

在镧系核区寻找巨超形变核态*

刘祖华

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

摘要 分析在稀土核区没有找到巨超形变的物理原因. 探讨在镧系核区寻找巨超形变核态的理论依据、实验方法、初步结果和存在问题.

关键词 超形变 巨超形变 镧系核

1 引言

超形变(SD)的预言和实验观察是核结构研究中最重要进展之一. 实验上, 利用熔合反应布居高角动量, 首先在 ^{152}Dy ^[1], 之后在 ^{132}Ce ^[2], 以及 ^{132}Ce 和 ^{152}Dy 一些相邻核和 $A \sim 190, A \sim 140$ 核区^[3,4]观察到超形变带. 根据理论预言和实验上观察的动力学转动惯量 g ⁽²⁾推算, 超形变核具有长轴与短轴之比为2:1的形状. 理论家们还预言了一些其它的奇异核形态^[5], 其中最吸引人的是具有长轴和短轴之比为3:1的巨超形变(HD).

理论计算表明, ^{152}Dy 和 ^{146}Gd 是寻找巨超形变的最佳候选者. 自1993年起, 在加拿大的Chalk River国家实验室, 意大利的Legnaro国家实验室, 美国的Lawrence Berkeley国家实验室, 利用大规模的 $4\pi\gamma$ 球探测系统寻找巨超形变核态. 最初的实验结果似乎显示在 ^{152}Dy ^[6,7]和 ^{147}Gd ^[8,9]中找到了HD带, 之后更精确的实验推翻了前面的结构. 本文在现有实验的基础上, 探讨寻找巨超形变核态所遇到的困难, 分析在稀土核区找不到巨超形变的物理原因, 着重讨论在镧系核区寻找巨超形变的理论依据、实验方法、初步结果和存在问题.

2 寻找 ^{152}Dy , $^{146,147}\text{Gd}$ 核中的巨超形变带

1993年, Galindo-Uribarri等人^[6]在加拿大Chalk River实验室, 利用轰击能量187MeV的 $^{120}\text{Sn}(^{37}\text{Cl}, \text{pxn})^{152,153}\text{Dy}$ 反应, 在质子开门的 $\gamma-\gamma$ 矩阵中找到10条 γ 跃迁, 其能量间距 $\Delta E_\gamma \sim 30\text{keV}$. 由 ΔE_γ 值, 推算核态的动力学转动惯量 $g^{(2)} \sim 130\hbar^2\text{MeV}^{-1}$, 相应的四极形变 $\beta_2 \geq 0.9$, 与巨超形变理论预言一致. 1995年, Viesti等人^[7]在意大利Legnaro实验室, 利用GASP谱仪, 用同样能量下的相同反应重复Chalk River实验室的实验, 证实Galindo-Uribarri等人的实验结果.

* 国家重点基础研究发展规划(G2000077400)资助

1995 年至 1996 年, LaFosse 等人^[8,9] 在美国 Lawrence Berkeley 实验室, 用 230MeV 的⁵¹V 轰击¹⁰⁰Mo 靶, 在^{146,147}Gd 中寻找巨超形变核态. 利用 Gammasphere, 作了 3 次实验. 第一次实验用了 36 个 Ge 探测器, 在¹⁴⁷Gd 中观察到一对转动带, 分别找到 9 条(a 带)和 11 条(b 带) γ 跃迁, 其能量间距 $\Delta E_\gamma \sim 29\text{keV}$, 相应的动力学转动惯量 $g^{(2)} = 140\hbar^2\text{MeV}^{-1}$. 非常大的动力学转动惯量与理论预言一致, 表明这些带具有巨超形变特征. 第二次和第三次实验中, Ge 探测器由第一次实验的 36 个增加到 57 个, 实验数据的统计提高了 13 倍, 未观察到 a 带, 似乎存在 b 带, 但减去本底后, b 带也消失, 由此推翻了第一次实验结果. 寻找巨超形变的实验非常困难, 因此得出错误的实验结果是可以理解的. 困难的原因可由图 1 来说明. 图 1(a) 是 230MeV 的⁵¹V + ¹⁰⁰Mo 熔合反应的角动量分布, 即形成的复合核的自旋分布. 理论预言只有自旋值大于 $80\hbar$ 才能形成 HD 转晕带, 相应的几率如图中的斜线部分所示. 由此可见, 布居 HD 态的几率只占形成复合核截面的一小部分. 所以即便使用大规模的 $4\pi\gamma$ 球, 实验上要获得足够的统计还是十分困难的. 图 1(b) 是用 Sierk^[10] 模型计算的裂变位垒高度随自旋的变化, $B_f(J)$. 由图可见, $B_f(J)$ 随 J 增大而减小, 最后在 $79\hbar$ 邻近 $B_f(J) \rightarrow 0$. 所以, 当 $J > 80\hbar$ 以后, 复合核尚未形成就发生裂变. 因此根本无法形成 $J > 80\hbar$ 的巨超形变核态. 这就是在稀土核区不可能找到巨超形变的物理原因.

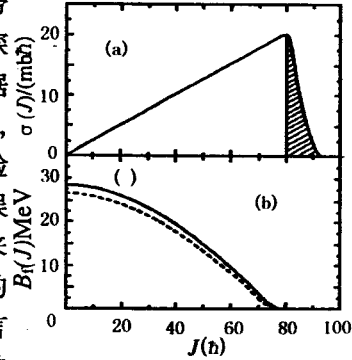


图 1(a) 230MeV 的¹⁰⁰Mo(⁵¹V, pxn)^{146,147}Gd 反应形成的复合核的角动量分布; (b)¹⁴⁷Gd(实线)和¹⁵²Dy(虚线)的裂变位垒随复合核自旋的变化

3 在铜系核区寻找巨超形变核态

对于重核和中重核, 形成 SD, HD 核态的机制各不相同. 在稀土核区, 原子核只有在高速集体转动下才有可能出现超形变和巨超形变. 而在铜系核区, 即使原子核的自旋为零, 势能面中仍然会出现相应于 SD, HD 核态的极小. 换句话说, 使原子核趋向高度形变的驱动力在不同核区不同, 在重核区驱动力为库仑力, 而在中重核区为集体转动引起的离心力.

3.1 理论依据

60 年代, 当时苏联的研究人员发现了裂变同质异能素. 随后, Strutinsky^[11] 用液滴模型加壳修正的混合方法, 预言了裂变位垒具有多峰结构, 解释了裂变同质异能素, 即为处于第二阱中的裂变核. 尤其值得指出的是, 用 Strutinsky 混合方法还预言了超重核岛.

裂变位垒是考虑原子核的各种拉长自由度, 轴不对称, 质量不对称等, 利用 Strutinsky 混合方法计算所得的势能面在裂变途径上的投影. 图 2 给出²³²Th 的裂变位垒, 其中 S_1, S_2, S_3 分别为第一、二和三位垒, $E_{\text{min}}^I, E_{\text{min}}^{II}, E_{\text{min}}^{III}$ 为第一、二、三阱极小. 第二阱 ($\beta_2 = 0.6, \beta_4 = 0.03$) 相应于超形变, 第三阱 ($\beta_2 = 0.85, \beta_3 = 0.35, \beta_4 = 0.18$) 具有反射不对称形状, 相

应于巨超形变. 因此, 理论计算显示, 铀系核中存在巨超形变核态.

3.2 实验方法和初步结果

由于非常低的分支比 ($\Gamma_\gamma/\Gamma_T = 0.001\%$) 和大量的裂变碎块 γ 本底, 因此无法通过 γ 射线测量来寻找铀系核区的巨超形变. 目前实验上多采用穿透共振方法. 采用这一方法时, 相应的裂变势垒应满足下列两个条件: (a) 第三阱有足够的深度, (b) 第一位垒的高度应低于第二位垒和第三位垒. 满足上述条件的主要是 Th, U 核. 图 3 给出 $^{232}, ^{234}, ^{236}\text{U}$ 的裂变势能曲线. 条件 (a) 使该核体系的第三阱存在可观察的共振态. 如将原子核激发到图中影形所示区间, 即激发能高于第一位垒而低于第二位垒, 由于条件 (b), 第二阱的核态 (SD 态) 高度阻尼, 只有第三阱中的共振态会在激发函数中呈现出窄的共振峰. 总之, 这两条件保证了实验上能观察且观察到的共振态是第三阱的核态.

研究巨超形变核态的最佳激发能区为影形区域所示. 1998 年, Krasznahorkay 等人^[12] 用 $^{235}\text{U}(d, p)^{236}\text{U}$ 反应, 精细测量了 ^{236}U 的裂变几率随激发能的变化, 以探寻裂变位垒第三阱极小. 图 4(a) 是观察到的激发函数的一部分. 假定观察到的共振峰包含整个转动带, 带中的各个转动能级的相对激发几率用 DWBA 计算, 以宽度等于实验分辨的高斯函数去拟合共振峰, 求得带头能量, 带的绝对强度和转动参数. 图 4(a) 中的实线是拟合结果. 图 4(b) 是作为 $\hbar^2/2g$ 函数的 χ^2/F 值. 其中 g 是转动惯量. 由此得到 $\hbar^2/2g = 1.6^{+1.0}_{-0.4}\text{keV}$ 与理论预言的巨超形变态的 $\hbar^2/2g_{\text{theor}} = 2.0\text{keV}$ ^[13] 很一致. 至今, 用穿透共振方法, 已在 $^{230}, ^{231}, ^{233}\text{Th}$ ^[14, 15] 和 $^{234}, ^{236}\text{U}$ ^[12, 16] 观察到裂变位垒的第三阱共振态.

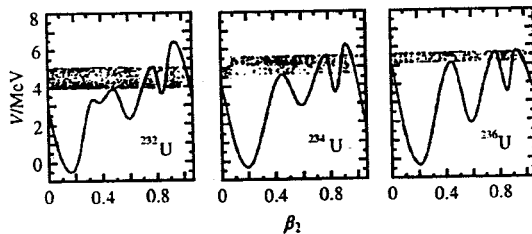


图3 几个 U 同位素的势能曲线

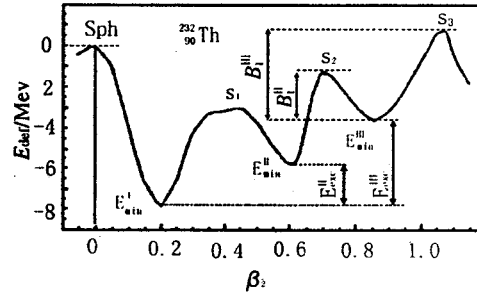


图2 ^{232}Th 的四极形变 β_2 为函数的势能曲线

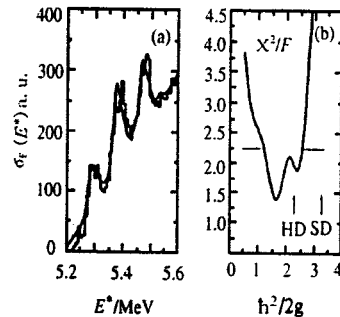


图4 HD 和 SD 转动参数的理论值如图中的箭头所示
(a) ^{236}U 裂变激发函数; (b) χ^2 分析结果.

4 讨论

如前所述, 在铀系核区, 用探测 γ 跃迁的方法来寻找巨超形变极端困难. 而穿透共振方

法测到的是位垒的第三阱的共振态,不是转动带.由于在势垒的第三阱,核的形状是反射不对称的,二种宇称的转动谱几乎简并,用拟合实验共振峰方法无法区分二种宇称的转动带.所以由穿透共振方法得到的实验结果还不能作为找到巨超形变的确切的实验证据.

总之,在稀土核区,由于自旋大于 $80\hbar$ 时裂变位垒消失,因而无法形成巨超形变核态.而在锕系核区,即使复合核的自旋为零,仍然存在势垒第三阱相对应的巨超形变.因此,如有更有效的实验方法,在锕系核区有可能找到巨超形变核态.鉴于寻找巨超形变的重要意义,中国的实验和理论核物理学家应为此积极探索

参考文献(References)

- 1 Nyako B M, Cressewell J R, Forsyth P D et al. Phys. Rev. Lett., 1984,52:507
- 2 Nolan P J, Kirwan A, Love D J G et al. J. Phys., 1985,G11:L17
- 3 Nolan P J, Twin P J. Ann. Rev. Nucl. Part. Sci., 1988,38:533
- 4 Janssens R V F, Khoo T L. Ann. Rev. Nucl. Part. Sci., 1991,41:321
- 5 Bengtsson T et al. Phys. Scr., 1981,24:200
- 6 Galindo-Uribarri A, Aandrews H R, Ball G C et al. Phys. Rev. Lett., 1993,71:231
- 7 Viesti G, Lunardon M, Bazzacco D et al. Phys. Rev., 1995, C51:2385
- 8 Lafosse D R, Sarantites D G, Baktash C et al. Phys. Rev. Lett., 1995,74:4186
- 9 Lafosse D R, Sarantites D G, Baktash C et al. Phys. Rev., 1996, C54:1585
- 10 Sierk A J. Phys. Rev., 1986, C33:2039
- 11 Strutinsky V M. Nucl. Phys., 1986, A122:1
- 12 Krasznahorkay A, Hunyadi M, Harakeh M N et al. Phys. Rev. Lett., 1998,80:2073
- 13 Bengtsson R, Ragnarsson I, Aberg S. Nucl. Phys., 1987, A473:77
- 14 Blons J, Mazur C, Paya D. Phys. Rev. Lett., 1975,35:1749
- 15 Blons J. Nucl. Phys., 1988, A502:121C
- 16 Blons J, Fabbo B, Mazur C et al. Nucl. Phys., 1988, A477:231

Search for the Hyperdeformed Nuclear States in the Actinide Nuclei *

LIU Zu-Hua

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract A detailed inquiry is made into the causes of which the definitive evidence for the existence of a hyperdeformed shape in rare earth nuclei has not been found. For the hyperdeformations in the actinide nuclei, the theoretical predictions, experimental methods, primary results and existing problems have been discussed.

Key words superdeformation, hyperdeformation, actinide nucleus

* Supported by Major State Basic Research Development Program of China(G2000077400)