

# $^{79}\text{Kr}$ 中 $K^\pi = \frac{5^-}{2}$ 转动带的带交叉 及其形状演化

潘强岩 罗亦孝

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

M. De Poli G. de Angelis C. Fahlander D. Bazzacco

E. Farnea A. Gadea D. R. Napoli P. Spolaore

(意大利国家核物理研究院 LEGNARO 国家实验室)

**摘要** 通过 $^{55}\text{Mn}(^{30}\text{Si}, \alpha\text{pn})$ 反应研究了 $^{79}\text{Kr}$ 的高自旋态. 利用 GASP 阵列配以由 40 个  $\Delta E$ - $ESi(\text{Au})$  望远镜所组成的带电粒子球实现  $\gamma\gamma\gamma$ -带电粒子符合测量. 在  $K^\pi = \frac{5^-}{2}$  转动带上发现了由 10 条新  $\gamma$  跃迁所构成的 9 条新能级. 将其中  $\alpha = +\frac{1}{2}$  和  $\alpha = -\frac{1}{2}$  伴带分别推到位于  $\left(\frac{37^-}{2}\right)8992\text{keV}$  和  $\left(\frac{59^-}{2}\right)20132\text{keV}$  能级. 并用推转壳模型作了分析讨论.

**关键词**  $\gamma\gamma\gamma$ -带电粒子符合 组态 核形状  $\pi g_{9/2}$  和  $\nu g_{9/2}$  转动排列 带交叉

## 1 引言

位于  $A \approx 80$  核区中的原子核呈现了十分丰富的核结构现象. 核形状往往强烈依赖于  $Z, N$  和角动量值; 占据  $g_{9/2}$  轨道的未配对核子的核形状驱动效应十分明显; 长椭、扁椭和三轴形变以及高自旋超形变出现共存. 通过对位于  $A \approx 80$  中重区域原子核的高自旋态的研究, 可揭示单粒子和集体自由度之间的相互作用. 它成为检验核结构模型的理想核区.

通过对  $\beta^+$  衰变的研究, 首先获得了  $^{79}\text{Kr}$  晕带的带头:  $\frac{9^+}{2}$  149keV 能级<sup>[1]</sup>. J. S.

Clemenets 等人利用 $^{10}\text{B}$ 引起反应,首先做了 $^{79}\text{Kr}$ 在束实验,给出了建立在 $\frac{9^+}{2}$  149keV 能级上的去耦转动带<sup>[2]</sup>. 后来,利用 $\alpha$ 束的在束实验将 $K^\pi = \frac{7^+}{2}$ 和 $K^\pi = \frac{5^-}{2}$ 转动带分别推到位于 $\frac{27^+}{2}$  5523keV和 $\frac{23^-}{2}$  4708keV能级<sup>[3-6]</sup>. G.D.Johns 等人<sup>[7]</sup>利用 $^{65}\text{Cu}(^{18}\text{O},\text{p}3\text{n})$ 反应,给出了 $^{79}\text{Kr}$ 高自旋态的最新结果,将 $K^\pi = \frac{7^+}{2}$ 和 $K^\pi = \frac{5^-}{2}$ 转动带分别推到位于 $\left(\frac{45^+}{2}\right)$  11822keV和 $\left(\frac{31^-}{2}\right)$  6446keV能级. 在 $K^\pi = \frac{7^+}{2}$ 转晕带上,观测到了位于转动频率 $\hbar\omega \approx 0.75\text{MeV}$ 处的第二交叉. 使该带从具有 $\text{vg}_{9/2}$ 组态的近扁椭过渡到具有 $\text{vg}_{9/2} \otimes \pi g_{9/2}^2$ 组态的近长椭,最后过渡到 $\text{vg}_{9/2}^3 \otimes \pi g_{9/2}^2$ 组态,从而回到近扁椭的形状演化过程<sup>[7]</sup>. 本文报道在对 $^{79}\text{Kr}$ 高自旋态谱学研究中实验的新发现. 将 $K^\pi = \frac{5^-}{2}$ 转动带推到 $\left(\frac{59^-}{2}\right)$  20132keV能级,发现了由一对 $\text{vg}_{9/2}$ 转动排列所导致的第二带交叉和很可能由第二对 $\pi g_{9/2}$ 转动排列导致的在 $(\pi, \alpha) = \left(-, -\frac{1}{2}\right)$ 伴带中的第三带交叉的出现.

## 2 实验描述和数据分析

实验是在意大利核物理国家研究院 Legnaro 国家实验室进行的. 利用 $^{55}\text{Mn}(^{30}\text{Si}, \alpha\text{pn})$ 反应布居了 $^{79}\text{Kr}$ 的高自旋态. 130MeV  $^{30}\text{Si}^{8+}$ 束流是由该实验室 XTU 串行加速器提供,流强为 3~4pA.  $^{55}\text{Mn}$ 靶是由厚度均为 $400\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 两片自支撑薄膜所构成,中间夹着厚度为 1mm 的空靶架. 用该实验室的 GASP 阵列进行 $\gamma\gamma\gamma$ 符合测量. 其融合反应中所蒸发的 p 和 $\alpha$ 粒子的鉴别及其多重性是由 40 个 $\Delta E-E$  Si(Au)望远镜所组成的带电粒子球提供的. 事件的点火条件为:至少有 3 个反康 Ge 探测器同至少有一个 $\Delta E-E$  Si(Au)望远镜或在 BGO 内球中至少有 4 块 BGO 单元同时点火. 5 天实验中,共收集到约  $1.4 \times 10^9$  个事件.

根据带电粒子在 $\Delta E$ 和 $E$  Si(Au)探测器中沉积的能量,用 $\Delta E-E$ 技术实现 p 和 $\alpha$ 的鉴别及其多重性的确定. 将所收集到的每个事件根据其 p 和 $\alpha$ 的出射道和 p、 $\alpha$ 的多重性进行分类并建立相应的 $\gamma\gamma\gamma$ 矩阵. 从而实现了 $\gamma\gamma\gamma$ -带电粒子的符合测量. 由于布居 $^{79}\text{Kr}$ 的高自旋态是通过 $\alpha\text{pn}$ 反应道实现的. 因此,将带电粒子球上仅探测到一个质子和一个 $\alpha$ 粒子的事件挑选出来,建立 $\alpha\text{p}$ 门的 $\gamma\gamma\gamma$ 矩阵,并用此矩阵建立 $^{79}\text{Kr}$ 的纲图. 在收集到的  $1.4 \times 10^9$  个事件中,属于 $\alpha\text{p}$ 事件数为  $1.9 \times 10^7$ . 其中 $^{79}\text{Kr} + \alpha\text{pn}$ 和 $^{78}\text{Kr} + \alpha\text{pn}$ 反应道占据事件数分别为 25% 和 63%.

在束实验中,多普勒能移严重影响 Ge 探测器的能量分辨. 由于实验时,带电粒子球测量了 p 和 $\alpha$ 的能量及其出射方向,使得在建立 $\gamma\gamma\gamma$ 矩阵时,可做多普勒能移的校正. 实验

所利用的  $\alpha$ p 出射道中, 多普勒能移校正使  $\gamma$  射线 ( $E_\gamma \approx 1.3\text{MeV}$ ) 能量分辨 (FWHM) 从 11.4keV 提高到 6.8keV.

为了指定能级的自旋和宇称, 实验做了 DCO 测量. 将位于同束流方向成  $90^\circ$  的 8 台 Ge 探测器同位于  $36^\circ$  和  $145^\circ$  的 12 台 Ge 探测器相符合事件构成二维 DCO 矩阵. 如果在已知  $\Delta I = 2$  跃迁上设门, 对于  $E2$  跃迁,  $R_{\text{DCO}} \approx 1.0$ ; 对于  $\Delta I = 1$  跃迁,  $R_{\text{DCO}} (= 0-2)$  值取决于  $E2 / M1$  的混合率  $\delta$  大小; 对于  $E1$  跃迁,  $R_{\text{DCO}} \approx 0.5$ .

### 3 $K^\pi = \frac{5^-}{2}$ 转动带

根据  $\gamma$  跃迁的能量和强度以及  $\gamma\gamma\gamma$  的符合关系, 通过对  $\alpha$ p 门的  $\gamma\gamma\gamma$  矩阵分析, 得到的  $^{79}\text{Kr}$  中  $K^\pi = \frac{5^-}{2}$  转动带如图 1 所示.

其中位于  $\frac{31^-}{2}$  6446keV 能级以下的能级是

已知的<sup>[7]</sup>. 新观测到的 10 条  $\gamma$  跃迁, 能量分别为 418.3、1412.0、1428.5、1570、1616.5、1774、1883、2041、2290 和 2668keV, 将该带的

$\alpha = +\frac{1}{2}$  和  $\alpha = -\frac{1}{2}$  伴带分别推到  $\left(\frac{37^-}{2}\right)$

8992keV 和  $\left(\frac{59^-}{2}\right)$  20132keV 能级. 同时,

实验证实了  $K^\pi = \frac{5^-}{2}$  转动带中已知的低

能部分. 能级的自旋和宇称是根据测得的 DCO 值来指定的. 由于位于该带上部的  $\gamma$  跃迁强度较弱, 无法确定其 DCO 值. 图 1 中给出了相应能级的自旋和宇称 (在小括号中). 图 2 显示了  $K^\pi = \frac{5^-}{2}$  转动带的  $\alpha$

$= -\frac{1}{2}$  伴带双重门投影累加能谱, 其中双

重  $\gamma$  门选在位于  $\alpha = -\frac{1}{2}$  伴带的底部能量

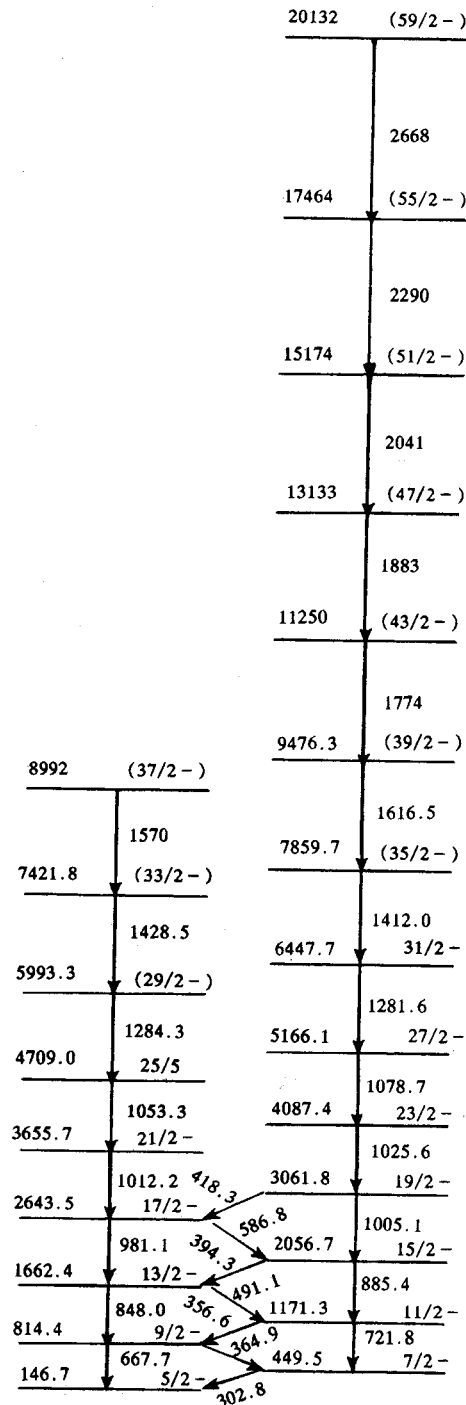


图 1 本工作测得的  $^{79}\text{Kr}$  中  $K^\pi = \frac{5^-}{2}$  转动带

表1  $^{79}\text{Kr}$ 中 $K^\pi = \frac{5^-}{2}$ 转动带的 $\gamma$ 跃迁的初态能级( $E_{\text{lev}}$ )、能量( $E_\gamma$ )、初态和末态的自旋和宇称( $I_i^\pi, I_f^\pi$ )、相对强度( $I_\gamma$ )和DCO值( $R_{\text{DCO}}$ )

$E_{\text{lev}}$ (keV)	$E_\gamma$ (keV)	$I_i^\pi \rightarrow I_f^\pi$	$I_\gamma^{\text{a}}$	$R_{\text{DCO}}$
146.7 <sup>(b)</sup>	146.7 <sup>(b)</sup>	$5/2^- \rightarrow 1/2^-$		
449.5	302.8(4)	$7/2^- \rightarrow 5/2^-$	40(8)	0.75(10)
814.4	667.7(5)	$9/2^- \rightarrow 5/2^-$	52(6)	0.98(12)
814.4	364.9(4)	$9/2^- \rightarrow 7/2^-$	28(6)	0.65(10)
1171.3	356.6(5)	$11/2^- \rightarrow 9/2^-$	6(2)	0.56(8)
1171.3	721.8(6)	$11/2^- \rightarrow 7/2^-$	66(8)	0.95(10)
1662.4	848.0(5)	$13/2^- \rightarrow 9/2^-$	41(8)	1.12(12)
1662.4	491.1(5)	$13/2^- \rightarrow 11/2^-$	10(4)	0.58(8)
2056.7	394.3(5)	$15/2^- \rightarrow 13/2^-$	5(2)	0.60(8)
2056.7	885.4(6)	$15/2^- \rightarrow 11/2^-$	60(10)	1.01(10)
2643.5	586.8(6)	$17/2^- \rightarrow 15/2^-$	4(2)	0.45(10)
2643.5	981.1(6)	$17/2^- \rightarrow 13/2^-$	25(5)	0.90(10)
3061.8	418.3(6)	$19/2^- \rightarrow 17/2^-$	2(1)	
3061.8	1005.1(8)	$19/2^- \rightarrow 15/2^-$	48(8)	0.95(10)
3655.7	1012.2(6)	$21/2^- \rightarrow 17/2^-$	16(3)	1.20(15)
4087.4	1025.6(8)	$23/2^- \rightarrow 19/2^-$	30(6)	1.20(10)
4709.0	1053.3(8)	$25/2^- \rightarrow 21/2^-$	8(3)	1.05(10)
5166.1	1078.7(8)	$27/2^- \rightarrow 23/2^-$	19(4)	1.10(10)
5993.3	1284.3(8)	$(29/2^-) \rightarrow 25/2^-$	4(1)	
6447.7	1281.6(8)	$31/2^- \rightarrow 27/2^-$	12(3)	0.90(10)
7421.8	1428.5(8)	$(33/2^-) \rightarrow (29/2^-)$	2(1)	
7859.7	1412.0(8)	$(35/2^-) \rightarrow 31/2^-$	10(3)	
8992	1570(2)	$(37/2^-) \rightarrow (33/2^-)$	1	
9476.2	1616.5(8)	$(39/2^-) \rightarrow (35/2^-)$	8(2)	
11250	1774(1)	$(43/2^-) \rightarrow (39/2^-)$	7(2)	
13133	1883(2)	$(47/2^-) \rightarrow (43/2^-)$	5(2)	
15174	2041(2)	$(51/2^-) \rightarrow (47/2^-)$	4(1)	
17464	2290(2)	$(55/2^-) \rightarrow (51/2^-)$	2(1)	
20132	2668(2)	$(59/2^-) \rightarrow (55/2^-)$	1	

(a) 强度相对于 $^{79}\text{Kr}$ 转晕带上 $E_\gamma=827.1\text{keV}(13/2^+ \rightarrow 9/2^+)$ 的跃迁(100). 相对强度为一个单位的弱跃迁的误差为60%.

(b) 取自文献[7].

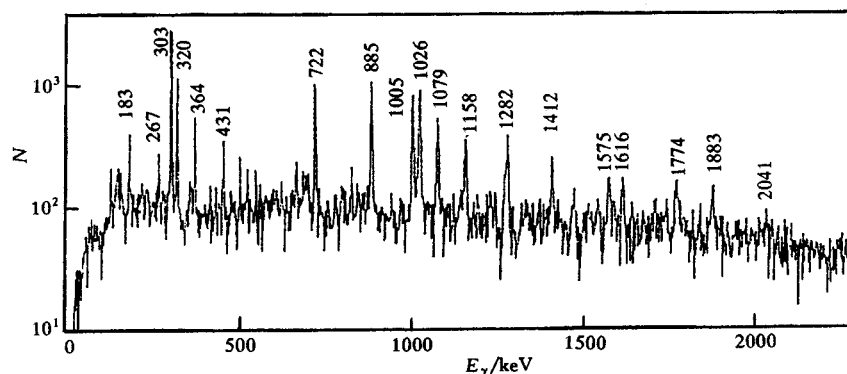


图 2 从 $\alpha p l$ 门的 $\gamma\gamma\gamma$ 矩阵中获得的 $\gamma$ 双重门累加能谱

分别为 722、885、1005、1079 和 1282keV 的  $\gamma$  跃迁的所有可能组合. 由于 1026keV 的  $\gamma$  射线与  $^{79}\text{Kr}$  的晕带上 1026keV  $\gamma$  射线相重叠, 因此, 没有用于拉门. 位于  $\alpha = -\frac{1}{2}$  伴带顶部两条  $\gamma$  射线较弱, 能量分别为 2290 和 2668keV, 其符合关系只能在相应的  $\gamma\gamma$  二维矩阵中得以证实. 属于  $K^\pi = \frac{5^-}{2}$  转动带的  $\gamma$  跃迁能量, 相对强度及其 DCO 值列于表 1 中.

## 4 解释与讨论

当实验观测到转动带的动力学转动惯量  $J^{(2)}$  随转动频率  $\hbar\omega$  发生突变时, 往往隐示着带交叉或其余核结构 (如形状和对效应) 发生变化. 图 3 给出  $^{79}\text{Kr}$  中  $K^\pi = \frac{5^-}{2}$  转动带的  $J^{(2)}$  随  $\hbar\omega$  的变化关系.

在  $\hbar\omega \approx 0.50$  和  $0.65\text{MeV}$  处, 两条伴带均出现  $J^{(2)}$  峰; 在  $\hbar\omega \approx 0.90\text{MeV}$  处,  $\alpha = -\frac{1}{2}$

伴带出现了  $J^{(2)}$  的第 3 个峰. 位于  $\hbar\omega \approx 0.50\text{MeV}$  处的第一个  $J^{(2)}$  峰, 文献 [6, 7] 已作了阐明. 即一对  $\pi g_{9/2}$  排列引起带交叉, 此交叉使  $K^\pi = \frac{5^-}{2}$  转动带从  $\nu f_{5/2}$  组态过渡到

$\nu f_{5/2} \otimes \pi g_{9/2}^2$  组态. 通过对  $^{79}\text{Kr}$  的总位能面 (TRS) 计算可知: 当转动频率  $\hbar\omega$  很小 ( $\sim 0.2\text{MeV}$ ) 时,  $\nu f_{5/2}$  组态位于  $(\beta_2, \gamma) =$

$(0.29, 19^\circ)$  的近长椭圆变占优势. 随着  $\hbar\omega$  的增加, 第一对  $\pi g_{9/2}$  的准粒子拆对排列, 导致了  $K^\pi = \frac{5^-}{2}$  带出现第一交叉. 当  $\hbar\omega \approx 0.5\text{MeV}$  时,  $\nu f_{5/2} \otimes \pi g_{9/2}^2$  组态位于  $(\beta_2, \gamma) =$

$(0.25-0.27, 14^\circ-16^\circ)$  的近长椭圆极小稳定形成, 并取代了  $\nu f_{5/2}$  组态位于  $(\beta_2, \gamma) = (0.29, 19^\circ)$  极小. 随着  $\hbar\omega$  的继续增加, 出现了  $\nu f_{5/2} \otimes \pi g_{9/2}^2$  和  $\nu f_{5/2} \otimes \pi g_{9/2}^2 \otimes \nu g_{9/2}^2$  组态共存, 后者相应的形变为  $(\beta_2, \gamma) = (0.26-0.29, -55^\circ-48^\circ)$ . 这说明,  $\hbar\omega > 0.5\text{MeV}$  时, 位于  $\nu g_{9/2}$  轨道上的中子对有可能发生拆对排列, 单粒子  $\nu g_{9/2}$  轨道驱动原子核发生扁椭圆变并使  $K^\pi = \frac{5^-}{2}$  转动带出现第二交叉. 作为一个例子, 图 4 给出了当  $\hbar\omega = 0.592\text{MeV}$  时,  $^{79}\text{Kr}$

的  $(\pi, \alpha) = \left(-, -\frac{1}{2}\right)$  组态的 TRS 等高图.

图 5 给出了  $(\beta_2, \gamma) = (0.28, 15^\circ)$  和  $(0.26, -55^\circ)$  形变的准粒子罗斯量. 它清楚地显示

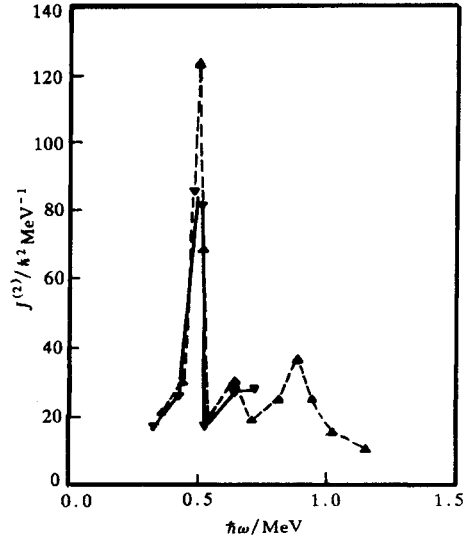
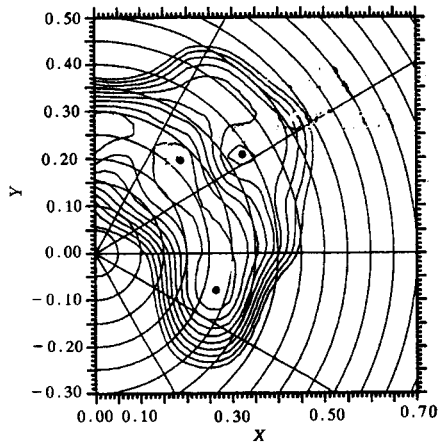


图 3  $K^\pi = \frac{5^-}{2}$  转动带的动力学转动惯量  $J^{(2)}$  随转动频率  $\hbar\omega$  的变化

$$\blacktriangledown \text{ 为 } (\pi, \alpha) = \left(-, +\frac{1}{2}\right);$$

$$\blacktriangle \text{ 为 } (\pi, \alpha) = \left(-, -\frac{1}{2}\right).$$

图 4  $^{79}\text{Kr}$  的  $(\beta_2, \gamma)$  平面上 TRS 等高图

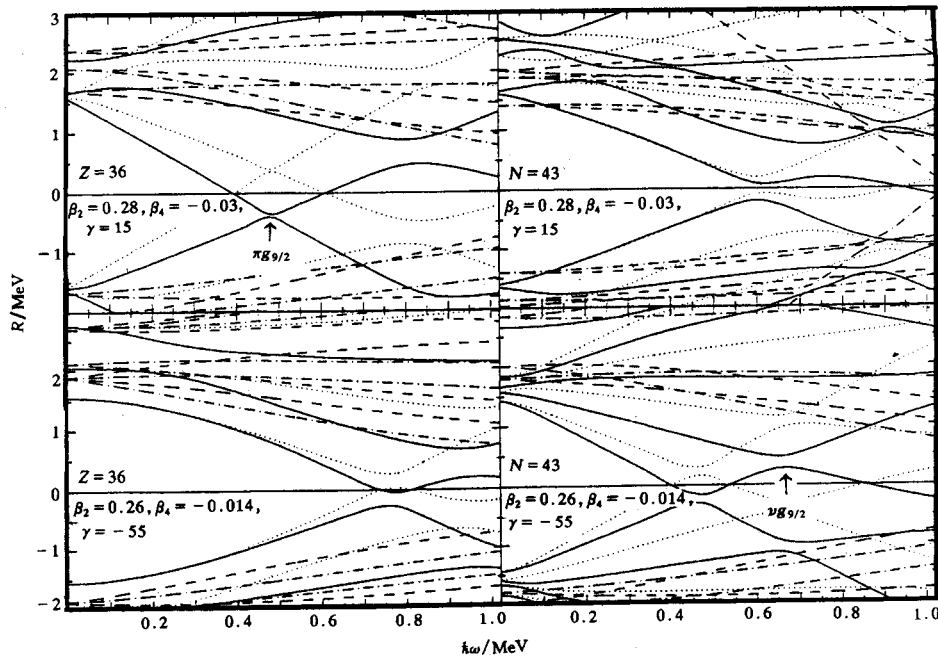
$$X = \beta_2 \sin(\gamma + 30^\circ),$$

$$Y = \beta_2 \cos(\gamma + 30^\circ).$$

了分别在  $\hbar\omega = 0.50$  和  $0.65$  MeV 处, 有一对  $\pi g_{9/2}$  和一对  $\nu g_{9/2}$  发生转动排列, 使  $K^\pi = \frac{5^-}{2}$  转动带出现交叉. 这同实验观测到的交叉频率很好地吻合. 此结果类似于在  $^{79}\text{Kr}$  的正宇称晕带和相邻的核素  $^{81,83}\text{Sr}$ ,  $^{83}\text{Zr}$  中所观测到由  $\pi g_{9/2}$  和  $\nu g_{9/2}$  拆对排列所导致的带交叉.

在 TRS 计算中, 我们发现: 当  $\hbar\omega \geq 0.58$  MeV 时,  $(\beta_2, \gamma) = (0.34, 0^\circ)$  形变出现在  $(\pi, \alpha) = \left(-, -\frac{1}{2}\right)$  组态中, 它同  $(\beta_2, \gamma) = (0.26, -55^\circ)$  形状共存 (如图 4 所示), 并在  $\hbar\omega \geq 0.90$  MeV 时占优势. 但在  $(\pi, \alpha) = \left(-, +\frac{1}{2}\right)$  组态中, 没有发现该形变. 因此, 建议实验中所观测到的

$K^\pi = \frac{5^-}{2}$  转动带的  $\alpha = -\frac{1}{2}$  伴带中位于  $\hbar\omega \approx 0.90$  MeV 的第 3 个  $J^{(2)}$  峰是由于核形变所

图 5 Woods-Saxon 势的  $^{79}\text{Kr}$  的单粒子罗萨斯量  $R$  随转动频率  $\hbar\omega$  的变化

粒子轨道  $(\pi, \alpha)$ : —— 为  $\left(+, +\frac{1}{2}\right)$ ; ..... 为  $\left(+, -\frac{1}{2}\right)$ ; ······ 为  $\left(-, +\frac{1}{2}\right)$ ; - - - 为  $\left(-, -\frac{1}{2}\right)$ . 箭头表示  $g_{9/2}$  核子对排列和带叉处.

致. 很可能是第二对  $\pi g_{9/2}$  拆对排列导致了在  $\hbar\omega \approx 0.90\text{MeV}$  处出现第三带交叉.

## 5 结论

利用  $^{55}\text{Mn}(^{30}\text{Si}, \alpha\text{pn})$  反应布居了  $^{79}\text{Kr}$  的高自旋态. GASP 阵列配以由 40 个  $\Delta E-E$  Si(Au) 望远镜所组成的  $4\pi$  带电粒子球进行  $\gamma\gamma\gamma$ -带电粒子符合测量. 将其中的  $K^\pi = \frac{5^-}{2}$  转动带的  $\alpha = +\frac{1}{2}$  和  $\alpha = -\frac{1}{2}$  两条伴带分别推到  $\left(\frac{37^-}{2}\right)8992\text{keV}$  和  $\left(\frac{59^-}{2}\right)20132\text{keV}$  高自旋态. 根据测得的 DCO 比值指定了激发态的自旋和宇称.

实验观测到  $^{79}\text{Kr}$  中  $K^\pi = \frac{5^-}{2}$  转动带在转动频率  $\hbar\omega \approx 0.65\text{MeV}$  处出现第二带交叉. 通过与推转壳模型的计算相比较, 证实了是由一对  $g_{9/2}$  中子拆对排列的结果所致. 未配对的  $\pi g_{9/2}$  轨道和  $\nu g_{9/2}$  轨道分别具有长椭和扁椭驱动效应. 当从  $\nu f_{5/2} \otimes \pi g_{9/2}^2$  组态过渡到  $\nu f_{5/2} \otimes \pi g_{9/2}^2 \otimes \nu g_{9/2}^2$  组态时, 核形状也从相应近长椭变到近扁椭. 实验中观测到在  $K^\pi = \frac{5^-}{2}$  转动带中的  $\alpha = -\frac{1}{2}$  伴带中出现在转动频率  $\hbar\omega \approx 0.90\text{MeV}$  的第 3 个  $J^{(2)}$  峰. 我们初步认为是: 当  $\hbar\omega \geq 0.58\text{MeV}$  时, 在  $(\pi, \alpha) = \left(-, -\frac{1}{2}\right)$  组态中逐渐形成的位于  $(\beta_2, \gamma) = (0.34, 0^\circ)$  形变替代  $\nu f_{5/2} \otimes \pi g_{9/2}^2 \otimes \nu g_{9/2}^2$  组态的近扁椭圆形变的结果. 这可能是由第二对  $\pi g_{9/2}$  拆对排列导致在  $\alpha = -\frac{1}{2}$  伴带中出现第三次带交叉.

## 参 考 文 献

- [1] Liptak J, Kristiak J. Nucl. Phys., 1978, **A311**:421—444
- [2] Clemenet J S et al. Phys. Rev., 1980, **C21**:1285—1289
- [3] Behar M et al. Phys. Rev., 1982, **C26**:1417—1431
- [4] Kajrys G et al. Phys. Rev., 1983, **C27**:983—1002
- [5] Winter G et al. J. Phys., 1988, **G14**:L13—L15
- [6] Schwengner R et al. Nucl. Phys., 1990, **A509**:550—586
- [7] Johns G D et al. Phys. Rev., 1994, **C50**:2786—2793

## Band Crossings and Shape Changes in the $K^\pi = \frac{5^-}{2}$ Band in $^{79}\text{Kr}$

Pan Qiangyan Luo Yixiao

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

M. De Poli G. de Angelis C. Fahlander D. Bazzacco

E. Farnea A. Gadea D. R. Napoli P. Spolaore

(*Laboratori Nazionali di Legnaro, INFN, 35020 Legnaro (PD), Italy*)

**Abstract** High-spin states in  $^{79}\text{Kr}$  were studied via the fusion evaporation reaction  $^{55}\text{Mn}(^{30}\text{Si}, \alpha\text{pn})$  at 130 MeV. Prompt  $\gamma\gamma\gamma$ -charged particle coincidences were made using the GASP array in conjunction with the  $\Delta E-E$  Si(Au) charged particle ball. Nine new states were found, along with 10 new transitions in the  $K^\pi = \frac{5^-}{2}$  band. The favored  $\left(\alpha = +\frac{1}{2}\right)$  and unfavored  $\left(\alpha = -\frac{1}{2}\right)$  signature sequences were extended up to states of  $\left(\frac{37^-}{2}\right)$  8992 keV and  $\left(\frac{59^-}{2}\right)$  20132 keV, respectively. A cranked shell-model analysis has been made to discuss the experimental results.

**Key words**  $\gamma\gamma\gamma$ -charged particle coincidence, configuration, nuclear shape,  $\pi g_{9/2}$  and  $\nu g_{9/2}$  alignments, band crossing