

# <sup>100,104</sup>Sn核在裂变过程中发射的轻粒子多重性\*

叶巍<sup>1)</sup>

(东南大学物理系 南京 210096)

**摘要** 用扩散模型考察了轻的幻核<sup>100</sup>Sn在裂变过程中蒸发的轻粒子多重性. 发现壳效应对质子的发射有很强影响, 而对中子几乎没有影响, 这与<sup>132</sup>Sn核的情况正好相反. 因此把这种现象归因于系统中中质比( $N/Z$ )的影响. 通过比较<sup>104</sup>Sn和<sup>100</sup>Sn发射的粒子,  $N/Z$ 的影响得到了进一步证实. 计算发现高激发能弱化了 $N/Z$ 效应.

**关键词** 壳效应 断前粒子多重性 中质比 扩散模型

## 1 引言

众所周知, 壳对超重核的稳定起到了至关重要的作用. 此外, 它在一些现象中的作用也被发现了<sup>[1-3]</sup>. 在文献[3]中, 我们讨论了壳对幻核<sup>132</sup>Sn蒸发粒子的影响, 发现它对中子发射有显著的影响, 而对带电粒子则没有影响. 这被解释为<sup>132</sup>Sn有一个很高的中质比( $N/Z = 1.64$ )的缘故. 在本工作中, 我们将研究壳对 $N/Z = 1$ 的<sup>100</sup>Sn核发射轻粒子的影响.

因为粒子是在裂变过程中蒸发的, 因此它的发射依赖于它如何与裂变竞争. 在这个竞争过程中, 两个基本的输入量, 即粒子的结合能和裂变位垒将起到很重要的作用. 由于不同粒子的结合能和壳校正的裂变位垒是系统中子数的函数. 因此可以预计壳对<sup>100</sup>Sn核发射不同轻粒子的影响将会不同于<sup>132</sup>Sn. 本文将考查系统的 $N/Z$ 对各种轻粒子发射壳效应的影响.

## 2 理论模型

本工作使用考虑了轻粒子发射的Smoluchowski方程<sup>[4]</sup>:

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

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;  $\theta = T/(\mu\beta)$ ,  $\mu$ 是系统的约化质量,  $\beta$ 是摩擦系数. (1)式右边第二项是轻粒子的发射,  $\lambda_i = \Gamma_i/\eta$ , 其中 $\Gamma_i$  ( $i=n, p, \alpha$ )是轻粒子的发射宽度, 用细致平衡原理的方法计算<sup>[5]</sup>.

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,

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

这里, 方程右边第1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2项是第 $s$ 代某个子核通过裂变及发射粒子的衰变率.

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:

$$N_i = \sum_{d=1}^{d_m} \sum_{s=1}^{s_m} n_{ds}. \quad (3)$$

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粒子数, 外层求和是对所有可能的衰变.

时间相关的裂变宽度定义为

$$\Gamma_f(t) = \hbar \lambda_f(t) = \hbar J(t)/\pi_f(t), \quad (4)$$

2005-04-12 收稿

\*国家自然科学基金(10405007, 90412014)和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

其中  $J(t)$  是通过鞍点的几率流,  $\pi_f(t)$  是系统在鞍点左边的几率.

### 3 计算结果和讨论

本工作通过比较  $^{100}\text{Sn}$  和  $^{132}\text{Sn}$  以及它与  $^{104}\text{Sn}$  发射的不同轻粒子多重性来研究不同粒子发射的壳效应与系统中质比的关系.

如果要考察壳效应, 除液滴位垒外(可用 Sierk 的方法计算<sup>[6]</sup>), 壳校正的位垒也应该被包括. 此外, 壳校正的温度阻尼在本工作中也被考虑了. 因此总的裂变位垒是

$$B_f(T) = B_{\text{DM}} - \delta U \cdot \Phi(T), \quad (5)$$

这里,  $B_{\text{DM}}$  是液滴位垒,  $\delta U$  是壳校正, 在温度  $T = 0$  时的值, 取自文献<sup>[7]</sup>.  $\Phi(T)$  是壳校正的温度依赖因子, 依照 Ignatyuk 等的工作<sup>[8]</sup>, 可以用下式进行参数化:

$$\Phi(T) = \exp(-aT^2/E_d). \quad (6)$$

这里,  $a$  是能级密度参数;  $E_d$  是壳校正的阻尼因子, 取为  $20\text{MeV}$ <sup>[9]</sup>. 计算中考虑了衰变过程产生的各种核的壳校正和角动量对粒子发射的影响.

为了更好地展示壳对粒子发射的影响, 我们定义

$$\Delta N_i \equiv N_i(\text{有壳校正}) - N_i(\text{无壳校正}),$$

这里,  $i = n, p, \alpha$ ; 符号  $N_p$  (有壳校正) 和  $N_p$  (无壳校正) 分别表示在有无壳校正情况下蒸发的质子多重性.

计算表明, 对  $^{100}\text{Sn}$  和  $^{104}\text{Sn}$  核, 壳效应起明显作用的角动量区间是  $50\hbar < L < 60\hbar$ . 图1给出了裂变核  $^{100}\text{Sn}$  和  $^{104}\text{Sn}$  的  $\Delta N_n$  和  $\Delta N_\alpha$ . 可以看出对这两个系统, 不同激发能处的  $\Delta N_n$  的值都接近于零, 表明中子发射没有受到壳效应的影响. 虽然  $^{104}\text{Sn}$  的  $\Delta N_\alpha$  的值展现了壳的影响, 但它太小, 而  $^{100}\text{Sn}$  的  $\Delta N_\alpha$  没有显示出壳的影响.

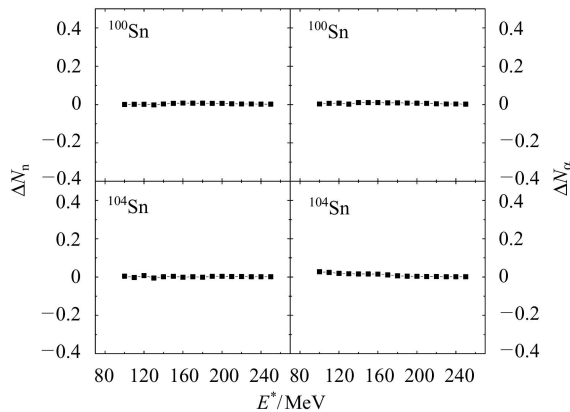


图1 系统  $^{100}\text{Sn}$  和  $^{104}\text{Sn}$  在角动量  $L = 55\hbar$  和粘滞系数  $\beta = 5 \times 10^{21}\text{s}^{-1}$  时裂变前蒸发中子和  $\alpha$  粒子的  $\Delta N_n$  和  $\Delta N_\alpha$  随激发能的变化

图2给出了系统  $^{100}\text{Sn}$  和  $^{104}\text{Sn}$  蒸发质子的情形. 很明显, 质子的发射受到了壳效应的强烈影响. 对  $^{100}\text{Sn}$ ,  $\Delta N_p$  随着激发能的增加而减少, 这是由于壳校正的大小是激发能的函数. 具体来说, 当激发能从  $100\text{MeV}$  增加到  $130\text{MeV}$  时,  $\Delta N_p$  从  $0.87$  降低到  $0.46$ , 当  $E^* = 180\text{MeV}$  时, 它进一步降为  $0.13$ . 而在

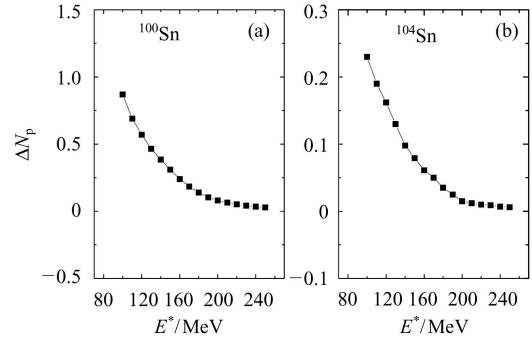


图2 系统  $^{100}\text{Sn}$  (a) 和  $^{104}\text{Sn}$  (b) 在角动量  $L = 55\hbar$  和粘滞系数  $\beta = 5 \times 10^{21}\text{s}^{-1}$  时裂变前蒸发的质子的  $\Delta N_p$  随激发能的变化

文献<sup>[3]</sup>中, 壳对  $^{132}\text{Sn}$  核蒸发质子几乎没有影响, 而它对中子激发函数的影响与图2相似. 我们认为之所以出现不同粒子随壳效应有不同的行为是因为壳校正的裂变位垒以及中子和质子的分离能是系统中子数的函数, 因此系统的  $N/Z$  会对粒子发射的壳效应产生影响. 图2也展示了壳在  $^{104}\text{Sn}$  发射质子中的作用. 在最低的激发能  $100\text{MeV}$  时, 壳效应使质子发射增加了  $0.23$ . 对  $130$  和  $180\text{MeV}$  的激发能, 这个增量减少为  $0.13$  和  $0.035$ , 这些增值远小于  $^{100}\text{Sn}$  的情况. 这是由于  $^{104}\text{Sn}$  比  $^{100}\text{Sn}$  有一个更高的  $N/Z$  的缘故. 高的  $N/Z$  产生了两个重要后果, 它使不同轻粒子的结合能以及系统的壳校正发生了变化. 因为粒子多重性主要是由于衰变过程中的前几步决定的, 因此在表1中列出了  $^{100}\text{Sn}$  和  $^{104}\text{Sn}$  连续蒸发5个中子或质子的结合能以及连续蒸发5个质子时系统所对应的壳校正的大小. 从中可以看出  $^{100}\text{Sn}$  核的中子结合能比质子的要大很多, 考虑到质子发射与中子发射是相竞争的, 高的质子发射率不利于中子的增加, 意味着一个非常小的中子发射. 因为复合核在衰变过程中, 粒子蒸发和裂变是主要的衰变道. 带电粒子的发射几率取决于它同裂变以及中子发射相竞争的结果. 这意味着在裂变几率不是很大的情况下, 小的中子多重性实际上表明一个小的中子发射几率. 图1中的计算表明中子不是该核的主要衰变模式, 暗示壳校正的引入对中子发射的影响是弱的.

表1  $^{100}\text{Sn}$ 和 $^{104}\text{Sn}$ 连续蒸发5个中子(或质子)时的粒子结合能以及连续蒸发5个质子时对应的壳校正的大小. (结合能 $B_{n,p}$ 和壳校正 $\delta U$ 的单位是MeV)

中子或 质子数	$^{100}\text{Sn}$		$^{104}\text{Sn}$		$^{100}\text{Sn}$	$^{104}\text{Sn}$
	$B_n$	$B_p$	$B_n$	$B_p$	$\delta U$	$\delta U$
1	17.45	2.98	12.45	4.22	-10.02	-5.49
2	14.46	1.65	10.02	4.09	-8.69	-4.12
3	18.37	1.41	13.47	4.14	-7.05	-2.56
4	15.49	0.57	11.21	3.33	-5.67	-1.82
5	19.11	0.42	17.45	2.98	-4.87	-0.81

虽然 $^{104}\text{Sn}$ 发射的中子结合能比 $^{100}\text{Sn}$ 的小一些,但同质子相比,仍然偏高.因此发射质子仍然是 $^{104}\text{Sn}$ 核退激的主要方式,因此只有质子发射会对壳效应敏感,见图2(b).同 $^{100}\text{Sn}$ 比较, $^{104}\text{Sn}$ 蒸发质子的结合能增加了不少,这不利于它发射更多的质子.壳校正增加了裂变位垒,会抑制裂变,相应地也增加了各种粒子的发射几率.很明显,壳校正越大,粒子发射的几率也就增加得越大.换句话说,也增加了壳对粒子发射的影响.虽然,壳校正增加了所有轻粒子的发射,但考虑到不同的轻粒子发射之间也存在竞争,因此它们对壳效应敏感的程度取决于谁是系统主要的衰变模式.

发射几率大的粒子将受到壳效应大的影响,反之,受到的影响就小.结果表明,对 $^{100}\text{Sn}$ 和 $^{104}\text{Sn}$ 系统,只有质子受到了壳很大的影响,见图1,2所示.图2指出,壳对 $^{100}\text{Sn}$ 蒸发质子的影响要强于 $^{104}\text{Sn}$ ,原因是前者有一个低的质子分离能和大的壳校正裂变位垒,这两个因素都导致 $^{100}\text{Sn}$ 发射了更多的质子和一个大的壳效应,比较图2(a)和2(b)就能清楚地看出这一点.

从图2中我们注意到,当 $^{100}\text{Sn}$ 和 $^{104}\text{Sn}$ 的激发能达到200MeV时,它们的 $\Delta N_p$ 都接近于零,这个结果一方面暗示壳效应的消失,另一方面也说明 $N/Z$ 对粒子发射壳效应的影响在大激发能处变弱.

## 4 总结

总之,用扩散模型研究了壳对 $^{100}\text{S}$ 和 $^{104}\text{Sn}$ 核在裂变过程中蒸发的轻粒子多重性的影响.计算表明壳仅强烈地影响了质子发射,对 neutron 却没有影响.这与 $^{132}\text{Sn}$ 核的情况正好相反.原因是前两个系统有一个小的中质比的缘故.此外我们还发现 $N/Z$ 的影响与系统的激发能有关,高激发能弱化了 $N/Z$ 对断前粒子发射壳效应的影响.

## 参考文献(References)

- Shrivastava A et al. Phys. Rev. Lett., 1999, **82**: 699; Mahata K et al. Phys. Rev., 2002, **C65**: 034613; Karamian S A et al. Eur. Phys. J., 2003, **A17**: 49
- Back B B et al. Phys. Rev., 1999, **C60**: 044602
- YE W. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2003, **27**(9): 798 (in Chinese)  
(叶巍. 高能物理与核物理, 2003, **27**(9): 798)
- LU Z D et al. Z. Phys., 1986, **A323**: 477; Phys. Rev., 1990, **C42**: 707; YE W et al. Z. Phys., 1997, **A359**: 385; Eur. Phys. J., 2003, **A18**: 571
- Delagrange H et al. Z. Phys., 1990, **A323**: 437
- Sierk A J. Phys. Rev., 1986, **C33**: 2039
- Myers W D, Swiatecki W J. LBL Preprint, 1994, LBL-36803; Nucl. Phys., 1996, **A601**: 141
- Ignatyuk A V et al. Sov. Nucl. Phys., 1975, **21**: 255
- Arimoto Y et al. Phys. Rev., 1999, **C59**: 796; 1997, **C55**: 1011(R)

# Particle Evaporation in the Fission Process of Nuclei $^{100,104}\text{Sn}^*$

YE Wei<sup>1)</sup>

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

**Abstract** The particle evaporation in the fission process of  $^{100}\text{Sn}$  is studied using a diffusion model. It is shown that the shell influences strongly the proton emission whereas its effect on neutron emission is negligible, in contrast with the case of  $^{132}\text{Sn}$ . It is due to the effect of the difference of neutron-to-proton ratio,  $N/Z$ , of the systems. This conclusion is further verified by comparing particle emission between  $^{100}\text{Sn}$  and  $^{104}\text{Sn}$ . Calculations indicate that high excitation energy weakens this  $N/Z$  effect.

**Key words** shell effect, pre-scission particle multiplicity, neutron-to-proton ratio, diffusion model

Received 12 April 2005

\*Supported by National Nature Science Foundation of China (10405007, 90412014) and the Teaching & Researching Foundation for Outstanding Teacher of Southeast University

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