

同位旋对轻系统裂变前粒子发射的影响*

叶巍¹⁾

(东南大学物理系 南京 210096)

摘要 在 Smoluchowski 方程的框架内,研究了同位旋对轻裂变同量异位素源¹¹⁰Tc, ¹¹⁰Pd, ¹¹⁰In 和同位素源^{110,117,124}In 裂变前粒子发射的影响. 计算结果表明:断前粒子发射对裂变源的同位旋有很强的依赖性,随着同位旋的增加,中子发射增强,而轻带电粒子则减弱;对一个高同位旋的系统,质子和 α 粒子不适合作为提取核耗散强度的实验观测量;核耗散强度的大小不改变同位旋对粒子发射的影响规律.

关键词 同位旋效应 断前粒子多重性 核耗散强度 轻裂变系统 Smoluchowski 方程

1 引言

核耗散的性质和大小以及它对裂变过程的影响一直是大量实验和理论工作的主题^[1-13]. 因为粒子发射会受到核耗散的影响,因此这些研究的主要目的是用轻粒子和 γ 射线多重性作为提取耗散强度的探针. 核耗散被认为是断前粒子增强发射的原因. 由于它的影响,需要一段时间才能建立起通过裂变位垒的准静态几率流,有效的裂变几率也小于统计模型公式的估计. 这些都增加了粒子在裂变前的发射.

目前,同位旋对热核形成和衰变的影响是重离子物理中的一个重要主题. 一些源于同位旋的新现象被发现了. 例如,核子-核子截面^[14]、丰中子核的半径^[15]、热核的衰变^[16]以及核物质的集体流^[17,18]等对同位旋的依赖性. 然而,为了更好地理解同位旋物理,更多的实验和理论研究仍然是需要的.

同位旋对重离子反应中轻粒子发射的影响已经被广泛注意和研究. 轻粒子不但是实验上容易测量的量,而且它对理解核反应机制也是一个非常有价值的观测量. 在本文中,我们用轻粒子作为考察同位旋效应的一个探针.

2 理论模型

本工作中用到同时考虑了中子、质子和 α 粒子发射的 Smoluchowski 方程^[19]

$$\frac{\partial P(x, t)}{\partial t} = \theta \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial U}{\partial x} P(x, t) + \frac{\partial P(x, t)}{\partial x} \right) - \sum_{i=n, p, \alpha} \lambda_i P(x, t), \quad (1)$$

这里 $P(x, t)$ 代表系统在形变坐标 x 和时刻 t 时的几率. $U = V/T$, 其中 T 是系统的温度, V 是系统的势函数. $\theta = T/(\mu\beta)$, μ 是系统的约化质量, β 是摩擦系数. (1) 式右边第二项是轻粒子的发射. $\lambda_i = \Gamma_i/\hbar$, 其中 Γ_i ($i = n, p, \alpha$) 是轻粒子的发射宽度,用细致平衡原理的方法来计算^[20]. 质子和 α 粒子的发射位垒用文献[21]中的公式来计算.

由于通过重离子反应形成的复合系统有较高的激发能,裂变和轻粒子发射相竞争,在它放出了轻粒子以后生成的子核仍有足够的能量通过发射轻粒子退激,最后可能以裂变结束. 通过这种方式,形成一个衰变链,这个衰变链可以用一套耦合方程来描述,

$$\frac{d}{dt} P_s(t) = \sum_{i=n, p, \alpha} \lambda_{i, s-1} P_{s-1}(t) - \left[\sum_{i=n, p, \alpha} \lambda_{i, s} + \lambda_{f, s}(t) \right] P_s(t), \quad (2)$$

这里 P_s 是第 s 代某个子核的存在几率. 方程右边

2003-04-12 收稿

* 东南大学优秀青年教师教学科研资助计划资助

1) E-mail: yewei@seu.edu.cn

第一项是源项,表示它通过第 $(s-1)$ 代某个子核发射粒子而产生. 第二项是第 s 代某个子核通过裂变及发射粒子的衰变率. $t=0$ 时,只有母核存在,其存在几率为 1,其他子核的存在几率为 0.

粒子多重性 $N_i (i=n, p, \alpha)$ 被定义为在核衰变过程中放出的粒子数目的总和:

$$N_i = \sum_{d=1}^{d_{\max}} \sum_{s=1}^{s_{\max}} n_{ds}. \quad (3)$$

内层求和是对具有一定权重的某一个衰变过程中释放的所有的粒子数,外层求和是对所有可能的衰变. 计算中考虑了角动量在粒子发射和裂变之间竞争的影响. 裂变位垒随角动量的变化用程序 barfit 来计算^[22].

3 计算结果和讨论

我们在扩散模型的框架内选择 In 的几个同位素作为研究同位旋效应的例子. ^{110}In , ^{117}In 和 ^{124}In 的同位旋参数 $(I = (N - Z)/A)$ 分别是 0.109, 0.162 和 0.209. 为了更好地研究同位旋对粒子发射的影响,一个同量异位素链,即 ^{110}Tc , ^{110}Pd 和 ^{110}In 被用来比较在本工作中的结果. 它们的同位旋参数分别是 0.218, 0.163 和 0.109. 这些值接近前面的 In 同位素的值.

图 1 展示了 In 的 3 个同位素蒸发的轻粒子多重性随激发能的变化. 正如所预期的,激发能的增

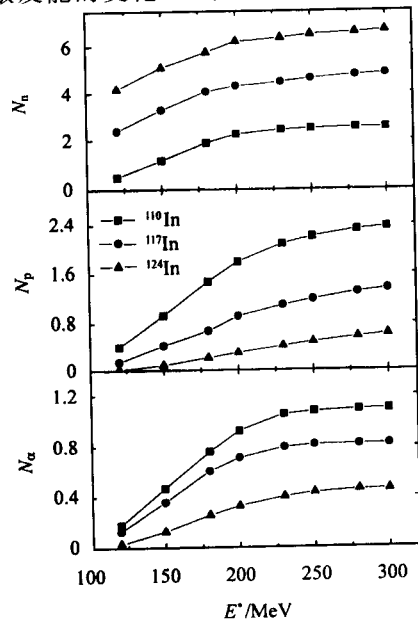


图 1 ^{110}In , ^{117}In 和 ^{124}In 在 $L = 70\hbar$ 和 $\beta = 5 \times 10^{21} \text{ s}^{-1}$ 时裂变前蒸发的中子 (N_n), 质子 (N_p) 和 α 粒子 (N_α) 的多重性随激发能的变化

加有利于粒子的发射. 从图中我们可以看出 N_n 随着同位素同位旋的增加而增加,但是 N_p 和 N_α 则降低. 这明显与裂变源中子数相对增多规律的系统学有关. 图 2 展示了对 $A = 110$ 系统的能量相关的中子、质子和 α 粒子的发射. 裂变源同位旋的增加增强了中子发射,但是抑制了质子和 α 粒子的发射. 发射源的同位旋越高,中子被蒸发得也就越多. 这些现象可以用粒子的结合能和系统的裂变位垒随同位旋的变化以及不同粒子发射之间的竞争来解释.

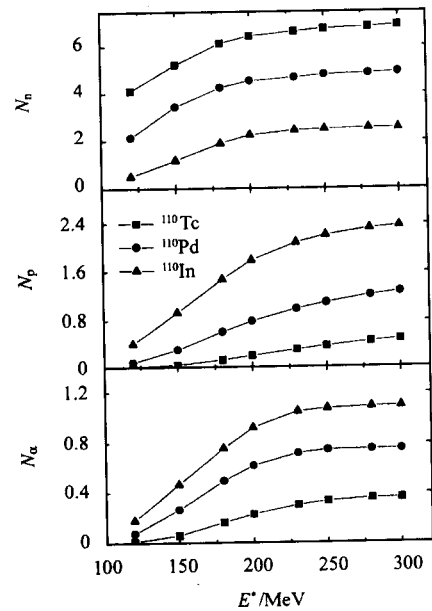


图 2 在 $L = 70\hbar$ 和 $\beta = 5 \times 10^{21} \text{ s}^{-1}$ 时, ^{110}Tc , ^{110}Pd 和 ^{110}In 裂变前蒸发的 N_n , N_p 和 N_α 的多重性随激发能的变化

为了便于讨论,作为一个展示的例子,表 1 中列出了复合核 ^{124}In , ^{117}In , ^{110}In , ^{110}Pd 和 ^{110}Tc 连续蒸发 8 个中子或 8 个质子时的中子和质子的结合能. 从中可以观察到中子和质子的结合能随系统同位旋的变化趋势. 对两个同位素,如丰中子核 ^{124}In 和缺中子核 ^{110}In ,以及对两个同量异位素,如多中子的 ^{110}Tc 核和少中子的 ^{110}In 核,同位旋高的系统,中子结合能小,这有利于增强中子的发射. 同时质子的结合能大,这会降低质子的发射几率.

另外,考虑到轻粒子是在裂变过程中发射的,因此裂变将同粒子发射相竞争. 裂变几率的大小与裂变系统的位垒有关. 裂变位垒越高,裂变几率就越小,相应的粒子发射几率也就越高. 图 3 表明裂变位垒随着系统同位旋的增加而增加,这意味着 ^{124}In

和¹¹⁰Tc 核的裂变几率都比¹¹⁰In 核的要小,这有利于¹²⁴In 和¹¹⁰Tc 系统蒸发更多的中子,当然也包括质子和 α 粒子. 因此,我们认为图 1 和 2 中展示的随着裂变系统同位旋的增加,中子的增强发射是由于同位旋大的系统同时拥有一个低的中子结合能和高的裂变位垒的缘故.

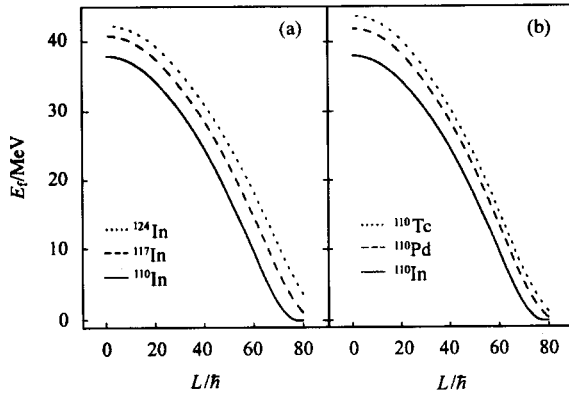


图 3 同位素链¹²⁴In, ¹¹⁷In, ¹¹⁰In(a)和同量异位素链¹¹⁰In, ¹¹⁰Pd, ¹¹⁰Tc (b)的裂变位垒随角动量的变化

对于质子,虽然高同位旋的系统有一个大的裂变位垒,这会有利于它的蒸发. 然而它的大的质子结合能(见表 1)却抑制了质子的发射. 计算指出:作为这两个因素竞争的结果, N_p 随着系统同位旋的增加而降低. 这表明质子结合能的增加对质子发射产生的影响超过了裂变位垒升高所带来的影响.

表 1 同位素链¹²⁴In, ¹¹⁷In, ¹¹⁰In 和同量异位素链¹¹⁰In, ¹¹⁰Pd, ¹¹⁰Tc连续蒸发 8 个中子或 8 个质子时中子(B_n)和质子(B_p)的结合能(结合能, MeV)

	¹²⁴ In		¹¹⁷ In		¹¹⁰ In		¹¹⁰ Pd		¹¹⁰ Tc	
	B_n	B_p	B_n	B_p	B_n	B_p	B_n	B_p	B_n	B_p
1	5.52	10.86	8.76	7.51	8.05	5.25	8.81	10.63	4.81	10.44
2	7.92	13.83	6.78	11.06	10.45	8.19	6.16	8.65	6.74	13.97
3	5.81	11.48	9.04	8.78	8.62	6.53	9.22	11.85	4.92	12.48
4	8.18	14.70	7.27	12.32	11.02	9.30	6.53	10.11	7.38	15.70
5	6.07	13.07	9.44	10.29	9.19	7.72	9.56	12.70	5.56	14.40
6	8.57	16.07	7.68	13.86	11.48	10.73	7.10	11.22	7.87	17.72
7	6.36	14.42	9.99	10.61	9.55	8.93	9.98	14.89	5.96	16.00
8	8.76	17.60	8.05	14.65	11.76	11.79	7.62	12.97	8.10	19.20

至于 α 粒子的情况,按照文献[21]中 α 粒子发射位垒的公式 $V_c = 2.88 Z_2 / (1.18 A_2^{1/3} + 4.642)$, 这里 Z_2 和 A_2 分别是余核的原子序数和质量数. 该公式指出系统的同位旋越高, V_c 就降低,低的发射位垒会增加 α 粒子的蒸发几率. 然而,图 1 和 2 却表明 N_α 随着裂变核同位旋的增加变小了. 我们认为这

是由于不同的轻粒子发射之间的竞争造成的. 正如前面所说,中子的发射会随着复合系统同位旋的增加而变强,中子蒸发几率的增加将大大减弱 α 粒子的发射. 这个影响要大于发射位垒的改变所产生的影响.

对一个高激发的复合核,特别是对于轻系统,除中子外,质子和 α 粒子也是一个重要的衰变道,实验数据分析中它们被广泛地用来提取裂变过程中有关核耗散强度的信息^[1,2,23-25]. 因此,断前中子和轻带电粒子对同位旋的不同依赖性将影响它们对耗散强度的敏感性.

图 4 描绘了 3 个 In 的同位素源蒸发的轻粒子作为同位旋和核粘滞系数的函数. 当 β 从 $2 \times 10^{21} \text{ s}^{-1}$ 增加到 $20 \times 10^{21} \text{ s}^{-1}$ 时, ¹¹⁰In 的中子多重性从 1.64 变到 2.80, ¹²⁴In 发射的 N_n 则从 4.7 变为 6.5. 对于带电粒子,在同样的 β 变化范围内, ¹¹⁰In 的 N_p 和 N_α 分别从 1.36 和 0.7 上升到 2.13 和 1.1. 而 ¹²⁴In 蒸发的质子和 α 粒子的变化区域是非常小的,即分别从 0.28 到 0.29 和从 0.316 到 0.328. 这个比较表明¹²⁴In 系统发射的中子多重性比¹¹⁰In 系统更敏感于耗散的大小. 然而它发射的带电粒子对 β 的依赖关系很弱,这正好同¹¹⁰In 的情形相反.

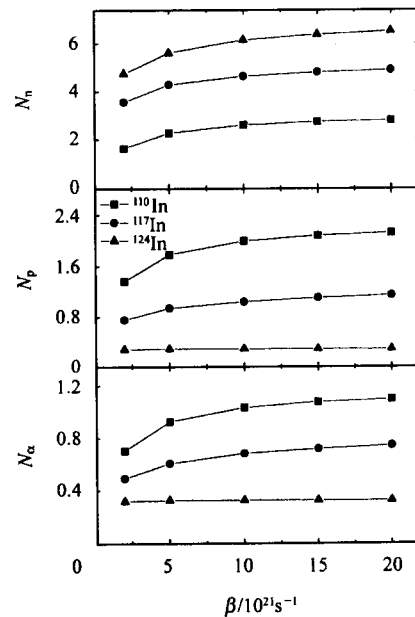


图 4 ¹¹⁰In, ¹¹⁷In 和¹²⁴In 在 $L = 70 \hbar$ 和 $E^* = 200 \text{ MeV}$ 时裂变前蒸发的 N_n , N_p 和 N_α 的多重性随核粘滞系数的变化

对同量异位素源蒸发的粒子,也观察到了与同位素源发射类似的情况(图 5). 由图可见,当 β 从最小增强到最大时,高同位旋的¹¹⁰Tc 系统发射的中子

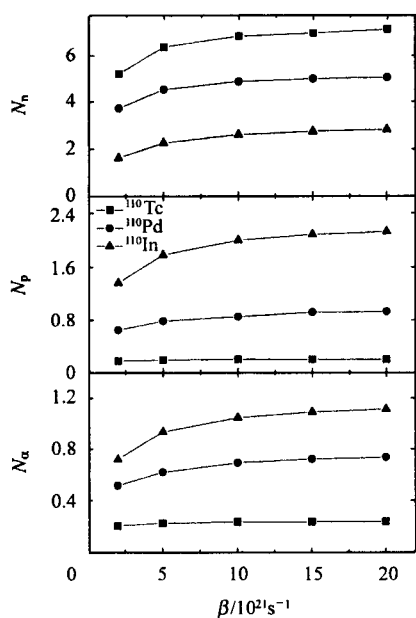


图 5 在 $L = 70\hbar$, $E^* = 200\text{MeV}$ 时 ^{110}Tc , ^{110}Pd 和 ^{110}In 裂变前蒸发的 N_n , N_p 和 N_α 的多重性随核粘滞系数的变化

多重性增加了 1.98, 这个值明显大于低同位旋的 ^{110}In , 因为后者的 N_n 仅增加了 1.10. 至于带电粒子的发射, 在一个小的核粘滞系数如 $2 \times 10^{21}\text{s}^{-1}$ 时, ^{110}Tc 蒸发的 N_p 和 N_α 分别为 0.177 和 0.206. 即使

在 β 增加到 $20 \times 10^{21}\text{s}^{-1}$ 时, 它发射的质子和 α 粒子也仅仅上升了 0.026 和 0.030. 这与 ^{110}In 核的发射形成了一个鲜明的对照. 因为它发射的 N_p 和 N_α 分别增加了 0.77 和 0.40, 大约增加了 55%. 这些结果再一次表明大的同位旋不利于带电粒子发射. 换句话说, 随着裂变系统同位旋的增加, 质子和 α 粒子的多重性不是耗散强度的一个敏感的实验观测量.

从图 4 和 5 中, 我们也发现虽然核耗散强度的变化会影响各种轻粒子的发射, 但它并没有改变同位旋对粒子发射的影响规律.

4 总结

总之, 通过在 Smoluchowski 方程的框架内考察同位旋对轻的同位素和同量异位素裂变源发射粒子的影响, 我们发现中子发射随着同位旋的增加而变强, 而轻带电粒子则变弱. 计算指出: 当一个裂变的复合核的同位旋变得非常高的时候, 质子和 α 粒子的发射不再敏感于核耗散的强度. 这意味着, 对于一个拥有大同位旋的轻复合系统, 轻带电粒子多重性不是一个提取热核裂变过程中耗散强度的好的观测量. 此外, 我们也发现核耗散强度的大小不改变同位旋对粒子发射的影响规律.

参考文献 (References)

- Hinde D J et al. Phys. Rev., 1992, **C45**: 1229
- Lestone J P et al. Phys. Rev. Lett., 1991, **67**: 1078
- Paul P, Thoennessen M. Annu. Rev. Nucl. Part. Sci., 1994, **44**: 65
- Diosezegi I et al. Phys. Rev., 2000, **C61**: 024613
- Shaw N P et al. Phys. Rev., 2000, **C61**: 044612
- Saxena A et al. Phys. Rev., 1994, **C49**: 932
- Pant L M et al. Eur. Phys. J., 2003, **A16**: 43
- Chatterjee A et al. Phys. Rev., 1995, **C52**: 3167
- Dhara D et al. Eur. Phys. J., 2000, **A7**: 209
- Abe Y et al. Phys. Rep., 1996, **275**: 49
- Frobrich P, Gontchar I I. Phys. Rep., 1998, **292**: 131
- Nadtochy P N et al. Phys. Rev., 2002, **C65**: 064615
- Karpov A V et al. Phys. Rev., 2001, **C63**: 054610; Eur. Phys. J., 2002, **A14**: 169
- Bertsch G F et al. Nucl. Phys., 1988, **A490**: 745
- SHEN W Q et al. Nucl. Phys., 1989, **A491**: 130
- XIAO Z G et al. Chin. Phys. Lett., 2001, **18**: 1037
- LI B A et al. Phys. Rev. Lett., 1996, **76**: 4492
- LI B A. Int. J. Mod. Phys., 1998, **E7**: 147
- LU Z D et al. Z. Phys., 1986, **A323**: 477; Phys. Rev., 1990, **C42**: 707; YE W et al. Z. Phys., 1997, **A359**: 385
- Delagrange H et al. Z. Phys., 1990, **A323**: 437
- Vaz L C, Alexander J M. Phys. Rep., 1983, **87**: 1
- Sierk A. Phys. Rev., 1986, **C33**: 2039
- Nakagawa T et al. Nucl. Phys., 1995, **A583**: 149
- Flored L et al. Nucl. Phys., 1997, **A620**: 171
- Kapan K et al. Nucl. Phys., 2001, **A686**: 109

Effects of Isospin on Multiplicity of Precission Particles of Light Fissioning Systems*

YE Wei¹⁾

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

Abstract The isospin effect of particle emission for fissioning isobaric sources ^{110}Tc , ^{110}Pd , ^{110}In and for isotopic sources of $^{110,117,124}\text{In}$ were investigated within the framework of the Smoluchowski equation. Calculations show that the emission of precission particles depends strongly on the isospin of the fission sources; With increasing isospin, neutron emission increases, but proton and α particle emission decrease; When a fissioning source has a larger isospin, light-charged particle emission is insensitive to the dissipation strength, indicating that for a light compound system with a high isospin, the multiplicity of proton and α particle is not a useful observable of extracting the magnitude of dissipation; The trend of various light particle emission with the isospin of fissioning systems is unrelated to the dissipation strength.

Key words isospin effect, precission particle multiplicity, nuclear dissipation strength, light fissioning system, Smoluchowski equation

Received 12 April 2003

* Supported by Foundation of Teaching & Research of the Best Young Teacher of Southeast University

1) E-mail: yewei@seu.edu.cn