针。

目前,现存的探测对称能的密度依赖性的探针都是强子探针。这些探针由于末态强相互作用,必然不真实地反映对称能的密度依赖性。克服这一困难的办法之一是利用电磁作用探针。人们曾经对中能重离子碰撞的光子产生进行过广泛的研究。为了减小光子产生截面、核子-核子散射的介质约化等的不确定性,以及其它系统误差对研究问题的影响,我们采用不同的对称能、核子-核子散射截面和光子产生截面计算了 $^{132}\text{Sn}+^{124}\text{Sn}$ 和 $^{112}\text{Sn}+^{112}\text{Sn}$ 两个反应系统的光子产生能谱,并计算了不同光子能量下的光子产生数目比^[44],它们的比值随光子动能分布如图10。从图10中可以看出,双反应系统光子产生能谱的比值将光子产生截面和核子-核子散射的介质约化的不确定性的影响大大地削弱了。而且双反应系统光子产生能谱的比值具有明显的对称能效应,并且越硬的光子对称能效应越强。两种对

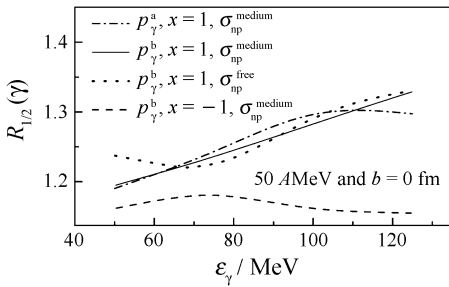


图10 双系统光子能谱比的对称能效应^[44]

称能在1.3倍^[44]的饱和密度处最多变化了20%,而对称能效应有15%。这样的敏感度也许还大于其它强子探针,包括 K^0/K^+ 。这样,就找到了探测对称能高密行为的第一个弱作用探针。另外,还计算了400 A MeV核核碰撞,发现在高入射能下光子产生的对称能效应变得很小。这是因为高入射能下,平均场效应进一步减弱、碰撞效应增强的缘故。

国际同行在对称能高密行为探针的探索上也取得了进展。李清峰等对1.5, 2.5和3.5 GeV/u $^{132}\text{Sn}+^{132}\text{Sn}$ 与 $^{112}\text{Sn}+^{112}\text{Sn}$ 反应产生的 π^-/π^+ 和 Σ^-/Σ^+ 的对称能效应进行了研究^[45]。 π^-/π^+ 随着束流能量的增加,其对称能效应越来越小,直至消失。而 Σ^-/Σ^+ 随着束流能量的增加,对称能效应的敏感度由大到小再增大,软的对称能的比值由位

置在下翻转到位置在上。在很高入射能下, Σ^-/Σ^+ 可以作为探测对称能高密行为(1到4倍正常核物质密度)的一个探针。

Ferini等对0.8—1.8 GeV/u的入射能下 π^-/π^+ 和 K^0/K^+ 的对称能效应进行了研究^[46]。在稍高的入射能量下, K^0/K^+ 的对称能效应要强于 π^-/π^+ 探针。因而在高核物质密度情况下, K^0/K^+ 也可做为一个对对称能敏感的探针研究对称能的高密行为。

3 对称能高密行为的实验约束

目前,尽管理论上给出了很多关于对称能高密行为的敏感观测量,但由于缺乏相应的实验数据,使得对称能的高密行为到现在为止依然没有清晰的结论。近两年,GSI的FOPI实验组在对称能的高密行为研究方面迈出了重要的两步。其一是双反应系统 $^{96}_{44}\text{Ru}+^{96}_{44}\text{Ru}$ 和 $^{96}_{40}\text{Zr}+^{96}_{40}\text{Zr}$ 在1.528 GeV/u的入射能下的 $(K^+/K^0)_{\text{Ru}}/(K^+/K^0)_{\text{Zr}}$ 实验数据与输运模型计算结果的比较^[29]。热模型给出的结果与实验数据符合得很好。静态无限核物质计算结果中软的对称能也与实验结果符合得很好。然而,虽然真实的重离子碰撞模拟给出的结果与实验数据也符合得很好,但是真实的重离子碰撞模拟也显示出 $(K^+/K^0)_{\text{Ru}}/(K^+/K^0)_{\text{Zr}}$ 对对称能的不敏感性。所以,该实验并没能给出很有价值的关于对称能高密行为的信息。

最近,我们通过IBUU04计算出不同对称能的 π^-/π^+ 并与FOPI的Au+Au实验数据做比较,首次得出在大于2倍核物质饱和密度时超密核物质对称能随密度的增加而下降^[47]。超密核物质对称能是软的(即对称能值随密度的增加而下降)这一结论有待于利用其它探针进一步检验。

4 结论与展望

本文回顾了关于核物质对称能高密行为研究的一些敏感观测量,如库仑峰附近的双 π^-/π^+ 、双中质微分流、高横动量挤出核子的中质比,以及双重离子碰撞系统的韧致辐射光子发射能谱比等。另外介绍了最近理论计算与FOPI实验数据对比得出的关于对称能高密行为的最新结论。

核物质对称能高密行为的研究在理论上虽然取得了初步成功,但仍有许多工作需要进一步深入研究,比如输运模型的单粒子势问题、核子及介子间

反应截面问题和碎块形成的问题。中子星核物质的中心密度可以达到数倍的核物质饱和密度,重离子碰撞在很高入射能下才能达到这样的核物质密度。但在很高的入射能情况下,碰撞效应往往淹没掉平均场效应。这使得人们难以看到平均场效应,尤其是相对较小的对称势(对称能)效应。因此,为了研究更高核物质密度下的对称能,有必要进一步研究在高入射能量情况下对对称能敏感的探针。另外,由于来自于核物质高密区的探针常常会受到低密区核子的散射,进而受到低密对称能的影响,使得观测测量表达的对称能的高密行为有失真。因此,有必要研究直接来自于核物质的高密区而较少地受低密区核子影响的其它探针,比如电磁作用探针。

在实验方面,美国的NSCL/MSU以及日本的RIKEN正计划合作建造新的TPC在放射性束流设备上测量180—400 AMeV核核碰撞产生的 π^-/π^+ 以及核子流来研究对称能的高密行为。德国的FAIR/GSI也为对称能的高密行为研究制定了详细的近期以及中长期计划,已将中子和质子微分流的实验列为计划之一^[48]。我国的CSR/LAN-ZHOU也已将对称能相关实验列为实验计划之一。预期在不远的将来,核物质对称能的高密行为研究将会有一个重大进展。

参考文献 (References):

[1] Ding Dazhao, Chen Yongshou, Zhang Huanqiao. Progress in Nuclear Physics; Shanghai, Shanghai Science and Technology Publishing House, 1997, 299—382(in Chinese).
(丁大钊,陈永寿,张焕乔.原子核物理进展.上海:上海科学技术出版社,1997,299—382.)

[2] Youngblood D H, Clark H L, Lui Y W. Phys Rev Lett, 1999, 82: 691.

[3] Danielewicz P, Lacey R, Lynch W G. Science, 2002, 298: 1592.

[4] Fuchs C. Prog Part Nucl Phys, 2006, 56: 1.

[5] Li B A, Chen L W, Ko C M. Phys Rep, 2008, 464: 113; Zuo W, Lejeune A, Lombardo U, *et al.* Eur Phys J, 2002, A14: 469; Dalen E, Fuchs C, Faessler A. Nucl Phys, 2004, A744: 227; Phys Rev, 2005, C72: 065803; Wiringa R B, Fiks V, Fabrocini A. Phys Rev, 1998, C38: 1010; Pandharipande V R, Garde V K. Phys Lett, 1972, B39: 608; Krastev P, Sammarruca F. Phys Rev, 2006, C74: 025808.

[6] Meng J, Toki H, Zhou S G, *et al.* Progress in Particle and

Nuclear Physics, 2006, 57: 470.

[7] Steiner A W, Prakash M, Lattimer J M, *et al.* Phys Rep, 2005, 411: 325.

[8] Dieperink A E L, Dewulf Y, Neck D V, *et al.* Phys Rev, 2003, C68: 64307.

[9] Brown B A. Phys Rev Lett, 2000, 85: 5296.

[10] Furnstahl R J. Nucl Phys, 2002, A706: 85.

[11] Steiner A W, Li B A. Phys Rev, 2005, C72: 041601(R).

[12] Chen L W, Ko C M, Li B A. Phys Rev, 2005, C72: 064309.

[13] Li B A, Ko C M, Bauer W. Int J Mod Phys, 1998, E7: 147.

[14] Li B A, Schröder W U. Isospin Physics in Heavy-Ion Collisions at Intermediate Energies. New York: Nova Science, 2001, 1.

[15] Li B A, Chen L W, Yong G C, *et al.* Phys Lett, 2006, B634: 378.

[16] Colo G, Giai N V, Meyer J, *et al.* Phys Rev, 2004, C70: 024307.

[17] Krastev P G, Li B A, Worley A. Astrophysical Journal, 2008, 676: 1170.

[18] Horowitz C J, Piekarewicz J. Phys Rev Lett, 2001, 86: 5647.

[19] Horowitz C J, Piekarewicz J. Phys Rev, 2001, C64: 062802.

[20] Horowitz C J, Piekarewicz J. Phys Rev, 2002, C66: 055803.

[21] Krastev P G, Li B A. Phys Rev, 2007, C76: 055804.

[22] Stone J R, Miller J C, Konciewicz R, *et al.* Phys Rev, 2004, C68: 034324.

[23] Li B A, Chen L W, Ko C M, *et al.* J Phys, 2008, G35: 014044.

[24] Tsang M B, Liu T X, Shi L, *et al.* Phys Rev Lett, 2004, 92: 062701.

[25] Chen L W, Ko C M, Li B A. Phys Rev Lett, 2005, 94: 032701.

[26] Li B A, Chen L W. Phys Rev, 2005, C72: 064611.

[27] Shetty D V, Yennello S J, Souliotis G A. Phys Rev, 2007, C76: 024606.

[28] Li T, Garg U, Liu Y, *et al.* Phys Rev Lett, 2007, 99: 162503.

[29] Lopez X, Kim Y J, Herrmann N, *et al.* Phys Rev, 2007, C75: 011901(R).

[30] Das C B, Gupta S D, Gale C, *et al.* Phys Rev, 2003, C67: 034611.

[31] Li B A, Das C B, Gupta S D, *et al.* Phys Rev, 2004, C69: 011603(R); Nucl Phys, 2004, A735: 563.

[32] Li B A, Yong G C, Zuo W. Phys Rev, 2005, C71: 014608.

[33] Li B A. Phys Rev Lett, 2002, 88: 192701; Nucl Phys, 2002, A708: 365.

[34] Li B A, Yong G C, Zuo W. Phys Rev, 2005, C71: 044604.

[35] Chen L W, Ko C M, Li B A. Phys Rev, 2003, C68: 017601; Nucl Phys, 2003, A729: 809.

- [36] Yong Gaochan, Li Baoan, Chen Liewen, *et al.* Acta Physica Sinica, 2006, 55(10): 5166(in Chinese).
(雍高产, 李宝安, 陈列文等. 物理学报, 2006, 55(10): 5166.)
- [37] Li B A. Phys Rev Lett, 2000, 85: 4221.
- [38] Yong Gaochan, Li Baoan, Zuo Wei. Chinese Physics Letters, 2005, 22(9): 2226.
- [39] Li B A, Chen L W, Das C B, *et al.* AIP Conf Proc, 2005, 791: 22.
- [40] Famiano M A, Liu T, Lynch W G, *et al.* Phys Rev Lett, 2006, 97: 052701.
- [41] Yong G C, Li B A, Chen L W, *et al.* Phys Rev, 2006, C73: 034603.
- [42] Yong G C, Li B A, Chen L W. Phys Rev, 2006, C74: 064617.
- [43] Yong G C, Li B A, Chen L W. Phys Lett, 2007, B650: 344.
- [44] Yong G C, Li B A, Chen L W. Phys Lett, 2008, B661: 82.
- [45] Li Q F, Li Z X, Zhao E G, *et al.* Phys Rev, 2005, C71: 054907.
- [46] Ferini G, Gaitanos T, Colonna M, *et al.* Phys Rev Lett, 2006, 97: 202301.
- [47] Xiao Zhigang, Li Baoan, Chen Liewen, *et al.* arXiv: 08080186.
- [48] ASY-EOS: Workshop on Nuclear Symmetry Energy at Medium Energy, Catania, <http://indico.ct.infn.it/conference/OtherViews.py?view=standard&confId=42>.

Studies of High Density Behavior of Nuclear Symmetry Energy^{*}

YONG Gao-chan^{1, 1)}, LI Bao-an², CHEN Lie-wen^{3, 4}

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

2 *Department of Physics, Texas A&M University-Commerce, Commerce, TX 75429, USA;*

3 *Institute of Theoretical Physics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;*

4 *Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy Ion Research Facility in Lanzhou, Lanzhou 730000, China)*

Abstract: One of the major tasks of studying isospin physics via heavy-ion collisions with neutron-rich nuclei, is to explore the isospin dependence of in-medium nuclear effective interactions and the equation of state of neutron-rich nuclear matter, i. e. , the density dependence of nuclear symmetry energy. Because of its great importance for understanding many phenomena in both nuclear physics and astrophysics, the study of the density dependence of nuclear symmetry energy has been the main focus of the intermediate-energy heavy-ion physics community during the last decade. Nowadays significant progress has been achieved in studying the low density behavior of nuclear symmetry energy, but the high density behavior of nuclear symmetry energy is still very uncertain. Theoretically, a number of observables have been proposed as sensitive probes to the high density behavior of nuclear symmetry energy. With new opportunities provided by the various radioactive beam facilities being constructed around the world, studies of the high density behavior of nuclear symmetry energy is expected to be one of the main forefront research areas in nuclear physics in the near future. In this report, based on the transport model IBUU we have reviewed the major progress achieved in studying the high density behavior of nuclear symmetry energy and discussed future challenges in this field.

Key words: nuclear matter; symmetry energy; high density behavior

* **Received date:** 5 Sep. 2008; **Revised date:** 14 Nov. 2008

* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(10710172, 10575119, 10675082,10575071); Shanghai Rising-Star Program of China(06QA14024); Major State Basic Research Development Program of China(973 Program)(2007CB815004); Program of Education Ministry for New Century Excellent Talents in University of China(NCET-05-0392); US National Science Foundation Awards(PHY-0652548,PHY-0757839); Research Corporation under Award(7123); Texas Coordinating Board of Higher Education Award(003565-0004-2007)

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