

# 形变对断前粒子发射同位旋效应的影响\*

毛英臣<sup>1,1)</sup> 叶巍<sup>2</sup> 任中洲<sup>1,3</sup>

1 (南京大学物理系 南京 210008)

2 (东南大学物理系 南京 210096)

3 (兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心 兰州 730000)

**摘要** 用动力学与统计相结合的模型和统计模型分别研究了形变对重同量异位素  $^{200}\text{Ag}$ ,  $^{200}\text{Tl}$ ,  $^{200}\text{Bi}$  和轻同量异位素  $^{110}\text{Pd}$ ,  $^{110}\text{In}$ ,  $^{110}\text{Te}$  断前粒子发射的影响. 计算表明形变的影响是存在的, 但形变却并没有改变中子和带电粒子发射对系统同位旋的依赖关系. 对可能的原因也进行了讨论.

**关键词** 同位旋效应 形变 分离能 断前粒子多重性 核耗散

## 1 引言

热核形成和衰变过程中的同位旋效应是当前核物理中的热点问题之一<sup>[1-10]</sup>. 裂变过程中的同位旋效应最近也引起了相当多的注意<sup>[11-14]</sup>. 例如对裂变碎片发射的同位旋标度行为的研究<sup>[13]</sup>. 文献[14]考察了同位旋对断前粒子发射的影响, 发现随着系统同位旋的降低, 中子发射降低, 而带电粒子发射增强, 这影响了不同轻粒子对核耗散的敏感性. 原因是低同位旋导致了系统断前发射中子的减少, 从而相应地降低了它对核耗散强度的敏感性.

裂变作为一种大尺度的集体运动, 形变对粒子发射的影响是显著的<sup>[15, 16]</sup>. 它增强了中子发射, 但抑制了轻带电粒子的发射<sup>[15]</sup>, 因此它可能会对不同轻粒子发射对裂变系统同位旋的依赖关系产生影响. 为了更细致地考察形变在裂变过程中对断前粒子发射的影响, 本文选择了2组系统, 即质量数  $A = 200$  的3个重同量异位素:  $^{200}\text{Ag}$ ,  $^{200}\text{Tl}$  和  $^{200}\text{Bi}$ , 以及  $A = 110$  的3个轻同量异位素:  $^{110}\text{Pd}$ ,  $^{110}\text{In}$  和  $^{110}\text{Te}$ , 分别对这两种体系进行了计算和讨论.

## 2 计算结果和讨论

### 2.1 CDSM对重系统的计算

本文采用动力学与统计相结合的模型(CDSM)程序 DESCEND 来计算复合核衰变过程中粒子的发射, 详细介绍请参考文献[17]. 在 CDSM 中只考虑了对称裂变的情况. 在裂变流达到准稳态几率之前, 系统的对称裂变由一维强阻尼的 Langevin 方程来描述,

$$\frac{dq}{dt} = -\frac{1}{M\beta} \frac{\partial S(q)}{\partial q} + \sqrt{\frac{T}{M\beta}} \Gamma(t), \quad (1)$$

这里, 形变坐标  $q = d/(2R_0)$ ,  $d$  是未来两裂变碎片的质心距离,  $R_0$  是复合核半径.  $M$  是惯量参数,  $\beta$  是约化摩擦系数,  $T$  是核温度.  $\Gamma(t)$  是随机力, 符合 Gauss 分布

$$\langle \Gamma(t) \rangle = 0, \langle \Gamma(t)\Gamma(t') \rangle = 2\delta_\varepsilon(t-t').$$

Langevin 方程的驱动力由熵  $S(q)$  来提供,

$$S(q) = 2\sqrt{a(q)[E_{\text{tot}}^* - V(q)]}, \quad (2)$$

其中  $a(q)$  是形变相关的能级密度参数. 系统的初始总激发能  $E_{\text{tot}}^* = E_{\text{beam}}A_T/(A_T + A_P) + Q$ ,  $A_P$ ,  $A_T$  和  $Q$  分别是弹核、靶核以及反应  $Q$  值. 而  $V(q)$  由液滴模型的结合能公式在  $\{c, h, \alpha\}$  参数坐标体系下的表述来确定<sup>[17, 18]</sup>:

$$V(A, Z, L, q) = a_2 \left[ 1 - \kappa \left( \frac{N-Z}{A} \right)^2 \right] A^{2/3} [B_s(q) - 1] + c_3 \frac{Z^2}{A^{1/3}} [B_C(q) - 1] + c_r L^2 A^{-5/3} B_r(q), \quad (3)$$

2005 - 01 - 29 收稿, 2005 - 12 - 12 收修改稿

\* 国家杰出青年基金(10125521), 国家自然科学基金(10535010, 10405007), 教育部博士点基金(20010284036), 国家重点基础研究发展规划项目(G2000077400), 中国科学院创新工程重点项目(KJ9X2-SW-N02)和东南大学优秀青年教师科研资助

1) E-mail: maoyingchen@sina.com

其中  $B_s(q)$ ,  $B_C(q)$  和  $B_r(q)$  分别是形变相关的相对表面能、库仑能和转动能.  $a_2$ ,  $c_3$ ,  $c_r$  和  $\kappa$  是与形变坐标无关的参数.

当裂变流达到准稳态后, 复合核的衰变由统计模型来计算. 这一衰变过程中轻粒子的发射宽度由 Blann 公式计算<sup>[17]</sup>, 而裂变宽度由下式给出:

$$\Gamma_f = 2\hbar \left( \frac{T_{gs}}{\beta_{gs}} \right) \frac{\sqrt{|S''_{gs}| |S''_{sd}|}}{2\pi M} \exp[S(q_{sd}) - S(q_{gs})] \times \left\{ 1 + \operatorname{erf} \left[ (q_{sc} - q_{sd}) \sqrt{S''_{sd}/2} \right] \right\}^{-1}, \quad (4)$$

其中 gs, sd 和 sc 分别标注系统的基态、鞍点和断点. 对其他相关参数的选取参见综述性文献[17].

在液滴模型中, 粒子分离能作为形变的函数可以写成

$$B_{\text{part}} = M_{\text{part}} + M_d^s + D_d - M_{\text{pare}}^s - D_{\text{pare}},$$

这里,  $M_{\text{part}}$  是被发射粒子的质量,  $M_d^s$  和  $M_{\text{pare}}^s$  分别是球形子核和母核的质量.  $D_d$  和  $D_{\text{pare}}$  是子核和母核的形变能, 它们是核形状的函数. 该表达式用在了当前的计算中.

在对 3 个  $A = 200$  的同量异位素系统  $^{200}\text{Ag}$ ,  $^{200}\text{Tl}$  和  $^{200}\text{Bi}$  的计算中, 本文将临界角动量  $l_c$  和激发能分别取为  $80\hbar$  和  $120\text{MeV}$ .

为了方便讨论形变对断前粒子发射同位旋效应的影响, 我们定义了两相近同位旋参数发射源的断前粒子多重性间的差  $\Delta N_i(\text{Ag}-\text{Tl}) = N_i(\text{Ag}) - N_i(\text{Tl})$  以及  $\Delta N_i(\text{Tl}-\text{Bi}) = N_i(\text{Tl}) - N_i(\text{Bi})$  作为讨论的对象, 这里  $i = n, p$  和  $\alpha$ , 其中  $N_i(\text{Ag})$ ,  $N_i(\text{Tl})$  和  $N_i(\text{Bi})$  分别代表复合核 Ag, Tl 以及 Bi 发射相应断前粒子的多重性.

图 1 展示了 CDSM 的计算结果. 可以发现形变对轻粒子多重性有明显影响. 考虑形变效应后的  $\Delta N_n(\text{Ag}-\text{Tl})$  和  $\Delta N_n(\text{Tl}-\text{Bi})$  要低于没有考虑形变时的情况. 这说明: (1) 形变对断前中子发射的同位旋效应影响较弱; (2) 形变对 Ag 发射中子的影响最大, 对 Tl 的影响次之, 而 Bi 受到的影响最小. 这从另一方面也表明形变增强了断前中子发射的同位旋效应. 此外, 图 1 表明  $\Delta N_n(\text{Tl}-\text{Bi})$  的值要大于  $\Delta N_n(\text{Ag}-\text{Tl})$  的值, 这说明高同位旋的两同量异位素间中子多重性的差要小于低同位旋的两同量异位素间多重性的差. 由  $\Delta N_{p,\alpha}(\text{Ag}-\text{Tl})$  和  $\Delta N_{p,\alpha}(\text{Tl}-\text{Bi})$  随核耗散强度的变化情况, 能得出形变对带电粒子发射同位旋效应的影响与断前中子情况相类似的结论. 对于这三种轻粒子的发射, 我们注意到高同位旋的两同量异位素间的粒子多重性差值在核耗散强度达到  $10\text{zs}^{-1}$  后出现了

饱和现象. 这说明随着核耗散强度的增加, 较高同位旋的两同量异位素因形变而产生的粒子多重性的改变逐渐趋于同步, 该现象对质子尤为明显. 而较低同位旋的两同量异位素间的粒子多重性差值却随着核耗散强度的增加而变大, 这说明低同位旋的两同量异位素间的多重性差值对核耗散的敏感性更强.

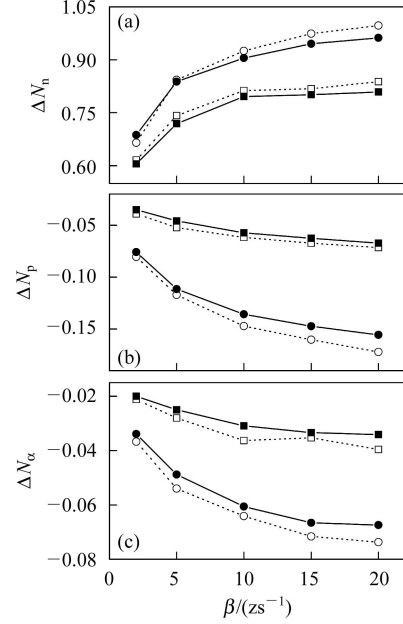


图 1 轻粒子多重性的差值随核耗散强度的变化  $\Delta N_i(\text{Ag}-\text{Tl})$  用  $\square$  和  $\blacksquare$  表示;  $\Delta N_i(\text{Tl}-\text{Bi})$  用  $\circ$  和  $\bullet$  表示. 其中  $1\text{zs} = 1 \times 10^{-21}\text{s}$ . 实心和空心符号分别对应考虑了形变和没考虑形变的情况.

## 2.2 统计模型对轻系统的计算

由于目前 CDSM 不能处理裂变参数小于 0.6 的轻系统衰变和不对称裂变过程<sup>[17]</sup>, 为了考察前面的结论与系统的尺度和裂变过程中碎片质量不对称性之间可能存在的关系, 下面又用考虑了耗散效应的统计模型程序 GEMINI 来对  $A = 110$  的轻系统进行计算.

由于该模型在文献[19, 20]中已有非常详细的介绍, 因此这里仅给出计算中用到的主要公式. 其中轻粒子的衰变宽度和裂变宽度分别用(5)式和(6)式来计算<sup>[20]</sup>:

$$\Gamma_{J_2}(Z_1, A_1, Z_2, A_2) = \frac{(2J_1 + 1)}{2\pi\rho_0} \times \sum_{l=|J_0-J_2|}^{J_0+J_2} \int_0^{E^* - B - E_{\text{rot}}(J_2)} T_1(\varepsilon) \rho_2(U_2, J_2) d\varepsilon, \quad (5)$$

$$\Gamma_f^{\text{BW}} = \frac{1}{2\pi\rho_0(E)} \int_0^{E-E_f} \rho_0(E - E_f - \varepsilon) d\varepsilon, \quad (6)$$

这里  $Z$ ,  $A$ ,  $J$  分别表示核的电荷、质量、自旋. 下标 0, 1, 2 分别对应母核、被发射的轻粒子以及子核.

$l, \varepsilon, B$  和  $T_1(\varepsilon)$  分别是被发射粒子的轨道角动量、动能、结合能和透射系数,  $\rho_0$  和  $\rho_2$  分别是母核和子核的能级密度,  $E^*$  和  $U_2$  分别是它们的激发能.  $E_{\text{rot}}(J_2)$  是子核的转动能.  $E_f$  是裂变位垒, 它随系统  $N/Z$  的变化是用 Sierk 的转动有限程模型来计算的<sup>[21]</sup>.

在这一部分所讨论的统计模型中, 计算所用到的裂变宽度公式为<sup>[22]</sup>

$$\Gamma_f(t) = \begin{cases} 0, & t < t_{\text{delay}}, \\ \Gamma_f^{\text{BW}}, & t \geq t_{\text{delay}}, \end{cases} \quad (7)$$

需要特别指出的是, 不同粒子(比如中子, 质子等)发射之间的竞争模式没有因裂变延迟的引入而改变, 它们的发射几率仍然取决于各自衰变宽度的相对大小.

在液滴模型中, 原子核的结合能中只有表面能和库仑能这两项是核形变的函数, 而对于轻系统, 四极形变是主要的, 因此其形变能可以写为

$$E_{\text{def}} = \frac{5}{4\pi} \beta_{\text{def}}^2 \left[ \frac{2}{5} E_C^{(0)} - \frac{1}{5} E_s^{(0)} \right], \quad (8)$$

这里,  $E_C^{(0)}$  和  $E_s^{(0)}$  分别是球形核的库仑能和表面能,  $\beta_{\text{def}}$  是形变参数, 它可以用半长轴、短轴分别为  $a$  和  $b$  的椭圆形的表达式来计算. 半长轴  $a$  可以表示成

$$a = R_0 \left( 1 + \sqrt{\frac{5}{4\pi}} \beta_{\text{def}} \right).$$

这里  $R_0$  是与椭球形核具有相同体积的球形核半径.

图2展示了  $^{110}\text{Pd}$ ,  $^{110}\text{In}$  和  $^{110}\text{Te}$  的中子、质子和  $\alpha$  粒子分离能相对于球形核时的改变随  $Z_{\text{axis}}$  ( $Z_{\text{axis}} = a/R_0$ ) 的变化曲线. 可以看出, 形变对不同粒子分离能的改变的影响不同. 一般趋势是形变降低(增加)了中子(质子)的分离能的改变. 与对3个核的中子、质子分离能的改变的影响不同, 形变降低了 Pd 的  $\alpha$  粒子分离能的改变, 这有利于 Pd 发射  $\alpha$  粒子. 此外, 对不同同位旋的系统, 粒子分离能的改变也有很大的差异. 具体地说, 中子分离能的改变随着同位旋的减小而增大, 而质子与  $\alpha$  粒子(除 Pd)情形恰好相反; 在相同的形变处, Te 核粒子分离能的改变最大, In 核次之, 而 Pd 核最小.

在具体计算中取  $Z_{\text{axis}}=1.5$ . 实验指出对于  $A \approx 110$  大小的核, 在该形变处, 质子和  $\alpha$  粒子的发射位垒大约降低 1 个 MeV<sup>[23]</sup>. 这个值用在了当前的计算中. 其他的主要输入量是: 激发能为 180 MeV, 最大熔合角动量  $L = 80\hbar$ , 能级密度参数  $a = A/10$  以及它在鞍点与球形基态处的比值  $a_f/a_v = 1$ . 这些数值都是一些标准的输入<sup>[24]</sup>.

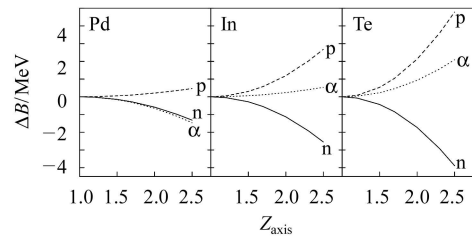


图2  $^{110}\text{Pd}$ ,  $^{110}\text{In}$  和  $^{110}\text{Te}$  蒸发的中子、质子和  $\alpha$  粒子的分离能相对于球形核时的变化作为形变的函数. 实线, 虚线和点线分别对应中子、质子和  $\alpha$  粒子的情况.

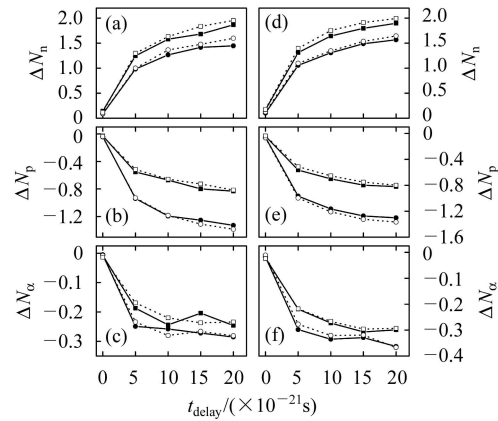


图3 中子、质子和  $\alpha$  粒子多重性的差值随裂变延迟时间的变化.  $\Delta N_i(\text{Pd-In})$  用  $\square$  和  $\blacksquare$  表示;  $\Delta N_i(\text{In-Te})$  用  $\circ$  和  $\bullet$  表示. 实心和空心符号分别对应考虑了形变和没考虑形变的情况. (a), (b) 和 (c) 表示对称裂变 ( $40 < A < 60$ ) 的情况; (d), (e) 和 (f) 是非对称裂变 ( $20 < A < 40$ ) 的情况.

图3展示了 Pd, In 和 Te 系统发射轻粒子的情形. 当裂变延迟时间  $t_{\text{delay}} = 0$  时, 实心符号和空心符号几乎重合. 这说明在没有考虑核耗散情形下, 形变没有对同位旋不同的系统发射的轻粒子产生显著影响. 然而随着裂变延迟时间的增加, 考虑形变效应后的  $\Delta N_n(\text{Pd-In})$  和  $\Delta N_n(\text{In-Te})$  值都小于没有考虑形变时的值, 这与图1中重系统发射中子的情况类似. 这表明: (1) 形变对断前中子发射的同位旋效应影响较弱; (2) 形变对 Te 发射中子的影响最大, 对 In 的影响次之, 而 Pd 受到的影响最小. 这与在相同的形变处, Te 中子分离能的改变最大, In 次之, 而 Pd 最小的现象相符合. 此外, 从图3可以看出  $\Delta N_n(\text{Pd-In})$  要高于  $\Delta N_n(\text{In-Te})$ , 这说明了在轻质量区较高同位旋的两同量异位素间中子多重性的差要大于较低同位旋的两同量异位素间多重性的差, 这一现象与重质量区的情况不同.

在不同的延迟时间处, 实心 and 空心符号之间的距离有些变化, 这是因为在复合核衰变过程中, 裂变是同粒子发射相竞争的, 它的参与会降低所有粒子的发射几率. 此外还由于在相同的延迟时间内存在中子发射同质子、 $\alpha$  粒子发射相竞争的情况. 裂变延迟时间的增加, 即核耗散的增强意味着裂变被强烈地阻尼了, 此时裂变不能有效地与粒子发射相竞争, 这会增加所有轻粒子的发射几率, 并且加大粒子发射之间的相互竞争. 大的粒子多重性增加了它们对形变效应的敏感性, 而大的多重性差值反映了形变的作用对延迟时间的敏感性加强.

形变对带电粒子发射的影响也展示在图3中. 与考虑了形变前后  $\Delta N_n(\text{Pd} - \text{In})$  和  $\Delta N_n(\text{In} - \text{Te})$  随裂变延迟时间的单调变化不同,  $\Delta N_{p,\alpha}(\text{Pd} - \text{In})$  及  $\Delta N_{p,\alpha}(\text{In} - \text{Te})$  的变化并不单调. 但形变对质子及  $\alpha$  粒子发射影响的存在可以通过实心符号并不总是与空心符号重合而得到证明. 在不同的  $t_{\text{delay}}$  处,  $\Delta N_{p,\alpha}(\text{Pd} - \text{In})$  (或  $\Delta N_{p,\alpha}(\text{In} - \text{Te})$ ) 的变化则可能是由于中子、质子和  $\alpha$  粒子发射存在竞争的缘故, 即中子的增强(减弱)将会抑制(增加)轻带电粒子的发射.

图3表明在考察的裂变延迟时间内,  $\Delta N_{p,\alpha}(\text{Pd} - \text{In})$  的绝对值总是大于  $\Delta N_{p,\alpha}(\text{In} - \text{Te})$  的, 这说明带电粒子发射对系统的同位旋依赖性并没有因形变的引入而改变.

通过比较图3(a), (b), (c) 和 (d), (e), (f), 可以发现上面的结论并不依赖于目前所讨论的轻系统的裂变碎片质量不对称性.

我们对当前的重系统和轻系统在不同的激发能和临界角动量下也进行了计算, 发现结论是类似的.

### 3 结论

对3个  $A = 200$  的重裂变系统发射轻粒子的动力学计算表明, 形变对裂变前粒子发射的同位旋效应产生了影响, 但它并没有改变中子和带电粒子发射对裂变系统同位旋的依赖关系. 用包括耗散效应的统计模型对3个  $A = 110$  轻系统的计算也得出了同样的结论, 并且该结论并不依赖于目前所研究的轻系统的裂变碎片质量不对称性.

### 参考文献(References)

- LI B A. *Int. J. Mod. Phys.*, 1998, **E7**: 147
- LI B A. *Phys. Rev.*, 2004, **C69**: 034614
- Rizzo J et al. *Nucl. Phys.*, 2004, **A732**: 202
- SHEN W Q et al. *Nucl. Phys.*, 1989, **A491**: 130
- XIAO Z G et al. *Chin. Phys. Lett.*, 2001, **18**: 1037
- HU R J et al. *HEP & NP*, 2003, **27**(11): 990 (in Chinese)  
(胡荣江等. 高能物理与核物理, 2003, **27**(11): 990)
- XU H S et al. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **85**: 716
- LIU J Y et al. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, **86**: 975; *Phys. Rev.*, 2004, **C70**: 034610
- MA Y G et al. *Phys. Rev.*, 2004, **C69**: 064610
- CHEN L W et al. *Phys. Rev.*, 2004, **C69**: 054606
- Friedman W A. *Phys. Rev.*, 2004, **C69**: 031601(R)
- Veselesky M et al. *Phys. Rev.*, 2004, **C69**: 044607
- WANG K et al. *Chin. Phys. Lett.*, 2005, **22**: 53
- YE W. *HEP & NP*, 2004, **28**(1): 73 (in Chinese)  
(叶巍. 高能物理与核物理, 2004, **28**(1): 73)
- YE W. *Commun. Theor. Phys.*, 2003, **40**: 477
- Bhattacharya C et al. *Phys. Rev.*, 2001, **C65**: 014611
- Frobrich P, Gontchar I I. *Phys. Rep.*, 1998, **292**: 131
- Brack M et al. *Rev. Mod. Phys.*, 1972, **44**: 320
- Charity R J. In: *Isospin Physics in Heavy-Ion Collisions at Intermediate Energies*. eds. LI B A and Udo Schroder. New York: Nova Science, 2001. 341
- Charity R J et al. *Nucl. Phys.*, 1988, **A483**: 371; *Phys. Rev.*, 1995, **C51**: 217
- Sierk A J. *Phys. Rev.*, 1986, **C33**: 2039
- Jurado B et al. *Phys. Lett.*, 2003, **B553**: 186
- YE W, SHEN W Q. *HEP & NP*, 2000, **24**(10): 945 (in Chinese)  
(叶巍, 沈文庆. 高能物理与核物理, 2000, **24**(10): 945)
- Yuasa-Nakagawa K et al. *Phys. Rev.*, 1996, **C53**: 997

# Effect of Deformation on Isospin Effect of Pre-scission Particle Emission<sup>\*</sup>

MAO Ying-Chen<sup>1;1)</sup> YE Wei<sup>2</sup> REN Zhong-Zhou<sup>1,3</sup>

1 (Department of Physics, Nanjing University, Nanjing 210008, China)

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

3 (Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy Ion Accelerator of Lanzhou, Lanzhou 730000, China)

**Abstract** The effect of deformation on pre-scission particle emission of three heavy isobaric systems,  $^{200}\text{Ag}$ ,  $^{200}\text{Tl}$ ,  $^{200}\text{Bi}$ , and light isobaric systems,  $^{110}\text{Pd}$ ,  $^{110}\text{In}$ ,  $^{110}\text{Te}$ , are investigated by the combined dynamical statistical model and the statistical models, respectively. The calculated results show that deformation has an effect on the isospin dependence of particle emission, but it does not change the dependence of different particle emission on the isospin of the systems. Possible reasons are discussed.

**Key words** isospin effect, deformation, separation energy, pre-scission particle multiplicity, nuclear dissipation

---

Received 29 January 2005, Revised 12 December 2005

<sup>\*</sup>Supported by National Natural Science Found for Outstanding Young Scientists of China (10125521), National Nature Science of Foundion of China (10535010, 10405007), Fund of the Education Ministry (20010284036), Major State Basic Research Development in China (G2000077400), Chinese Academy of Sciences Knowledge Innovation Project (KJCX2-SW-N02) and Foundation of Teaching & Research of the Best Young Teacher of Southeast University

1) E-mail: maoyingchen@sina.com