

复杂粒子发射对热核巨共振的影响*

文万信^{1,2} 靳根明¹

1(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

2(苏州大学核医学院 苏州 215007)

摘要 讨论了引起统计蒸发模型计算结果与高温热核偶极巨共振实验结果之间存在差异的因素, 对比了标准 CASCADE 程序计算结果与加入复杂粒子发射后的计算结果, 计算显示复杂粒子发射对高温热核偶极巨共振的性质有影响。

关键词 巨共振 复杂粒子 热核

1 引言

自从 1947 年发现偶极巨共振(GDR)以来, 随着实验条件的不断改善, 实验从不同方面对 GDR 的性质进行了系统性的研究。1970 年以前主要通过光核实验研究布居于原子核基态的 GDR 性质, 系统性实验表明 GDR 是原子核的普遍性质, 元素周期表上的原子核都有 GDR 激发态。GDR 由共振能量、共振宽度与共振强度 3 个特征物理量表征。基态 GDR 的共振能量是质量数 A 的光滑函数, 强度基本上为 100% TKR (Thomas-Reiche-Kuhn sum rule), 而宽度随质量数变化很大^[1]。20 世纪 70 到 80 年代, 通过复合核反应全面地研究了低温核 ($T < 3\text{MeV}$) GDR 性质, 实验发现 GDR 能量与强度基本与基态核相同, 而宽度随温度迅速增长^[1]。造成 GDR 宽度展宽的因素有两种: 一是碰撞阻尼机制; 二是形状的热涨落^[2]。一些理论认为碰撞阻尼机制造成的共振宽度基本不随核温度变化, 而四极形变与形状热涨落的耦合是导致 GDR 宽度随核温度增加的主要原因^[3]。形变也引起 GDR 能量劈裂, 出现两个成分。1990 年以后则主要研究热核 (3—6MeV) GDR 的性质, 实验证实 GDR 强度仍然与基态核基本相同, 共振能量随温度升高略有下降, 而宽度则经历了低温区的增加后趋于饱和^[4]。理论上也建立了许多模型对高温热核 GDR 实验现象进行解释, 我们曾试图解释巨共振

能量随温度增加略微下降的实验现象, 给出共振能量随温度的变化关系

$$E_D = E_D(0)(1 \times 10^{-4} - 2 \times 10^{-4} T^2)^{5/2}$$

统计蒸发模型经常用于解释巨共振实验结果, 以其为理论基础编写的 CASCADE 计算程序是唯一可以直接与 GDR 衰变 γ 能谱实验数据进行比较的程序, 也由它来提取 GDR 的能量和宽度等特征量^[6]。CASCADE 程序仅考虑 γ, n, p, α 衰变, 激发能较低时 ($T < 3\text{MeV}$) 模型能够很好地解释复合核衰变实验数据包括 GDR 衰变 γ 能谱。随着激发能增加, 模型计算结果逐渐偏离实验数据。27MeV/u $^{36}\text{Ar} + ^{90}\text{Zr}$ 反应热核 GDR 实验是迄今为止实验设备最完备的一个热核 GDR 实验^[7,8]。反应所形成的热核质量数 $A \approx 115$, 激发能高达 350—550MeV。实验所用的 γ 探测器 MEDEA 由 180 个 BaF_2 晶体探测单元组成, 覆盖的立体角达 3.37π , 它是一个理想的高能 γ 探测器。实验测得的 GDR γ 能谱与统计蒸发模型的标准 CASCADE 程序计算结果之间存在明显的差别。如果假定激发能高于 250MeV 时 GDR γ 衰变被抑制并固定 GDR 宽度, 计算结果则可较好地符合实验数据。从理论方面考虑, 激发能 (核温度) 增加后可能会有一些新的影响 GDR 性质的因素出现, 而它们并没有纳入统计蒸发模型与相关的计算程序之中。从实验本身来看, 低温核 GDR 实验的衰变母核基本上都是复合核, 初始的原子序数、质量数和激发能基本

2002-03-08 收稿

国家自然科学基金(19805012)资助

上是惟一的;而热核 GDR 实验则依据线动量转移 (LTM)窗口确定衰变母核(熔合核)的平均质量数与激发能,实际衰变母核的原子序数、质量数及激发能都有一定的分布宽度,实验 γ 能谱是一定 LMT 区间所对应的熔合核衰变 γ 的平均,这也是造成计算结果偏离实验数据的一个可能原因. 另一方面 LMT 选择方法本身也会造成 GDR 宽度展宽,以 $A \approx 110$ 为例,对应于 10% LMT 宽度的质量数分布将导致 GDR 宽度展宽约 0.5 MeV. 在数据分析时可以选取较窄的 LMT 窗口以减小衰变母核 A, Z, E^* 分布宽度,从而改善实验数据的品质,但为了取得同样统计精度就必须增加实验时间或探测器数量.

单从热核衰变机制方面考虑,在低能核反应中复合核的激发能较低,仅通过蒸发 γ, n, p, α 粒子及发生裂变等方式退激发, CASCADE 程序能够很好地解释复合核实验现象,在分析 GDR 实验数据时也相当成功;而中能重离子核反应所形成的热核激发能都很高,退激方式十分复杂,除发射 γ, n, p, α 轻粒子外,还要发射其他复杂粒子,如 Li, Be, B, C 等,甚至发生多重碎裂. 然而 CASCADE 程序并不考虑复杂粒子发射,这也是造成模型与热核 GDR 实验偏离的另一个可能原因. 还有其他的原因,如其他的巨共振模式被激发、同位旋标量巨共振 (ISCQR) 或矢量四极巨共振 (IVGQR) 等. 中能重离子核反应中复杂粒子的发射几率随激发能增加而增加,尽管复杂粒子发射几率远低于轻粒子发射几率,但由于质量数大,单个复杂粒子所带走的核子数与激发能以及角动量都较大,从定性上考虑,复杂粒子发射的影响不可忽略. 本文将在标准 CASCADE 程序基础上简单地加入复杂粒子退激发,讨论复杂粒子发射对高温热核 GDR 性质是否有影响.

2 统计蒸发模型

高温热核通过发射 γ, n, p, α 轻粒子以及复杂粒子,或通过裂变和多重碎裂等方式进行衰变. 在热核 GDR 实验中一般只关联测量余核 j γ 符合事件,裂变与多重碎裂事件被排除在外. 因此在模型中仅需考虑蒸发衰变方式,而不必考虑裂变与多重碎裂退激方式,这样计算过程大为简化. 统计蒸发模型不考虑热核的形成过程,而是假定热核在衰变过程中一直处于热平衡状态,粒子和 γ 衰变几率由 Hausser-Feshbach 公式给出^[6],核从状态 (E_1, J_1, π_1) 通过粒子发射跃迁到状态 (E_2, J_2, π_2) 的衰变宽度为

$$\frac{d\Gamma(E_i)}{dE_i} = \frac{\rho(E_1, J_1, \pi_1)}{\rho(E_2, J_2, \pi_2)} \sum_{s_i} \sum_{|J_2 - s_i|}^{J_2 + s_i} \sum_{L=|J_1 - s_i|} T_L^i(E_i), \quad (1)$$

其中 ρ 为能级密度, E, J, π 为衰变核的激发能、角动量和宇称; s_i 为第 i 种粒子的自旋, $S = J_2 + s_i$ 为道自旋, L 和 $E_i = E_1 - E_2 - B_i$ 为其轨道角动量和动能, B_i 为结合能. $T_L^i(E_i)$ 是第 i 种粒子与子核散射的穿透系数. 粒子发射应遵守宇称守恒原理,但 CASCADE 程序一般不考虑宇称. 同样,统计 γ 衰变宽度为

$$\frac{d\Gamma(\epsilon_\gamma)}{d\epsilon_\gamma} = \frac{\rho(E_1, J_1, \pi_1)}{2\pi\rho(E_2, J_2, \pi_2)} \sum_L \xi_L f_L(\epsilon_\gamma), \quad (2)$$

式中 $\epsilon_\gamma = E_1 - E_2$ 为 γ 能量, ξ_L 为常数,对于 E1, M1 和 E2 跃迁,一般取 $f_L(\epsilon_\gamma) = \epsilon_\gamma^{2L+1}$. GDR 衰变 γ 宽度为

$$\frac{d\Gamma(E_\gamma)}{dE_\gamma} = \frac{\rho(E_1, J_1, \pi_1)}{\rho(E_2, J_2, \pi_2)} \frac{\sigma_{\text{abs}}(E_\gamma)}{3} \frac{E_\gamma^2}{(\pi\hbar c)^2}, \quad (3)$$

其中 $J_2 = J_1 - 1, J_1, J_1 + 1$. $\sigma_{\text{abs}}(E_\gamma)$ 为 Lorentz 型光吸收截面,即

$$\sigma_{\text{abs}}(E_\gamma) = \frac{4\pi e^2 \hbar}{Mc} \frac{NZ}{A} \sum_{j=1}^2 \frac{S_j \Gamma_j E_j^2}{(E_\gamma^2 - E_{0j}^2)^2 + E_j^2 \Gamma_j^2}, \quad (4)$$

E_0, Γ, S 为 GDR 能量、宽度和强度. 若为形变核, Lorentz 吸收截面则有两种不同成分,分别对应于长轴和短轴共振. 若为球形核,则只有一种成分. 能级密度可取为

$$\rho(E, J) = \frac{a^{1/2}(2J+1)}{12\theta^{3/2}(U+T)^2} \exp(2\sqrt{aU}), \quad (5)$$

其中

$$U = E - \Delta - J(J+1)/\theta' = aT^2 - T,$$

$$\theta = 2I_{\text{rgo}}/\hbar^2,$$

$$\theta' = \theta(1 + \delta J^2 + \delta' J^4),$$

这里 Δ 为对能, T 为核温度, I_{rgo} 为转动惯量,能级密度参数 a 可随温度调节,一般 $a = A/8 - A/13$. GDR 实验测量 4—40 MeV 的 γ 能谱,它由 3 种成分组成,即统计衰变 γ 、韧致辐射 γ 及 GDR 衰变 γ . 对于球形核,一般取 $S \approx 1, \Gamma = 4-8 \text{ MeV}, E_0 = 31.2A^{-1/3} + 20.6A^{-1/6} \text{ MeV}$. 具体计算中, Γ 还可以随激发能的消耗而适时改变.

3 计算与讨论

统计蒸发模型形式上已经包含了各种粒子的蒸

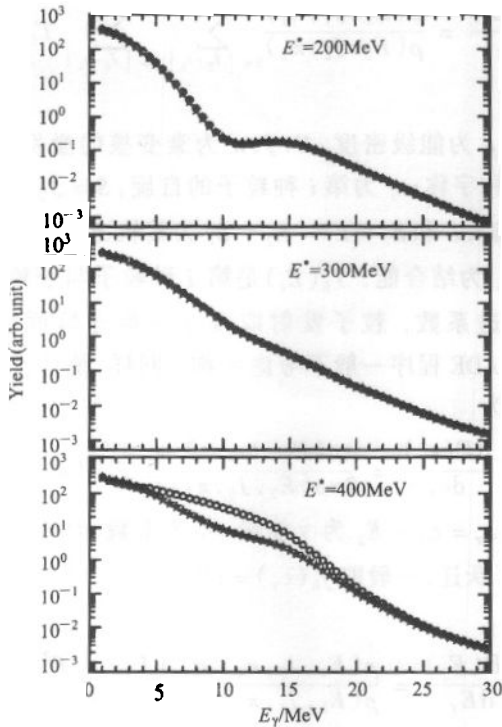


图 1 ^{118}Sn 核 GDR 衰变 γ 标准 CASCADE 程序计算结果 (○) 与加入 ^{12}C 衰变竞争计算结果 (*) 的比较

发,但是具体应用还存在诸多问题. 首先并非所有粒子的核势都有完整的实验数据,另外还有计算方面的困难. 由于 ^{12}C 核势实验数据完整,我们在标准 CASCADE 程序中加入 ^{12}C 衰变竞争,以讨论复杂粒子发射是否对高温热核 GDR 的性质有影响. 计算了 ^{118}Sn 核 GDR 衰变 γ 能谱,对比了标准 CASCADE 程序计算结果与加入了 ^{12}C 衰变竞争的计算结果(如图 1 所示). 激发能取为 200, 300 和 400 MeV, 共振能

量与宽度分别取为 15.5 MeV 与 8.0 MeV, 共振强度为 1. 在激发能较低时,如 200 和 300 MeV, 两者计算结果几乎没有差别; 而当激发能较高时(400 MeV), 两者出现明显的差别. 随着激发能由低到高变化, 复杂粒子的发射几率由很小变得不可忽略, 它们对 GDR 性质的影响也逐渐显现了出来. 尽管这里只考虑 ^{12}C 衰变竞争, 而没有考虑其他复杂粒子的发射, 但计算结果表明复杂粒子发射的确对高温热核 GDR 的性质有影响.

统计蒸发模型的标准 CASCADE 程序未考虑复杂粒子发射的影响, 不能准确反映真实的高温热核的衰变图像. 除了不能很好地符合实验数据外, 还很难保证能够准确地从 γ 能谱提取高温热核 GDR 的特征物理量. 为了消除统计蒸发模型计算结果与高温热核 GDR 实验数据之间的差别, 需要从理论与实验两方面着手. 需要在理论上探讨影响高温热核 GDR 性质的因素及其机制, 还需要修正完善统计蒸发模型计算程序. 由于更重的复杂粒子发射几率很小, 应该考虑在统计蒸发模型的计算程序中加入 C 以下的复杂粒子发射, 使其能够反映高温热核真实的衰变过程. 这样有利于从实验数据中提取准确的 GDR 特征物理量和准确认识高温热核 GDR 的性质. 实验上需要测量高温热核衰变中的余核与 γ 、轻粒子及复杂粒子符合事件, 同时需要将 LMT 窗口限制在最小限度. 新的实验应一方面检验修正后的统计蒸发模型计算程序, 另一方面用同一模型解释实验的 γ 、轻粒子及复杂粒子数据, 探讨复杂粒子发射对高温热核巨共振性质的影响程度及方式, 并较为细致地研究 GDR 性质随核温度的变化.

参考文献 (References)

- 1 Snover K A. *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.*, 1986, **36**:545—603
- 2 Kmiecik M, Maj A, Bracco A et al. *Nucl. Phys.*, 2000, **A674**:29—46
- 3 Alhassid Y, Bush B. *Phys. Lett.*, 1990, **65**:2527—2530
- 4 Gaardhoje J J. *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.*, 1992, **42**:483—536
- 5 WEN W, DAI G, JIN G. *Phys. Rev.*, 1995, **C52**:187—191
- 6 Puhlhofer F. *Nucl. Phys.*, 1977, **A280**:267—284
- 7 Le Faou J H, Suomijarvi T, Blumenfeld Y et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1994, **72**:3321—3324
- 8 Suomijarvi T, Blumenfeld Y, Piattelli P et al. *Phys. Rev.*, 1996, **C53**:2258—2272

Influence of Complex Particle Emission on Properties of Giant Dipole Resonance of Hot Nuclei *

WEN Wan-Xin^{1,2} JIN Gen-Ming¹

¹ (Institute of Modern Physics, The Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

² (Nuclear Medicine School, Soochow University, Suzhou 215007, China)

Abstract The possible reasons for the discrepancy between calculation results based on the statistical evaporation model and experimental data of giant dipole resonance of very hot nuclei are discussed. Both of simulations with the standard CASCADE code and the code coupling complex particle emission are carried out. It is shown that the complex particle emission affects the properties of giant dipole resonance of very hot nuclei.

Key words giant dipole resonance, complex particle, hot nuclei

Received 8 March 2002

* Supported by National Natural Science Foundation of China (19805012)