

奇质量超形变核 Signature 伙伴 带的两种劈裂

李 龙

(北京大学物理系 北京 100871)

摘要 阐述了奇质量超形变核 Signature 伙伴带的两种劈裂,包括 $\Delta I = 1$ 颤动和带首劈裂. 通过超形变 Signature 伙伴带 $M1$ 跃迁实验数据的分析,显示出一些奇质量核的超形变带存在带首劈裂. 并讨论了 Signature 伙伴带产生带首劈裂的可能机制.

关键词 超形变带 Signature 劈裂 $\Delta I = 1$ 颤动 带首劈裂

1 引言

近年来,原子核超形变带的研究已成为核结构研究的前沿领域之一. 关于超形变带的跃迁能谱,已有了原子核“全同带”^[1]和 $\Delta I = 2$ 颤动($\Delta I = 4$ 分岔)^[2]问题的讨论. 文献[3]中又提出了关于奇质量核 $\Delta I = 1$ 颤动的现象,除了这种 Signature 劈裂的现象外,本文将着重讨论另一种 Signature 劈裂现象,即带首劈裂.

原子核中的 Signature 劈裂以及 Signature 反转问题^[4]在一些原子核高自旋态研究中常常涉及到. 处理高自旋的理论模型主要有推转壳模型^[5]和粒子-转子模型^[6]. 在粒子-转子模型中,原子核集体运动的哈密顿量被划分为转动项、反冲项和 Coriolis 项. Coriolis 项一般是不能忽略的,对于轴对称的变形核,Coriolis 项会导致奇质量核 K 等于 $1/2$ 带的脱耦合效应. 实际上,不仅 K 等于 $1/2$ 的带, K 为 $3/2, 5/2 \dots$ 的带也存在脱耦合效应,只是强度随着 K 值的增大而减小^[7]. 奇质量核超形变带的 $\Delta I = 1$ 颤动也是来源于 Coriolis 项. 而反冲项的作用,在大多数情况下是被忽略的. 通常只是认为其会对 Coriolis 项产生一个衰减因子,而且随着自旋的增大,衰减因子的作用可以逐渐忽略^[6]. 带首($\omega = 0$)处通常是二重简并的 Nilsson 能级,随着 ω 的增大,Coriolis 作用破坏了时间反演不变性,一个转动带就劈裂为 Signature $r = \pm i$ 的两支.

在本文中,通过对奇质量核超形变 Signature 伙伴带带中 $M1$ 跃迁能谱的分析,可以看出在一些奇质量核超形变带中的确存在另一种劈裂现象,即带首处的二重简并不存

在. 我们把这种劈裂现象称为带首劈裂.

2 奇质量核超形变带的 $\Delta I = 1$ 颤动

奇质量核超形变带的 $\Delta I = 1$ 颤动, 在文^[3]中已有较详细的讨论. 简单地说, 对于一对 Signature 伙伴带, 如果用

$$\Delta^2 E_\gamma(I) = 1/2[E_\gamma(I+2 \rightarrow I) + E_\gamma(I \rightarrow I-2)] - E_\gamma(I+1 \rightarrow I-1) \quad (1)$$

来衡量它们之间的相对移动. 分析表明, 对于 $A \sim 190$ 区的大多数奇质量核的超形变带, 都表现出明显的 $\Delta I = 1$ 颤动, 它们的共同特点是: 在低自旋时, $\Delta^2 E_\gamma(I)$ 几乎为零, 随着自旋 I 的增大, $\Delta^2 E_\gamma(I)$ 的幅度越来越大. 这种 $\Delta I = 1$ 颤动的变化规律, 可以通过在奇质量核的能谱公式中增加与 Signature 有关的脱耦合项, 即改进的 ab 公式^[3]

$$E(I) = a[\sqrt{1 + bI(I+1)} - 1] + (-1)^{I+1/2} (I+1/2) A[a_1 - b_1 I(I+1)] \quad (2)$$

而得到解释. 根据公式(2), 对一些奇质量超形变核的 Signature 伙伴带同时拟合, 结果是令人满意的^[3].

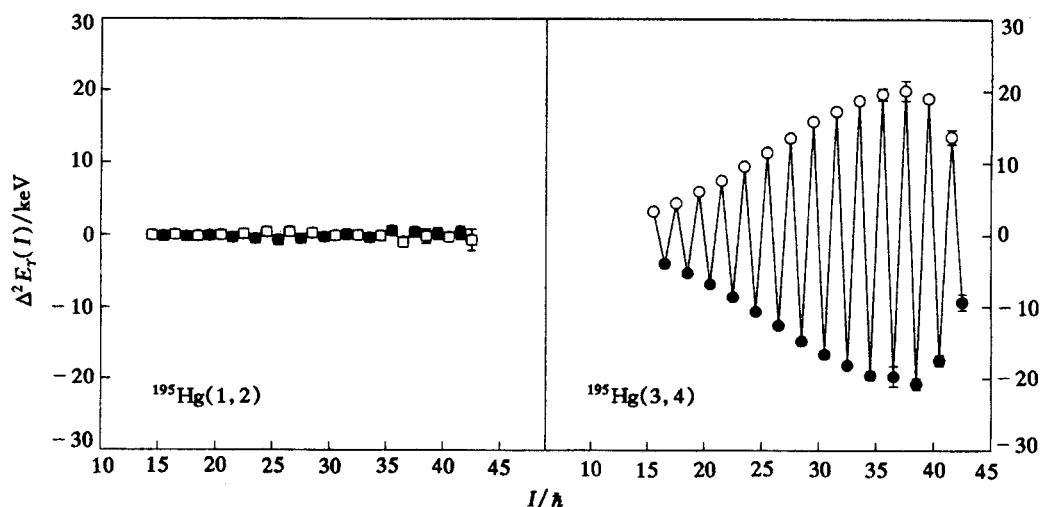


图 1 ^{195}Hg 超形变 Signature 伙伴带的 $\Delta I = 1$ 颤动

采用(2)式拟合, 得到的参数为:

$$\text{第 1, 2 带 } a = 7.5683 \times 10^4 \text{ keV}, \quad b = 1.3280 \times 10^{-4},$$

$$a_1 = -0.03697, \quad b_1 = -0.1828 \times 10^{-4};$$

$$\text{第 3, 4 带 } a = 6.6701 \times 10^4 \text{ keV}, \quad b = 1.6368 \times 10^{-4},$$

$$a_1 = 0.5514, \quad b_1 = 0.2631 \times 10^{-4}.$$

最近, 在 $A \sim 190$ 区又观测到 ^{195}Hg 的两对 Signature 伙伴带^[8], 分别是 $^{195}\text{Hg}(1, 2)$ 和 $^{195}\text{Hg}(3, 4)$. 作为对文献 [3] 的补充. 图 1 显示了这两对 Signature 伙伴带 $\Delta I = 1$ 颤动的变化规律. 可以看到, Signature 伙伴带 $^{195}\text{Hg}(3, 4)$ 表现出明显的 $\Delta I = 1$ 颤动. 而 Signature 伙伴带 $^{195}\text{Hg}(1, 2)$ $\Delta I = 1$ 颤动的幅度相对来说很小.

3 奇质量核超形变带的带首劈裂

在前一部分,简单地讨论了奇质量核超形变核的 $\Delta I = 1$ 颤动,需要指出的是,在上面的分析中,只涉及到超形变带的 $E2$ 跃迁能量,与这些 Signature 伙伴带的相对位置无关.下面分析一下奇质量核超形变带 $M1$ 跃迁能量.

已观测到带间 $M1$ 跃迁能量的奇质量核超形变 Signature 伙伴带有: $^{193}\text{Tl}(1, 2)^{[9]}$ 、 $^{193}\text{Hg}(1,2a)^{[10]}$ 、 $^{193}\text{Hg}(3,2b)^{[10]}$ 、 $^{195}\text{Tl}(1,2)^{[11]}$ 、 $^{195}\text{Pb}(5,6)^{[12]}$. 用改进的 ab 公式 (2) 拟合上述几对 Signature 伙伴带的 $E2$ 跃迁能量,如果这些 Signature 伙伴带间没有额外的劈裂,根据拟合参数计算出的 $M1$ 跃迁能量当然应当与实验值一致. 表 1—5 中列出了这样计算出的 $M1$ 跃迁能量值及相应的实验值. 可以看出,对于 $^{193}\text{Tl}(1,2)$, 计算值和实验值基本上符合,相差仅 1keV 左右(见表 1). 对于 $^{193}\text{Hg}(1,2a)$, 它的第 1 带,计算值比实验值系统地大 13keV

表 1 超形变 Signature 伙伴带 $^{193}\text{Tl}(1,2)$ $M1$ 跃迁能量的计算值与实验值

第 1 带			第 2 带		
$E_\gamma(I \rightarrow I-1)/\text{keV}$		自旋 I 指定值	$E_\gamma(I \rightarrow I-1)/\text{keV}$		自旋 I 指定值
实验值	计算值		实验值	计算值	
	76.8	15/2		68.5	13/2
	97.3	19/2		89.2	17/2
118.9	117.8	23/2	108.0	109.6	21/2
139.2	138.2	27/2	128.3	129.7	25/2
160.1	158.9	31/2	148.2	149.3	29/2
180.6	179.5	35/2	167.4	168.4	33/2
201.4	200.1	39/2	185.8	186.9	37/2
221.5	220.8	43/2	203.5	204.8	41/2
	241.6	47/2		222.0	45/2
	262.4	51/2		238.5	49/2
				254.2	53/2

实验数据取自文献[9]. 通过拟合得到的参数为: $a = 7.4532 \times 10^4 \text{keV}$, $b = 1.3982 \times 10^{-4}$, $a_1 = -0.0176$, $b_1 = 0.7324 \times 10^{-4}$

左右,而第 2 带,计算值比实验值系统地小 13keV 左右,明显地显示出 Signature 不同的两个带之间存在能级的总体移动. 其它的 Signature 伙伴带 $^{193}\text{Hg}(3,2b)$ 、 $^{195}\text{Tl}(1,2)$ 、 $^{195}\text{Pb}(5,6)$ 的结果与 $^{193}\text{Hg}(1,2a)$ 类似,只是能级总体移动的幅度小一些. 这说明在这些超形变带中,除了转动哈密顿量中的 Coriolis 项导致的 Signature 劈裂外,还应该存在与自旋无关的整体劈裂. 相应地,能谱公式 (2) 又应该进一步修改为:

$$E(I) = a[\sqrt{1 + bI(I+1)} - 1] + (-1)^{I+1/2}(I+1/2)A[a_1 - b_1I(I+1)] + (-1)^{I+1/2}E_0. \quad (3)$$

由于新增加的项 $(-1)^{I+1/2}E_0$ 可以通过带首处两个伙伴带的劈裂加以确认,故可称为带首劈裂. 产生这一项的原因,可能是转动哈密顿量中的反冲项. 具体地说,对于轴对称的变形核,如果有绕某一垂直于对称轴的轴转动 180° 不变的对称性,选择适当的相因子,

表2 超形变Signature伙伴带¹⁹³Hg(1,2a)M1跃迁能量的计算值与实验值

第 1 带			第 2a 带		
$E_{\gamma}(I \rightarrow I-1)/\text{keV}$		自旋 I 指定值	$E_{\gamma}(I \rightarrow I-1)/\text{keV}$		自旋 I 指定值
实验值	计算值		实验值	计算值	
	90.0	15/2		80.0	17/2
	112.7	19/2		99.4	21/2
121.1	134.5	23/2	132.2	119.2	25/2
141.6	155.2	27/2	152.9	139.5	29/2
160.7	174.7	31/2	173.7	160.4	33/2
179.3	192.8	35/2		181.8	37/2
196.9	209.3	39/2		204.1	41/2
212.3	224.0	43/2		227.1	45/2
226.4	236.8	47/2		251.1	49/2
	247.6	51/2		276.2	53/2
	256.1	55/2		302.5	57/2

实验数据取自文献[10]. 通过拟合得到的参数为: $a = 4.5568 \times 10^4 \text{keV}$, $b = 2.3622 \times 10^{-4}$, $a_1 = 0.1354$, $b_1 = 2.5282 \times 10^{-4}$

表3 超形变Signature伙伴带¹⁹³Hg(3,2b)M1跃迁能量的计算值与实验值

第 1 带			第 2 带		
$E_{\gamma}(I \rightarrow I-1)/\text{keV}$		自旋 I 指定值	$E_{\gamma}(I \rightarrow I-1)/\text{keV}$		自旋 I 指定值
实验值	计算值		实验值	计算值	
	82.4	15/2		88.1	17/2
	103.9	19/2		108.5	21/2
122.6	125.2	23/2	132.2	128.7	25/2
142.7	146.1	27/2	152.9	148.6	29/2
162.5	166.6	31/2	173.7	168.4	33/2
182.6	186.7	35/2	192.3	187.8	37/2
201.9	206.3	39/2	212.9	206.9	41/2
220.5	225.3	43/2		225.7	45/2
	243.8	47/2		244.2	49/2
	261.7	51/2		262.3	53/2

实验数据取自文献[10]. 通过拟合得到的参数为: $a = 5.3482 \times 10^4 \text{keV}$, $b = 2.008 \times 10^{-4}$, $a_1 = 0.0294$, $b_1 = 0.2158 \times 10^{-4}$

单粒子态 χ_{Ω} (例如 Nilsson 态, 宇称为 $(-1)^l$)有

$$\begin{aligned}
 R_2(\pi)\chi_{\Omega} &= \sum_{\Lambda} a_{\Lambda} R_2(\pi)|N\Lambda\Sigma\rangle = \\
 &= -i \sum_{\Lambda} a_{\Lambda} (-1)^{l+\Lambda+1/2+\Sigma} |Nl-\Lambda-\Sigma\rangle = \\
 &= -i(-1)^{l+\Omega+1/2} \chi_{-\Omega}, \quad (4)
 \end{aligned}$$

$$R_2^2(\pi)\chi_{\Omega} = -\chi_{\Omega}. \quad (5)$$

如果奇质量核有三个(或更多的)粒子不成对, 并且其中有两个粒子占据不同的轨道

表4 超形变Signature伙伴带¹⁹³Tl(1,2)M1跃迁能量的计算值与实验值

第 1 带			第 2 带		
$E_{\gamma}(I \rightarrow I-1)/\text{keV}$		自旋I 指定值	$E_{\gamma}(I \rightarrow I-1)/\text{keV}$		自旋I 指定值
实验值	计算值		实验值	计算值	
	52.9	11/2		73.7	13/2
	72.3	15/2		95.7	17/2
99.0	91.8	19/2	109.0	117.3	21/2
119.5	111.6	23/2	129.5	138.2	25/2
140.5	131.5	27/2	149.0	158.4	29/2
161.5	151.8	31/2	168.0	177.8	33/2
181.0	172.4	35/2		196.3	37/2
	193.4	39/2		213.8	41/2
	214.8	43/2		230.1	45/2

实验数据取自文献 [11]. 通过拟合得到的参数为: $a = 6.86 \times 10^4 \text{keV}$, $b = 1.5324 \times 10^{-4}$, $a_1 = -0.0871$, $b_1 = -1.5479 \times 10^{-4}$

表5 超形变Signature伙伴带¹⁹³Pb(5,6)M1跃迁能量的计算值与实验值

第 1 带			第 2 带		
$E_{\gamma}(I \rightarrow I-1)/\text{keV}$		自旋I 指定值	$E_{\gamma}(I \rightarrow I-1)/\text{keV}$		自旋I 指定值
实验值	计算值		实验值	计算值	
	53.5	11/2		75.4	13/2
	72.8	15/2		98.2	17/2
101.0	92.1	19/2	112.0	120.7	21/2
122.0	111.3	23/2	132.9	142.9	25/2
142.5	130.5	27/2	153.2	164.6	29/2
163.0	149.5	31/2	172.8	185.9	33/2
182.7	168.4	35/2	193.0	206.6	37/2
201.9	187.1	39/2	211.7	226.8	41/2
221.0	205.8	43/2	231.0	246.3	45/2
	224.3	47/2		265.1	49/2
	242.7	51/2		283.2	53/2
	261.0	55/2			

实验数据取自文献 [12]. 通过拟合得到的参数为: $a = 6.1429 \times 10^4 \text{keV}$, $b = 1.7410 \times 10^{-4}$, $a_1 = 0.0899$, $b_1 = 0.4948 \times 10^{-4}$

χ_{Ω} 和 $\chi_{\Omega'}$, 当 $\Omega' = \Omega'' = 1/2$ 时, 原子核的总波函数可以写为:

$$\frac{1 + e^{i\pi\alpha} R_2(\pi)}{\sqrt{2}} [\chi_{\Omega} \chi_0^{(+)} D_{MK}^I] = \frac{1}{\sqrt{2}} \chi_0^{(+)} [\chi_{\Omega} D_{MK}^I - (-1)^{I+1/2} \pi \chi_{-\Omega} D_{M-K}^I], \quad (6)$$

或

$$\frac{1 + e^{i\pi\alpha} R_2(\pi)}{\sqrt{2}} [\chi_{\Omega} \chi_0^{(-)} D_{MK}^I] = \frac{1}{\sqrt{2}} \chi_0^{(-)} [\chi_{\Omega} D_{MK}^I + (-1)^{I+1/2} \pi \chi_{-\Omega} D_{M-K}^I]. \quad (7)$$

其中 $\Omega = K, \pi = (-1)^{I+I'+I''}$

$$\chi_0^{(+)} = \frac{1}{\sqrt{2}} [\chi_{\Omega'} \chi_{-\Omega''} + (-1)^{\alpha+1/2} \chi_{-\Omega'} \chi_{\Omega''}] , \quad (8)$$

$$\chi_0^{(-)} = \frac{1}{\sqrt{2}} [\chi_{\Omega'} \chi_{-\Omega''} - (-1)^{\alpha+1/2} \chi_{-\Omega'} \chi_{\Omega''}] . \quad (9)$$

这时反冲项 $j_+j_- + j_-j_+$ 对转动能有不可忽略的贡献,

$$\langle \chi_0^{(+)} | j_+j_- + j_-j_+ | \chi_0^{(+)} \rangle = (-1)^{\alpha+1/2} \langle \chi_{\Omega'} | j_+ | \chi_{-\Omega'} \rangle \langle \chi_{-\Omega''} | j_- | \chi_{\Omega''} \rangle , \quad (10)$$

$$\langle \chi_0^{(-)} | j_+j_- + j_-j_+ | \chi_0^{(-)} \rangle = (-1)^{\alpha-1/2} \langle \chi_{\Omega'} | j_+ | \chi_{-\Omega'} \rangle \langle \chi_{-\Omega''} | j_- | \chi_{\Omega''} \rangle . \quad (11)$$

如果 $\Omega' = \Omega'' \neq 1/2$, 则反冲项 $j_+j_- + j_-j_+$ 对转动能有高阶的贡献. 这就是奇质量核超形变带存在带首劈裂的可能机制.

综上所述, 奇质量核超形变带存在两种 Signature 劈裂. 一种是 $\Delta I = 1$ 颤动, 另外的一种是带首劈裂. 在分析奇质量核超形变带 $M1$ 跃迁能量的性质时, 带首劈裂的存在, 对分析结果有很大的影响, 因而, 对这一问题的深入讨论是很有必要的.

参 考 文 献

- [1] Byrski T, Beck F A et al. Phys. Rev. Lett., 1990, **64**:1650
Stephens F S, Deleplanque M A et al. Phys. Rev. Lett., 1990, **65**:301
- [2] Hibotte S, Andrews H R et al. Phys. Rev. Lett., 1993, **71**:4299
B Cederwall, R F Janssens et al. Phys. Rev. Lett., 1994, **72**:3150
- [3] Wu Chongshi. High Energy Physics and Nuclear Physics (in Chinese), 1997, **21**(7):621—626
(吴崇试, 高能物理与核物理, 1997, **21**(7):621—626)
- [4] Bengtsson R, Frisk H et al. Nucl. Phys., 1984, **A415**:189;
Drissi S, Li Ziping et al. Nucl. Phys., 1996, **A600**:63
- [5] Bengtsson R, Garrett J D (1984). Lund Mph-84 / 18, The Cranking Model—Theoretical and Experimental Basis
- [6] Ring P, Shuck P. The Nuclear Many-body Problem, (Springer-verlag, 1980)
- [7] Hara K, Iwasaki S. Nucl. Phys., 1984, **A430**:175
- [8] Hackman G, Krucken R et al. Phys. Rev., 1997, **C55**:148
- [9] Bouneau S, Wilson A N et al. Phys. Rev., 1996, **C53**:9
- [10] Joyce M, Sharpey-Schafer J F et al. Phys. Rev. Lett., 1993, **71**:2176
- [11] Ducroux I, Astier A et al. Phys. Lett., 1994, **B341**:6
- [12] Duprat I, Azaiez F et al. Phys. Rev., 1996, **C53**:2706

Two Kinds of Signature Splittings in Odd- A Superdeformed Nuclei

Li Long

(Department of Physics, Peking University, Beijing 100871)

Abstract Two kinds of signature splittings, the $\Delta I = 1$ staggering and the band head splitting, are studied in odd- A superdeformed nuclei in the $A \sim 190$ mass region. It is shown that the band head splittings exist in the signature partner bands of some odd- A superdeformed nuclei by means of analysing the experimental $M1$ transition energies between the partner bands. A possible mechanism is proposed for this phenomenon.

Key words superdeformed band, Signature splitting, $\Delta I = 1$ staggering, band head splitting