

文章编号: 1007-4627(2012)02-0129-04

利用同质异位素产额比提取对称能的近似方法

普洁¹, 乔庆鹏^{1,2}, 魏慧玲¹, 王闪闪¹, 马春旺¹, 张同林¹

(1. 河南师范大学物理系, 河南 新乡 453007;

2. 河南教育学院物理系, 河南 郑州 450046)

摘要: 在修改的 Fisher 模型框架下, 利用同质异位素产额比和结合能方程中对称能系数与温度比率的关联, 可以提取对称能系数与温度的比值。利用 3 种不同的近似方法得到了重离子核反应产生丰中子余核的对称能系数与温度比(a_{sym}/T), 并研究了相关物理量对 a_{sym}/T 的影响。结果表明, 库仑能对提取丰中子余核的 a_{sym}/T 影响较小, 且参考核的选取对 a_{sym}/T 的提取也有一定的影响。

关键词: 重离子核反应; 同质异位素产额; 对称能

中图分类号: O571.42; O571.43+2 **文献标志码:** A

1 引言

对称能是核物质状态方程中的一个重要参数, 对原子核的性质有很大的作用。在核天体物理学中, 它是与中子星演化、质子比例、中子星半径及密度等相关的一个非常重要的物理量。因此对对称能进行深入研究具有重要的意义。

核的对称能依赖于温度和密度, 虽然人们已经对饱和密度和零温度下的核物质对称能有了较好的了解, 但对于高密度和高温度下核物质对称能的认识仍然模糊^[1-3]。过去有很多实验研究了核物质的状态方程及液气相变问题^[4-5], 还研究了在不同密度与温度下发射源的对称能^[6-9]。对丰中子核而言, 不同的模型得到不同的对称能, 甚至同一个模型运用不同的相互作用也会得到不同的结果^[1, 10-12]。现在关于对称能在高温高密区域的行为也有完全相反的预言, Yong 提出利用 n/p 作为探针, 探测该区域对称能是否可能是负值^[12]。

最近, Huang 等^[13]在一个修改的 Fisher 模型 (Modified Fisher Model, 简称 MFM)^[14]下, 通过分析重离子核反应中同质异位素产额比, 提取了费米能附近的中子剩余度 $I=1$ 的原子核的 a_{sym}/T 。在文献^[15-16]中, 利用不同的同质异位素产额比关联形式分析了中能炮弹碎裂反应中丰中子核的

a_{sym}/T 。本文将基于文献^[13, 15-17], 利用不同的关联来提取丰中子同质异位素的 a_{sym}/T , 同时研究相关物理量对提取 a_{sym}/T 结果的影响。

2 模型介绍

2.1 修改的 Fisher 模型

在 MFM 中^[13-14], 中子剩余度 $I=N-Z$, 质量数为 A 的碎片产额为

$$Y(A, I) = CA^{-\tau} \exp \left\{ \frac{(W(A, I) + \mu_n N + \mu_p Z)}{T} + N \ln \left(\frac{N}{A} \right) + Z \ln \left(\frac{Z}{A} \right) \right\}, \quad (1)$$

其中: $A^{-\tau}$ 来源于碎片的熵; τ 对于所有碎片相同; C 为常数; μ_n 是中子化学势; μ_p 为质子化学势; Z 和 N 是碎片的质子数和中子数; $W(A, I)$ 是碎片的结合能。 $W(A, I)$ 在这里等于密度 ρ 和温度 T 时原子核的结合能, 由 Weizsäcker-Beth 半经验质量公式给出:

$$W(A, I) = -\frac{a_{\text{sym}}(\rho, T)I^2}{A} - \frac{a_c(\rho, T)Z(Z-1)}{A^{1/3}} + a_v(\rho, T)A -$$

收稿日期: 2011-07-15; 修改日期: 2011-08-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10905017); 河南省高校科技创新团队资助项目(2010IRTSTHN002)

作者简介: 普洁(1988-), 女, 河南开封人, 学生, 硕士, 从事重离子核反应实验和理论研究; E-mail: wlpujie@126.com

通讯联系人: 马春旺, E-mail: machunwang@126.com

$$a_s(\rho, T)A^{2/3} - \delta(N, Z), \quad (2)$$

其中, a_{sym}, a_c, a_v 和 a_s 分别表示对称能系数、库仑能系数、体积能系数和表面能系数。由于存在温度依赖, 此时的系数不仅包含结合能部分, 也包含熵的部分^[14]。对能项 $\delta(N, Z)$ 具有下列的形式^[18]:

$$\delta(N, Z) = \begin{cases} \frac{a_p(\rho, T)}{A^{1/2}}, & \text{odd-odd,} \\ 0, & \text{even-odd,} \\ -\frac{a_p(\rho, T)}{A^{1/2}}, & \text{even-even,} \end{cases} \quad (3)$$

其中, a_p 为对能系数, 定义 I 相差 2 的同质异位素产额比 (isobaric yield ratio, 简称 IYR) 为^[13, 15-16, 18]

$$\begin{aligned} R(I+2, I, A) &= \frac{Y(A, I+2)}{Y(A, I)} \\ &= \exp \left[\frac{W(I+2, A) - W(I, A) + (\mu_n - \mu_p)}{T} + \right. \\ &\quad \left. S_{\text{mix}}(I+2, A) - S_{\text{mix}}(I, A) \right], \quad (4) \end{aligned}$$

其中, $S_{\text{mix}}(I, A) = N \ln \left(\frac{N}{A} \right) + Z \ln \left(\frac{Z}{A} \right)$, 由式(2)和式(4)可得:

$$\begin{aligned} R(I+2, I, A) &= \exp \left\{ [\mu_n - \mu_p + \right. \\ &\quad 2a_c(Z_I - 1)/A^{1/3} - 4a_{\text{sym}}(I+1)/A - \\ &\quad \delta(N+1, Z-1) + \delta(N, Z)]/T + \\ &\quad \left. \Delta(I+2, I, A) \right\}, \quad (5) \end{aligned}$$

其中, 中子丰度为 I 的同质异位素为参考核, 式(5)中的 Z 和 N 均为参考核的质子数和中子数(下同)。由于 $\Delta(I+2, I, A) = S_{\text{mix}}(I+2, A) - S_{\text{mix}}(I, A)$, $\Delta(1, -1, A) = 0$, 由式(3)知当 I 为奇数, $\delta(N, Z) = 0$, $\delta(N+1, Z-1) = 0$, 则有:

$$\begin{aligned} R(I+2, I, A) &= \\ &\exp \left\{ [\mu_n - \mu_p + 2a_c(Z_I - 1)/A^{1/3} - \right. \\ &\quad \left. 4a_{\text{sym}}(I+1)/A]/T + \Delta(I+2, I, A) \right\}, \quad (6) \end{aligned}$$

尤其, 当 $I = -1$ 时, 对于镜像核, 式(6)简化为

$$\ln [R(1, -1, A)] = \frac{(\mu_n - \mu_p) + 2a_c(Z-1)/A^{1/3}}{T}. \quad (7)$$

利用式(7)可提取镜像核的 $(\mu_n - \mu_p)/T$ 和 a_c/T 。

具有不同 I 的同质异位素, 在不同的假设下, $(\mu_n - \mu_p)/T$, a_c/T 和 a_{sym}/T 有不同的结果。可以利用式(6)和式(7)提取的结果。

2.2 利用同质异位素产额提取 a_{sym}/T 的方法

(1) 利用镜像核作为参考核的方法

假设 $I = -1$ 参考核的质子数为 Z , 则中子剩余度为 I 的同质异位素的质子数为

$$Z_I = Z - \frac{I+1}{2}. \quad (8)$$

由式(6)和(7)可得:

$$\begin{aligned} \frac{a_{\text{sym}}}{T} &= -\frac{A}{4(I+1)} \left[\ln R(I+2, I, A) - \right. \\ &\quad \left. \Delta(I+2, I, A) - \ln R(1, -1, A) + \right. \\ &\quad \left. \frac{a_c(I+1)}{A^{1/3}T} \right], \quad (9) \end{aligned}$$

其中, 假设 $(\mu_n - \mu_p)_I/T = (\mu_n - \mu_p)_{-1}/T$, 且 a_c/T 是利用式(7)提取的镜像核结果。将用式(9)得到 a_{sym}/T 的方法记为方法(a)。

(2) 利用 $I-2$ 和 $I+2$ 的同质异位素作为参考核的方法

由式(6)可知, 参考核的中子剩余度为 I 的 IYR 为

$$\begin{aligned} R(I+2, I, A) &= \\ &\exp \left\{ [(\mu_n - \mu_p)_I + 2a_c(Z_I - 1)/A^{1/3} - \right. \\ &\quad \left. 4a_{\text{sym}}(I+1)/A]/T + \Delta(I+2, I, A) \right\} = \\ &\exp \left\{ [(\mu_n - \mu_p) + 2a_c(Z_{I-2} - 1 - 1)/A^{1/3} - \right. \\ &\quad \left. 4a_{\text{sym}}(I+1)/A]/T + \Delta(I+2, I, A) \right\}, \quad (10) \end{aligned}$$

参考核的中子剩余度为 $I-2$ 的 IYR 为

$$\begin{aligned} R(I, I-2, A) &= \\ &\exp \left\{ [(\mu_n - \mu_p)_{I-2} + 2a_c(Z_{I-2} - 1)/A^{1/3} - \right. \\ &\quad \left. 4a_{\text{sym}}(I-1)/A]/T + \Delta(I, I-2, A) \right\}. \quad (11) \end{aligned}$$

对于具有 I 和 $I+2$ 的同质异位素, 假设 a_c/T , a_{sym}/T 相等和 $(\mu_n - \mu_p)_I/T = (\mu_n - \mu_p)_{I-2}/T$, 由式(10)和(11)化简得:

$$\frac{a_{\text{sym}}}{T} = -\frac{A}{8} \left\{ \ln [R(I+2, I, A)] - \right.$$

$$\left. \begin{aligned} & \Delta(I+2, I, A) - \ln [R(I, I-2, A)] + \\ & \Delta(I, I-2, A) + \frac{2a_c}{A^{1/3}T} \end{aligned} \right\}, \quad (12)$$

将式(12)得到 a_{sym}/T 的方法记为方法(b)。忽略式(12)中 a_c/T 项, 可得:

$$\frac{a_{\text{sym}}}{T} = -\frac{A}{8} \left[\ln R(I+2, I, A) - \Delta(I+2, I, A) - \ln R(I, I-2, A) + \Delta(I, I-2, A) \right], \quad (13)$$

将式(13)得到 a_{sym}/T 的方法记为方法(c)。

3 结果与讨论

以 1 AGeV $^{124}\text{Xe}+\text{Pb}$ 与 $^{136}\text{Xe}+\text{Pb}$ ^[19] 反应产生的碎片截面的测量结果为例进行分析, 图 1 给出了利用 2.2 节中 3 种方法得到丰中子余核 a_{sym}/T 的结果。

方法(a)以镜像核的 IYR 作为参考核, 受镜像核质量数 A 范围的限制, 利用方法(a)测得的 $I>1$

余核的结果较少。方法(b)以 I 相邻的 IYR 作为参考核, 忽略了 $(\mu_n - \mu_p)/T$ 在不同中子剩余度 I 的同质异位素之间的差别, 得到的结果与 Huang 等^[14] 的基本相同。虽然 $I=1$ 的同质异位素在 A 较大的部分有所下降, 但从 $I=3$ 和 5 的同质异位素得到的结果与已有的经验结果相似, 质量数 A 为 25~80 之间的原子核的 a_{sym}/T 在 10~30 之间随着 A 的增大而增大, 并在 $a_{\text{sym}}/T=25$ 左右的地方达到饱和。对于 $I=1$ 的余核, 方法(a)和(b)的结果重合, 但随着 I 的增大, 方法(a)和(b)的结果出现了很大的差别。说明参考核的选取对丰中子余核 a_{sym}/T 的提取有较大的影响。

方法(c)忽略了方法(b)中的 a_c/T 项。在 $I>1$ 时, 方法(c)比(b)的结果偏大, 并且随着余核质量数的增加, 方法(c)与(b)的结果差得更大, 这是由于从 ^{124}Xe 反应中提取的 a_c/T 比 ^{136}Xe 反应中提取的值大而引起的。由于库仑能依赖于质量数, 从本结果可以看出, 库仑能在较大的反应系统中, 对于提取丰中子余核的 a_{sym}/T 不能简单忽略。在反应系统较小时, 忽略库仑能对提取 a_{sym}/T 影响较小。

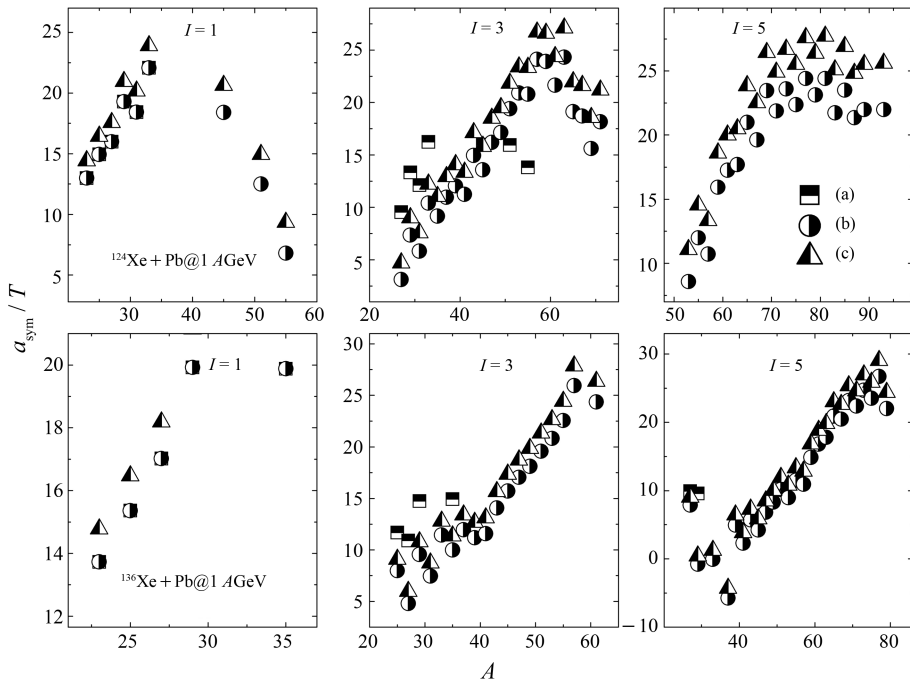


图 1 方法(a)、方法(b)和方法(c)得到 1 AGeV $^{124}\text{Xe}+\text{Pb}$ 与 $^{136}\text{Xe}+\text{Pb}$ ^[18] 反应中产生余核的 a_{sym}/T

4 总结

在 MFM 框架下, 利用 IYR 与质量公式的关联, 提取了 1 AGeV $^{124}, ^{136}\text{Xe}+\text{Pb}$ 反应产生丰中子

余核的对称能系数与温度的比率 a_{sym}/T 。基于不同的近似方法得到的丰中子余核 a_{sym}/T 结果表明, 参考核的选取对丰中子余核 a_{sym}/T 的提取影响较大, 余核的 a_c/T 对提取其 a_{sym}/T 影响较小。选取合适

的近似方法对理论分析具有重要的影响,本文仅对这些近似方法进行了简单的比较。由于提取结果可能受到反应系统的大小和中子丰度、入射能量和余核本身中子丰度的影响,需要对这些影响因素做进一步系统和深入的理论与实验研究。

参考文献 (References):

- [1] LI B A, CHEN L W, KO C M, *et al.* Phys Rep, 2008, **464**: 113.
- [2] LI B A. Phys Rev C, 2003, **67**: 017601.
- [3] MA Y G, SU Q M, SHEN W Q, *et al.* Phys Rev C, 1999, **60**: 024607.
- [4] DAS C B, GUPTA S D, LYNCH W G, *et al.* Phys Rep, 2005, **406**: 1.
- [5] GUPTA S D, MEKJIAN A Z, TSANG M B. Advances in Nuclear Physics, 2002, **26**: 89.
- [6] XU H S, TSANG M B, LIU T X, *et al.* Phys Rev Lett, 2000, **85**: 716.
- [7] WADA R, TEZKRATT R, HAGEL K, *et al.* Phys Rev C, 1997, **55**: 227.
- [8] MA Y G, SIWEK A, PETER J, *et al.* Phys Lett B, 1997, **390**: 41.
- [9] MA C W, WEI H L, YU M. Phys Rev C, 2010, **82**: 057602.
- [10] CHEN L W, KO CHE Ming, LI B A, *et al.* Front Phys China, 2007, **2**: 327.
- [11] XU J, CHEN L W, LI B A, *et al.* Phys Rev C, 2008, **77**: 014302.
- [12] YONG G. C. Phys Rev C, 2010, **81**: 054603.
- [13] HUANG M, CHEN Z, KOWALSKI S, *et al.* Phys Rev C, 2010, **81**: 044620.
- [14] HIRSCH A S, BUJAK A, FINN J E, *et al.* Phys Rev C, 1984, **29**: 508.
- [15] MA C W, WANG F, MA Y G, *et al.* Phys Rev C, 2011, **83**: 064620.
- [16] YU M, WEI H L. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2011, **39** (3): 58.
(于勉, 魏慧玲. 河南师范大学学报(自然科学版), 2011, **39** (3): 58.)
- [17] WANG S S, MA C W, WEI H L. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2011, **39**(2): 186.
(王闪闪, 马春旺, 魏慧玲. 河南师范大学学报(自然科学版), 2011, **39**(2): 186.)
- [18] GREEN A E S, EDWARDS D F. Phys Rev, 1953, **91**: 46.
- [19] HENZLOVA D, SCHMIDT K H, RICCIARDI M V, *et al.* Phys Rev C, 2008, **78**: 044616.

Approximate Methods to Extract Symmetry Energy Using Isobaric Yield Ratio Methods

PU Jie¹, QIAO Qin-peng^{1, 2}, WEI Hui-ling¹, WANG Shan-shan¹, MA Chun-wang¹, ZHANG Tong-lin¹

(1, Department of Physics, Henan Normal University, Xinxiang 453007, Henan, China;

2, Department of Physics, Henan Institute of Education, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: In the framework of the modified Fisher model, correlations between the symmetry-energy coefficient in semi-classical mass formula to temperature (a_{sym}/T) and the isobaric yield ratio in Heavy-ion collisions are established. a_{sym}/T of neutron-rich fragments are extracted using these correlations. It is found that the Coulomb-energy term has little effect on a_{sym}/T of fragments, while the reference isobars adopted have great influence on the extracted a_{sym}/T of fragments.

Key words: heavy-ion collision; isobaric yield ratio; symmetry energy

Received date: 15 Jul. 2011; Revised date: 20 Aug. 2011

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (10905017); Program for Innovative Research Team (in Science and Technology) in University of Henan Province(2010IRTSTHN002)

Corresponding author: MA Chun-wang, E-mail: machunwang@126.com