

朗之万方程模拟核裂变碎片的同位旋标度*

王鲲¹ 马余刚^{1;1)} 蔡翔舟¹ 陈金根¹ 方德清¹ 郭威^{1,2} 刘桂华^{1,2} 马春旺^{1,2}
马二俊^{1,2} 沈文庆¹ 苏前敏^{1,2} 石钰^{1,2} 田文栋¹ 颜廷志^{1,2}

1(中国科学院上海物理应用研究所 上海 201800)

2(中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 使用结合朗之万方程和统计分支的组合模型模拟 $^{112}\text{Sn}+^{112}\text{Sn}$ 和 $^{116}\text{Sn}+^{116}\text{Sn}$ 两个同位旋相关的反应系统, 通过高斯分布采样的方式得到了核裂变的碎片分布, 将两系统碎片的同位素和同中子异位素的分布相比, 发现存在同位旋标度律现象. 同时提取了同位旋标度系数, 发现同位旋标度系数是和碎片分布宽度相关的, 并且同能量、单位质量的粘滞系数也有很强的依赖关系.

关键词 朗之万方程 同位旋标度 裂变动力学

1 引言

放射性束流的产生对同位旋物理的发展起到了重要的推动作用. 同位旋标度律是近几年发现的一个比较有意义的物理现象, 由于同位旋标度系数对理解核态方程中的对称能系数具有重要意义, 可以作为研究极端条件下的核的状态方程的一个新的探针^[1]. 因此越来越引起人们的关注. 同位旋标度是指考查两个同位旋相关的核反应系统 1 和 2. 这两个系统的相同碎片产额之比 $R_{21}(N, Z)$ 和碎片的中子数 N 和质子数 Z 成指数关系^[2]:

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

式中 C , α 和 β 是 3 个参数. $\alpha = \Delta\mu_n/T$ 而 $\beta = \Delta\mu_z/T$, 这里 $\Delta\mu_n$ 和 $\Delta\mu_z$ 分别是两个反应系统的中子化学势的差和质子化学势的差. 目前为止, 同位旋标度现象已在多种实验中被发现, 从低能的轻粒子蒸发^[2], 裂变^[3] 以及深度非弹反应, 到中能的弹核碎裂^[5, 6] 及多重碎裂^[7, 8]. 同时, 一些理论模型计算的结果也表明存在同位旋标度现象. 比如 BUU 模型^[8]、非对称的分子动力学模型, 统计多重碎裂模型, 还有格点气体模型^[8-13] 等.

2 CDSM 模型模拟裂变反应的碎片分布

这里使用了 CDSM 模型来描述核裂变过程, 这个模型是一个过阻尼 Langevin 方程, 使用了 MC 抽样方法, 在演化中耦合了轻粒子发射. 关于 CDSM 的细节描述见^[14]. 计算中, 我们采用 20 万个动力学分支中的裂变事件来做样本. 在断点处取一个 -1 到 1 均值为 0 的高斯分布的随机数做为质量不对称自由度参数 $\alpha_0 = \frac{A_1 - A_2}{A_1 + A_2}$, A_1 和 A_2 分别是两个裂变碎片的质量. 由于本文中的有关计算属于低能区, 因此假定复合核系统达到裂变点时系统的同位旋已达到平衡, 两个碎片的 N/Z 和复合核系统的 N/Z 是相同的.

3 同位旋标度

式(1)也可以写成 $\ln R_{21} = C_Z + \alpha N$, 这里 C_Z 是一个同 Z 有关的常数, $C_Z = \ln C + \beta Z$, 如果在自然对数坐标上画对应每一个 Z 的比率 R_{21} 关于 N 的函数, 那么将出现一条条的直线, 如图 1(左). 图中每一条线上的同种符号表示一个同位素链. 这样同位旋标度的系数 α 可以直接提取出来. 同样, 系数 β 也可以从同中子

* 国家自然科学基金(10135030, 10405032, 10405033, 10505026)和上海市科技发展基金(06JC14082, 05XD14021, 03QA14066)资助
1) E-mail: yigma@sinap.ac.cn

异位素链中提取出来, 见(右)图.

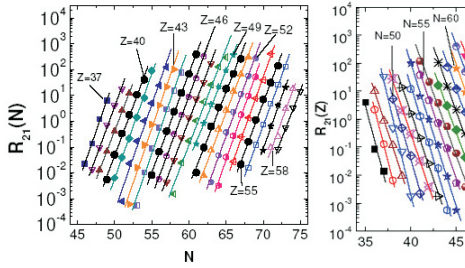


图1 CDSM模型模拟 $^{112}\text{Sn}+^{112}\text{Sn}$ 和 $^{116}\text{Sn}+^{116}\text{Sn}$ 两个同位旋相关反应系统的碎片产物的同位素(左)和中子异位素(右)的比率
 $\sigma_{\alpha_0} = 0.06$, $E_{\text{beam}}/A = 8.4\text{MeV}$ 直线为指数拟合.

从另一角度来看同位旋标度律现象, 在两个同位旋相关的反应道的产物中, 对于含同一质子数 Z 的碎片分布具有近似相等的宽度但却有不同的平均质量, 也就是分布的峰位有一个差. 如果用一个高斯分布来描述带电荷数为 Z 的同位素分布 $Y(N)|_Z$ 和中子数为 N 的异位素分布 $Y(N)|_N$ 就是: $Y(N)|_Z \sim \exp\left[-\frac{(N-N_Z)^2}{2\sigma_Z^2}\right]$, $Y(N)|_N \sim \exp\left[-\frac{(Z-N_N)^2}{2\sigma_N^2}\right]$. 这里 N_Z 和 N_N 分别是这两个分布的峰位, σ_Z^2 和 σ_N^2 是这两个分布的标准方差. 若将两个系统同一元素或同中子异位素的分布按上式相除得到产额分布的比值 R_{21} , 对两边取对数, 并忽略二次项, 则有 $\ln(R_{21}(N)|_Z) \sim \frac{[(N_Z)_2 - (N_Z)_1]N}{\sigma_Z^2}$, 而 $\ln(R_{21}(Z)|_N) \sim \frac{[(N_N)_2 - (N_N)_1]Z}{\sigma_N^2}$. 这里假定两个反应系统中的 σ_Z^2 近似相等. 对比同位旋标度的定义, 对于一个给定的 Z 或者 N , 可认为 $\alpha \sim \frac{[(N_Z)_2 - (N_Z)_1]}{\sigma_Z^2}$, $\beta \sim \frac{[(N_N)_2 - (N_N)_1]}{\sigma_N^2}$.

假定其它因素可以忽略掉, σ_Z^2 , σ_N^2 是和碎片温度 T 成正比的. 即 $\alpha \sim \frac{[(N_Z)_2 - (N_Z)_1]}{T}$, 而 $\beta \sim \frac{[(N_N)_2 - (N_N)_1]}{T}$. 这里两个峰值的差 $[(N_Z)_2 - (N_Z)_1]$ 可以理解为和两个系统化学势的差有关的一项.

通过图1可以直接提取同位旋标度系数 α , β 以及得到它们和每条线所表示的电荷数 $Z(N)$ 和中子数 $N(Z)$ 之间的关系. 为了考查质量不对称自由度的高斯采样对同位旋标度系数的影响, 这里选取了 α_0 的高斯分布的标准差为 $\sigma_{\alpha_0} = 0.04, 0.06, 0.08, 0.20$ 的范围从-1到1, 平均值为0的随机数. 当 σ_{α_0} 取值比较小时, 对称裂变的事件所占比重比较大, α 随着 Z 增加而增加, 意味着同位旋效应变强了. 在最近的对一个基于简单液滴模型的裂变碎片分析中预言了同位旋标

度系数 α 随碎片电荷数增加而增加的结果^[3]. 而在另一种极端情况下, 当 σ_{α_0} 取比较大的值时, 同取小值时的行为相反, α 的值随着 Z 的增大而变小. 在这种条件下, 看起来在 Z 取值小的时候同位旋效应相对强些. 而 σ_{α_0} 取值在两者中间的情形时, α 值的上升和下降竞争的结果导致在对称裂变处附近出来一个低谷点. 这种情形可以联想到在中子引发 $^{238,233}\text{U}$ 的裂变数据中, 同位旋标度系数随电荷数增加时在对称裂变附近出现类似拐弯的现象^[4]. 他们解释是由于温度的变化引起的. 在本文情况, 这种同位旋标度系数 α 的弯曲现象是由于质量不对称自由度取值范围的影响, 或者说, 是来自于对称裂变与非对称裂变事件按不同权重混合的原因. 从本质上来讲, 是由于化学势和温度都随着碎片的电荷数增加而变化的结果.

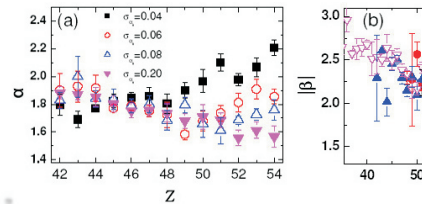


图2 (a), (b)中符号为在不同 σ_{α_0} 下同位旋标度系数 α , $|\beta|$ 关于 Z , N 的函数

总的来说, α 是和裂变碎片的质量不对称自由度的宽度有关的. 同样的从图1的(b)中得到 β , 在不同的 σ_{α_0} 下得到的 $|\beta|$ 和中子数 N 的关系, 可见图2(b)和 α 与 Z 的关系不同的是, $|\beta|$ 随着中子数 N 的增加总是减小的, 对 σ_{α_0} 的影响不大.

4 同位旋标度系数的能量、约化粘滞系数依赖

在本文计算中, 也做了同位旋标度系数的能量依赖. 见图3(a)和(b), 很明显, 同位旋标度系数 α , β 的绝对值随能量的升高而减小. 表明入射能量的升高使同位旋效应减弱. 这一行为和某些统计模型中的计算以及实验上观测到的结果^[11, 13, 15, 16]中的同位旋标度系数随温度的升高而减小类似.

对于Langevin方程来说, 粘滞系数是一个很重要的量. 在前面计算中, 使用的为一体化耗散约化粘滞系数的拟合结果 β_{OBD} ^[14]. 为了考查粘滞系数对同位旋标度系数的影响, 我们使用了 $\beta_0 = 2, 4, 6, 8, 10$ 这样的常数来代替 β_{OBD} . 图3是 α (c)和 $|\beta|$ (d)关于 β_0 的函数. 显然, α 和 $|\beta|$ 的值随着约化粘滞系数的减小而减小. 较大的约化粘滞系数意味着布朗粒子是在相对粘

稠的介质中运动. 相比小约化粘滞系数, 系统演化到断点时消耗了较多的能量, 减弱了初始时两系统同位旋的差别. 表明同位旋标度系数同裂变动力学中的粘滞系数有很强的依赖关系的.

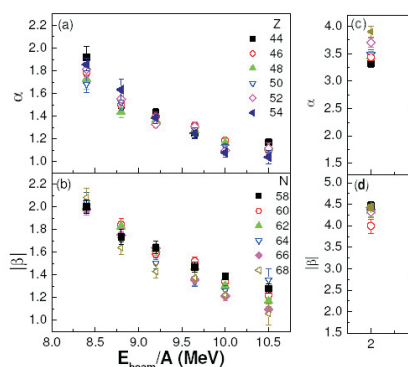


图 3 同位旋标度系数 α (a) 与 $|\beta|$ (b) 与入射能量得关系; α (c) 和 $|\beta|$ (d) 与约化粘滞系数的关系. 其中碎片的电荷数 $Z=44-54$ 中子数 $N=58-68$, σ_{α_0} 取 0.06.

5 结论

通过使用结合朗之万方程和统计分支的组合模型模拟了 $^{112}\text{Sn}+^{112}\text{Sn}$ 和 $^{116}\text{Sn}+^{116}\text{Sn}$ 两个同位旋相关的反应系统. 通过高斯分布采样的方式得到了核裂变的碎片分布, 并将两系统产生的碎片做了同位旋标度律研究, 发现存在同位旋标度律现象. 对同位旋标度律现象的产生原因做了分析, 同时提取了同位旋标度系数, 发现同位旋标度系数是和碎片分布宽度相关的. 同位旋标度系数 α 和 $|\beta|$ 随能量升高或随单位质量的粘滞系数的增大而变小.

感谢北京师范大学包景东教授及沈阳师范大学刘玲副教授在朗之万方程方面对我的指导及有价值的讨论.

参考文献(References)

- 1 Ma Y G et al. Prog. Phys., 2002, **22**: 99(in Chinese); MA Y G et al. Nucl. Sci. Tech., 2004, **15**: 4 (马余刚等. 物理学进展, 2002, **22**: 99)
- 2 Tsang M B et al. Phys. Rev. Lett., 2001, **86**: 5023
- 3 Friedman W A. Phys. Rev., 2004, **C69**: 031601(R)
- 4 Veselsky M et al. Phys. Rev., 2004, **C69**: 044607
- 5 Souliotis G A et al. Phys. Rev., 2003, **C68**: 024605
- 6 Veselsky M et al. Phys. Rev., 2004, **C69**: 031602(R)
- 7 Geraci E et al. Nucl. Phys., 2004, **A732**: 173
- 8 LIU T X et al. Phys. Rev., 2004, **C69**: 014603
- 9 Botvina A S et al. Phys. Rev., 2002, **C65**: 044610
- 10 Tsang M B et al. Phys. Rev., 2001, **C64**: 041603
- 11 Tsang M B et al. Phys. Rev., 2001, **C64**: 054615
- 12 Ono A et al. Phys. Rev., 2003, **C68**: 051601
- 13 MA Y G et al. Phys. Rev., 2004, **C69**: 064610
- 14 Fröbrich P, Gontchar I I. Phys. Rep., 1998, **292**: 131
- 15 MA Y G et al. Chin. Phys. Lett., 1999, **16**: 256; MA Y G et al. Phys. Rev., 1999, **C60**: 024607
- 16 MA Y G. Acta Phys. Sin., 1999, **49**: 654

Isoscaling of the Fission Fragments in Langevin Equation Simulation*

WANG Kun¹ MA Yu-Gang^{1,1)} CAI Xiang-Zhou¹ CHEN Jin-Gen¹ FANG De-Qing¹ GUO Wei^{1,2}
LIU Gui-Hua^{1,2} MA Chun-Wang^{1,2} MA Er-Jun^{1,2} SHEN Wen-Qing¹ SU Qian-Min^{1,2}
SHI Yu^{1,2} TIAN Wen-Dong¹ YAN Ting-Zhi^{1,2}

¹(Shanghai Institute of Applied Physics, CAS, Shanghai 201800, China)

²(Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract A combined dynamical and statistical model has been applied to simulate the fission process of $^{112}\text{Sn}+^{112}\text{Sn}$ and $^{116}\text{Sn}+^{116}\text{Sn}$. The mass distribution of the fission fragments is given by the Gaussian probability sampling. The isoscaling behavior has been observed from yield ratio of the fission fragments and the isoscaling parameter α and β have been extracted. It seems that the isoscaling parameters are sensitive to the width of fission probability and the beam energy as well as the deduce friction parameter.

Key words Langevin equation, fission dynamics, isoscaling

* Supported by National Natural Science Foundation of China (10135030, 10405032, 10405033, 10505026) and Shanghai Development Foundation for Science and Technology (06JC14082, 05XD14021, 03QA14066)

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