

转动自由度对 $10.6\text{MeV/u } ^{84}\text{Kr} + ^{27}\text{Al}$ 反应中裂变前粒子增强发射的影响*

叶巍

(东南大学物理系 南京 210096)

摘要 在统计模型的框架内研究了 In 核在三维空间的转动自由度对 10.6 和 $8.5\text{MeV/u } ^{84}\text{Kr} + ^{27}\text{Al}$ 碰撞裂变前粒子发射的影响. 发现对后一个轰击能, 断前粒子发射不敏感于转动自由度; 对前一个能量, 转动自由度的引入使提取的裂变延迟时间从 $20 \times 10^{-21}\text{s}$ 减少到 $7.5 \times 10^{-21}\text{s}$, 表明了它对裂变前粒子蒸发的影响, 计算结果也表明仅有转动自由度并不能完全解释 In 核的断前粒子增强发射现象. 发现了转动自由度在粒子发射中所起的作用对系统的激发能有一定的依赖关系.

关键词 转动自由度 轻系统 粒子多重性 裂变延迟时间

1 引言

重离子诱导的熔合裂变反应已成为研究大尺度集体核运动的主要方法. 形成的复合核通常以裂变和粒子发射来退激, 标准的统计模型能很好地描述这样一种衰变过程. 但近期对在高激发能情况下裂变过程中粒子多重性的测量表明^[1-4] 实验值高于标准的统计理论估计, 这被认为是由于裂变延迟效应引起的. 扩散模型预计需要一段暂态时间裂变才能达到它的准稳态值^[5-7]. 在这段时间内, 裂变不能有效地与轻粒子发射相竞争, 从而造成粒子发射的增强. 增强的部分被用来估计裂变延迟时间, 它的长短与核的粘滞强度有关, 因此对导致出现超出统计模型估计值的因素的准确估计和决定核粘滞系数的大小就显得十分重要. 由于反应形成的复合核在三维空间具有各种可能的取向, 即使它们具有相同的角动量, 它们在系统的对称轴上的投影(以下简称为 K 自由度)也不同, 这个差异会影响到裂变的几率. 因为当系统处在 $K > 0$ 态的时候, 与高自旋集体运动相联系的离心力被减少, 从而导致单位时间内的裂变几率降低. 最近, Lestone^[8] 发现在以前的统计模型中, 对裂变宽度的计算都没有考虑 K 自由度对它的影响. 在计及该因素后, 他发现即使不考虑核的粘滞性的影响, $^{16}\text{O} + ^{208}\text{Po}$, $^{18}\text{O} + ^{192}\text{Po}$, $^{16}\text{O} + ^{197}\text{Au}$ 几个反应的理论计算值也

2001-02-21 收稿, 2001-04-30 收修改稿

* 东南大学基金(9207021099)资助

能很好地符合实验数据,这揭示了 K 自由度的重要影响. 由于 K 自由度的影响只有在复合核的角动量非常高的情况下才变得显著,因此用具有高角动量的裂变延迟数据来考察这种效应是必要的. 本文在统计模型的框架内,研究了 K 自由度对 8.5 和 10.6MeV/u $^{84}\text{Kr} + ^{27}\text{Al}$ 反应裂变前粒子发射的影响. 由于考察的是轻系统,因此在拟合实验数据时,除摩擦系数以外,只需要一个时间参数,即暂态时间. 对轻系统,由于其鞍点构型接近断点构型,鞍点前发射就是裂变前粒子的主要部分,这与文献[8]在分析中所用的重系统的情形不同. 在那里,鞍点后发射也是断前粒子的一个重要来源,因此在拟合实验数据时,除暂态时间外,还需要鞍点到断点的时间,这会使提取的裂变延迟时间有一些不确定性. 因此我们认为用轻系统作为实验材料更利于定量地揭示 K 自由度对断前粒子发射的影响. 本文重点研究 K 自由度对从粒子多重性这个实验中的可观测量提取轻系统 \ln 裂变延迟时间的影响;此外还考察 K 自由度的作用与系统激发能的关系.

2 主要计算公式

文献[8]在考虑 K 自由度后,将 Bohr-Wheeler 的裂变宽度公式写为

$$\Gamma_f^{\text{BW}} = \frac{\sum_K P(K) \Gamma_f^{\text{BW}}(K)}{\sum_K P(K)}, \quad (1)$$

这里 K 是系统的自旋 J 在对称轴上的投影,取值范围从 $-J$ 到 J . $\Gamma_f^{\text{BW}}(K)$ 是 Bohr-Wheeler 的裂变宽度作为 K 的函数,

$$\Gamma_f^{\text{BW}}(K) = \frac{\hbar\omega_{\text{eq}}}{2\pi} \exp\left(-\frac{B_f}{T}\right), \quad (2)$$

这里 B_f 是裂变位垒,

$$B_f = B_f(T=0) - \delta a \cdot T^2, \quad (3)$$

其中 δa 是费米气体能级密度在鞍点和基态平衡位置处的差. 由于系统的能级密度与其转动能有关,而后者又依赖于 K 的大小,因此 δa 与 K 有关. $P(K)$ 是系统处在 K 态的几率,

$$P(K) = \frac{T}{\hbar\omega_{\text{eq}}} \exp\left(-\frac{V_{\text{eq}}}{T}\right), \quad (4)$$

这里, ω_{eq} 是势能面在基态平衡位置处的曲率, V_{eq} 是基态平衡位置处的库仑能、核能和转动能的和作为 K 的函数.

为了便于计算, Lestone⁸ 在假定 ω_{eq} , V_{eq} 及裂变鞍点的形状与 K 无关的情况下,将方程(1)简化成

$$\Gamma_f^{\text{BW}} = \Gamma_f^{\text{BW}}(K=0) \frac{K_0 \sqrt{2\pi}}{2J+1} \text{erf}\left(\frac{J+1/2}{\sqrt{2}K_0}\right), \quad (5)$$

详细情况见文献[8]. 其中误差函数定义为

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-t^2) dt. \quad (6)$$

$K_0^2 = TI_{\text{eff}}^{\text{rot}}/\eta^2$. 这里 $I_{\text{eff}}^{\text{rot}}$ 是核在裂变鞍点的有效转动惯量, 定义为 $1/I_{\text{eff}}^{\text{rot}} = 1/I_{\text{par}} - 1/I_{\text{ver}}$, 这里 I_{par} 和 I_{ver} 分别是系统对平行和垂直于其对称轴的转动惯量, 用文献[9]中的方法进行计算. $\Gamma_f^{\text{BW}}(K=0)$ 就是在通常的统计模型中使用的裂变宽度公式. 在以下的计算中, 我们用到的公式就是考虑了 K 自由度影响后的裂变宽度公式(5).

另外, 轻粒子的发射宽度如中子、质子和 α 粒子等用文献[9]中的方法计算.

3 结果与讨论

在本工作中, 研究 10.6 和 8.5 MeV/u $^{84}\text{Kr} + ^{27}\text{Al}$ 两个碰撞. 在统计模型 GEMINI 的框架内, 裂变延迟时间被处理成一个拟合参量. 文献[10]用统计模型在没有考虑 K 自由度影响的情况下, 通过与实验中测量到的断前质子多重性进行比较, 提取了 $20 \times 10^{-21} \text{ s}$ 的裂变延迟时间. 在本文中, 除考虑由于 K 自由度的影响而修正过的裂变宽度公式(5)以外, 其余的初始条件, 如 In 核的激发能 200 MeV , 最大熔合角动量 $80 \hbar$, 两体衰变所对应的角动量

区间 $65 \hbar < L < 80 \hbar$, 能级密度参数 $a = A/10$ (A 是系统的质量数) 以及它在鞍点处与基态球形处的比值取为 1, 都与文献[10]中用的完全一样. 另外, 在计算中核温度取系统在平衡位置处的值.

图 1 展示了 In 核在非对称 ($20 < M < 40$) 和对称 ($40 < M < 60$) 裂变情况下断前质子多重性作为裂变延迟时间的函数. 可以看出, 用考虑了 K 自由度后的裂变宽度公式(5)以后, 只需要 $7.5 \times 10^{-21} \text{ s}$ 的裂变延迟时间就能符合实验数据. 这个值低于未考虑 K 自由度影响时所需的 $20 \times 10^{-21} \text{ s}$ 的裂变延迟时间. 这表明了 K 自由度对裂变前粒子发射有影响. 但从图 1 可以看出, 仅有 K 自由度并不能完全再现实验数据. 这与 Lestone 对从重系统的分析中所得出的结论不同, 因此, 对 ^{111}In 核的断前粒子增强发射现象, 裂变延迟效应仍然具有决定影响.

由于在导出公式(5)时做了一些简化. 因此有必要检验一下这样的处理对上述结论的影响. 因为对这些影响不易作出精确估计, 但是由于它们的最终效果都是对裂变宽度产生影响. 因此, 在本工作中, 我们把这些影响处理成一个折合因子, 即在裂变宽度公式(5)前乘

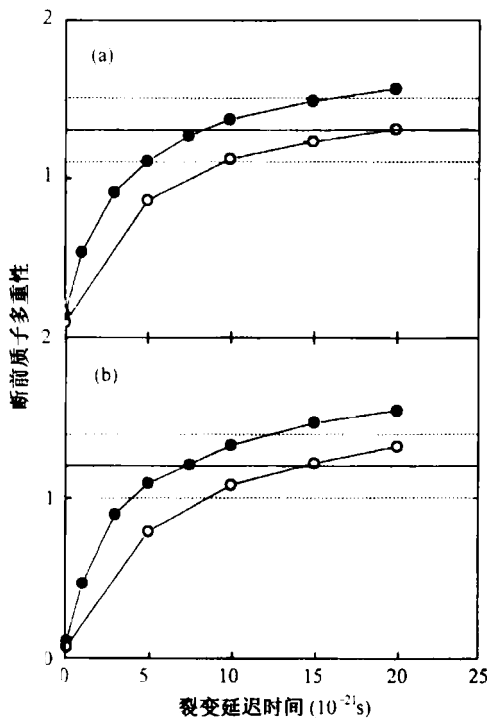


图 1 10.6 MeV/u $^{84}\text{Kr} + ^{27}\text{Al}$ 反应形成的 ^{111}In 核断前质子多重性作为裂变延迟时间的函数

(a) 非对称裂变 ($20 < M < 40$);

(b) 对称裂变 ($40 < M < 60$).

— 实验结果, - - - 误差, ○ 没有考虑 K 自由度的影响(文献[10]), ● 计及 K 自由度影响后的结果.

上一个因子来模拟这些简化对结论的影响,结果见图 2.

图 2 反映了因简化处理而对裂变延迟时间提取的影响.可以看出,因简化处理而产生的影响不大.裂变延迟时间越长,这种影响就越小.原因是在裂变被延迟这一段时间内,它不能有效地与粒子发射相竞争;此外,断前粒子多重性主要是由来自头几步的衰变过程决定的.当裂变时间很短时,裂变就能更早地同粒子发射竞争,因此上面的简化处理对粒子发射的影响就要稍微大一些.虽然如此,它们也没有影响到我们所提取的裂变延迟时间.

对 8.5MeV/u ⁸⁴Kr + ²⁷Al 反应,我们用与上面同样的方法计算了 *K* 自由度对其裂变前质子多重性的影响.有关的参数如 ¹¹¹In 核的激发能 152MeV,最大的熔合角动量 77ħ,两体衰变所对应的角动量区间 64ħ < *L* < 77ħ 以及能级密度参数 *a* = *A*/8.5 取自文献[11].计算结果见图 3.

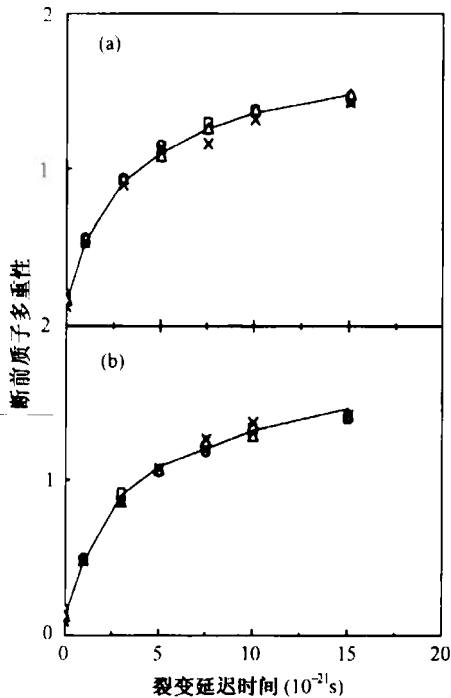


图 2 模拟简化对 10.6MeV/u ⁸⁴Kr + ²⁷Al 反应中 ¹¹¹In 核断前质子多重性与裂变延迟时间关系的影响

(a) 非对称裂变(20 < *M* < 40);(b) 对称裂变(40 < *M* < 60).
○,□,△和× 分别表示在裂变宽度公式(5)前乘上一个因子 0.5,0.8,1.2 和 1.5 倍时的结果,实线同图 1 中的●.

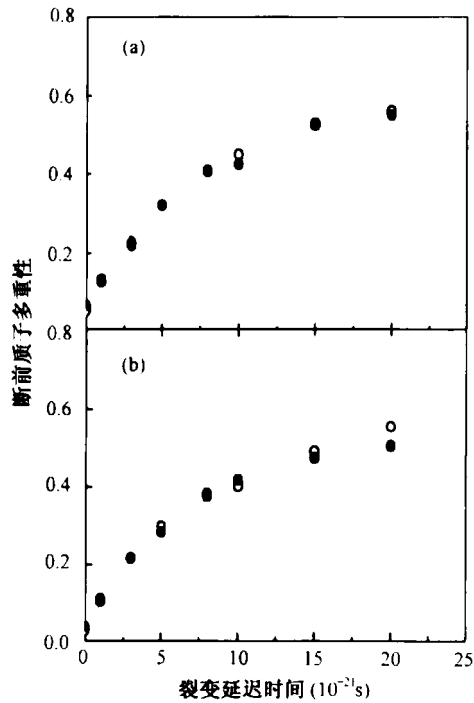


图 3 8.5MeV/u ⁸⁴Kr + ²⁷Al 反应形成的 ¹¹¹In 核断前质子多重性作为裂变延迟时间的函数

(a) 非对称裂变(20 < *M* < 40);(b) 对称裂变(40 < *M* < 60).
○ 没有考虑 *K* 自由度的影响,● 计及 *K* 自由度影响后的结果.

从图中可以看出,对低一些的入射能量,即 8.5MeV/u 时的情形,断前粒子蒸发不敏感于 *K* 自由度的引入.为了便于同束流能量为 10.6MeV/u 的情况作比较,我们取能级密度参数 *a* = *A*/10 并进行了计算,发现结果同图 3 是一样的.同图 1 中的计算条件相比较,除激发能外,其余的初始条件几乎一样,因此 *K* 自由度在这两个不同轰击能量下的不同行

为与激发能的差异有关. 结合图 1 和图 3 所得到的结果, 我们可以得出这样的结论: K 自由度对裂变过程中粒子发射的影响除了要求大角动量以外, 高的激发能也是其产生可观影响的前提. 可能的原因是在高激发能情况下, 粒子发射的时间变短, 裂变过程加快, 因此 K 自由度就能较早地参与影响粒子的发射, 从而对最终的断前粒子多重性有较大的影响.

总之, 我们用统计模型考察了 K 自由度在 8.5 和 10.6 MeV/u 两个不同的束流能量下, $^{84}\text{Kr} + ^{27}\text{Al}$ 反应产生的同样一个轻系统 In 裂变前粒子发射中所起的作用. 结果表明对轰击能为 8.5 MeV/u 的情形, K 自由度没有产生影响; 对高一些的人射能量, 即 10.6 MeV/u 的情况, 该因素的引入使提取的裂变延迟时间从 20×10^{-21} s 减少到 7.5×10^{-21} s, 暗示了一个较小的核粘滞系数, 但它也不能完全解释断前粒子多重性的实验数据. 此外, 我们还发现了 K 自由度的作用对激发能有一定的依赖关系.

参考文献 (References)

- 1 Newton J O et al. Nucl. Phys., 1988, A483:126—152
- 2 Hinde D J et al. Phys. Rev., 1992, C45:1229—1259
- 3 Lestone J P et al. Phys. Rev. Lett., 1991, 67:1078—1081
- 4 Paul P, Thoennessen M. Annu. Rev. Nucl. Part. Sci., 1994, 44:65—108
- 5 Kramers H A. Physica, 1940, 7:284
- 6 Weidenmuller H A et al. Phys. Rev., 1984, C29:879—884
- 7 Frobrich P et al. Nucl. Phys., 1993, A556:281—306
- 8 Lestone J P. Phys. Rev., 1999, C59:1540—1544
- 9 Charity R J et al. Nucl. Phys., 1988, A483:371—405
- 10 Nakagawa T et al. Phys. Rev., 1996, C53:977—1000
- 11 JIANG D X et al. Chin. Phys. Lett., 1998, 15(2):95—97

Effect of Rotational Degree of Freedom on the Enhanced Precission Particle Emission in 10.6MeV/u $^{84}\text{Kr} + ^{27}\text{Al}$ Reaction *

YE Wei

(Department of Physics, Southeast of University, Nanjing 210096, China)

Abstract Effect of the rotational degree of freedom of In nucleus in three dimension space on precission particle emission in 10.6MeV/u and 8.5MeV/u $^{84}\text{Kr} + ^{27}\text{Al}$ collisions was studied in the framework of a statistical model. The calculation results show that for the latter incident energy, particle emission is insensitive to the rotational degree of freedom, while for the former one, the incorporation of this factor leads to the reduction of the extracted fission delay time from 20×10^{-21} s to 7.5×10^{-21} s, indicating the existence of this effect. The result also demonstrates that this effect is unable to completely account for the experimental data. In addition, the effect of rotational degree of freedom on particle evaporation prior to scission was found to depend on the excitation energy.

Key words rotational degree of freedom, light system, particle multiplicity, fission delay time

Received 21 February 2001, Revised 30 April 2001

* Supported by Foundation of Southeast of University(9207021099)