

同位旋对断前粒子发射影响的壳结构依赖性^{*}

叶巍¹⁾

(东南大学物理系 南京 210096)

摘要 用扩散模型研究了壳对幻数附近的核, 即²⁰⁴Pb, ²⁰⁸Pb, ²¹²Pb 和¹²⁸Sn, ¹³²Sn, ¹³⁶Sn, 在裂变过程中蒸发轻粒子多重性的影响. 发现壳能够影响粒子发射的同位旋依赖性, 并且该影响的大小与复合系统的自旋和激发能有关. 计算表明角动量在壳影响同位旋相关的粒子发射中起到了显著的作用, 而高激发能弱化了壳的影响.

关键词 同位旋效应 断前粒子多重性 壳校正 扩散模型

1 引言

同位旋对热核形成和衰变的影响是当前核物理的热点问题之一^[1]. 它在一些现象中所起的重要作用已被揭示^[2-13]. 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.

最近的一个基于扩散模型的工作^[13]指出, 同位旋影响了粒子发射, 并且被发射的中子数随系统同位旋的增加而增加. 这一考察是针对非幻数的系统. 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. 对于一个幻核, 由于壳对裂变位垒的修正, 壳影响了粒子发射与裂变之间的竞争^[14]. 进而, 壳校正的裂变位垒是系统中子数的函数. 因此可以预计壳能够对粒子发射的同位旋依赖性产生影响. 本工作致力于这个问题以及它与复合系统自旋和激发能的关系的研究.

2 理论模型

为了研究扩散过程中的粒子发射, 我们使用考虑了轻粒子发射的 Smoluchowski 方程^[15]:

$$\frac{\partial P(x, t)}{\partial t} = \theta \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial U}{\partial x} P(x, t) + \frac{\partial P(x, t)}{\partial x} \right) -$$

$$\sum_{i=n, p, \alpha} \lambda_i P(x, t), \quad (1)$$

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 $\Gamma_i (i = n, p, \alpha)$ 是轻粒子的发射宽度.

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.

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

2004-06-22 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

放的所有的粒子数,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

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

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

为了探讨壳是如何影响粒子发射对同位旋的依赖性,一个 $Z = 82$ 的 Pb 同位素链(即 ^{204}Pb , ^{208}Pb 和 ^{212}Pb)和3个 $Z = 50$ 的 Sn 核(即 ^{128}Sn , ^{132}Sn 和 ^{136}Sn)被用做展示的例子,这是因为 ^{208}Pb 和 ^{132}Sn 是目前已知的具有最大壳校正的核. 在扩散模型中,粒子的分离能和裂变位垒是两个基本的输入量,它们与粒子发射宽度和裂变宽度紧密相关. 在一个很大的程度上,它们决定了粒子多重性的大小,相应地也决定了同位旋效应.

粒子发射宽度用细致平衡原理的方法计算^[16]:

$$\Gamma_i = \frac{(2I_i + 1) m_i}{\pi^2 \hbar^2 \rho(E^*, A)} \int_{V_i}^{E^* - B_i} \epsilon \sigma_i(\epsilon) \rho(E^* - V_i - B_i - \epsilon, A - A_i) d\epsilon, \quad (5)$$

这里, A 是母核的质量数, ρ 是能级密度, E^* 是系统扣除了转动能后的激发能. I_i , m_i , B_i , σ_i , V_i 和 A_i ($i = n, p, \alpha$) 分别是被发射粒子的自旋、质量、结合能、逆吸收截面、发射位垒和质量数. 其中 B_i 和 V_i ^[17] 是系统同位旋的函数, σ_i 也是同位旋的函数,因为它包含 V_i ^[18]. 因此,粒子发射宽度与同位旋有关. 至于裂变宽度,它是通过裂变位垒与同位旋有关的.

如果要考察壳效应,除液滴位垒外(可用 Sierk 的方法计算^[19]),壳校正的位垒也应该包括在内. 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:

$$B_f(T) = B_{DM} - \delta U \cdot \Phi(T), \quad (6)$$

这里, B_{DM} 是液滴位垒, δU 是壳校正温度 $T = 0$ 时的值,取自文献^[20]. $\Phi(T)$ 是壳校正的温度依赖因子,依照 Ignatyuk 等的工作^[21],可以用下式进行参数化:

$$\Phi(T) = \exp(-aT^2/E_d), \quad (7)$$

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 20MeV ^[22]. 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.

为了更好地揭示粒子发射的同位旋依赖性与核

壳结构的关系,我们定义了下面的量:

$$\Delta N_i^{212\text{Pb}(^{204}\text{Pb})} \equiv N_i(^{212}\text{Pb}) - N_i(^{204}\text{Pb}),$$

这里 $i = n, p, \alpha$. $\Delta N_n^{212\text{Pb}(^{204}\text{Pb})}$ 表示 ^{212}Pb ($N_n(^{212}\text{Pb})$) 和 ^{204}Pb ($N_n(^{204}\text{Pb})$) 蒸发的中子多重性的差. 同样可定义系统 ^{208}Pb 和 ^{204}Pb , ^{136}Sn 和 ^{128}Sn 以及 ^{132}Sn 和 ^{128}Sn 发射的各种轻粒子多重性的差.

由于角动量对粒子发射壳效应的显著影响^[23],因此本工作对这些同位素在不同角动量的情况进行了细致的计算. 从图1中可以看出,有无壳校正时的结果并不相同,说明壳对 ^{204}Pb , ^{208}Pb 和 ^{212}Pb 蒸发的带电粒子的影响是不同的. 实心符号总是略为低于空心符号,这意味着壳对 ^{204}Pb 蒸发质子和 α 粒子的影响要略强于 ^{208}Pb 和 ^{212}Pb . 其原因是同位旋效应使 ^{204}Pb 比 ^{208}Pb 和 ^{212}Pb 蒸发了更多的带电粒子. 考虑到带电粒子发射与中子发射是相竞争的,高的中子发射率不利于带电粒子的增加. 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,小的带电粒子多重性实际上表明一个小的带电粒子发射几率,也就是说,复合核主要是通过中子蒸发退激的. 虽然壳校正增加了裂变位垒,导致裂变几率降低,抑制了裂变,从而影响了中子和带电粒子的发射. 但是它们受壳效应影响的程度取决于谁是系统主要的衰变模式. 很明显,发射几率大的将受到壳效应影响大,反之,受到的影响就小. 由于当前选择的3个 Pb 同位素的中质比 N/Z 都很高,即使对最小的 ^{204}Pb ,它的 $N/Z = 1.49$,一个相当大的值. 由以前的工作可知^[13],它的带电粒子发射也不会很大,说明中子是这个系统主要退激方式. 这暗示壳校正的引入主要影响了中子发射,对带电粒子的影响是弱的. 总之,这里同位旋效应和小多重性的综合效应大于壳效应. 结果表明,壳虽然能对 Pb 同位素发射的带电粒子产生影响,但它的作用不是很大,见图1. 对其他的角动量可以观察到类似的图像.

图2描绘了取5个不同的角动量时壳对粒子发射同位旋依赖性的影响. 很明显,对于任何一个角动量, $\Delta N_n^{208\text{Pb}(^{204}\text{Pb})}$ 在有壳校正情况下的值超过了它在没有壳校正情况下的值. 这归因于 ^{208}Pb 在衰变链中所产生的子核的壳校正比 ^{204}Pb 的要大,这使前者能蒸发更多的中子. 同位旋效应指出: 丰中子核 ^{212}Pb 比缺中子核 ^{204}Pb 发射了更多的中子. 在本工作中要讨论的是,如果考虑了壳在这两个核在衰变过

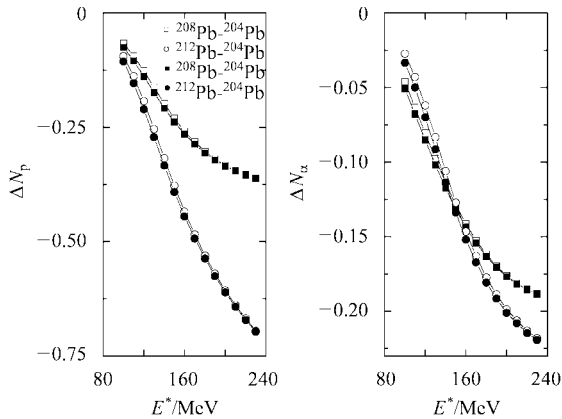


图 1 系统 ^{212}Pb 和 ^{204}Pb 以及 ^{208}Pb 和 ^{204}Pb 在角动量 $L = 55\hbar$ 和粘滞系数 $\beta = 5 \times 10^{21} \text{ s}^{-1}$ 时裂变前蒸发的质子 (ΔN_p) 和 α 粒子 (ΔN_α) 的多重性的差在有壳效应的情况下随激发能的变化

实心和空心符号分别表示有壳效应和无壳效应的情况。

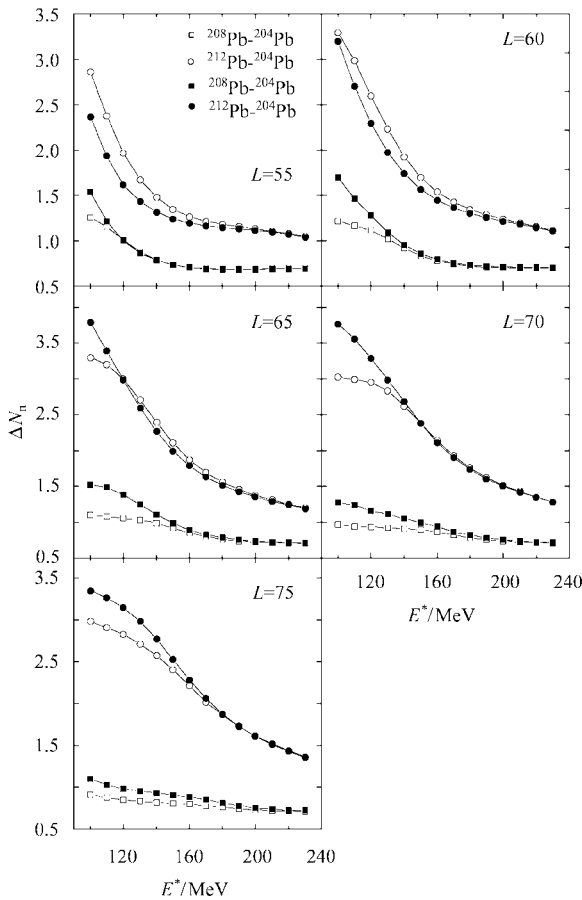


图 2 同图 1, 但是在 5 个角动量 $L = 55, 60, 65, 70, 75\hbar$ 对中子蒸发 (ΔN_n) 的情形 (图中符号说明同图 1)

程中的影响, 哪个核发射的中子会受到更大的影响以及这对中子发射的同位旋规律有何影响. 虽然 ^{212}Pb 和 ^{204}Pb 具有相当的壳校正, 但当它们通过蒸发轻粒子退激后, 所产生子核的壳校正大小将会有一个明显的差异. 因为粒子多重性来自于衰变链中所有核的贡献 (见方程(3)), 因此壳可能会影响这两个 Pb 系统蒸发的中子多重性. 由图 2 可以看出 ^{212}Pb 和 ^{204}Pb 蒸发中子的情况与角动量有关. 在 $L = 55\hbar$ 时, 同无壳校正的情况相比, 有壳校正的 $\Delta N_n^{212\text{Pb}(^{204}\text{Pb})}$ 要小. 这说明考虑了壳效应以后, ^{212}Pb 和 ^{204}Pb 发射中子的差别变小了. 换句话说, 同位旋对系统 ^{212}Pb 和 ^{204}Pb 蒸发中子的影响与这两个系统在衰变过程中产生的所有子核的壳结构有关. 其原因是: 对这两个 Pb 系统, 由于高的同位旋, 带电粒子发射被抑制, 因此除同位旋效应外, 裂变是影响这两个 Pb 蒸发中子差异的主要因素. 因为裂变位垒在很大程度上决定了裂变几率的大小, 在本文中, 它由液滴部分和壳校正组成. 虽然 ^{212}Pb 和 ^{204}Pb 具有类似的壳校正, 但前者有一个更大的液滴位垒, 因此壳校正 ^{212}Pb 的位垒中的比重要小于 ^{204}Pb , 这意味着壳校正对 ^{212}Pb 裂变几率的影响要小于 ^{204}Pb , 相应地它对 ^{212}Pb 发射中子的影响也要小于 ^{204}Pb . 对于一个 $60\hbar$ 的角动量, 有无壳校正时的 ΔN_n 的差异小于 $L = 55\hbar$ 的值, 表明同 ^{204}Pb 相比, 壳对 ^{212}Pb 影响的增加要快一些. 例如, 在激发能 $E^* = 100\text{MeV}$ 时, 不包括和包括壳校正的 $\Delta N_n^{212\text{Pb}(^{204}\text{Pb})}$ 差从 $L = 55\hbar$ 时的 0.508 减少到 $L = 60\hbar$ 时的 0.10. 特别是当 L 上升到 $65\hbar$ 时, 一些在低激发能 ($E^* < 120\text{MeV}$) 处的实心点开始超过了空心点. 这说明壳对 ^{212}Pb 的影响要大于 ^{204}Pb . 原因来自两个方面: 一个是角动量效应, 随着 L 的增加, 液滴位垒减少; 此外, 转动动能带走了一部分激发能, 这降低了核温度. 这两个因素一致地增加了壳校正位垒在总的位垒中的比重. 另一个原因是在这两个 Pb 系统衰变的过程中, 一般来讲, ^{212}Pb 衰变链中的核壳校正的大小要大于 ^{204}Pb 衰变链中的核壳校正. 这是因为在前者的衰变链中产生的核都在具有最大壳校正的核 ^{208}Pb 的附近, 而那些来自 ^{204}Pb 衰变链中的核则远离 ^{208}Pb 核. 结果表明, 除同位旋效应外, 壳效应使 ^{212}Pb 比 ^{204}Pb 蒸发了更多的中子. 这意味着由于壳的影响, ^{212}Pb 和 ^{204}Pb 发射中子数目的差异将会变大. 例如在 $E^* = 100\text{MeV}$, 当 L 从 $65\hbar$ 变到 $70\hbar$ 时, 这个差异从 0.490 增加到 0.805. 然而, 高的 L 并不意味着更强的壳效应. 因

为在 100MeV 的激发能时, $L = 70\hbar$ 时的壳效应带来的这两个 Pb 系统蒸发中子的差异超过了 $L = 75\hbar$ 时的值. 虽然增大 L 会进一步降低核温度, 因此会有利于增加壳对中子发射的影响. 但是考虑到粒子发射对角动量有很强的依赖性, 也就是说, 粒子多重性会随着角动量而迅速减少, 尤其是当 L 特别大的时候^[15]. 这归因于角动量降低了裂变位垒, 从而增加了裂变几率的缘故. 前面已说过, 一个小的中子多重性显著减弱了它的发射对壳效应的敏感性. 计算指出当 L 从 $70\hbar$ 上升到 $75\hbar$ 时, 后面一个原因起了主导作用.

从图 2 可以观察到在高的激发能情况下, 实心圆和空心圆之间的差异变小. 取 $L = 70\hbar$ 的情况为例. 当 E^* 从 100 增加到 120MeV 时, 差异相应的从 0.805 降低到 0.335. 这是由于壳效应的温度阻尼引起的. 尤其是当 E^* 超过了某一个值后, 例如对当前的 L , 它是 150MeV, 差异接近零, 暗示壳效应的消失. 这个结果指出壳对粒子发射的同位旋效应的影响与裂变系统的激发能有关.

展示在图 3 中的是关于 3 个 Sn 同位素的情况. 一些类似于 Pb 同位素链的特征被发现了. ^{132}Sn 和 ^{128}Sn 衰变链上子核壳校正的差别导致实心方块在图示的 3 个角动量都始终大于空心方块. 壳对 ^{136}Sn 和 ^{128}Sn 发射中子的影响与它对 ^{212}Pb 和 ^{204}Pb 类似. 图 3 比较了在有壳效应时, $\Delta N_n^{^{136}\text{Sn}(^{128}\text{Sn})}$ 随角动量的变化. 具体来说, 在 $L = 80\hbar$ 时, 无壳效应的 $\Delta N_n^{^{136}\text{Sn}(^{128}\text{Sn})}$ 要大一些. 在 $L = 85\hbar$ 和一个低的 140MeV 的激发能时, 相对于 ^{128}Sn , 壳效应使 ^{136}Sn 发射了更多的中子, 这说明壳增强了同位旋对粒子发射的影响. 同低 L 的情况相比, 一个 $90\hbar$ 的角动量因带走更多的激发能而使温度进一步被降低, 同时也大大地降低了总裂变位垒中的液滴部分. 因此可以预计壳对粒子发射的影响将会增加. 为了对此有一个定量的认识, 我们用 $L = 90\hbar$ 的结果来说明. 在 $E^* = 140\text{MeV}$ 时, 壳效应使 ^{136}Sn 与 ^{128}Sn 发射的中子多重性的差异上升了 1.33, 这是一个相当大的值而且没有包括同位旋效应. 因此, 这里的计算也建议壳影响了中子发射对系统同位旋的依赖性.

图 3 表明当 E^* 从 140MeV 增加到 160MeV 时, 因壳效应而增加的中子多重性从 1.330 下降到 0.665. 当它达到 200MeV 时, 增量仅有 0.126. 如果 E^* 超过了 210MeV, 那么有壳效应时的 $\Delta N_n^{^{136}\text{Sn}(^{128}\text{Sn})}$ 接近无壳效应时的 $\Delta N_n^{^{136}\text{Sn}(^{128}\text{Sn})}$. 原因是在这个能

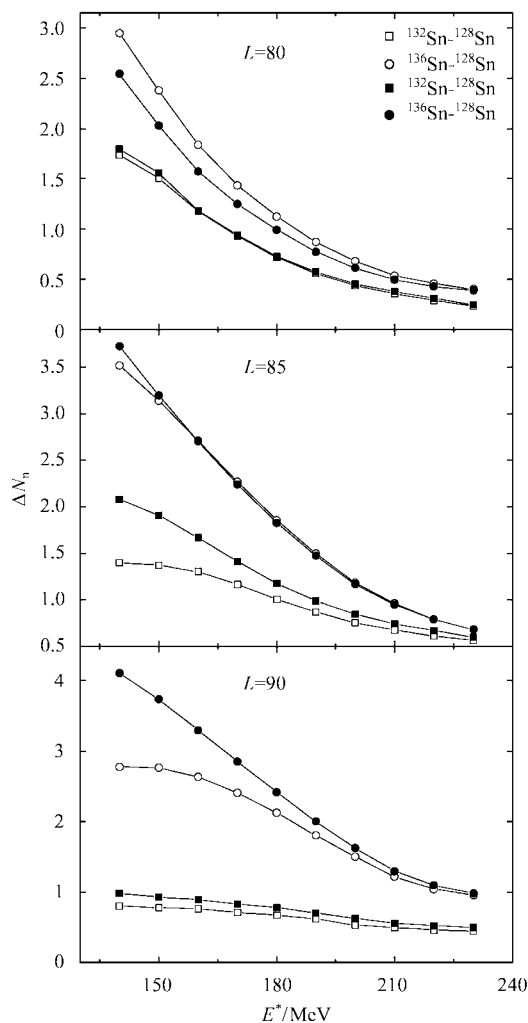


图 3 系统 ^{136}Sn 和 ^{128}Sn 以及 ^{132}Sn 和 ^{128}Sn 在 $L = 80, 85, 90\hbar$ 和 $\beta = 5 \times 10^{21} \text{s}^{-1}$ 时裂变前蒸发的中子 (ΔN_n) 的多重性的差在有壳效应的情况下随激发能的变化. 实心 and 空心符号分别表示有壳效应和无壳效应的情况.

量, ^{136}Sn 与 ^{128}Sn 核中的壳效应消失了. 这揭示了壳影响粒子发射的同位旋依赖性的大小与系统的激发能有关, 并且大的激发能会减少壳的影响.

4 总结

总之, 用 Smoluchowski 方程研究了壳对轻的 ^{128}Sn , ^{132}Sn , ^{136}Sn 和重的 ^{204}Pb , ^{208}Pb , ^{212}Pb 核在裂变过程中蒸发的轻粒子多重性的影响. 计算表明这个效应是存在的, 并且它受到系统自旋和激发能很大的影响. 我们发现角动量在壳影响粒子发射的同位旋依赖上起到了很重要的作用, 而高激发能弱化了这样一个壳效应.

参考文献 (References)

- 1 LI B A. *Int. J. Mod. Phys.*, 1998, **E7**:147
- 2 LI B A. *Phys. Rev.*, 2004, **C69**:034614; **C69**:011603(R)
- 3 Friedman F A. *Phys. Rev.*, 2004, **C69**:031601
- 4 Moretto M et al. *Phys. Rev.*, 2004, **C69**:044604
- 5 Rizzo J et al. *Nucl. Phys.*, 2004, **A732**:202
- 6 SHEN W Q et al. *Nucl. Phys.*, 1989, **A491**:130
- 7 XIAO Z C et al. *Chin. Phys. Lett.*, 2001, **18**:1037
- 8 XU H S et al. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **85**:716
- 9 LIU J Y et al. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, **86**:975
- 10 CHEN L W et al. *Phys. Rev.*, 2004, **C69**:054606; 2003, **C68**:014605
- 11 Veselesky V et al. *Phys. Lett.*, 2001, **B497**:1
- 12 MA Y C et al. *Phys. Rev.*, 1999, **C60**:024607
- 13 YE W. *High Energy Phys. and Nucl. Phys.*, 2004, **28**(1):73 (in Chinese)
(叶巍. 高能物理与核物理, 2004, **28**(1):73)
- 14 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)
- 15 LU Z D et al. *Z. Phys.*, 1986, **A323**:477; *Phys. Rev.*, 1990, **C42**:707; YE W et al. *Z. Phys.*, 1997, **A359**:385; *Prog. Theor. Phys.*, 2003, **109**:933
- 16 Delagrange H et al. *Z. Phys.*, 1990, **A323**:437
- 17 Vaz L C, Alexander J M. *Phys. Rep.*, 1983, **87**:1
- 18 Dortvrvy I et al. *Phys. Rev.*, 1959, **116**:683
- 19 Sierk A. *Phys. Rev.*, 1986, **C33**:2039
- 20 Myers W D, Swiatecki W J. IBL Preprint, 1994, IBL-36803; *Nucl. Phys.*, 1996, **A601**:141
- 21 Ignatyuk A V et al. *Sov. Nucl. Phys.*, 1975, **21**:255
- 22 Arimoto Y et al. *Phys. Rev.*, 1999, **C59**:796; 1997, **C55**:1011(R)
- 23 YE W. *High Energy Phys. and Nucl. Phys.*, 2004, **28**(2):181 (in Chinese)
(叶巍. 高能物理与核物理, 2004, **28**(2):181)

Dependence of Isospin Effects of Particle Evaporation on the Nuclear Shell Structure *

YE Wei¹⁾

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

Abstract The shell effects on the particle evaporation for those nuclei near magic number, namely, ^{204}Pb , ^{208}Pb and ^{212}Pb as well as ^{128}Sn , ^{132}Sn and ^{136}Sn , are investigated via a diffusion model. Calculations show that shell has an effect on the isospin dependence of particle emission, and that the magnitude of this shell effect is related to the spin and excitation energy of compound systems. It is found that angular momentum plays a significant role in the shell effects on the isospin-dependent particle emission while high excitation energy weakens such shell effects.

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

Received 22 June 2004

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

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