

偶-偶 Er 同位素核的 γ 自由度效应

钟纪泉 张学谦

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

1995-11-22 收稿

摘 要

根据 Davydov 和 Filippov 的非轴对称转子模型, 从实验的 $E(2_2^+)/E(2_1^+)$ 以及 $E(2_1^+)$ 值, 提取了偶-偶 Er 同位素核的四极形变 β 与非轴对称 γ 参数. 结果表明, Davydov 和 Filippov 关于非轴对称转子的理论, 与过渡区核的低激发谱的实验结果相符合, 表明在 ^{157}Tm 中非轴对称性是重要的.

关键词 非轴对称转子模型, 形变参数, 非轴对称效应.

众所周知, Davydov 和 Filippov 的非轴对称转子理论可对偶-偶变形核的一些激发带, 例如 γ 振动激发带, 给予一定的解释, 特别是对过渡区非轴对称度较大的核^[1].

根据 Davydov 和 Filippov 的非轴对称转子模型^[2], 系统地讨论了 γ 自由度对偶-偶 Er 同位素核基态四极形变的影响, 特别是对过渡区 ^{156}Er 核素的影响, 并与 Moller 和 Nix 的理论^[3] 以及从实验有效转动惯量提取的数值^[4] 进行了比较. 据此, 讨论了 ^{157}Tm 基态性质的非轴对称性.

Davydov 和 Filippov^[2] 曾用 Bohr 哈密顿量来讨论偶-偶核的能谱, 他们假定在低激发谱中可以把振动自由度冻结, 只考虑转动激发, 但不限于轴对称情况, 即考虑非轴对称陀螺哈密顿量

$$H = (\hbar^2 / 2) \sum I_\lambda^2 / J_\lambda \quad (1)$$

的本征解, 转动惯量 J_λ 取

$$J_\lambda = 4J_0 \sin^2(\gamma - 2\pi k / 3) / 3, \quad (2)$$

其中 J_0 仅依赖于 β , β 是四极形变参数, γ (取 $0^\circ < \gamma < 60^\circ$) 决定核的形状对于轴对称的偏离, 称之为非轴对称自由度参数.

在具有一定对称性(绕垂直于 3 轴任一轴转 180° 的对称性)的对称陀螺波函数所张的空间中, 把 H 对角化后, 计算能量本征值. 以 $3\hbar^2 / 4J_0$ 为单位, $I^\pi = 2^+$ 两条能级为

$$\begin{aligned} E(2_1^+) &= 9\{1 - [1 - 8\sin^2(3\gamma) / 9]^{1/2}\} / \sin^2(3\gamma), \\ E(2_2^+) &= 9\{1 + [1 - 8\sin^2(3\gamma) / 9]^{1/2}\} / \sin^2(3\gamma). \end{aligned} \quad (3)$$

$I^\pi = 3^+$ 的一条能级为

$$E(3^+) = 18 / \sin^2(3\gamma) . \quad (4)$$

$I^\pi = 4^+$ 的 3 条能级满足如下方程

$$E^3 - 90E^2 / \sin^2(3\gamma) + 48[27 + 26\sin^2(3\gamma)]E / \sin^4(3\gamma) - 640[27 + 7\sin^2(3\gamma)] / \sin^4(3\gamma) = 0. \quad (5)$$

因此, 一个原子核轴对称的破坏, 即 γ 自由度的效应, 导致了新能级 $E(2_2^+)$ 、 $E(3^+)$ 、 $E(4_2^+)$ …… 的出现. 应用 $E(2_2^+) / E(2_1^+)$ 比对于 γ 参数的依赖关系

$$E(2_2^+) / E(2_1^+) = \{1 + [1 - 8\sin^2(3\gamma) / 9]^{1/2}\} / \{1 - [1 - 8\sin^2(3\gamma) / 9]^{1/2}\}. \quad (6)$$

由实验的 $E(2_2^+) / E(2_1^+)$ 比值, 得到了非轴对称 γ 自由度参数. 有了 γ 实验提取值, 就可应用 $E(2_1^+)$ 实验的能量与四极形变参数 β 以及 γ 自由度参数的关系提取相应的四极形变参数, 在提取的过程中, 应用了关系^[3]

$$E(2_1^+) = (3\hbar^2 / J_0) \{9 - [81 - 72\sin^2(3\gamma)]^{1/2}\} / [4\sin^2(3\gamma)], \quad (7)$$

其中, 根据 L. Grodzins 的一个通常的经验规则^[5,6], 惯性参数 $6\hbar^2 / (2J_0) \approx 1225A^{-7/3}\beta^{-2}$.

由公式(3) — (5) 所得到的能级, 作为 γ 的函数, 在图 1 中用实线来表示. 对于 $\gamma=0$ 、能谱 $E(2_1^+)$ 、 $E(4_1^+)$ …… 的性质是轴对称的. 对于一定四极形变值, 核的轴对称的破坏, 即 γ 自由度的增加, 导致了轴对称核能级 $E(2_1^+)$ 、 $E(4_1^+)$ …… 的增加, 这个增加相应于有效形变参数的减少, 对于第一个激发态, 有效形变参数 β_{eff} 为^[2]

$$\beta_{\text{eff}} = \beta \{4 \sin^2(3\gamma) / [9 - 9(1 - 8 \sin^2(3\gamma) / 9)^{1/2}]\}^{1/2}. \quad (8)$$

除了轴对称核能谱的能级发生变化之外, γ 自由度的增加也导致了新的能级 $E(2_2^+)$ 、 $E(3^+)$ 、 $E(4_2^+)$ …… 的出现.

根据我们得到的 γ 形变参数以及相应的四极形变参数 $\beta(\gamma)$ 值, 以 $\Delta=0.25$ ($3\hbar^2 / J_0$) = $306.25A^{-7/3}\beta^{-2}$ 为单位, 由实验低激发谱 $E(2_1^+)$ 、 $E(4_1^+)$ 、 $E(2_2^+)$ 、 $E(3^+)$ 得到了与偶-偶 Er 同位素核相应的 $E(I_i^+, \gamma) = E(I_i^+) / \Delta$ (见图 1).

图 1 清楚地表明, Davydov 理论对过渡区非轴对称较大的核基态及激发态附近性质的讨论是合适的. $E(4_2^+)$ 能级实验值与 Davydov 理论符合得不好, 这可能是由于在 $E(4_2^+)$ 能级以上, 激发能对四极形变参数及 γ 自由度的影响所致.

利用(6) — (8) 式以及 $E(2_1^+)$ 和 $E(2_2^+)$ 实验值, 系统地提取了 Er 同位素核的四极形变参数 β 、 ϵ_{eff} 和非轴对称自由度参数 γ , 在表 1 中分别表示成 $\beta(\gamma)$ 、 $\epsilon_{\text{eff}}(\gamma)$ 以及 γ ,

为了和理论值比较, 这里也列出了 Moller 和 Nix 利用折叠 Yakawa 势所作的系统计算^[3], 在表 1 中表示成 $\epsilon_2(\text{MN})$. $\epsilon_2(J)$ 是作者在文献[4] 中从实验有效转动惯量提取的核的基态四极形变. $\epsilon_2(Q_0)$ 是由电四极矩 Q_0 实验值^[7], 按公式^[8]

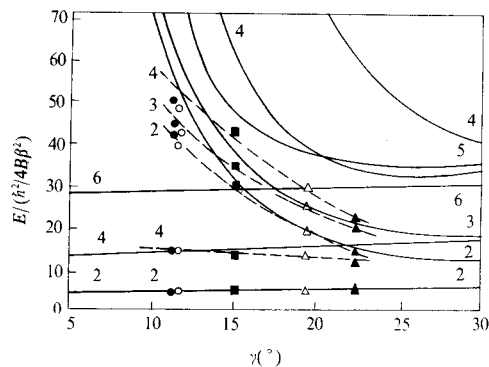


图 1 偶-偶 Er 同位素低激发谱与 Davydov 和 Filippov 理论比较

质量数 A 分别为 156 (\blacktriangle), 158 (\blacktriangle), 160 (\blacksquare), 162 (\circ) 和 164 (\bullet).

图中数字表示偶-偶核自旋 I 值. 实线为理论值.

$$Q_0 = (4/5) eZA^2/3 \varepsilon_2 (1 + \varepsilon_2/2) r_0^2 \quad (9)$$

定出的, 其中 $r_0 = 1.25\text{fm}$, $\varepsilon_2(Q_0)$ 值是文献[4]给出的.

表1 Er同位素核与 ^{157}Tm 的四极形变参数及非对称自由度参数

Z	N	$\varepsilon_2(\text{MN})$	$\varepsilon_2(J)$	$\varepsilon_2(Q_0)$	$\langle \beta^2 \rangle^{1/2}$	γ^0	$\beta(\gamma)$	$\varepsilon_{\text{eff}}(\gamma)$
68	86	0.145	0.104					
68	88	0.185	0.144			23.46	0.193	0.156
69	88	0.185			0.210			
68	90	0.205	0.211			18.17	0.242	0.207
68	92	0.232	0.260			15.06	0.284	0.249
68	94	0.245	0.287	0.247		13.29	0.306	0.273
68	96	0.252	0.292	0.252		12.89	0.317	0.284
68	98	0.259	0.296	0.262		12.69	0.332	0.299

由表1可以清楚地看出, 对所讨论的Er同位素, $\varepsilon_2(J)$ 与 $\varepsilon_{\text{eff}}(\gamma)$ 非常接近, 这是因为原子核轴对称的破坏, 导致了相应于轴对称核的状态能量的增加, 这个增加相应于原子核有效转动惯量的减少, 或者相应于原子核有效形变参数的减少^[2]. 在文献[4]中, 作者根据Bohr和Mottelson关于对关联对转动惯量的影响的近似考虑, 以及转动惯量对于形变的依赖关系, 从实验有效转动惯量提取核的形变参数, 事实上, 这种提取方法已考虑了非轴对称效应.

当与Moller和Nix值比较时, 我们发现 $N=90$ 的 ^{158}Er 核, 获得的 $\varepsilon_2(J)$ 和 $\varepsilon_{\text{eff}}(\gamma)$ 与其符合得较好. 这可能表明, 对于 ^{158}Er 核以及 $N \geq 90$ 的Er同位素核, γ 自由度对基态四极形变的效应可以忽略($\gamma < 20^\circ$). 正是由于这一点, 对于 ^{159}Tm 核来说, 由于它的核心 ^{158}Er 的 γ 自由度效应可以忽略, 所以能够用绝热近似两参数转动动能公式, 对基态转动带进行讨论, 提取相应的惯性参数、退耦合参数值^[9,10].

有意义的是, 尽管对于 $N \geq 90$ 的Er的同位素核, 获得的 $\varepsilon_2(J)$ 和 $\varepsilon_{\text{eff}}(\gamma)$ 比 $\varepsilon_2(\text{MN})$ 系统地偏高, 但对于 ^{156}Er 核得到的 $\varepsilon_2(J)$ 和 $\varepsilon_{\text{eff}}(\gamma)$ 却较小于 $\varepsilon_2(\text{MN})$, 这充分地表明, ^{156}Er 核中 γ 形变自由度的重要性($\gamma > 20^\circ$), 这给 $1/2[411]$ 组态出现于 ^{157}Tm 核基态可能是非轴对称效应造成的解释提供了理论基础. 文献[11]利用同位素移动测量了核电荷半径, 在假定四极形变情况下, 用小液滴模型计算 ^{157}Tm 的等效形变参数 $\langle \beta^2 \rangle^{1/2} = 0.21$ ($\langle \varepsilon^2 \rangle^{1/2} = 0.189$), 由于没有考虑 γ 自由度效应, 故这个值比较接近Moller与Nix的值 $\varepsilon_2(\text{MN}) = 0.185$, 而与 $\varepsilon_2(J) = 0.144$ 以及 $\varepsilon_{\text{eff}}(\gamma) = 0.165$ 偏离较大.

由上可见, Davydov和Filippov^[11]的非轴对称转子理论, 可被用来讨论 γ 自由度对偶-偶稀土区四极形变的影响, 特别是过渡区核的低激发谱, 提取的偶-偶同位素核四极形变参数以及 γ 自由度参数, 同现有理论结果比较, 显示了所获取的Er同位素形变参数的正确性以及 γ 自由度在 ^{156}Er 核中的重要性, 进而给出 ^{157}Tm 核基态是非轴对称的.

参 考 文 献

- [1] 曾谨言、孙洪洲, 原子核结构理论, 上海科学技术出版社, (1987) 173.
- [2] A. S. Davydov, G. F. Filippov. *Nucl. Phys.*, **8**(1958) 237.
- [3] P. Moller, R. Nix, Private Communication, (1984).
- [4] 张敬业、钟纪泉、廖毕程, 高能物理与核物理, **12**(1988) 665.
- [5] J. Meyer *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **32**(1974) 1383.
- [6] L. Grodzins, *Phys. Lett.*, **2**(1962) 88.
- [7] M. A. J. Mariscotti *et al.*, *Phys. Rev.*, **178**(1969) 1864.
F. Azgüi *et al.*, *Nucl. Phys.*, **A439**(1985) 573.
- [8] R. Bengtsson, S. Aborg, *Phys. Lett.*, **B172**(1986) 277.
- [9] P. Tlustý, D. Venos, J. Adam *et al.*, *Z. Phys.*, **A341**(1992) 435.
- [10] 钟纪泉、张学谦, 高能物理与核物理, **20**(1996) 1087.
- [11] G. D. Alkhazov, A. E. Barzakh, I. Ya. Chubukov *et al.*, *Nucl. Phys.*, **A477**(1988) 37.

Non-axial Parameter γ Effects on Even-Even Er Isotopes

Zhong Jiquan Zhang Xueqian

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

Received 22 November 1995

Abstract

Based on the non-axial rotor model given by Davydov and Filippov, the deformation parameter β and non-axial parameter γ of even-even Er isotopes are determined from the energy of the first 2^+ level and the energy ratio of the second 2^+ level and the first one. The present work indicates that this model is consistent with the experimental results in the transitional region. It also shows that the non-axial effects on ^{157}Tm nuclide are of importance.

Key words non-axial rotor model, deformation parameter, non-axial effects.