

断前粒子发射的壳效应*

叶巍¹⁾

(东南大学物理系 南京 210096)

摘要 用推广的裂变扩散模型研究了裂变前壳效应对粒子发射的影响. 双幻核²⁰⁸Pb 和¹³²Sn 被用作例子来展示这个壳效应. 计算结果表明壳效应对这两个复合系统断前发射的粒子有影响. 对中子, 壳的影响非常明显. 我们发现壳对中子发射的影响随着裂变系统激发能的增加而逐渐变弱.

关键词 壳效应 断前粒子多重性 裂变扩散模型

1 引言

对许多热核系统在裂变过程中发射的中子^[1], 轻带电粒子^[2]和 γ 射线^[3] 多重性的测量表明它们的值都超过了标准统计模型的估计, 这被认为是由于裂变阻尼引起的. 考虑了裂变过程中耗散的扩散模型被用来解释这个现象. 在该模型的框架内研究了许多影响裂变过程中粒子发射的物理因素^[4].

壳效应不但对核结构的确定起到了重要的作用, 而且裂变过程壳效应的信息对于超重元素的合成也是有价值的. 一般认为, 在高激发能时, 壳效应会消失. 然而, 最近的一些工作^[5,6] 建议中子闭壳 ($N = 126$) 可能影响了裂变碎片的各向异性. Back 等发现^[7] 为了拟合²²⁴Th ($N = 134$) 和²¹⁶Th ($N = 216$) 复合系统的蒸发剩余截面, 对于前面一个核必须用一个大的耗散系数. 于是, 他们认为核耗散的大小与在 $N = 126$ 的中子闭壳有关. 这些工作促使我们研究壳结构对裂变过程中粒子发射的影响. 因为双幻核²⁰⁸Pb ($Z = 82, N = 126$) 和¹³²Sn ($Z = 50, N = 82$) 是已知的具有最大壳校正的核, 因此在本工作中, 它们被用作考察壳对裂变过程中粒子发射影响的例子.

2 模型

在大粘滞性近似条件下, Fokker-Planck 方程可

以简化为 Smoluchowski 方程. 本文中用到的同时考虑了中子、质子和 α 粒子发射的 Smoluchowski 方程如下^[8]:

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

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, 它可以用细致平衡原理的方法来计算^[9]. 时间相关的裂变宽度定义为

$$\Gamma_i(t) = \hbar \lambda_i(t) = \hbar J(t)/\pi_i(t), \quad (2)$$

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

在 10 MeV/u 左右的重离子反应中, 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.

$$\frac{d}{dt} P_i(t) = \sum_{i=n, p, \alpha} \lambda_{i-1} P_{i-1}(t) - \left[\sum_{i=n, p, \alpha} \lambda_{i+1} + \lambda_{i, i}(t) \right] P_i(t), \quad (3)$$

2002-12-12 收稿

* 东南大学优秀青年教学科研资助计划资助

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

这里 P_s 是第 s 代某个子核的存在几率. 方程右边第一项是源项, 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.

3 计算结果和讨论

计算中用到的裂变位垒由液滴部分和温度相关的壳校正部分组成:

$$B_f(T) = B_{DM} - \delta U \cdot \Phi(T), \quad (4)$$

这里 B_{DM} 是液滴位垒, δU 是壳校正, 在温度 $T=0$ 时的值, 取自文献[10]. 对 ^{208}Pb 和 ^{132}Sn 这两个核, 它们的壳校正分别是 -12.84 MeV 和 -11.55 MeV . $\Phi(T)$ 是壳校正的温度依赖因子, 依照 Ignatyuk 等的工作^[11], 可以用下式进行参数化:

$$\Phi(T) = \exp(-aT^2/E_d), \quad (5)$$

这里 a 是能级密度参数, 取为 $A/8$; E_d 是壳校正的阻尼因子, 取为 20 MeV ^[12]. 在计算中, 衰变过程产生的各种核的裂变位垒的壳校正都被考虑了.

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

$$\nu_i = \sum_{d=1}^{dm} \sum_{s=1}^{sm} n_{ds}. \quad (6)$$

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. 符号 dm 表示衰变链的最大数目, sm 指的是某一个衰变链的衰变次数, n_{ds} 表示第 d 个衰变链中第 s 次蒸发某一个轻粒子的数目. 粒子结合能的数据取自 Myers 和 Swiatecki 的估计^[10]. 本工作考虑了在每一次衰变过程中裂变和粒子发射之间的竞争.

本文包括角动量效应. 因角动量而带走的转动

能用刚体模型计算^[13]. 它对轻粒子发射宽度的影响是轻粒子不但带走了一部分激发能, 而且改变了子核的角动量. 作为一个初步的近似, 假定一个中子或质子带走 $1\hbar$ 的角动量, 而 α 粒子则带走 $2\hbar$ 的角动量. 液滴部分的裂变位垒用程序 barfit^[13] 来计算.

用粒子多重性研究壳效应, 角动量是一个关键因素. 它起到了双重作用. 一方面, 它降低了液滴裂变位垒; 另一方面, 因为它的原因, 转动能占据了一部分激发能. 这部分能量没有用于“热浴”来升高核的温度, 结果裂变系统的温度被降低. 温度的降低会增加壳校正部分的裂变位垒, 这有利于壳效应的研究. 因此, 大角动量的引入对于壳效应的研究是重要的. 然而, 考虑到断裂前粒子发射对角动量有很强的依赖性, 即随着角动量的增加, 粒子发射会减少. 这意味着如果裂变系统的角动量过大, 那么发射的粒子数会非常少, 这将降低粒子发射对壳效应的敏感性, 不利于本文的研究. 作为上面两个相反要求的一个折衷, 一个适当的角动量区间对于当前的研究是必要的.

对重核 ^{208}Pb , 我们发现当裂变系统的角动量处在 $55\hbar-75\hbar$ 之间时, 壳效应是明显的. 表 1 给出了在有、无壳校正情况下, ^{208}Pb 核在角动量 $L=60\hbar$ 和 $\beta=5 \times 10^{21} \text{ s}^{-1}$ 时裂变前蒸发的中子、质子和 α 粒子的多重性随激发能的变化. 可以看出壳校正的引入虽然改变了粒子多重性的大小, 但是并没有改变轻粒子发射随激发能的变化趋势. 这些行为可以通过观察一个互补的量, 即核的首次裂变几率, 而得到理解. 从该表中, 可以看到有壳校正时, 核的首次裂变几率减少. 这是由于壳增加了裂变系统位垒的缘故. 从表 1 中也注意到壳校正对质子和 α 粒子发射的影响不大, 但是它对中子的影响则很大. 因此, 下面主要研究中子发射.

表 1 在无壳校正和有壳校正的情况下, ^{208}Pb 核在 $L=60\hbar$ 和 $\beta=5 \times 10^{21} \text{ s}^{-1}$ 时裂变前蒸发的中子、质子和 α 粒子的多重性 ($M_i (i = n, p, \alpha)$) 和核的首次裂变几率 (P_f) 随激发能的变化

E^*/MeV	无壳校正				有壳校正			
	M_n	M_p	M_α	$P_f(\%)$	M_n	M_p	M_α	$P_f(\%)$
100	3.807	0.0267	0.0159	6.62	5.115	0.0308	0.0181	4.11
110	4.377	0.0459	0.0282	5.11	5.369	0.0520	0.0316	
120	4.847	0.0727	0.0457	4.01	5.588	0.0810	0.0505	
130	5.197	0.1070	0.0684	3.20	5.711	0.1165	0.0743	
140	5.438	0.1473	0.0955	2.58	5.795	0.1570	0.1017	2.08
150	5.598	0.1911	0.1246	2.11	5.848	0.2001	0.1305	
160	5.700	0.2369	0.1545	1.73	5.878	0.2449	0.1598	1.48

(续表 1)

E^*/MeV	无壳校正				有壳校正			
	M_n	M_p	M_α	$P_f(\%)$	M_n	M_p	M_α	$P_f(\%)$
170	5.762	0.2829	0.1838	1.43	5.890	0.2899	0.1884	1.25
180	5.795	0.3286	0.2119	1.19	5.889	0.3346	0.2158	1.06
190	5.808	0.3734	0.2384	0.99	5.878	0.3785	0.2417	0.90
200	5.807	0.4171	0.2631	0.83	5.860	0.4214	0.2658	0.76
230	5.754	0.5360	0.3265	0.50	5.779	0.5421	0.3280	0.48

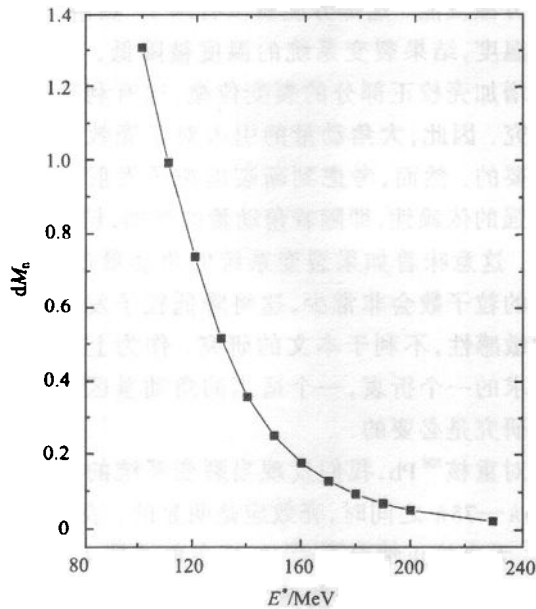


图 1 在有、无壳校正的情况下²⁰⁸Pb核在 $L = 60\hbar$ 和 $\beta = 5 \times 10^{21} \text{ s}^{-1}$ 时裂变前蒸发的中子多重性的差值 dM_n 随激发能的变化

图1显示了在有、无壳校正的情况下,²⁰⁸Pb核

在 $L = 60\hbar$ 和 $\beta = 5 \times 10^{21} \text{ s}^{-1}$ 时裂变前蒸发的中子多重性的差值随激发能的变化. 很明显,壳的影响随着激发能的增加逐渐降低. 这个结果与一个已知的事实一致,即在高激发能时,壳效应将消失. 对于当前的情况,当激发能达到 200 MeV 时,壳基本上不产生影响. 这是因为在高激发能,壳对位垒的校正可以忽略的缘故. 然而在低一些的能量,如 130 MeV 处,由于壳导致的裂变位垒的升高使中子多重性上升了 0.51. 当系统的激发能进一步降低到 100 MeV 时,壳校正的裂变位垒达到了液滴位垒的 1/3. 裂变位垒大的变化将直接影响蒸发的中子数,结果中子发射的数目增加了 1.31,这是一个相当大的增加量.

在壳效应对角动量的敏感区域以外,壳的影响是相当小的. 作为一个例子,我们在表 2 中给出了在 $L = 30\hbar$ 时的结果. 从表中可以观察到,中子多重性的差值只在零点附近有一个涨落. 这些特征也正是所预期的. 原因是低角动量不但增加了液滴部分的裂变位垒,而且因升高了裂变系统的温度而使壳校正的位垒降低. 这两个因素一同减少了壳对粒子发射的影响.

表 2 同表 1 但是对 $L = 30\hbar$ 时的情况

E^*/MeV	无壳校正				有壳校正			
	M_n	M_p	M_α	$P_f(\%)$	M_n	M_p	M_α	$P_f(\%)$
100	5.923	0.0660	0.0405	0.29	5.939	0.0664	0.0408	0.19
110	6.584	0.1047	0.0657	0.27	6.528	0.0989	0.0623	0.18
120	6.555	0.1466	0.0940	0.24	6.539	0.1467	0.0944	0.17
130	6.526	0.1919	0.1249	0.21	6.508	0.1923	0.1252	0.16
140	6.507	0.2379	0.1558	0.19	6.503	0.2387	0.1563	0.15
150	6.437	0.2843	0.1859	0.17	6.445	0.2852	0.1865	0.14
160	6.365	0.3296	0.2144	0.15	6.377	0.3305	0.2150	0.12
170	6.299	0.3743	0.2413	0.13	6.311	0.3751	0.2418	0.11
180	6.232	0.4172	0.2660	0.12	6.240	0.4180	0.2670	0.10
190	6.166	0.4593	0.2889	0.10	6.173	0.4599	0.2893	0.09
200	6.103	0.4993	0.3099	0.09	6.110	0.5000	0.3103	0.08
230	5.925	0.6114	0.3631	0.06	5.929	0.6118	0.3634	0.06

表3 在无校正和有壳校正的情况下, ^{132}Sn 核在 $L = 85\hbar$ 和 $\beta = 10 \times 10^{21} \text{ s}^{-1}$ 时裂变前蒸发的中子、质子和 α 粒子的多重性和核的首次裂变几率随激发能的变化

E^*/MeV	无壳校正				有壳校正			
	M_n	M_p	M_α	$P_f(\%)$	M_n	M_p	M_α	$P_f(\%)$
140	3.354	0.0011	0.0005	11.77	4.662	0.0012	0.0006	6.00
150	3.991	0.0026	0.0013	8.94	5.107	0.0029	0.0014	5.14
160	4.562	0.0054	0.0027	7.02	5.440	0.0058	0.0030	4.42
170	5.019	0.0097	0.0051	5.65	5.662	0.0104	0.0055	3.82
180	5.354	0.0161	0.0087	4.64	5.822	0.0170	0.0092	3.32
190	5.597	0.0247	0.0136	3.87	5.942	0.0259	0.0143	2.89
200	5.773	0.0357	0.0198	3.27	6.032	0.0371	0.0207	2.53
210	5.902	0.0488	0.0272	2.79	6.100	0.0503	0.0281	2.23
220	5.996	0.0637	0.0353	2.40	6.149	0.0653	0.0362	1.97
230	6.062	0.0801	0.0439	2.09	6.184	0.0818	0.0449	1.75
240	6.109	0.0979	0.0529	1.82	6.206	0.0995	0.0538	1.56
250	6.139	0.1165	0.0618	1.60	6.216	0.1181	0.0627	1.39
260	6.154	0.1359	0.0707	1.41	6.217	0.1374	0.0715	1.25
280	6.150	0.1757	0.0874	1.11	6.194	0.1771	0.0881	1.00
300	6.107	0.2158	0.1023	0.89	6.138	0.2170	0.1029	0.82

下面研究轻系统 ^{132}Sn 的情形. 对这个系统,壳效应起到明显作用的角动量区间是 $80\hbar$ — $95\hbar$. 取 $L = 85\hbar$ 时的结果作为一个展示的例子. 计算结果见表3. 同 ^{208}Pb 核在 $L = 60\hbar$ 时的结果类似,壳对质子和 α 粒子蒸发的影响不大,但对中子的影响则很大. 也就是说,对这样一个轻系统,壳的影响在系统能量增高时变弱. 300 MeV 的激发能将使壳的影响消失. 而当系统的激发能减少到 140 MeV 时,壳效应将使 ^{132}Sn 系统蒸发的中子数增加1.31. 这样一个增加量再一次说明了壳对断前粒子发射

的影响.

4 总结

总之,通过在Smoluchowski方程的框架内考察重系统 ^{208}Pb 和轻系统 ^{132}Sn 在裂变过程中发射的轻粒子,壳效应的影响被理论计算描述了,尤其是对中子蒸发的影响. 进而发现对这两个双幻核,壳对中子多重性的影响随着裂变系统激发能的增加将逐渐变弱,直至消失.

参考文献 (References)

- Gavron A et al. Phys. Rev., 1987, C35:579—590
- Hinde D J et al. Phys. Rev., 1992, C45:1229—1259
- Paul P, Thoennessen M. Annu. Rev. Nucl. Part. Sci., 1994, 44: 65—108
- Frobrich P, Gontchar I I. Phys. Rep., 1998, 292:131—237
- Shrivastava A et al. Phys. Rev. Lett., 1999, 82:699—702
- Mahata M et al. Phys. Rev., 2002, C65:034613(1—5)
- Back B B et al. Phys. Rev., 1999, C60:044602(1—7)
- LU Z D et al. Z. Phys., 1986, A323:477—484; Phys. Rev., 1990, C42:707—710; YE W et al. Z. Phys., 1997, A359:385—389
- Delagrange H et al. Z. Phys., 1990, A323:437—449
- Myers W D, Swiatecki W J. Report No. I.B.I.-36803, 1994
- Ignatyuk et al. Sov. Nucl. Phys., 1975, 21:255
- Arimoto A et al. Phys. Rev., 1997, C55:R1011—R1015
- Sierk A. Phys. Rev., 1986, C33:2039—2051

Effects of Shell on Pre-Scission Particle Emission

YE Wei¹⁾

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

Abstract Influence of the shell effect on the emission of light particles prior to scission is explored in the framework of the Smoluchowski equation. Doubly magic nuclei ^{208}Pb and ^{132}Sn are chosen as examples to demonstrate this shell effect. Results show that shell has an effect on light particle emissions. For neutrons, the shell effect is significant. Moreover, it is found that this shell effect on neutron emission gradually fades out with increasing the excitation energy.

Key words shell effect, pre-scission particle multiplicity, fission diffusion model

Received 12 December 2002

* Supported by Foundation of Teaching and Researching of the Best Teacher of Southeast University

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