

文章编号: 1007-4627(2015)03-0259-08

## 中能Ca+Ca反应中的对称能效应

安荣<sup>1</sup>, 晏世伟<sup>1,2,3</sup>, 蒋翔<sup>1</sup>

(1. 北京师范大学核科学与技术学院, 北京 100875;

2. 北京市辐射中心, 北京 100875;

3. 兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心, 兰州 730000)

**摘要:** 采用把重离子碰撞的动力学和统计衰变过程相结合的一个两步模型, 再现了INDRA Collaborations对入射能为35 A MeV  $^{40}\text{Ca}+^{40}\text{Ca}$  和  $^{48}\text{Ca}+^{48}\text{Ca}$  反应的实验结果。进而得到了反应碎块同位素分布的Isoscaling参数 $\alpha(Z)$ 和 $\beta(N)$ , 约化对称能系数 $\zeta(Z)$ 及与平均场中的对称能强度系数 $C_s$ 之间的关系。结果表明, Isoscaling参数强烈依赖于系统的丰中子程度。随着质子数的增大,  $\zeta(Z)$ 在动力学阶段呈现平缓趋势但在衰变之后呈现上升趋势, 且该结果不依赖于所选取的反应系统。对称能效应在统计衰变过程之后的末级碎块分布中有明显表现。

**关键词:** 重离子碰撞; 多重碎裂; 约化对称能系数

**中图分类号:** O571.4   **文献标志码:** A   **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.32.03.259

### 1 引言

原子核是一个典型的量子多体系统。原子核的宏观动力学行为随着其密度及温度等变量的变化而呈现出各种复杂的形态。这些形态的变化与核状态方程(EOS)中密度相关的对称能项密切相关。通过大量的实验和理论研究, 人们已经获得了丰富的有关核状态方程的知识。然而, 无论是实验还是理论研究, 所给出的对称能的密度依赖形式依然存在着很大的不确定性。特别是在高密度区, 各种理论模型所给出的趋势差别非常大。通过重离子碰撞过程来确定对称能的密度依赖形式, 给出其合理的约束成为目前核物理研究中一个重要课题<sup>[1-5]</sup>。

就重离子核反应来说, 反应所形成的同位素的分布形状对对称能十分敏感<sup>[6]</sup>, 同时出射粒子也与对称能有一定依赖<sup>[7]</sup>。因而, 反应产物分布的Isoscaling规律是目前对对称能研究的一个有效方法之一。在中高能区, 发生碰撞的弹核和靶核经过一个伴随着液气相变的、复杂的压缩和膨胀过程。在这一动力学过程中产生了大量中等质量的受激碎块, 这些受激碎块会进一步通过放出各种轻粒子, 或裂变成更小碎块, 直至放出 $\gamma$ 射线等方式衰变成处于 $\beta$ 稳定线附近的基态同位素。

对于动力学过程来说, 人们普遍接受的观点是反应所产生的初级碎块的同位素分布, 对对称能的形式具有

灵敏的依赖。然而, 对于衰变过程结束后, 末级碎块分布对对称能的形式依赖性有两种不同的结论: 一种认为, 衰变过程能够抹去末级碎块分布对对称能形式的依赖<sup>[8]</sup>; 另一种认为, 在受激碎块的统计衰变之后, 对称能效应依然保持在碎块的同位旋分布中<sup>[9]</sup>。因此, 对这一问题目前并没有一个系统的分析和结论。

近来, 为了获得核物质EOS中对称能项的新信息, INDRA Collaborations对入射能为35 A MeV  $^{40}\text{Ca}+^{40}\text{Ca}$  和  $^{48}\text{Ca}+^{48}\text{Ca}$  反应的碎块同位素分布进行了测量<sup>[10]</sup>。然而, 尚没有该实验结果系统的理论分析<sup>[10]</sup>。以该实验结果为基础, 本文将对上述问题做出初步的分析和讨论。

理论上, 由于重离子碰撞后期的次级衰变过程会持续相当长的时间, 以达到实验的可观测范围。这一时间远远超过了微观输运模型给出稳定描述的时间范围, 这在中高能重离子碰撞情况下尤其如此。而且, 对于分子动力学模型来说, 原则上, 它能够描述轻粒子的产生, 但尚不能给出复合核发射的分支比。基于此, 我们采用一个两步反应机制, 即把重离子碰撞过程分成两个阶段来描述: 动力学过程和统计衰变过程。前一阶段核反应的动力学过程粒子遵循从初态到末态的时间演化, 后一阶段的统计衰变过程会对受激发的初始碎块进行“次级

收稿日期: 2014-10-08; 修改日期: 2014-11-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10945019); 国家人力资源和社会保障部科学基金资助项目

作者简介: 安荣(1987-), 男, 甘肃环县人, 硕士研究生, 从事粒子物理与原子核物理研究; E-mail: freeanrong@163.com。

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

衰变”处理,直至它们冷却到基态。

我们采用改进的量子分子动力学 (ImQMD) 模型<sup>[11-12]</sup>描述动力学过程,而用统计衰变模型 GEMINI<sup>[13]</sup>来描述碎块的退激发过程。碎块的激发能是由碎块在本体质心系中的总能量减去该碎块在基态时的结合能得到的。在动力学模型模拟的末期,采用传统的 Coalescence 模型给出初级碎片的信息,用于统计模型的计算。

ImQMD 模型是一个微观的输运模型,它同时考虑了平均场和介质中核子-核子两体碰撞,因而它能够很好地描述中等能区重离子碰撞的动力学过程<sup>[14-15]</sup>。统计衰变模型 GEMINI 考虑了各种轻粒子的发射,对称裂变及各种可能的两体衰变模式。能级密度采用 Fermi 气体模型,并考虑了壳和对修正。我们的计算结果表明,上述两步模型能很好地描述中高能区的重离子碰撞过程<sup>[15-16]</sup>。

## 2 Isoscaling 规律与约化对称能系数

在中高能重离子碰撞中,系统的多重碎裂现象一般主要发生在剧烈的核子-核子碰撞的动力学过程中。核态方程和核物质液-气相变是这个领域研究的重要方面。而给出核态方程中对称能项的合理约束更是目前重离子核反应研究中一个挑战性的课题。其结果对理解核反应动力学,核结构(特别是远离  $\beta$  稳定线核的结构)以及核天体物理有着重要意义。

在多重碎裂的反应中,对称能依赖于发射源的密度  $\rho$ 、温度  $T$ 、压强和同位旋。其中,同位旋效应源于反应过程中质子和中子的不同密度和受到不同的相互作用。在流体动力学模型下,中子和质子流差与对称能  $S(\rho)$  的关系可以表示成

$$j_n - j_p \propto S(\rho) \nabla I + \frac{\partial S(\rho)}{\partial \rho} I \nabla \rho,$$

其中:右边第一项为同位旋扩散项 (Isospin Diffusion),第二项为同位旋迁移项 (Isospin Migration)。这两项在很大程度上都与对称能的强度有关。实验结果表明,重离子碰撞产生的同位素分布的形状对对称能十分敏感。因此,反应所形成的同位素分布对研究碎裂核系统的性质十分有利。人们倾向于使用碎块的产额分布去寻找不同密度和温度下发射源的对称能信息。

从统计理论出发,同位素的形成主要是受自由能的作用<sup>[18]</sup>。同位素产额  $Y(N, Z)$  与核自由能  $G(N, Z)$  有如下关系<sup>[18-22]</sup>:

$$Y(N, Z) \propto \exp \frac{-[G(N, Z) - \mu_n N - \mu_p Z]}{T}, \quad (1)$$

其中:  $\mu_n$  和  $\mu_p$  表示中子和质子的化学势;  $T$  表示碎块形成时的温度。  $G(N, Z)$  中的对称能项通常可以表示为

$$E_{\text{sym}} = \zeta(Z) \frac{I^2}{A}, \quad (2)$$

其中:  $A = N + Z$  是总的核子数;  $I = N - Z$  是核子的不对称度。  $\zeta(Z)$  是约化对称能系数,其依赖于发射源的密度  $\rho$  和温度  $T$ 。应该指出,从某一个反应由方程(2)抽取对称能是十分困难的,因为我们需要一个很大范围的同位素。为了克服这一限制,可以考虑两个具有不同  $N/Z$  的相似反应,而得到<sup>[18,24-25]</sup>:

$$R_{21}(N, Z) = \frac{Y_2(N, Z)}{Y_1(N, Z)} = C \exp(\alpha N + \beta Z), \quad (3)$$

其中:  $\alpha = (\mu_n^2 - \mu_n^1)/T$  和  $\beta = (\mu_p^2 - \mu_p^1)/T$  表示来自不同反应系统的中子和质子的化学势与温度的比值。  $C$  是一个归一化的常数因子。式(3)就是 Isoscaling 规律,它最早由 MSU group 在实验上观测到<sup>[26-27]</sup>,并被后来的一系列实验所证实<sup>[28-30]</sup>。利用 Isoscaling 关系(3),  $\alpha$  和  $\beta$  可由  $\ln R_{21}(N, Z)$  与  $N$  或  $Z$  的线性关系得到。

由 Isoscaling 关系(3)所得到的 Isoscaling 参数与对称能系数  $\zeta(Z)$  之间存在着密切的关系。这一关系可以表示为<sup>[24,30-31]</sup>

$$\zeta(Z) = \frac{\alpha(Z)}{4\Delta(Z/A)^2}, \quad (4)$$

其中

$$\Delta \left( \frac{Z}{A} \right)^2 = \left( \frac{Z}{A} \right)_1^2 - \left( \frac{Z}{A} \right)_2^2, \quad (5)$$

$\bar{A}$  为对于具有给定质子数的同位素的平均质量数。(4)式表明, Isoscaling 参数  $\alpha(Z)$  和同位素分布的宽度  $\Delta(Z/A)^2$  决定了约化对称能系数  $\zeta(Z)$ 。关系式(3)、(4)和(5)是本文讨论的基础。

## 3 结果及讨论

在我们的模拟中,我们选择了巨正则系综的统计方法。巨正则系综的统计方法能够很好地描述同位素和同重元素的分布<sup>[17]</sup>。在符合实验结果<sup>[10]</sup>的基础上,我们分析了入射能为  $35 \text{ A MeV}^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ ,  $^{48}\text{Ca} + ^{48}\text{Ca}$  和  $^{60}\text{Ca} + ^{60}\text{Ca}$  反应。  $t = 300 \text{ fm}/c$  为动力学和统计衰变模型的衔接时间。ImQMD 模型参数与文献<sup>[15]</sup>相同。计算结果及与实验结果的比较如图 1 和图 2 所示。

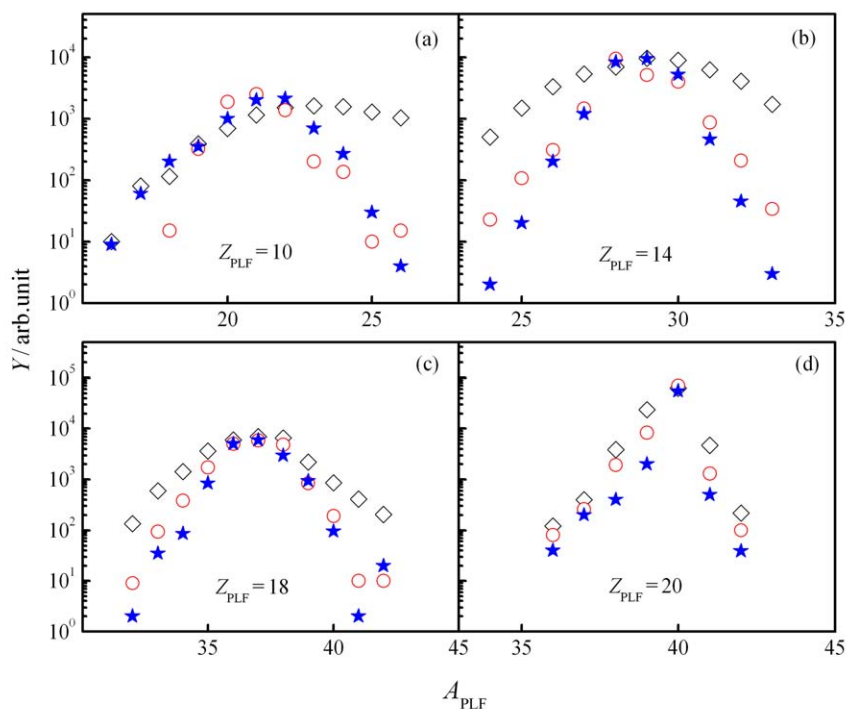


图 1 (在线彩图)  $^{40}\text{Ca}+^{40}\text{Ca}$  反应中质子数  $Z = 10$ (a),  $14$ (b),  $18$ (c),  $20$ (d) 的类弹核的同位素分布的计算结果与实验结果<sup>[10]</sup>的比较

空心方块、空心圆圈和实心星分别表示动力学阶段、衰变之后和实验上测量的同位素分布。

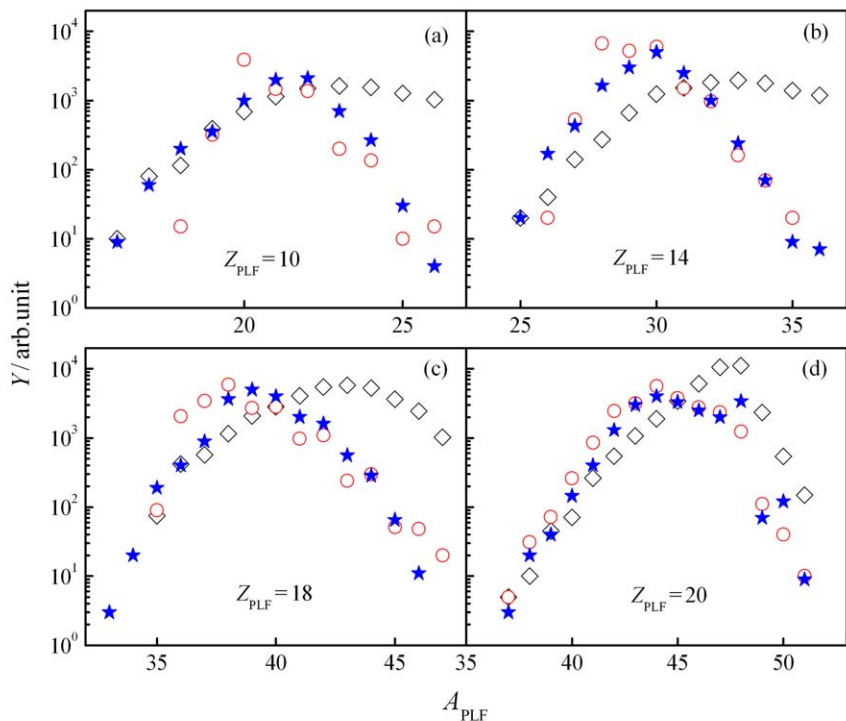


图 2 (在线彩图) 如图 1,  $^{48}\text{Ca}+^{48}\text{Ca}$  反应的同位素分布的计算结果与实验结果<sup>[10]</sup>的比较

从实验结果<sup>[10]</sup>来看, 所得同位素分布在一个很宽的质量范围。丰中子同位素可达  $N/Z = 1.6$  (对  $Z_{PLF} = 10$ ) 到  $N/Z = 1.57$  (对  $Z_{PLF} = 18$ )。平均质量数  $\langle A_{PLF} \rangle$

和分布宽度  $\sigma$  随  $Z_{PLF}$  的增加而增加。对于小的  $Z_{PLF}$ ,  $\langle A_{PLF} \rangle$  和  $\sigma$  在两个反应系统之间差别不大。而对于丰中子的弹核引起的反应,  $\langle A_{PLF} \rangle$  和  $\sigma$  随  $Z_{PLF}$  的增加十

分显著。这是因为一方面不同的碰撞参数决定了形成块的大小，另一方面相对于质子而言中子更容易成块。而且，分布的峰值集中在  $N_{PLF} = Z_{PLF}$ 。

理论上，通过比较模拟结果与实验结果，可以很容易地看出，动力学过程所产生的初级碎块的同位素分布难以再现实验结果。通过考虑由统计衰变模型描写的受激初级碎块的衰变过程，极大地改善了同位素的分布，所得的理论计算结果很好的符合了实验结果。

这里应该指出，按照统计理论，一个处于平衡态的复合核系统，其碎块的质量分布应是一个对称的高斯分布<sup>[32]</sup>。因此，动力学过程所产生的初级碎块的同位素分布实际上表明初级碎块所经历的是一个

动力学的非平衡过程，其保持了对入射道某种程度上的记忆。另一方面，衰变后所给出的末级碎块分布可以对实验结果很好的描述，本工作所采用的两步模型能可靠地描述入射能为 35 A MeV  $^{40}\text{Ca}+^{40}\text{Ca}$ ,  $^{48}\text{Ca}+^{48}\text{Ca}$  和  $^{60}\text{Ca}+^{60}\text{Ca}$  反应过程。

### 3.1 同位素分布的Isoscaling规律

利用公式(3)我们选择  $^{40}\text{Ca}+^{40}\text{Ca}$  作为参考反应系统，视作反应系统 1，而  $^{48}\text{Ca}+^{48}\text{Ca}$  和  $^{60}\text{Ca}+^{60}\text{Ca}$  则是视作反应系统 2 和 3。在前面符合实验结果的基础上，我们统计得出了  $\ln R_{21}$ ,  $\ln R_{31}$  随  $N$  和  $Z$  变化的结果。图 3(a), (c) 和 (b), (d) 分别给出了  $\ln R_{21}$ ,  $\ln R_{31}$  对于给

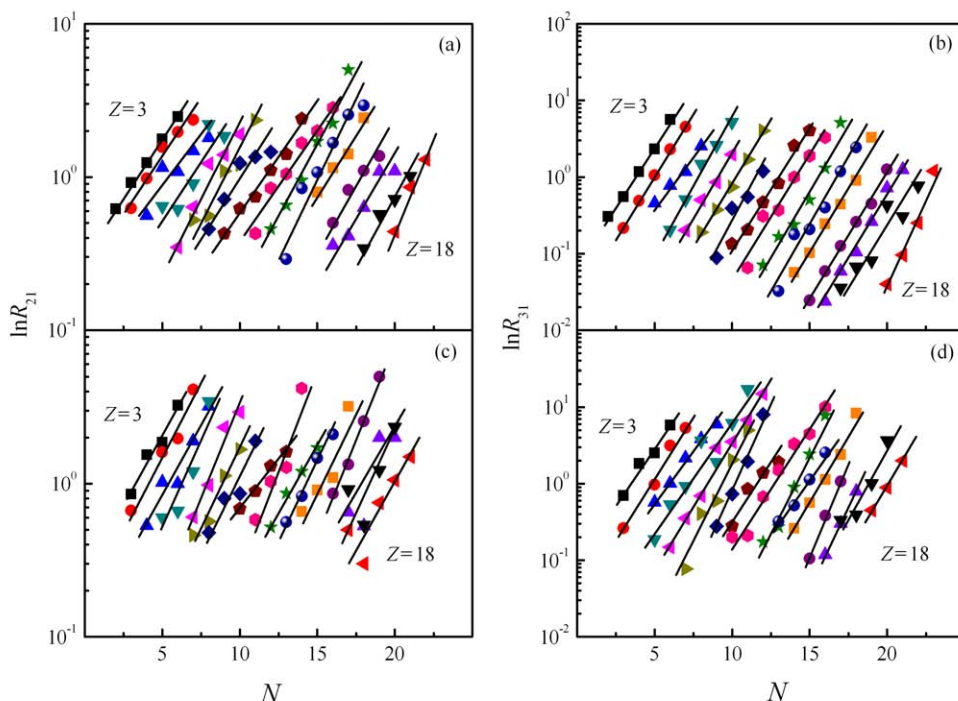


图 3 (在线彩图)  $R_{21}$  和  $R_{31}$  的计算结果

定的  $Z = 3 \sim 18$  随  $N$  的变化结果，其中 (a), (b) 对初级碎块，(c), (d) 对应末级碎块。根据关系式(3)，各直线的斜率即为相应的  $\alpha(Z)$ 。同样可以得到  $\ln R_{21}$ ,  $\ln R_{31}$  随  $Z$  的变化情况，其结果与随  $N$  的变化情况类似，只是此时  $\beta(N) < 0$ 。

图 4(a),(b) 分别给出由  $\ln R_{21}$  和  $\ln R_{31}$  所得到的动力学阶段产生的初级碎块和衰变后末级碎块的  $\alpha(Z)$ 。可以看出，无论是对初级还是对末级碎块， $\alpha(Z)$  随  $Z$  的变化不大，几乎与  $Z$  无关。这一结论与文献[33]是一致的。从平均的意义上，在没有加衰变之前， $^{40}\text{Ca}+^{40}\text{Ca}$  和  $^{48}\text{Ca}+^{48}\text{Ca}$  组合的  $\alpha = 0.37 \pm 0.03$ ,  $\beta = -0.42 \pm 0.04$ ,  $^{40}\text{Ca}+^{40}\text{Ca}$  和  $^{60}\text{Ca}+^{60}\text{Ca}$  组合

的  $\alpha = 0.45 \pm 0.05$ ,  $\beta = -0.54 \pm 0.04$ 。当加上衰变之后， $^{40}\text{Ca}+^{40}\text{Ca}$  和  $^{48}\text{Ca}+^{48}\text{Ca}$  组合的  $\alpha = 0.76 \pm 0.04$ ,  $\beta = -0.97 \pm 0.05$ ,  $^{40}\text{Ca}+^{40}\text{Ca}$  和  $^{60}\text{Ca}+^{60}\text{Ca}$  组合的  $\alpha = 0.87 \pm 0.03$ ,  $\beta = -0.89 \pm 0.02$ 。由于统计带来的误差也在我们的考虑范围之内， $\alpha$  和  $\beta$  的值受反应系统的丰中子程度影响很大，这很容易从图 3 看出来。

$\alpha$  和  $\beta$  的值是我们通过不同的反应系统的同位素和同中子数的比值获得的，这对于不同的统计阶段来说对反应系统的影响是一样的。但是我们可以看到，加上衰变之后数值的大小却出现了一定程度的波动。衰变模型使得处于激发的碎块通过发射核子或者小的碎块退激发到稳定的基态，这一过程壳和对效应起主要作用。

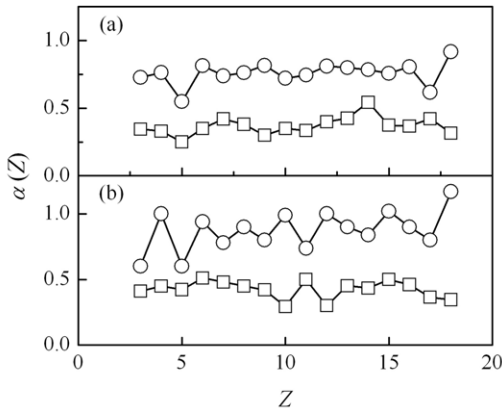


图 4 从不同反应系统的初级碎块和衰变之后碎块的同位素比值中获得的 $\alpha$  值  
(a) 表示动力学阶段, (b) 表示衰变之后。空心方块为 $^{40}\text{Ca}+^{40}\text{Ca}$ 和 $^{48}\text{Ca}+^{48}\text{Ca}$  反应组合, 空心圆圈为 $^{40}\text{Ca}+^{40}\text{Ca}$ 和 $^{60}\text{Ca}+^{60}\text{Ca}$ 反应组合。

### 3.2 约化对称能系数 $\zeta(Z)$

通过巨正则系综的方法, 我们讨论了不同反应系统之间的同位素的分布情况。在我们讨论的范围内, 同位素的分布主要由发射源的同位旋不对称度来决定的。在弹核和靶核碰撞发生压缩和膨胀的过程中, 核子在弹靶之间相互转移。在这个重新分配的过程中发生着复杂的物理过程。我们通过对碎块的同位素的统计来间接地揭示其内部的复杂机制。按照方程(4), 为了获得对称能系数, 我们通过 $^{40}\text{Ca}+^{40}\text{Ca}$ 和 $^{48}\text{Ca}+^{48}\text{Ca}$ ,  $^{40}\text{Ca}+^{40}\text{Ca}$ 和 $^{60}\text{Ca}+^{60}\text{Ca}$ 的组合来得到方程(4)中的 $\Delta(Z/A)^2$ 。结果示于图5。从图中我们可以看到, 对于动力学阶段产生的初级碎块, 随着质子数

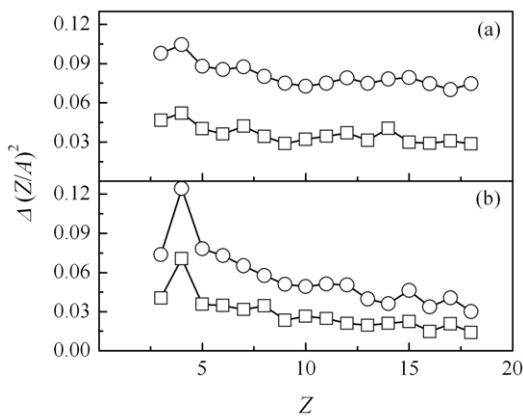


图 5 不同反应系统之间的初级碎块和衰变之后碎块的 $\Delta(Z/A)^2$  值随着质子数的变化  
(a) 表示动力学阶段, (b) 表示衰变之后。空心方块为 $^{40}\text{Ca}+^{40}\text{Ca}$ 和 $^{48}\text{Ca}+^{48}\text{Ca}$  反应组合, 空心圆圈为 $^{40}\text{Ca}+^{40}\text{Ca}$ 和 $^{60}\text{Ca}+^{60}\text{Ca}$ 反应组合。

的增大 $\Delta(Z/A)^2$ 呈略微的下降趋势。但是, 当我们加上衰变之后这个趋势就明显地增大。这是因为大的碎块通过发射轻粒子进行衰变的结果。而且不同的组合之间数值也不一样, 因为对于丰中子的反应系统, 形成的同位素分布范围较宽且其产额相对增大。

我们所得到的基态的末态碎块分布是通过这两个模型的组合得到的, 加上衰变之后改变了同位素分布的宽度, 这与实验结果是一致的。

在图6给出了通过表达式(4)得到了约化的对称能系数 $\zeta(Z)$ 。对于动力学阶段产生的初级碎块, 除了 $Z \leq 5$ 的碎块外,  $\zeta(Z)$ 对质子数的依赖很弱, 基本保持不变。根据公式(4), 这意味着 $\alpha$ 与 $\Delta(Z/A)^2$ 呈正比关系。这是一个非常有意义的结果, 因为对于处于热平衡和化学平衡下的碎块,  $\zeta(Z)$ 应该与表面和体对称能系数之间存在如下关系,

$$\zeta(Z) \propto 1 - \frac{C_s}{C_v} (2Z)^{-1/3}, \quad (6)$$

对于基态核,  $C_s \approx C_v$ 。因此, 我们所得到的 $\zeta(Z)$ 与 $Z$ 几乎无关意味着, 此时,  $C_s \approx 0$ 。这表明初级碎块产生过程中的表面效应并不明显。就初级碎块产生的动力学过程来说, 各个碎块不是孤立的, 相互之间依然存在着复杂的作用<sup>[9]</sup>, 而且, 如前面所述, 这一过程是非平衡的。

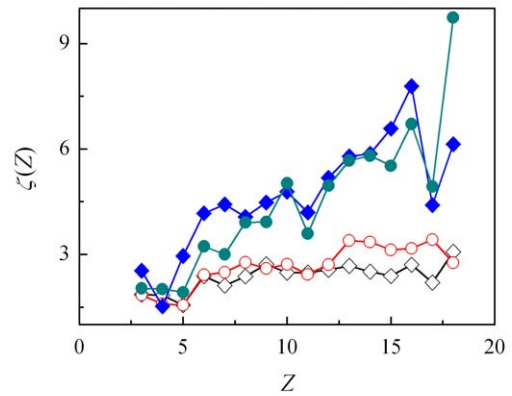


图 6 (在线彩图) 衰变前后的约化对称能系数 $\zeta(Z)$ 随着质子数 $Z$ 的变化  
 $^{40}\text{Ca}+^{40}\text{Ca}$ 为反应参考系统1 方块为 $^{40}\text{Ca}+^{40}\text{Ca}$  与 $^{48}\text{Ca}+^{48}\text{Ca}$  反应组合, 圆圈为 $^{40}\text{Ca}+^{40}\text{Ca}$  与 $^{60}\text{Ca}+^{60}\text{Ca}$  反应组合。空心表示初级碎块, 实心表示末级碎块。

由图1~2可知, 加上衰变模型之后的同位素分布能够很好地符合实验结果。因此, 由末级碎块分布计算所得的 $\zeta(Z)$ 应该与实验结果一致<sup>[18]</sup>。图6中的实心圆圈和实心方块给出了由末级碎块分布计算所得的 $\zeta(Z)$ 。很显然,  $\zeta(Z)$ 随 $Z$ 的增加而明显增加, 定性上与关系



式(6)一致。这一结果表明,  $\zeta(Z)$  对  $Z$  的依赖源于受激初级碎块的统计衰变过程。对称能效应在统计衰变过程之后的末级碎块分布中明显的表现出来, 而且与反应系统关系并不明显。由于同位素分布宽度在两个过程中发生变化, 我们在得出的 Isoscaling 参数的变化趋势基本上一致, 但是动力学阶段和统计衰变之后的同位素分布的宽度明显不同, 尤其是当质子数增大时, 在动力学过程中可以产生中质比很大的同位素。但是加上衰变之后, 相应同位素的中质比明显变小, 这是由于退激发后的碎块要趋于稳定, 靠近  $\beta$  稳定线。这也说明了考虑衰变的必要性。

### 3.3 平均场中的对称能系数 $C_s$ 与 $\zeta(Z)$ 的关系

最后, 我们来看 ImQMD 模型平均场中的对称能系数  $C_s$  与  $\zeta(Z)$  的关系。采用不同的  $C_s$ , 我们对  $^{40}\text{Ca}+^{40}\text{Ca}$  与  $^{48}\text{Ca}+^{48}\text{Ca}$  和  $^{40}\text{Ca}+^{40}\text{Ca}$  与  $^{60}\text{Ca}+^{60}\text{Ca}$  两个反应组合, 计算了  $\zeta(Z)$  与  $Z$  的关系, 如图 7~8 所示。

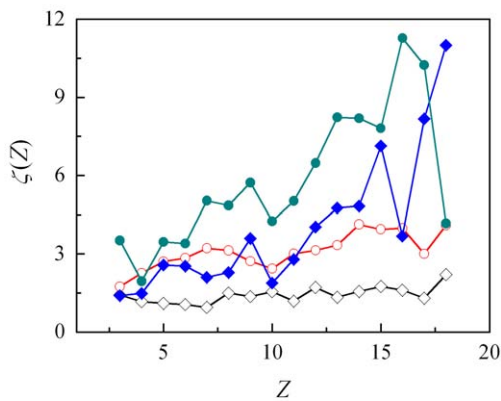


图 7 (在线彩图) 以  $^{40}\text{Ca}+^{40}\text{Ca}$  为反应参考系统 1,  $^{48}\text{Ca}+^{48}\text{Ca}$  为反应系统 2, 平均场中对称能系数  $C_s$  为 0 (方块) 和 48 (圆圈) 时, 动力学阶段 (空心) 和衰变之后 (实心) 约化对称能系数  $\zeta(Z)$  随着质子数  $Z$  的变化

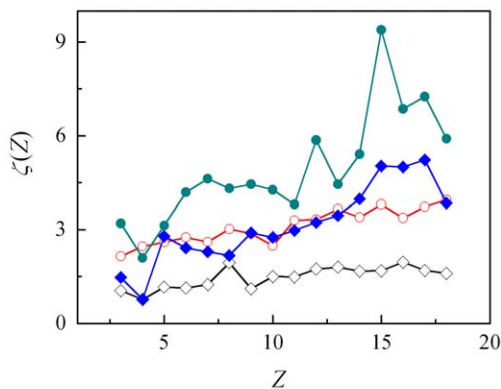


图 8 (在线彩图) 同图 7, 但  $^{60}\text{Ca}+^{60}\text{Ca}$  为反应系统 2

从图 7~8 可以明显地看出, 改变  $C_s$  的大小, 基本不改变  $\zeta(Z)$  与  $Z$  的依赖关系。然而,  $\zeta(Z)$  强度对  $C_s$  十分敏感。  $C_s$  的增加可以在很大程度上增加  $\zeta(Z)$  的大小。在平均场对称能强度参数  $C_s$  取相同数值时 (0, 32 或者 48), 这两个双反应系统的 Isoscaling 参数 (及约化对称能参数) 的变化趋势类似, 这从图 6, 图 7 和图 8 中可以看出, 但数值上存在一些差别, 这种差别是来自于这两个双反应系统的非对称度的不同。

## 4 结论

采用把重离子碰撞的动力学和统计衰变过程相结合的一个两步模型, 再现了 INDRA Collaborations 对入射能为 35 A MeV  $^{40}\text{Ca}+^{40}\text{Ca}$  和  $^{48}\text{Ca}+^{48}\text{Ca}$  反应的实验结果。通过理论模拟进而得到了反应碎块同位素分布的 Isoscaling 参数  $\alpha(Z)$  和  $\beta(N)$ , 约化对称能系数  $\zeta(Z)$  及与平均场中的对称能强度系数  $C_s$  之间的关系。

在巨正则系综理论下,  $\alpha(Z)$ ,  $\Delta(Z/A)^2$  和  $\zeta(Z)$  这三个量之间存在着方程(4)所示关系。因此, 对  $\zeta(Z)$  的分析取决于对  $\alpha$  和  $\Delta(Z/A)^2$  计算的精度。本工作首先对 INDRA Collaborations 所得的同位素分布实验结果进行分析。结果表明, 动力学过程所产生的初级碎块的同位素分布难以再现实验结果。通过考虑由统计衰变模型描写的受激初级碎块的衰变过程, 极大地改善了同位素的分布, 所得的理论计算结果很好地符合了实验结果。

在此基础上, 从理论上得到了  $\alpha(Z)$  和  $\Delta(Z/A)^2$ 。从计算结果来看,  $\alpha(Z)$  对同位素的电荷数  $Z$  并不敏感, 而受反应系统的丰中子程度影响很大。对于初级碎块,  $\Delta(Z/A)^2$  随  $Z$  有下降的趋势。对于末级碎块, 这一下降的趋势更加明显。对初级碎块,  $\zeta(Z)$  对  $Z$  依赖很弱, 基本保持不变。这意味着表面效应并不明显, 碎块之间存在某种程度的关联近似看做核物质来处理是适合的。而对末级碎块,  $\zeta(Z)$  随  $Z$  而明显增加。因此,  $\zeta(Z)$  对  $Z$  的依赖主要源于受激初级碎块的统计衰变过程。对称能效应在统计衰变过程之后的末级碎块分布中明显地表现出来。

ImQMD 模型平均场中的对称能系数  $C_s$  与  $\zeta(Z)$  的关系是一个非常有趣的课题。本工作结果表明,  $C_s$  的大小, 基本不改变  $\zeta(Z)$  与  $Z$  的依赖关系, 而  $\zeta(Z)$  强度对  $C_s$  十分敏感。

### 参考文献:

- [1] TSANG M B, ZHANG Yingxun, DANIELEWICZ P, *et al.* Phys Rev Lett, 2009, **102**: 122701.

- [2] SAMADDAR S K, DE J N, VINAS X, *et al.* Phys Rev C, 2007, **76**: 041602(R).
- [3] ZHANG Yingxun, LU Xiaohua, ZHAO Kai, *et al.* Nuclear Physics Review, 2011, **28**(4): 377. (in Chinese)  
(张英逊, 卢晓华, 赵凯, 等. 原子核物理评论, 2011, **28**(4): 377.)
- [4] LEHAUT G, GULMINELLI F, LOPEZ O. Phys Rev Lett, 2009, **102**: 142503.
- [5] 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.)
- [6] LI B A, CHEN W, KO C M. Recent Progress and New Challenges in Isospin Physics with Heavy-ion Reactions[J]. Phys rep, 2008, **464**: 113.
- [7] LI Qingfeng, GUO Chenchen, WANG Yongjia. Nuclear Physics Review, 2013, **30**(3): 331. (in Chinese)  
(李庆峰, 郭琛琛, 王永佳. 原子核物理评论, 2013, **30**(3): 331.)
- [8] NAPOLITANI P, COLONNA M, GULMINELLI F, *et al.* Phys Rev Lett, 2010, **81**: 044619.
- [9] ONO AKIRA. AIP Conf Proc Ser, 2007, **884**: 292.
- [10] ADEMARD G, BORDERIE B, CHBIHI A, *et al.* Eur Phys J A, 2014, **50**: 33.
- [11] WANG N, LI Z X, WU X Z, *et al.* Phys Rev C, 2004, **69**: 034608.
- [12] WANG N, LI Z X, WU X Z, *et al.* Phys Rev C, 2002, **65**: 064608.
- [13] CHARITY R J, MCMAHAN M A, WOZNIAC G J, *et al.* Nucl Phys A, 1988, **483**: 371.
- [14] WANG Lichun, YAN Shiwei, LI Yanjing, *et al.* Nucl Phys A, 2013, **920**: 1.
- [15] LI Yanjing, YAN Shiwei, JIANG Xiang, WANG Lichun. Nucl Phys A, 2013, **902**: 1.
- [16] CHENG J X, JIANG X, YAN S W, *et al.* J Phys G: Nucl Part Phys, 2012, **39**: 055104.
- [17] MALLIK SWAGATA, CHAUDHURI GARGI. Phys Rev C, 2013, **87**: 011602(R).
- [18] CHEN Z, KOWALSKIS S, HUANG M. *et al.* Phys Rev C, 2010, **81**: 064613.
- [19] PU Jie, QIAO Qingpeng, WEI Huiling, *et al.* Nuclear Physics Review, 2012, **29**(2): 129. (in Chinese)  
(普洁, 乔庆鹏, 魏慧玲, 等. 原子核物理评论, 2012, **29**(2): 129.)
- [20] TSANG M B, HSI W C, LYNCH W G, *et al.* Phys Rev C, 2001, **64**: 054601.
- [21] TSANG M B, HSI W C, LYNCH W G, *et al.* Phys Rev Lett, 2008, **101**: 122702.
- [22] CHAUDHURI G, DAS GUPTA S, MOCKO M. Nucl Phys A, 2008, **813**: 293.
- [23] MINICH R W, AGARWALS S, BUJAK A, *et al.* Phys Lett B, 1982, **118**: 458.
- [24] ONO AKIRA, DANIELEWICZ P, FRIEDMAN W A, *et al.* Phys Rev C, 2003, **68**: 051601(R).
- [25] WUENSCHEL S, DIENHOFFER R, SOULIOTIS G A, *et al.* Phys Rev C, 2009, **79**: 061602.
- [26] XU H S, TSANG M B, LIU T X, *et al.* Phys Rev Lett, 2000, **85**: 716.
- [27] TSANG M B, FRIEDMAN W A, GELBKE C K, *et al.* Phys Rev Lett, 2001, **86**: 5023.
- [28] SOULIOTIS G A, SHETTY D V, VESELSKY M, *et al.* Phys Rev C, 2003, **68**: 024605.
- [29] GERACI E, BRUNOA M, D AGOSTINO M, *et al.* Nucl Phys A, 2004, **732**: 173.
- [30] LE FÈVRE A, (INDRA and ALADIN Collaborations *et al.*). Phys Rev Lett, 2005, **94**: 162701.
- [31] BOTVINA A S, LOZHKIN O V, TRAUTMAN W. Phys Rev C, 2002, **65**: 044610.
- [32] OLMIA A, LYNEN U, NATOWITZ J B, *et al.* Phys Rev Lett, 1980, **44**: 383.
- [33] HUANG M, CHEN Z, KOWALSKIS S, *et al.* Nucl Phys A, 2010, **847**: 233.

## Effect of Symmetry Energy in Reaction Ca+Ca at Intermediate Energies

AN Rong<sup>1,1)</sup>, YAN Shiwei<sup>1,2,3</sup>, JIANG Xiang<sup>1</sup>

(1. College of Nuclear Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Beijing Radiation Center, Beijing 100875, China;

3. Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy-Ion  
Research Facility in Lanzhou, Lanzhou, 730000, China)

**Abstract:** A two-step model for combining the dynamical and statistical decay processes in heavy-ion collisions is used to reproduce the experimental results of the INDRA Collaborations on  $^{40}\text{Ca}+^{40}\text{Ca}$  and  $^{48}\text{Ca}+^{48}\text{Ca}$  reactions at 35 AMeV. We obtain the isoscaling parameters  $\alpha(Z)$  and  $\beta(N)$  of isotopic distributions of the fragments, the reduced symmetry energy coefficient  $\zeta(Z)$  and its dependence on the symmetry energy strength coefficient  $C_s$  in the mean field. Our results suggest that Isoscaling parameters strongly depend on the degree of neutron-rich. With the increasing atomic number,  $\zeta(Z)$  represents a smoothly flat tendency during the dynamical process but shows the increasing tendency after decay, and such results are independent on the selected reaction systems. The effect of symmetry energy shows evidently in the isotopic distributions of fragments after statistical decay process.

**Key words:** heavy ion collision; multifragmentation; reduced symmetry energy coefficient

---

**Received date:** 8 Oct. 2014; **Revised date:** 5 Nov. 2014

**Foundation item:** National Nature Science Foundation of China(10945019); Science Foundation of Ministry of Human Resources and Social Security of the People's Republic of China

1) E-mail: freeanrong@163.com.

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