

原子核的巨形变态研究*

吴锡真

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

摘要 简要叙述了该课题研究的现状,并从核裂变和巨形变结合的观点上,对中重核和重核中的巨形变态研究提出一些看法,以推动对这个课题的探讨.

关键词 巨形变态 转动双中心壳模型 核裂变

分类号 O571.21

原子核的巨形变态(Hyperdeformation)是指核的四极变形远大于 $\beta_2 = 0.6$ (超形变态),长短轴之比达到 3:1 的大变形状态.这是一个理论上已有预言但实验上尚未认真研究的未知核态,是继超形变发现之后又一个重要的具有十分挑战意义的新研究课题.它涉及到极端变形情况下,壳结构是否存在和快速转动核体系的稳定性极限问题,包括原子核形状随自旋的变化、形状共存和形状分布等重要物理内容.另有研究指出,在所谓核平均场的 Pseudo-SU₃ 和 Pseudo-spin 对称性方面,有一个重要研究方向就是原子核大变形构形的分布,巨、超形变核体系的简并方式极有可能提供检验 Pseudo-SU₃ 和 Pseudo-spin 对称性的实验数据.因此巨形变问题研究的重要性超出了高自旋物理的范围.

历史上核裂变的研究与核结构研究曾经是彼此独立进行的.自 1963 年裂变形状同质异能态发现以后,两者才紧密地结合起来.事实上,裂变同质异能态和超形变态对某些重核来源是一回事.因此有理由认为,巨形变的研究和裂变问题的研究应同步进行.巨形变态可能是裂变过程中某种准稳状态.在重核中,可能是某种与质量不对称有关的异能态.

这里讨论两个问题:(1)高自旋下的巨形变态,即中重核巨形变问题;(2)重核中的巨形变问题——初态裂变碎片的巨形变态.

1 高自旋情况下的巨形变核态

巨形变问题的讨论可以追溯到 1985 年^[1](轻核中巨形变构形研究可以追溯的更

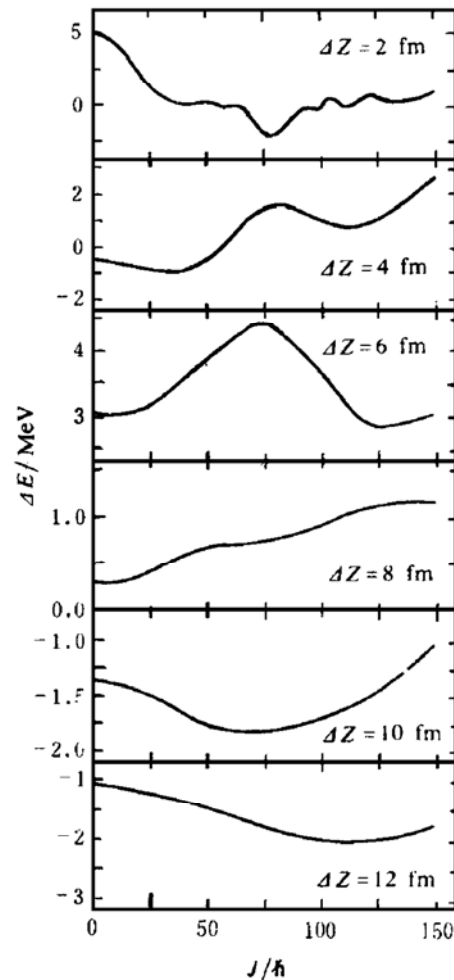


图 1 在不同拉长变形下,¹⁶⁴Dy 核的壳修正能 ΔE 与总自旋 J 的函数关系.双中心壳模型中其他参数固定为颈参数 0.8,质量不对称参数为 0.0,两碎变形 $\beta_1 = \beta_2 = 1.0$ (见文献[3])

* 国家自然科学基金和核工业科学基金资助课题.
1996 - 11 - 21 收稿.

早). 在理论上, 人们利用 Cranked Nilsson-strutinsky 方法计算核的位能作为自旋的函数, 研究了 ^{168}Yb 邻近核的巨形变问题. 在 $\beta_2 = 1.05$ 和 $I = 80 \hbar$ 时, 观察到明显的巨形变极小^[2]. 1989 年, 吴锡真等人发展的转动双中心壳模型, 为研究巨形变提供了有力的理论工具^[3]. 在这个模型基础上研究 ^{164}Dy 核在不同拉长变形下壳修正能与自旋的关系, 发现当拉长变形 $\Delta Z = 10 \text{ fm}$ (即核的长短轴之比约为 3 : 1) 和总自旋为 $75 \hbar$ 时, 存在明显负能壳修正极小, 如图 1 所示^[3]. 类似理论计算预示, 在多个中重核中可能存在高自旋的巨形变态^[4]. 陈、吴、董等人也在转动双中心壳模型基础上计算了高自旋条件下 ^{146}Gd 核的巨形变形状, 如图 2 所示^[5], 当 $I < 70 \hbar$ 时, 位能面上的极小是非常浅的, 似乎不能形成巨形变态. 在更高的自旋下, 位能面上的极小变深, 但裂变位垒可能降得很低, 这时裂变的竞争对巨形变形成是一个严重的限制. 但下面事实使实验上仍极有可能发现巨形变态.

1.1 宏观裂变位垒

裂变位垒随自旋和中子数的变化趋势有利于巨形变的形成, 当核的中子数增加时 ($N \sim 80$ 到 $N \sim 100$), 裂变不稳定极限明显移向高自旋方向. 例如, $^{164}_{66}\text{Dy}_{98}$ 的位垒比 $^{152}_{66}\text{Dy}_{86}$ 的位垒高出近 5 MeV . 另一方面如果固定中子数而当质子数减少一个单位时, 位垒也增加近 1 MeV ^[2]. 因此在自旋不变情况下, 增加中子数减少质子数可以增加裂变位垒, 有利于巨形变的形成.

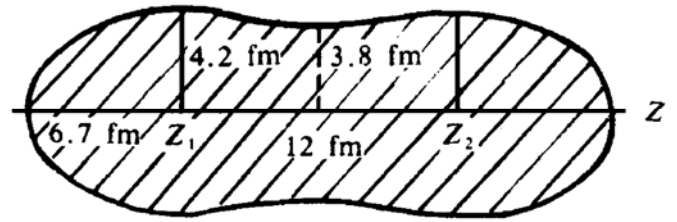
1.2 巨偶极共振

由于巨形变态出现在更大的拉长变形下, 所以它的巨偶极共振 (GDR) 强度分布比超形变的 GDR 的低 $1.5 \sim 2.5 \text{ MeV}$ (超形变最低、GDR 强度极大出现在 $\sim 8 \text{ MeV}$). 因而通过 γ 发射退激发提供了增强低伏巨形变态布局的机制.

1.3 带电粒子发射

大的拉长变形导致库仑位垒的降低. 因而大大增强了带电粒子 (如质子) 的发射. 质

子的发射可带走相当多的激发能和带走相对少的角动量. 这种机制使得有可能通过质子- γ 符合提高对巨形变带的实验观察本领.



$$\Delta Z = 12 \text{ fm} \quad \varepsilon = 0.2 \quad \beta = 1.65$$

$$\hbar\omega = 0.05 \hbar\omega_0 \quad 3.1:1$$

图 2 计算的 ^{146}Gd 核的巨形变变形转动角频率为 $\hbar\omega = 0.05 \hbar\omega_0$ ($\hbar\omega_0 = 41 \text{ MeV}/A^{1/3}$) 核的长短轴的比例为 3.1 : 1

1.4 对能减弱导致集体惯量增加

有效惯量参数为

$$\bar{B}_{\text{eff}} \sim \frac{g\pi}{\Delta_\pi^2} \left(\frac{\Delta n}{\Delta\beta}\right)_\pi^2 + \frac{g\nu}{\Delta_\nu^2} \left(\frac{\Delta n}{\Delta\beta}\right)_\nu^2$$

其中, $(\Delta n/\Delta\beta)_{\pi(\nu)}$ 是在位垒区域单粒子能级交叉数, $\Delta_{\pi(\nu)}$ 是对能, $g_{\pi(\nu)}$ 是与 Fermi 能处能级密度有关的比例常数 (π 表示质子, ν 表示中子). 巨形变态的裂变几率

$$P \sim \exp\left(-\frac{2}{\hbar} \int_{\beta_{\text{in}}}^{\beta_{\text{out}}} \sqrt{2B_{\text{eff}}[V(\beta) - E]} d\beta\right)$$

β_{in} 和 β_{out} 为进出裂变位垒区域变形坐标值. 由于高自旋导致对能减少, 有效惯量增加, 因此裂变受到抑制, 这有利于巨形变的存在.

以上讨论说明了巨形变态的存在与否和裂变位垒的位置和高低有密切关系, 如巨形变极小出现在位垒以内且位垒有一定高度, 那么该巨形变态的存在和发现就非常可能. 由于丰中子中重核的裂变位垒明显高于其相邻缺中子核, 所以产生非常丰中子核的低能放射性束在研究巨形变中可能很有用.

2 重核中的巨形变问题

重核中, 巨形变态的存在起源于位能面上的第三个极小. 在铜系核中, 具有大的四极

和八极反射不对称构形的第三个极小是由第二鞍点分裂而成的. 实验上, 已通过铀系元素的 (n, f) 、 (n, pf) 和 (d, pf) 反应产生的共振观察到第三个极小的存在^[5]. 近来通过对 ^{232}Th 核裂变轻碎片的不对称角分布和铀系核近垒光致核裂变截面斜度的分析也找到第三个极小存在的证据. 在铀系核中, 巨形变态的理论研究以前是用 Nilsson-Strutinsky 模型进行的. 研究发现, 在 $Z \geq 86$ 和 $N = 142 \sim 148$ 的核中可能有较深的第三个极小, 这为在重核中寻找巨形变态提供了理论背景. 由于诱发裂变反应的极端复杂性, 自发裂变便成为研究重核巨形变的首要选择. Hamilton 等人沿这个方向作了许多工作^[6,7]. 他们第一次直接测量了 ^{252}Cf 自发裂变中瞬发碎片对 Zr-Ce 和 Mo-Ba 的产额及相关的中子多重性. 发现在 Mo-Ba 裂变方式中, 中子多重性扩展到 $0 \sim 10$ 个. 这个裂变中子多重性的巨大增长预示了新的裂变模式的存在, 即在 Mo-Ba 分裂时, 存在两种裂变模式:

1) 通常模式 有较大的裂变平均总动能 ($\overline{\text{TKE}} = 189 \pm 1 \text{ MeV}$) 和宽的初始碎片质量分布 ($\overline{A}_H = 145.7$ 和 $\overline{A}_L = 106.3$) 以及小的碎片激发能 ($\overline{E}_{\text{Ba}}^* = 15 \text{ MeV}$, $\overline{E}_{\text{Mo}}^* = 12 \text{ MeV}$).

2) 新模式 裂变总动能低得多 ($\overline{\text{TKE}} = 153 \pm 3 \text{ MeV}$). 质量分布局限在以下三种质量分裂 $^{108}\text{Mo} - ^{144}\text{Ba}$ 、 $^{107}\text{Mo} - ^{145}\text{Ba}$ 和 $^{106}\text{Mo} - ^{146}\text{Ba}$ 中的一种或几种, 相应这些分裂方式的激发能是 $\overline{E}_{\text{Ba}}^* / \overline{E}_{\text{Mo}}^* = 35.4/33.2$ 、 $39.7/23.8$ 和 $45.0/16.9$.

以上数据可知, 在新的裂变模式中, Ba 碎片如 ^{146}Ba 有反常高的激发能, 可发射 $5 \sim 8$ 个中子. 同时, 由于这时碎片带有非常低的平均总动能, 这意味着碎片在断裂时有大的拉长变形. 从激发能估算, 断裂时 $^{144} \sim ^{146}\text{Ba}$ 的长短轴之比分别约为 2.8 、 3.0 和 3.2 . 因此断定在断裂时, 它们处在巨形变态.

为了解释实验上的新现象, 人们计算了 ^{252}Cf 的位能面, 如图 3 所示. 这里存在三个通

向断点的裂变通道: 一个是对称裂变路途 ($\beta_3 = 0$), 相应于分裂方式 $A_1/A_2 = 126/126$; 中间路途 (I) 相应于不对称分裂方式 $A_1/A_2 = 134/118$; (II) 相应于质量分裂方式 $A_1/A_2 = 146/106$. 后两种不对称分裂方式 (I) 和 (II) 分别通向局部巨形变极小: $\beta_2 = 1.0, \beta_3 = 0.4$ 和 $\beta_2 = 0.9, \beta_3 = 0.65$.

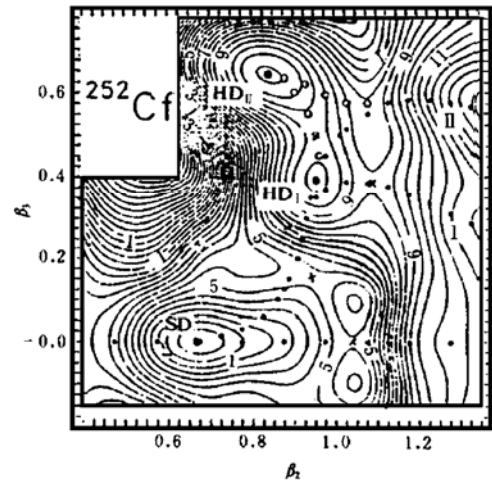


图 3 ^{252}Cf 核的位能表面与变形参数 β_2 和 β_3 的函数关系. 位能极小和鞍点分别用大圆点和叉表示 (见文献^[6])

因为转动双中心壳模型包括有体系拉长、颈部形成、质量不对称和两碎片四极变形等独立坐标, 广泛用来研究裂变、准分子态, 尤其是接近断点构形的核状态, 因此是描述与裂变有紧密关系的重核巨形变的理想微观模型. 在这个模型基础上, 获得了 ^{252}Cf 自发裂变过程中, 单粒子能级随拉长变形、颈部形成坐标和质量不对称坐标的变化, 借助 Strutinsky 方法又获得了裂变位能曲线, 如图 4 所示. 实线相应于对称裂变情况, 是一个典型的双峰位垒. 第一个位能极小相应于基态变形, 而在第二位阱中存在超变态或形状同质异能态. 虚线相应于质量不对称裂变如 Mo-Ba 分裂. 除了基态变形阱和超形变阱之外, 还存在第三个位能极小. 它出现在更大的变形下, 相应 ^{252}Cf 核巨形变构形. 通过这个巨形变极小的裂变道产生了巨形变构形的碎片 Ba. 由此可见, ^{252}Cf 位能面上的第三个极小可能导致巨形变碎片的产生. 在重核中, 这第三个极

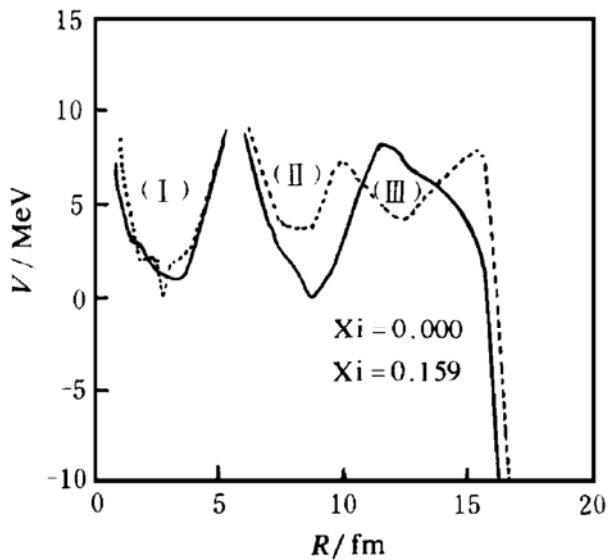


图 4 ^{252}Cf 核的裂变位能曲线

小的存在取决于某种程度的质量不对称. 因此在重核中, 不对称裂变和巨形变碎片的出现有着密切关系, 它们可能起源于同一个动力学过程, 巨形变研究可能为裂变研究提供新的认识, 而裂变动力学研究又可能为找寻巨形变提供信息.

参 考 文 献

- 1 Casten R F, Von Brentano P, Haque A M I. Evidence for an Underlying SU(3) Structure near Neutron Number $N=104$. *Phys Rev*, 1985,C31:1991
- 2 Dudek J, Werner T, Riedinger L L. Prediction of Hyperdeformed Nuclear States at very High Spins. *Phys Lett*, 1988,B21:252
- 3 Wu Xizhen, Maruhn J A, Greiner W. The Rotating Two-center Shell Model. *Z Phys*, 1989,A334:207
- 4 Nazarewicz W. Variety of Shapes in the Mercury and Lead Isotopes. *Phys Lett*, 1993,B305:195, Galindo-Uribarri A, Andrews H R, Ball G C. First Evidence for Hyperdeformed Nuclear Shape at High Angular Momentum. *Phys Rev Lett*, 1993,71:231
- 5 Cwiok S, Nazarewicz W, Saladin J X et al. Hyperdeformations and Clustering in the Actinide Nuclei. *Phys Lett*, 1994,B322:304
- 6 Hamilton J H, Ter-Akopian G M, Oganessian Yu Ts et al. A New Spontaneous Fission Mode for ^{252}Cf ; hyperdeformation, cluster radioactivity, new levels. *Proceedings of XV Nuclear Physics Divisional Conference on Low Energy Nuclear Dynamics*, St Petersburg, Russian, April 18~22, 1995, 187
- 7 Ter-Akopian G M, Hamilton J H, Oganessian Yu Ts et al. New Spontaneous Fission Mode for ^{252}Cf ; indication of hyperdeformed $^{144,145,146}\text{Ba}$ at scission. *Phys Rev Lett*, 1996,77:32

On Investigation of Nuclear Hyperdeformation

WU Xizhen

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413)

Abstract The recent development on investigation of hyperdeformation is outlined. From point of view of combining hyperdeformation with nuclear fission, a discussion on approaches for studying hyperdeformation is given for pushing ahead with this research.

Key Words hyperdeformation rotating two-center shell model nuclear fission