

⑥ 224 — 229

裂变延迟与可能发自超重系统的 GDR γ 射线*

王建松 沈文庆 叶 巍 蔡延璞 马余刚 冯 军

方德清 蔡翔舟 苏前敏

(中国科学院上海原子核研究所 上海 201800)

0571.43

摘 要 简要评述了裂变延迟系统学研究, 论述了用巨偶极共振 γ 射线方法研究超重系统存在的可能性及这方面理论和实验的研究.

关键词 裂变延迟 时间标度 轻带电粒子 巨偶极共振
分类号 O571.43

γ 射线

超重系统

1 前言

粘滞性是核物质的一个基本性质, 中、低能核反应中的复合核裂变过程的研究是揭示核物质粘滞性的一个重要途径. 一般认为复合核的裂变是这样一个过程, 即通过核反应形成一个热平衡态的核, 接着向鞍点演化, 最后在断点处发生裂变. 用无阻尼液滴模型计算得到鞍点到断点的时间为 3×10^{-21} s^[1], 这也是无粘滞性核裂变过程的时间标度. 在六七十年代, 人们从测量到的裂变碎片动能发现, 核反应中有相当一部分动能被损失, 因此认为核反应是一种耗散过程. 到了 80 年代, 人们陆续发现, 在温度为 1~2 MeV 的热核裂变过程中, 测量到断点前的中子、轻带电粒子(LCP)、巨偶极共振(GDR) γ 射线的多重性比传统蒸发统计模型的计算结果有明显的增强^[2]. 这一现象的发现使得人们对热核的裂变过程有了一个新的认识, 即认为核物质在温度为 1~2 MeV 的区域内有很大的粘滞性, 从而使热核的裂变过程变慢, 大大增强了中子、LCP、GDR γ 射线在断点前的蒸发. 这一现象通常称之为裂变延迟(强耗散裂变或扩散裂变).

早期的研究主要集中在复合核质量数 $A \approx 150 \sim 250$ 附近^[3], 温度在 1~2 MeV 范围内. 研究表明, 裂变延迟的时间标度为 $10^{-20} \sim 10^{-19}$ s 数量级, 比一般认为的核反应时间慢一个数量级. 最近的研究表明, 在 $A \approx 110$ 附近也存在着裂变延迟现象. 从 10 MeV/u 的 $^{58}\text{Ni} + ^{56}\text{Fe}$ 反应系统中提取的裂变延迟时间为 5×10^{-21} s, 从 10.6 MeV/u 的 $^{84}\text{Kr} + ^{27}\text{Al}$ 反应系统提取的裂变延迟时间是 2×10^{-20} s^[2]. 同时对反应系统的质量不对称性、入射道效应及角动量对裂变延迟的影响等在理论和实验上都作了研究^[4~12].

本文将评述 10.6 MeV/u 的 $^{84}\text{Kr} + ^{27}\text{Al}$ 反应中裂变延迟及其系统学研究情况. 介绍利用裂变延迟使断点前 GDR γ 射线多重性增强这一现象观测从超重复合系统发射 GDR γ 射线的可能性以及用 Vlasov 对超重复合系统 GDR γ 射线的计算结果.

2 10.6 MeV/u $^{84}\text{Kr} + ^{27}\text{Al}$ 反应中的裂变延迟研究

2.1 裂变延迟时间的提取与实验观测到的现象

10.6 MeV/u $^{84}\text{Kr} + ^{27}\text{Al}$ 反应的实验是

收稿日期: 1998-10-7, 收修改稿日期: 1999-04-07.

* 国家自然科学基金(项目号 19675059、19675960、19703012、19725531)、上海市科学技术发展基金(项目号 96XD14011、97QA14038、97XD14020) 和中科院院长基金特别支持项目共同资助.

在 RIKEN 的回旋加速器大散射室 (AS-CHRA) 上完成的, 实验测量了源的速度、碎片的能量分布和角分布^[5]. 分析表明, 在该反应系统中完全熔合是主要的反应机制, 同时还测量了与裂变碎片符合的轻带电粒子能谱^[5,6], 为得到熔合对称裂变事件, 对该能谱增加了碎片质量为 $40 < A < 60$ 且碎片速度为 $3.5 < v_r < 5.5$ cm/s 的限制条件. 用三源模型对该能谱进行拟合, 得到断点前粒子发射的多重性占了总的粒子发射多重性的 80%.

用统计模型拟合断点前粒子发射的多重性, 可以提取裂变延迟的时间标度. Yuasa-Nakagawa 等^[4]用两种统计模型提取裂变延迟时间, 一种是在 GEMINI^[4]模型中引入一段裂变延迟时间, 即在这段时间内裂变宽度为零, 以便拟合断点前粒子发射多重性的增强. 另一种是 EHF_M (Extended Hauser-Feshbach Method)^[5]统计模型, 在该模型中引入了切断能量, 也就是当两裂变碎片的激发能之和大于这一能量时, 裂变相空间关闭, 裂变不与粒子蒸发竞争. 断点前粒子多重性由以下公式得到:

$$\rho_f(E^*)\Gamma_f = \frac{1}{2\pi} \int \sum_{i,j} N_{ij}^f(E) dE,$$

其中 $\rho_f(E^*)$ 为能级密度, $N_{ij}^f(E)$ 为轻带电粒子蒸发的相空间, 定义断点前的时间由复合核自旋 $J=0$ 时的断点前粒子蒸发宽度得到, 即 $\tau_0 = \hbar / \Gamma_0^f$. 用这两种方法从实验数据提取的裂变延迟时间是一致的, 约为 2×10^{-20} s. 这表明主要的两体裂变是一个慢过程.

我们对 10.6 MeV/u $^{84}\text{Kr} + ^{27}\text{Al}$ 反应中与碎片符合的轻粒子发射的方位角分布和方位角关联谱进行了研究^[7]. 从非对称裂变事件的 α - α 粒子关联谱提取复合系统发射粒子的各向异性度为 $\beta = 1.2 \pm 0.3$. Nakagawa 等人用三源模型拟合实验中轻带电粒子的多重性得到 $\beta \approx 1.5$, 两者是一致的.

2.2 动力学模型计算

用一体耗散动力学模型 (HICOL) 研究了

10.6 MeV/u $^{84}\text{Kr} + ^{27}\text{Al}$ 反应^[3]. 计算在不同角动量下复合核形状随时间的演变, 角动量小于 $83 \hbar$ 时发生完全熔合, 提取的裂变延迟时间大于 2×10^{-20} s, 与实验结果^[5,6]一致. 计算表明, 对于 $^{84}\text{Kr} + ^{27}\text{Al}$ 反应系统, 轰击能大于 8 MeV/u 时, 准裂变才会发生.

我们还用推广了的裂变扩散模型 (Smoluchowski 方程) 研究了 10.6 MeV/u $^{84}\text{Kr} + ^{27}\text{Al}$ 反应中的角动量对断点前粒子多重性的影响. 发现断点前粒子多重性和裂变延迟时间随角动量的减小而逐渐增大^[10]. 图 1 给出了断点时间对和平均角动量入射道质量不对称性的依赖性. 从图上可以清楚地看到, 断点时间随入射系统的质量不对称性增大而变长, 随角动量的增大而变短, 不论是扩展了的统计模型、与 HICOL 耦合的扩展

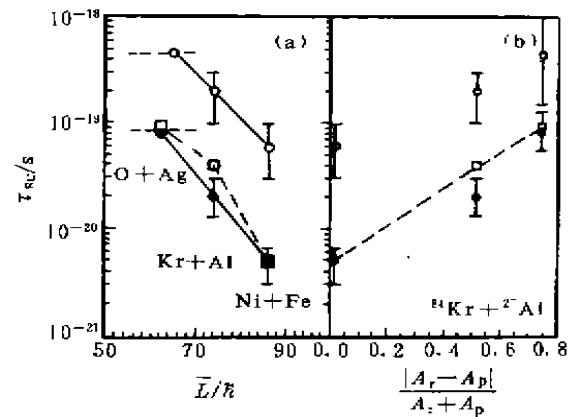


图 1 断点时间对系统对称裂变发生的平均角动量(a)和入射道质量不对称性的依赖性(b)^[11]

●和○分别代表用扩展统计模型和 HICOL 耦合的扩展统计模型从实验中提取的结果^[7, 8, 12]. 水平方向的---是实验点可能的角动量范围. □是本小组的计算结果.

统计模型, 还是裂变扩散模型, 其提取的断点时间随角动量、系统质量不对称性的变化趋势是一样的. 用推广的扩散模型还研究了裂变路径对断点前粒子发射的影响, 发现裂变路径的长短不同可导致鞍点前粒子发射与鞍点到断点前之间的粒子发射之比随裂变系

统质量一定的变化关系^[11,12].

3 裂变延迟的系统学

原子核裂变的研究从 20 世纪 30 年代就已开始. 在 80 年代以前, 原子核的裂变过程可以用标准的统计模型和一体欠阻尼耗散理论很好地描述. 从 80 年代初开始, 人们先后用中子、LCP 和 GDR γ 射线作为时钟, 对裂变的时间标度进行了测量. 从而使人们对裂变的耗散过程提出了新的观点, 认为原子核裂变在一定的激发能(或温度)范围内是一个过阻尼的耗散过程, 或者说裂变有 $10^{-20} \sim 10^{-19}$ s 的延迟时间. 最近十来年的实验研究充分地证明了这一点.

用 GDR 方法研究耗散裂变的能量依赖性表明^[14], 裂变耗散强烈依赖于激发能. 对钚系统, 耗散系数(γ)在很窄的能量范围内从 $\gamma < 0.15$ 变到 $\gamma = 10$. 对此, Thoenesson 等^[4]通过分析已有的实验数据, 提出了一个关于延迟裂变发生的阈值的经验判据: 当核温度与裂变位垒之比 $T_{in}/E_{bar}(t) > 0.26 \pm 0.05$ 时, 裂变过程不再符合标准的统计模型. 在实验中观测到裂变时间标度变长, 裂变为过阻尼耗散过程. 图 2 给出了用不同实验方法得到的温度阈值与复合系统的裂变位垒之比随质量数的变化. 虽然, Vandenbosch 对这一经验判据用 Bohr-Wheeler 理论进行了解释^[15], 但对它的物理机制仍不十分明确. 这一经验判据的适用范围是, 复合核质量数为 150~250. 能否推广, 还需更多的实验验证. 最新的 $A \approx 110$ (10.6 MeV/u $^{84}\text{Kr} + ^{27}\text{Al}$) 的实验数据正好符合这一判据^[14]. 那么从复合核温度阈值直到复合核不再形成, 延迟裂变是否存在呢? 目前还没明确定论. 最近对 35 MeV/u 的 $^{63}\text{Cu} + ^{197}\text{Au}$ 和 40 MeV/u 的 $^{40}\text{Ar} + ^{232}\text{Th}$ 反应的研究表明^[16], 在激发能为约 4 MeV/u 时, 复合系统仍可以形成并有裂变延迟现象.

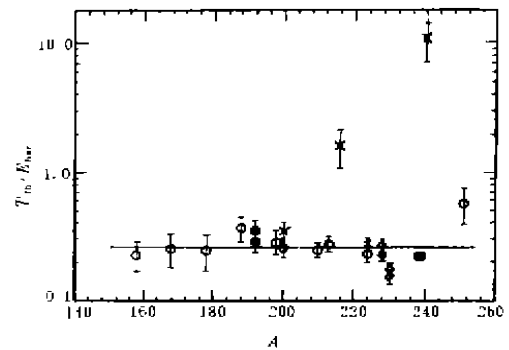


图 2 阈温度与平均裂变位垒之比作为质量数的函数^[14]

○为重离子反应中的中子多重性, □为质子反应的中子多重性, ●为带电粒子方法, △为 γ 射线多重性, ◇为周边碰撞数据.

核反应的入射道和出射道对裂变延迟也有很大的影响. R. Wada 等人对 18.5 MeV/u 的 $^{136}\text{Xe} + ^{48}\text{Ti}$ 反应系统的研究得出裂变延迟时间依赖于两体裂变道的碎片质量不对称性, 对于碎片质量对称道, 延迟时间约为 10^{-20} s; 对于非对称道, 则约为 10^{-21} s. 在 $A \approx 110$ 附近, 已经有 10.6 MeV/u 的 $^{84}\text{Kr} - ^{27}\text{Al}$ 、10 MeV/u 的 $^{58}\text{Ni} + ^{56}\text{Fe}$ 和 $^{16}\text{O} + ^{m}\text{Ag}$ 三组反应系统. 实验观测和不同的统计模型^[5-6]、扩散模型提取的裂变延迟时间表明^[10], 裂变延迟时间随入射道质量的不对称性增加而变长, 随角动量的增加而变短. 入射道对裂变延迟的影响起源于角动量的变化^[10]. 从这两个反应系统中提取的裂变延迟时间与较重系统的裂变延迟时间^[17]基本上在同一数量级. 这说明复合系统的裂变延迟时间与其质量的依赖性很小.

到目前为止, 人们对裂变延迟现象有了一定的了解, 但是还有很多有趣的问题有待进一步研究. 如裂变延迟时间(或者是耗散阻尼)是随温度的升高最后达到饱和, 还是达到一个最大值然后下降; Thoenesson 等人提出的裂变延迟发生阈值的经验公式是否可以推广, 其物理机制是什么等.

4 用GDR 研究超重复合系统的可能性

在理论上,人们早就预言在 $Z \approx 114$ 附近存在一个稳定岛,自从重离子加速器出现以来,人们一直试图通过重离子核反应来合成一些超重核.

用 GDR γ 的发射作为时钟研究裂变的时间标度具有其独特的优点. (1)GDR γ 射线在核反应的早期发射,它的能量基本不受核温度的影响,可以用经验公式很好地描述;(2)GDR γ 射线的宽度系统地依赖于热核的激发能和角动量;(3)GDR γ 射线因形变而产生的劈裂效应已有很好的解释.(4)GDR 的内禀强度 S 与经典求和规则的差别在 10% 以内,不依赖与核温度.自 Thoennessen 等^[2]首次用 GDR 方法研究热核裂变的时间标度以来,GDR 方法已广泛地用于研究热复合核裂变中的动力学过程和物理机制^[13].用统计模型拟合 GDR γ 的能谱可以提取鞍点到断点的时间^[14].

GDR γ 射线一般是在复合系统的早期发射的,对于超重系统,主要的反应机制是在条件鞍点之后形成一个中间态,随后的裂变在时间标度上要比熔合裂变短得多,即所谓的准裂变或快裂变.但在中间态时,复合系统可能会形成一个具有很大形变或奇形变形的单一核,这个单一核可能有时间建立 GDR.由于裂变、准裂变都存在一定时间的延迟($10^{-20} \sim 10^{-19}$ s),而且实验数据显示,复合系统的原子序数在 90 到 105 之间,随原子序数的增加,鞍点前 GDR γ 射线的产额降低,鞍点到断点之间的 GDR γ 射线产额反而增加(参见文献[14]中的图 12),即利于在超重复合系统裂变之前建立 GDR.因此通过观测超重系统发射的 GDR γ 射线研究超重复合系统的性质和衰变机制是有可能的.

5 用Vlasov 方程研究超重系统的GDR

微观的半经典 Vlasov 方法可以很好地

定量描述原子核内的集体运动 GDR,其结果与相对复杂的 RPA(Random-Phase-Approximation)是一致的^[19,20].计算的 GDR 强度、峰值和宽度与实验值相符很好.

我们用这种方法计算了超重系统 Au + Au 和 Xe + U 的 GDR 的强度分布及其随温度的变化关系^[21].图 3 给出了不同温度条件下的 GDR 强度的分布,可以看出 GDR 强度随温度的增高而变小,宽度则随温度的增高而变大.计算中引入了对中子和质子的不同平均场和粒子占有轨道的区分,考虑了粒子

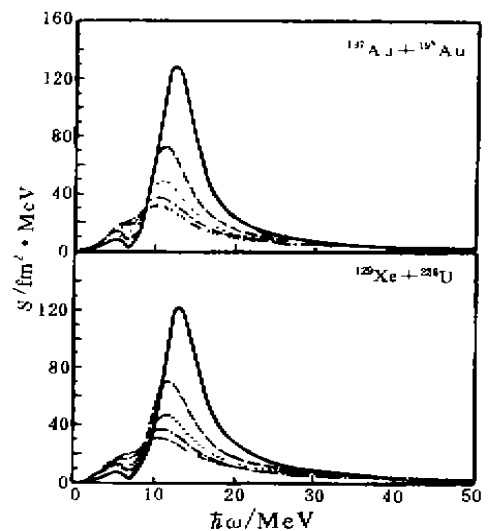


图 3 考虑关联作用的 GDR 强度分布随温度的变化

— $T=1$ MeV, - - $T=2$ MeV,
 ... $T=3$ MeV, - · - $T=4$ MeV,
 --- $T=5$ MeV.

之间的剩余相互作用,同时加入了温度相关的碰撞弛豫项 $\tau(T)$, $\tau(T)$ 是核温度的函数^[19]:

$$\frac{\hbar}{\tau(T)} = \frac{\hbar}{\tau(0)} + \frac{\hbar}{\Delta\tau(T)},$$

其中, $\Delta\tau(T) = 3.45T^{-2} + 0.392T^{-1/2}$, $\tau(0)$ 是 $T=0$ 时的弛豫时间.

因为超重复合系统很可能如前所述,是一个处于中间态的有很大形变的复合系统,

我们简单地假设为扁长形变, 于是 GDR 强度分布的峰就劈裂成了两个, 一个低于原来的峰位, 另一个高于原来的峰位. 图 4 给出了形变参数 δ 分别为 0.2、0.3、0.5 时的 GDR 强度分布.

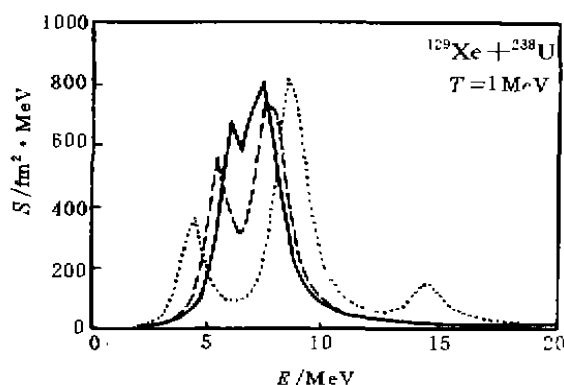


图 4 不同形变值下的 GDR 强度分布
— $\delta=0.2$, --- $\delta=0.3$, ... $\delta=0.5$.

6 结论

通过对 $10.6 \text{ MeV/u } ^{84}\text{Kr} + ^{27}\text{Al}$ 系统的研究可以得出以下结论: (1) 用不同的模型, 包括裂变扩散模型, 对实验中的 LCP 增强效应的拟合得到的裂变延迟时间是一致的, 约

为 $2 \times 10^{-20} \text{ s}$, 表明主要的两体裂变是一个慢过程, 且与 $A \approx 200$ 的重系统的裂变延迟时间在同一数量级, 说明复合系统的裂变延迟时间与其质量的依赖性很小. (2) 从非对称裂变事件的 α - α 粒子关联提取复合系统发射粒子的各向异性度 $\beta = 1.2 \pm 0.3$, 与三源模型拟合所得的 $\beta \approx 1.5$ 是一致的. (3) $A \approx 110$ 复合核裂变的断点时间随入射系统的质量不对称性增大而变长, 随角动量的增大而变短, 可以用裂变路径的长短来解释鞍点前粒子发射与鞍点到断点前之间的粒子发射之比随裂变系统质量的变化关系. (4) 轰击能量为 8 MeV/u 是 $^{84}\text{Kr} + ^{27}\text{Al}$ 反应系统中准裂变道出现的阈值. $A \approx 110$ 反应系统出现延迟裂变的阈值符合 M. Thoennesson 等人对于高的质量范围提出的经验判据.

由于裂变延迟, 鞍点到断点的时间标度在 10^{-20} s 数量级, GDR 有可能在这段时间内建立. 用 GDR γ 射线作为时钟研究核反应的动力学过程取得了很大的成功, 因此 GDR γ 射线方法是研究超重复合核是否形成及其性质的一个很好的手段.

参 考 文 献

- 1 Nix J R. Further Studies in the Liquid-drop Theory of the Nuclear Fission. Nucl Phys. 1969, A130; 241 ~ 292
- 2 Hinde D J, Hilschler D, Rossner H. Fission Timescale of Excited Nuclei. Nucl Phys, 1989, A502; 497c ~ 514c; Lestone J P, Leigh J R, Newton J O *et al.* Fission Time Scale from Pre-scission Charged-particle Multiplicity. Phys Rev Lett, 1991, 67; 1078; Thoennesson M, Chakrabarty D R, Herman M G *et al.* Giant Dipole Resonance in Highly Excited Thorium; Evidence for strong fission hindrance. Phys Rev Lett, 1987, 59; 2 860 ~ 2 863
- 3 Thoennesson M, Bertsch G F. Threshold for Dissipative Fission. Phys Rev Lett, 1993, 71; 4 303 ~ 4 306
- 4 Yuasa-Nakagawa K, Nakagawa T, Furutaka K *et al.* Entrance Channel Effect on the Pre-scission Time of Binary Decay for the Medium Mass Nuclei (mass ~ 110). Phys Lett, 1995, B351; 77 ~ 81
- 5 Futami Y, Yuasa-Nakagawa K, Nakagawa T *et al.* Decay Mechanism of a Highly Excited Nucleus Produced in the Reaction $^{84}\text{Kr} + ^{27}\text{Al}$ at 10.6 MeV/nucleon . Nucl Phys, 1996, A607; 85 ~ 104
- 6 Nakagawa T, Yuasa-Nakagawa K, Furutaka K *et al.* Study of Pre-scission Evaporation for $^{84}\text{Kr} + ^{27}\text{Al}$ at 10.6 MeV/u Using 3π -phoswich Detector System. Nucl Phys, 1995, A583; 149 ~ 152
- 7 叶巍, 沈文庆, 马余刚等. $10.6 \text{ MeV/u } ^{84}\text{Kr} + ^{27}\text{Al}$ 碰撞中粒子发射的方位角分布和方位角关联. 高能物理与核物理, 1997, 21; 1 ~ 7
- 8 Yuasa-Nakagawa K, Kasagi J, Nakagawa T *et al.* Binary Decay Fragment and Pre-scission Charge Multiplicity in $^{84}\text{Kr} + ^{27}\text{Al}$ at 10.6 MeV/nucleon . Phys Rev, 1996,

- C53; 997~1 000
- 9 叶巍, 沈文庆, 马余刚等. 用动力学模型计算 10.6 MeV/u $^{84}\text{Kr}({}^{27}\text{Al}, \text{准裂变})$ 反应的裂变时间. 高能物理与核物理, 1997, 21; 348~355
 - 10 叶巍, 沈文庆, 陆中道等. 10.6 MeV/u $^{84}\text{Kr} + {}^{27}\text{Al}$ 反应中角动量对断点前粒子多重性的影响. 高能物理与核物理, 1998, 22; 265~270; Ye Wei, Shen W Q, Ma Y G *et al.* Angular Momentum Effect in Precission Particle Multiplicities for a Light System by Diffusion Model. Z Phys, 1997, A359; 385
 - 11 叶巍. 轻系统 $A \approx 100$ 的裂变延迟效应. 博士论文, 上海, 1998, 1~100
 - 12 叶巍, 沈文庆, 马余刚等. 裂变路径对断点前粒子发射的影响. 高能物理与核物理, 1998, 22; 1~7
 - 13 Charity R J, McMahan M A, Wozniak G J *et al.* Systematics of Complex Fragment Emission in Niobium-induced Reaction. Nucl Phys, 1988, A483; 371~405
 - 14 Paul P, Thoennessen M. Fission Time Scales from Giant Dipole Resonances. Annu Rev Nucl Part Sci, 1994, 44; 65~108
 - 15 Vandenbosch R. Origin of Empirical Threshold for Dissipative Fission. Phys Rev, 1994, C50; 2 618~2 619
 - 16 Wada R, Tezkratt R, Hagel K *et al.* Excitation Energies and Temperatures of Hot Nuclei Produced in the Reactions of $^{63}\text{Cu} + {}^{197}\text{Au}$ at 35 A MeV. Phys Rev, 1997, C55; 227~242; Utely D, Wada R, Hagel K *et al.* Excitation Energy Deposition in Central Collision of 40 A MeV ^{40}Ar with ${}^{232}\text{Th}$. Phys Rev, 1994, C49; R1 737~1 740
 - 17 Hinde D J, Hilscher D, Rossner H. Neutron Emission as a Probe of Fusion-fission and Quasifission Dynamics. Phys Rev, 1992, C45; 1 229~1 259
 - 18 Gaardhøje J J. Nuclear Structure at High Excitation Energy Studied with Giant Resonances. Annu Rev Nucl Part Sci, 1992, 42; 483~536
 - 19 Brink D M, Dellafiore A, Di Toro M. Solution of the Vlasov Equation for Collective Modes in Nuclei. Nucl Phys, 1986, A456; 205~234
 - 20 Cai Yanhuang, Toro M Di. Semiclassical Description of the Isovector Giant Multipole Resonances. Phys Rev, 1989, C39; 105~113; Zhou B S, Cai Y H, Zhu Z Y. Description of Isovector Giant Dipole Resonances in Relativistic Vlasov Equation at Small Amplitude Limit. Z Phys, 1995, A352; 119~126; Toro M Di, Cai Y H, Phys Rev, 1991, C42; 2 748; Cai Yanhuang, Smerzi A, Toro M Di. Study of a Soft Quadrupole Excitation in the Nucleus ${}^{11}\text{Li}$; A phase space model of neutron halo nuclei. Phys Rev, 1994, C50; 2 809~2 814
 - 21 Cai Y H, Wang J S, Shen W Q *et al.* The Study of Giant Dipole Resonance of Super Heavy Compound System. Chin Phys Lett, 1998, 15; 642~644

Fission Delay and GDR γ -ray of Possible Emission from Super-heavy System

Wang Jiansong Shen Wenqin Ye Wei Cai Yanhuang Ma Yugang
Feng Jun Fang Deqing Cai Xiangzhou Shu Qianmin

(Institute of Nuclear Research, the Chinese Academy of Science, Shanghai 201800)

Abstract The systematics of the fission delay is reviewed. The theory and experiment researches on the formation of the super-heavy compound nucleus by means of Giant Dipole Resonance γ -ray are introduced.

Key words fission delay time scale light charged particle giant dipole resonance

Classifying number O571.43