

同位旋标度规律的动力学和统计衰变效应*

田文栋¹⁾ 马余刚 方德清 蔡翔舟 王宏伟 郭威 王鲲

(中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

摘要 通过同位旋相关的量子分子动力学模型和统计级联衰变模型, 计算了两个相似的同位旋不同的反应系统的同位旋标度规律, 计算的结果表明对于轻粒子碎片, 同位旋标度系数 α 随反应时间的增加有所变大, 而对于重的余核产物, α 随反应时间的增加有所减小; 轻粒子碎片的 α 基本上保持不变, 中等质量和重的余核, α 与产物的大小相关, 产物越重 α 越大. 统计级联衰变可以稍微增加同位旋标度参数 α , 但是不改变 α 对于轻粒子和重产物的变化规律.

关键词 同位旋标度规律 同位旋相关的量子分子动力学模型 统计级联衰变模型

1 引言

核反应的产物中包含了同位旋自由度的相关信息, 近些年来人们开始越来越多地关注同位旋的自由度, 进行了大量非对称核引起的核反应^[1-3]. 对核物质状态中的同位旋相关的对称能项的理解, 在核天体物理, 中子星性质的确定上, 也具有重要的意义. 在测量核反应产物同位旋的信息时, 测量到是衰变后的次级产物, 而理论模型计算出来的往往是初级产物, 在理论和实验比较时有很多困难. 最近 M. B. Tsang 提出在两个相似的核反应中, 如果两个反应不同的仅仅是入射道同位旋, 那么这两个反应的同位素产额的比值可表示为 Z 和 N 的简单函数关系^[4, 5]

$$R_{21}(N, Z) = Y_2/Y_1 = C \exp(\alpha N + \beta Z). \quad (1)$$

这种函数关系称为同位旋标度规律, 其中 α , β 是同位旋标度参数, C 是归一化系数, 下标 '1' 通常表示缺中子的系统, 而 '2' 表示丰中子的系统. 并且在文献[6]中作者认为次级衰变不会改变同位旋标度规律及其参数, 因此通过同位旋标度规律可以获得有关初级产物的一些信息. 接下来的一系列理论和实验上的工作证实同位旋标度规律的普遍性, 在很多反应机制如蒸发反应^[7], 深部非弹性散射中^[8, 9], 裂变^[10] 和多重碎裂中^[4, 5, 11-13], 都观察到同位旋标度规律, 而且也从理论模型上^[6, 14-19] 研究了同位旋标度的一些规律

和特征. 但是一些理论模型^[20, 21] 的计算结果也持有不同的观点, 认为次级衰变对同位旋标度还是有很大改变的, 因此从不同的理论模型框架下进一步确定次级衰变的影响就比较重要.

2 同位旋相关的量子分子动力学模型和统计级联衰变模型

同位旋相关的量子分子动力学模型是广泛应用于核反应研究的一个动力学模型^[22-24], 对该模型的详细描述可在上述文献中获得. 本工作中采用的一组参数列在表 1 中.

表 1 文中 IQMD 计算采用的参数

α^*	β	γ	ρ_0	v_y/MeV	m	$C_{\text{sym}}/\text{MeV}$
-356	303	1.17	0.16	-2.4	0.83	32

* α , β 和 γ 对应于软势, 单位是 MeV.

IQMD 计算的产物是初级产物, 处于激发状态, 这些初级产物的衰变我们采用一个统计级联衰变模型 GEMINI 来计算, GEMINI 模型是描述热核衰变的一个成功的统计模型^[25, 26]. 该模型考虑了从轻粒子发射到对称裂变的所有可能的两体衰变模式, 通过 Monte Carlo 技术追踪复合核通过两体衰变的衰变链, 直到产物不能再衰变为止.

* 国家自然科学基金(10405033, 10405032, 10505026)资助

1) E-mail: tianwendong@sinap.ac.cn

初级产物的激发能的计算是在动力学模型计算结束, 开始用统计衰变模型计算的时刻进行计算,

$$E^* = E_{inc}^{c.m.} - \sum_{mult} E_{kin}^{c.m.} - Q. \quad (2)$$

公式中的求和是对该时间中的所有碎片, E^* 是系统总的激发能, 假定激发能在核子之间平均分配, 可以得到每个碎片的激发能.

3 计算结果

模拟计算选择了两个相同的但同位旋不同的系统, 分别为碰撞参数都为 $b=1$, 入射能为 $E = 35\text{MeV}/A$ 的 $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ 和 $^{48}\text{Ca} + ^{48}\text{Ca}$ 轻的反应系统, 为了观察其动力学效应, 在 IQMD 计算中我们选择了几个不同的反应时间观察其同位素的产额比. 在图 1 中我们给出了在反应时间 $t = 240\text{fm}/c$ 时, 获得的同位素的产额比 R_{21} 分别作为 N 和 Z 的函数, 在对数坐标系中, 产额比分别是中子数(上图)和质子数(下图)的

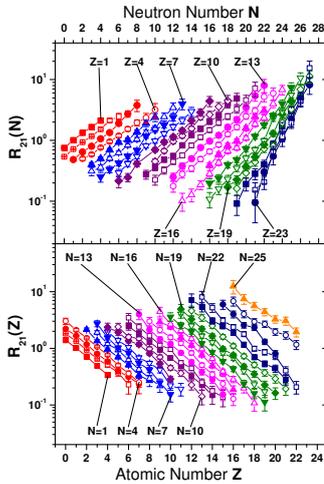


图 1 入射能为 $E = 35\text{MeV}/A$, $b = 1$ 的 $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$, $^{48}\text{Ca} + ^{48}\text{Ca}$ 的两个系统在反应时间 $t = 240\text{fm}/c$ 的同位素的产额比(上图) 和同中子素的产额比(下图)

图中已经表示了每一条同位素链对应的质子数(上图)和每一条同中子数链对应的中子数(下图).

很好的线性函数. 我们可以把公式(1)通过固定其中的一个分量质子数或中子数而分别表达为另一个分量中子数或质子数的函数.

$$R_{21}(N) = Y_2(N)/Y_1(N) = C_1 \exp(\alpha N). \quad (3)$$

$$R_{21}(Z) = Y_2(Z)/Y_1(Z) = C_2 \exp(\beta Z). \quad (4)$$

利用公式(3)和(4)拟合图 1 中的每一条同位素(同中子数)链, 以及计算的其他反应时间的同位素的产额的比值, 我们可以得到对应的同位旋标度参数 α 和 β , 文中

我们只讨论了参数 α , 因为参数 β 和 α 绝对值基本相同, 但是 β 是负值, 而 α 是正值. 在图 2 的上图中, 我们画出了 IQMD 计算的在不同反应时间从同位素产额比中提取的同位旋标度参数 α 与产物的原子序数 Z 和反应时间的关系.

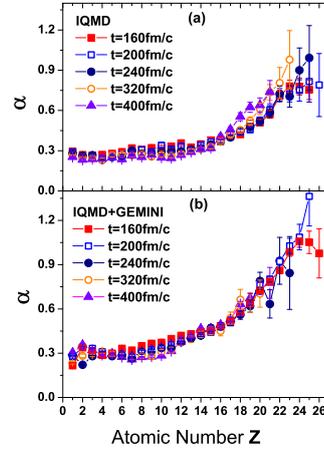


图 2 同位旋标度参数 α 与反应时间和反应产物的电荷数 Z 之间的关系

上图是 IQMD 计算结果, 下图是考虑了初级产物的统计级联衰变后的结果.

从图 2(a) 中可以发现, 对应于不同反应时间的动力学效应不是特别的明显, 对于轻的粒子和中等质量的碎片如 $Z < 15$, 与 Z 的变化关系基本上保持平坦的状态, 即基本上与产物的大小没有多大关系, 在反应时间短的时刻, 同位旋标度参数 α 要稍微大一点, 反应时间长的时刻, α 基本上位于观察的几个反应时刻的底部. 重的反应碎片如 $Z \geq 15$ 或余核, 却和产物的大小相关, 随着产物的电荷数的增加, 同位旋标度参数 α 也在增加, 而与反应时间的关系上, 虽然不是特别明显, 却也表现出与轻的产物相反的趋势, 即反应时间长的时刻 α 比反应时间短的时刻的 α 降低了.

在图 2(b) 中, 是考虑初级产物的统计衰变后提取的同位旋标度参数 α 和产物的大小, 开始考虑次级衰变的反应时间的关系. 此时的 α , 对轻的反应产物仍旧保持着相同的值, 而且比较时间比较短时考虑次级衰变 α 仍旧显得大一点, 即对于轻的粒子和产物仍旧保持了动力学的一些效应. 但是对于重的碎片或余核, 已经观察不到动力学的效应了; 但 α 随 Z 的增加还是增加, 因此次级衰变的影响主要在重的碎片产物上.

4 总结

通过同位旋相关的量子分子动力学模型 IQMD 和

统计级联衰变模型 (GEMINI) 的模拟计算两个不同同位旋的相似反应系统 $^{40}\text{Ca}+^{40}\text{Ca}$ 和 $^{48}\text{Ca}+^{48}\text{Ca}$ 在入射能 $E = 35\text{MeV}/A$ 的中心碰撞中的同位素产额分布的比值的计算, 揭示了初级产物的同位旋标度规律动力学效应体现在对于轻的粒子和碎片, 同位旋标度参数 α 随反应时间增加而降低, 对于重的产物则呈现相反的趋势. 但是次级产物的同位旋标度规律的动力学效

应已经大大被削弱了. 同位旋标度规律源于两个反应系统入射道的同位旋自由度的不同, 从而反应产物的同位素分布与入射道的同位素相关, 其动力学效应表现在同位旋自由度的演化, 而次级衰变效应也体现在初级产物的次级衰变对于轻的粒子和重的碎片是不相同的, 重的初级产物受次级衰变的影响更大一点.

参考文献(References)

- 1 LI B A, Schroeder W. *Isospin Physics in Heavy Ion Collisions at Intermediate Energies*. Nova Science, New York, 2001
- 2 M Di Toro et al. *Prog. Nucl. Nucl. Phys.*, 1999, **42**: 125 and references therein
- 3 LI B A, Ko C M, Bauer W. *Int. J. Mod. Phys.*, 1998, **E7**: 147 and references therein
- 4 XU Hu-Shan et al. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **85**: 716
- 5 Tsang M B et al. *Phys. Rev.*, 2001, **C64**: 041603(R)
- 6 Tsang M B et al. *Phys. Rev.*, 2001, **C64**: 054615
- 7 Brzychczyk J et al. *Phys. Rev.*, 1993, **C47**: 1553
- 8 Volkov V. *Phys. Rep.*, 1978, **44**: 93
- 9 Souliotis G A et al. *Phys. Rev.*, 2003, **C68**: 024605
- 10 Veselsky M, Souliotis G A, Jandel M. *Phys. Rev.*, 2004, **C69**: 044607
- 11 Botvina A S, Lozhkin O V, Trautmann W. *Phys. Rev.*, 2002, **C65**: 044610
- 12 Geraci E et al. *Nucl. Phys.*, 2004, **A732**: 173
- 13 Shetty D V et al. *Phys. Rev.*, 2004, **C70**: 011601(R)
- 14 WANG Kun et al. *Chin. Phys. Lett.*, 2005, **22**: 53
- 15 MA Y G, WANG K, CAI X Z et al. *Phys. Rev.*, 2005, **C72**: 064603
- 16 MA Y G, WANG K, WEI Y B et al. *Phys. Rev.*, 2004, **C69**: 064610
- 17 Ono A, Danielewicz P, Friedman W A et al. *Phys. Rev.*, 2003, **C68**: 051601(R)
- 18 TIAN Wen-Dong, MA Yu-Gang, CAI Xiang-Zhou et al. *Chin. Phys. Lett.*, 2005, **22**: 306
- 19 Raduta Ad R. *Eur. Phys. J.*, 2005, **A24**: 85
- 20 Botvina A S, Lozhkin O V, Trautmann W. *Phys. Rev.*, 2002, **C65**: 044610
- 21 Di Toro M, Presentation in Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Sep. 2005
- 22 Aichelin J et al. *Phys. Rev.*, 1998, **C37**: 2451
- 23 Aichelin J. *Phys. Rep.*, 1991, **202**: 233
- 24 CHEN Lie-Wen, ZHANG Feng-Shou, JIN Gen-Ming. *Phys. Rev.*, 1998, **C58**: 2283
- 25 Charity R J et al. *Nucl. Phys.*, 1988, **A483**: 371
- 26 Charity R J. Computer Code GEMINI, see <http://wunmr.wustl.edu/pub/gemini>

Dynamical and Statistical Sequential Decay Effect on Isoscaling*

TIAN Wen-Dong¹⁾ MA Yu-Gang CAI Xiang-Zhou FANG De-Qing

WANG Hong-Wei GUO Wei WANG Kun

(Institute of Applied Physics, CAS, Shanghai 201800, China)

Abstract Isoscaling roles have been studied for two isospin similar system by isospin dependent quantum molecular dynamical model (IQMD) and statistical sequential decay model GEMINI. For the light fragments, isoscaling parameter α increases with the reaction time, the heavy fragment presents decreasing with reaction time. α of the light fragment keeps flat, but α of the intermediate and heavy fragments is dependent on the fragment size, increases with the fragment size. Statistical sequential decay will increase isoscaling parameter α slightly, but does not change the roles in light and heavy fragments.

Key words isoscaling, isospin-dependent quantum molecular dynamical model(IQMD), statistical sequential decay model(GEMINI)

* Supported by National Natural Science Foundation of China (10405033, 10405032, 10505026)

1) E-mail: tianwendong@sinap.ac.cn