

文章编号: 1007-4627(2016) 03-0258-05

中能重离子反应中对称势对熵的影响

王 阔, 郭文军, 张霄吉

(上海理工大学理学院, 上海 200093)

摘要: 基于同位旋相关的量子分子动力学模型, 研究了对称势、束流能量、对称能强度系数对中能重离子碰撞反应系统的熵的影响。研究发现, 对称势对熵有一定影响, 且对熵的影响大小与反应系统中质比有关。另外发现在 $^{40}\text{Ca}+^{40}\text{Ca}$ 和 $^{40}\text{Si}+^{40}\text{Si}$ 反应系统中对称能强度系数对熵也有影响, 当对称能强度系数 $c=32\text{ MeV}$ 时, 对这两个系统来说其对熵的影响最大。通过实验上对熵的测量可以得到对称势的形式和大小。

关键词: 中能重离子反应; 熵; 对称势

中图分类号: O571.6 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.33.03.258

1 引言

在重离子碰撞中, 核物质性质的研究是核物理与理论物理的重要研究方向。众所周知, 原子核是由质子和中子组成的, 而同位旋效应^[1-2]就是在重离子碰撞中各种物理观测量随系统中质比(同位旋)的演化规律, 其中对称势和同位旋相关的介质中核子-核子碰撞截面是最重要的同位旋相关物理量^[3-5]。它们的研究对于了解原子核的结构、非对称核物质状态方程的建立、以及探索超新星爆发的机制和中子星的冷却速率等方面都有非常重要的意义^[6-7]。近年来, 人们发现密度依赖的核物质对称能对核物理学和天体物理学具有重要的意义, 所以从理论上和实验上都进行了大量的研究, 并在低密对称能方面取得了一定的进展, 但高密对称能尚不确定^[8-10]。

理论上研究中能重离子碰撞通常是建立模型, 利用计算机模拟, 并模拟结果与实验数据比较得出物理结论。当前研究中能重离子碰撞的主流模型是 Boltzmann 输运模型和量子分子动力学(QMD)模型, 这两大模型取得了极大的成功^[11]。近年来, 人们用 QMD 模型对重离子反应进行了大量的研究。Feng 等^[12]基于同位旋和动量相关的输运模型, 研究了重离子碰撞中动量相关的对称势对一些同位旋灵敏的可观测量的影响, 发现不管是不是动量相关的对称势-对称能密度依赖性是否相似, 都会导致可观测量的不同分布。Kaur 等^[13]通过使用同位旋相关的量子分子动力学(IQMD)模型, 研究了具有

确定不变的总的反应质量的非对称碰撞通道的原子核阻止, 发现了质量的不对称性对原子核阻止和核反应的平衡有很大的影响。Fang 等^[14-15]在 IQMD 模型的框架内, 通过使用平均自由程的方法研究了热核物质的粘度, 发现粘度和熵的密度比, 随着温度的增加而减少, 并逐渐趋于一个稳定值。Vermani 等^[16]基于 QMD 模型, 根据类氦和类质子的值分析了中能重离子碰撞中熵的产生, 发现在不同入射能量的 $\text{Ca} + \text{Ca}$ 和 $\text{Nb} + \text{Nb}$ 碰撞系统过程中产生的熵的计算值和实验上符合得很好。Gudima 等^[17]借助于级联模型研究了熵的产生, 发现产生的特定的熵对碰撞解体阶段相空间的选择非常灵敏, 用比平衡统计学方法获得的熵值更小。Aichelin 等^[18]根据 Boltzmann-Uehling-Uhlenbeck(BUU) 方程研究了总的核核核物质状态方程的依赖性, 发现熵强烈地依赖于参数的变化。Kaur 等^[19]发现利用类氦与类质子的比值可以计算熵, 结果与实验值符合, 另外还发现随着反应系统的中质比增大, 熵会减小。

我们之前的工作, 根据 IQMD 模型研究了不同反应系统碰撞产生的碎片, 建立了一个新的计算熵的模型, 并根据这个模型得出的熵的计算值与实验值符合得很好^[20]。目前对称势的形式和大小都很不确定, 实验上和理论上都很需要得到对称势的具体形式, 所以本文在之前工作的基础上, 重点研究密度相关的对称势以及不同对称能强度系数对熵的影响, 通过修改其中的对称能参数并与熵的实验值进行比较, 试图确定对称势的形式和大小。

收稿日期: 2016-03-25; 修改日期: 2016-05-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10905041)

作者简介: 王阔(1989-), 男, 江苏徐州人, 硕士研究生, 从事核物理研究; E-mail: wangkuo007@163.com

通信作者: 郭文军, E-mail: impgwj@126.com。

2 模型

在研究过程中, 我们使用的熵计算公式是^[19]

$$S_N = 3.945 - \ln(R_{dp}), \quad (1)$$

R_{dp} 是反应产物中氦与自由质子的比值, 也可以用类氦与类质子的比值来表示^[21]。我们根据该公式并结合 QMD 模型, 用不同的密度表示类氦和类质子, 其中把密度小于 0.02 fm^{-3} 的质子看成类质子。密度超过 0.02 fm^{-3} 但不超过 0.07 fm^{-3} , 我们把这样的碎片看作类氦^[20]。

利用 QMD 模型进行模拟计算, 但要考虑同位旋效应的影响就需要对 QMD 模型进行适当的修改, QMD 模型主要包含 3 个因素: 密度相关的平均场、介质中核子核子碰撞截面和 Pauli 阻塞。其中密度相关的平均场包含同位旋有关的对称势和库仑势, 这里我们对对称势进行修改, 通过修改其中的参数来得到不同的对称势, 相互作用势和参数如下所示^[22-24]:

$$U = U^{\text{Sky}} + U^{\text{Yuk}} + U^{\text{Coul}} + U^{\text{MDI}} + U^{\text{Pauli}} + U^{\text{Sym}}, \quad (2)$$

其中 U^{Sky} 是密度依赖的 Skyrme 势; U^{Yuk} 是 Yukawa 势; U^{Coul} 是库仑势; U^{MDI} 是动量相关作用; U^{Pauli} 是泡里势; U^{Sym} 是对称势。对 U^{Sym} 进行修改讨论是本篇文章的重要内容之一, 对称势 U^{Sym} 的经验公式有

$$U_1^{\text{Sym}} = cF_1(u)\delta\tau_z, \quad (3)$$

$$\sigma_{np}^{\text{free}} = \begin{cases} -\frac{5067.4}{E^2} + \frac{9069.2}{E} + 6.9466(\text{mb}), & E \leq 40 \text{ (MeV)}; \\ \frac{239380}{E^2} + \frac{1802.0}{E} + 27.147(\text{mb}), & 40 < E \leq 400 \text{ (MeV)}; \\ 34.5(\text{mb}), & 400 < E \leq 800 \text{ (MeV)}; \end{cases} \quad (8)$$

$$\sigma_{nn}^{\text{free}}(\sigma_{pp}^{\text{free}}) = \begin{cases} -\frac{1174.8}{E^2} + \frac{3088.5}{E} + 5.3107(\text{mb}), & E \leq 40 \text{ (MeV)}; \\ \frac{93074}{E^2} - \frac{11.148}{E} + 22.429(\text{mb}), & 40 < E \leq 310 \text{ (MeV)}; \\ \frac{887.37}{E} + 0.05331E + 3.5475(\text{mb}), & 310 < E \leq 800 \text{ (MeV)}. \end{cases} \quad (9)$$

从上述式子可以看出, 介质效应使核子-核子碰撞截面变小。现在已经知道在自由的情况下, 当能量低于 400 MeV/u 时, 中子-质子碰撞截面大约是中子-中子、质子-质子碰撞截面的 3 倍。因此, 介质中同位旋相关核子-核子碰撞截面满足 $\sigma_{np} > \sigma_{nn} \equiv \sigma_{pp}$, 而同位旋无关的情况下 $\sigma_{np} = \sigma_{nn} = \sigma_{pp}$ 。

$$U_2^{\text{Sym}} = cF_2(u)\left(\delta\tau_z + \delta^2/2\right), \quad (4)$$

$$U_3^{\text{Sym}} = cF_3(u)\left(\delta\tau_z - \delta^2/4\right), \quad (5)$$

$$U_0^{\text{Sym}} = 0, \quad (6)$$

其中 $\tau_z = \pm 1$, 分别表示中子和质子的情况。这里 $c = 32 \text{ MeV}$ 是对称势的强度系数, $F_1(u) = u$, $F_2(u) = u^2$, $F_3(u) = u^{1/2}$ 。 $u \equiv \rho/\rho_0$; δ 是相对中子过剩, $\delta = (\rho_n - \rho_p)/(\rho_n + \rho_p) = (\rho_n - \rho_p)/(\rho)$, ρ , ρ_0 , ρ_n 和 ρ_p 分别是核密度、饱和密度、中子密度和质子密度。在以往的研究中公式里的 $c = 32 \text{ MeV}$, 作为一个常数来处理, 在这里, 我们将 c 作为一个变量来处理, 分别取值 28, 30, 32, 34, 36, 这样就能够得到不同的对称势。

一般核反应都是处于核介质中的, 所以在反应动力学中应该用介质中的核子核子碰撞截面。在对中能重离子碰撞中集体流的研究中发现介质中核子核子碰撞截面是减小的。Klakow 等^[25]使用 BUU 模型研究中能重离子反应平衡能时, 发现介质中的核子核子碰撞截面等于自由空间中截面的 80% 时, 计算得到的平衡能可以较好地拟合实验数据, 从而提出了一个经验的介质中核子核子碰撞截面的公式:

$$\sigma_{NN}^{\text{med}} = (1 + \gamma \frac{\rho}{\rho_0})\sigma_{NN}^{\text{free}}, \quad (7)$$

式中: $\gamma = -0.2$; $\sigma_{NN}^{\text{free}}$ 为自由核子-核子碰撞截面, 其具体形式为

3 结果与讨论

我们分别计算了 $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ 和 $^{93}\text{Nb} + ^{93}\text{Nb}$ 反应系统在能量为 400, 650, 1050 MeV/u 时产生的熵的值, 并将它们与实验值相比较, 以及熵随质子数和入射能量的变化, 分别如图 1 所示。

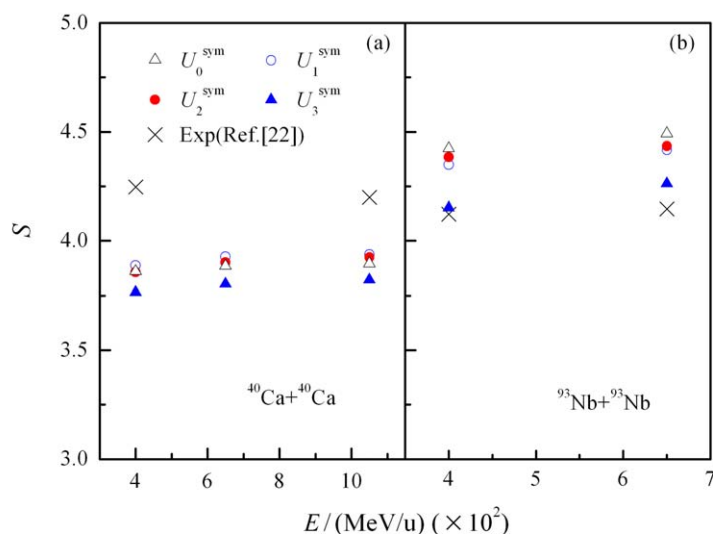


图 1 (在线彩图) 不同反应系统中不同对称势下熵的计算值和实验值的比较

图 1 给出了 $^{40}\text{Ca}+^{40}\text{Ca}$ 和 $^{93}\text{Nb}+^{93}\text{Nb}$ 反应系统在对称势取 U_0, U_1, U_2, U_3 , 每核子能量取 400, 650, 1050 MeV 时熵的计算值与实验值的关系。图中叉形是实验值, 空心三角形、空心圆、实心圆和实心三角形分别代表的是我们在 U_0, U_1, U_2, U_3 对称势下的计算值。从图中可以明显地看出, 在这两个系统中, 在所选择的四个对称势下我们计算得到的值与实验值十分接近。在 $^{40}\text{Ca}+^{40}\text{Ca}$ 系统中, 当对称势取 U_1 时, 计算值最接近实验值, 在 $^{93}\text{Nb}+^{93}\text{Nb}$ 系统中, 当对称势取 U_3 时, 计算值最接近实验值。所以选取不同的对称势对熵的计算值影响较大。不同的对称势对中子的排斥和对质子的吸引的强度不一样, 所以不同对称势对类氦、类质子的产额不一样, 进而造成熵的值不同。

图 2 是 $A=40$, 对称势取 U_0, U_1, U_2, U_3 时, 反应系统的熵随质子数的变化, 图中四种图形对应的对称势与图 1 的情况一样。从图中可以看出, 随着质子数的增大, 熵逐渐增大, 和文献 [16] 结论一致。另外在丰中子

系统中可以看出, U_0 对应的熵最大。这是因为丰中子系统中质子少中子多, 对称势排斥中子, 进而产生更多的自由中子, 更少的自由质子, 熵的值变小。而考虑 U_0 就是没有对称势的存在, 与上述情况相反, 所有 U_0 对应熵的值比 U_1 大。所以, 不同的对称势、不同的中质比对熵的影响大小不同。

图 3 表示的是质子数为 14, 16, 18, 20, 22, 24 时对称势分别取 U_0, U_1, U_2, U_3 对应的熵的平均值。 $A=40$, 图中 0.324, 0.646, 0.566, 0.617 分别代表的是右边 3 个点的平均值与左边 3 个点的平均值的差值。可以明显地看出, 不管是哪个对称势均对熵产生了较大影响, 其中当对称势为 U_1 时, 这个差值最大, 也就是说此时对熵的影响最大。总之, 对称势对熵的影响总体较大, 但不同的对称势对熵的影响不同。为了区分在丰中子、缺中子系统中对称势对熵的影响, 我们对图 3 进行了处理。 $Z=19$ 左边的值表示对 Z 比较小的丰中子的 3 个系统取平均, $Z=19$ 右边的值表示对 Z 比较大的缺中子的 3 个

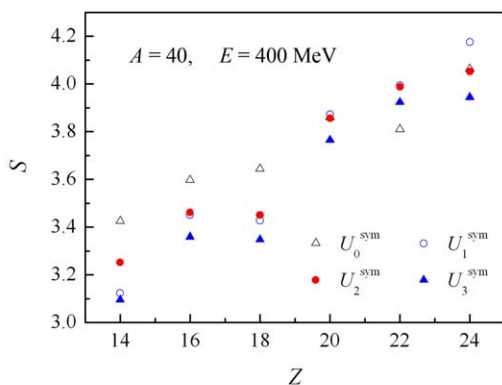


图 2 (在线彩图) $A=40$ 的不同对称势下熵随质子数的变化

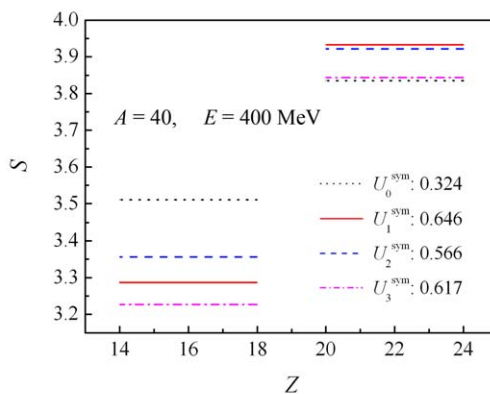


图 3 (在线彩图) 不同质子数不同对称势下熵的平均值

系统取平均。

图4给出了 $^{40}\text{Ca}+^{40}\text{Ca}$ 和 $^{40}\text{Si}+^{40}\text{Si}$ 反应系统中, 对称势为 U_1 时, 取不同对称能强度系数得到的熵随入射能量的变化。从图中可以看出, 在两个系统中, 熵都是随着入射能量的增大而增大, 但在 $^{40}\text{Ca}+^{40}\text{Ca}$ 系统中, 当 $c = 32$ MeV, 熵的值最大。相反的, 在 $^{40}\text{Si}+^{40}\text{Si}$ 反应系统中, 熵的值则最小。这说明对称能强度系数取不同的值对不同中质比的反应的熵影响很大, 我们可以由此来确定对称能的强度系数。

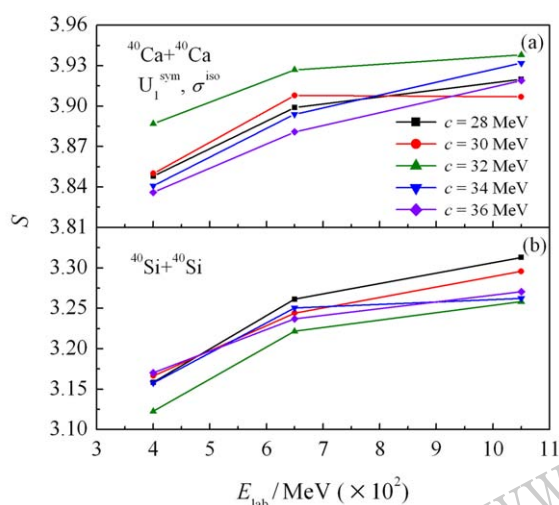


图4 (在线彩图) 对称势下反应系统取不同对称能强度系数时的熵随入射能量的变化

4 结论

本文利用IQMD模型研究了束流能量、对称势以及对称能强度系数对中能重离子反应中熵的影响。我们发现对称势对熵的计算值影响较大并且不同的对称能强度参数、不同的中质比对熵计算也有影响。因此, 实验上通过对熵的测量反过来可以得到对称势的形式和大小。

参考文献:

- [1] FENG Z Q, XIE W J, CHEN P H. Phys Rev C, 2015, **92**(4): 044604.
- [2] ZHANG A, GUO W J, HUANG J W. Chin Phys C, 2014, **38**(5): 054103.
- [3] GUO W J, HUANG J W, YONG G C. Chin Phys Lett, 2014, **31**(10): 102501.
- [4] YANG L M, GUO W J, ZHANG F. Chin Phys C, 2013, **37**(10): 104101.
- [5] KUMAR S, RAJNI, KUMAR S. Phys Rev C, 2010, **82**(2): 024610.
- [6] LI B A, KO C M, REN Z Z. Phys Rev Lett, 1997, **78**: 1644.
- [7] LI B A, REN Z Z, KO C M, *et al.* Phys Rev Lett, 1996, **76**: 4492.
- [8] LI Zhuxia. Nuclear Physics Review, 2014, **31**(3): 285. (in Chinese)
(李祝霞. 原子核物理评论, 2014, **31**(3): 285.)
- [9] LI Qingfeng, WANG Yongjia, GUO Chenchen, *et al.* Nuclear Physics Review, 2014, **31**(3): 291. (in Chinese)
(李庆峰, 王永佳, 郭琛琛, 等. 原子核物理评论, 2014, **31**(3): 291.)
- [10] YONG Gaochan, LI Baoan, CHEN Liewen. Nuclear Physics Review, 2009, **26**(2): 85. (in Chinese)
(雍高产, 李宝安, 陈列文. 原子核物理评论, 2009, **26**(2): 85.)
- [11] LIU J Y, LIU H, CHEN B. Nucl Phys Rev 1998, **15**(2): 65.
- [12] FENG Z Q. Phys Rev C, 2011, **84**(2): 024610.
- [13] KAUR V, KUMAR S, PURI R K. Nucl Phys A, 2011, **861**(1): 37.
- [14] FANG D Q, MA Y G, ZHOU C L. Phys Rev C, 2014, **89**(4): 047601.
- [15] ZHOU C L, MA Y G, FANG D Q. Phys Rev C, 2013, **88**(2): 024604.
- [16] VERMANI Y K, PURI R K. Nucl Phys A, 2010, **847**(3-4): 243.
- [17] GUDIMA K K, TONEEV D, ROPKE G, *et al.* Phys Rev C, 1985, **32**: 1605.
- [18] AICHELIN J, REMLER E A. Phys Rev C, 1987, **35**: 1291.
- [19] KAUR S, PURI R K. Phys Rev C, 2014, **89**: 057603.
- [20] ZHANG X J, GUO W J, LI X J, WANG K. Chin Phys C, 2016, **3**: 034103.
- [21] BERTSCH G, CUGNON J. Phys Rev C, 1981, **24**: 2514.
- [22] AICHELIN J, STOCKER H. Phys Lett B, 1986, **176**(1,2): 14.
- [23] AICHELIN J. Phys Rev C, 1988, **37**(6): 2451.
- [24] CHEN L W, ZHANG F S, JIN G M. Phys Rev C, 1998, **58**: 2283.
- [25] KLAKOW D, WELKE G, BAUER W. Phys Rev C, 1993, **48**(4): 1982.

Effect of Symmetry Potential on Entropy in Intermediate Energy Heavy Ion Reactions

WANG Kuo, GUO Wenjun, ZHANG Xiaoji

(*University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China*)

Abstract: Based on the isospin-dependent quantum molecular dynamics model, effects of the symmetry potential, incident beam energy and different symmetry energy strength coefficients on the entropy of reaction system are studied. The results show that the symmetry potential affects the entropy, and the effect changes with the neutron-proton ratio of the reaction system. Besides, in $^{40}\text{Ca}+^{40}\text{Ca}$ and $^{40}\text{Si}+^{40}\text{Si}$ reaction systems, the symmetry energy strength coefficient also has effect on the entropy when the symmetry energy strength coefficient $c = 32$ MeV, the effect on the entropy is largest for the two systems. Therefore the form and size of symmetry potential could be obtained by comparison of the model calculation and the experiments on the measurement of entropy.

Key words: intermediate energy heavy ion collision; entropy; symmetry potential

<http://www.npr.ac.cn>

Received date: 25 Mar. 2016; **Revised date:** 10 May 2016

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(10905041)

Corresponding author: GUO Wenjun, Email: impgwj@126.com.