

^{187}Au 的能级结构及单质子与偶-偶核芯的耦合特性*

朱胜江 陈智超

(清华大学现代应用物理系 北京 100084)

E. F. Zganjar¹ M. O. Kortelahti¹ J. L. Wood² H. K. Carter³

J. H. Hamilton⁴ A. V. Ramayya⁴ X. Zhao⁴

1 (Department of Physics, Louisiana State University, Baton Rouge, La, U. S. A)

2 (School of Physics, Georgia Tech., Atlanta, Ga, U. S. A)

3 (UNISOR, Oak Ridge Associated Universities, Oak Ridge, Tenn., U. S. A)

4 (Physics Department, Vanderbilt University, Tenn., U. S. A)

1992年11月9日收到

摘 要

利用 $^{177}\text{Hf}(^{19}\text{F}, 9\text{n})^{187}\text{Tl}$ 反应和在线同位素分离法, 对 ^{187}Au 低激发态能级结构进行了 γ - γ 符合与 γ -e 符合的测量分析, 束流能量为 175 MeV, 发现了多条新的跃迁, 测量了内转换系数, 扩展了 ^{187}Au 的能级图. 对 ^{187}Au 低激发态下的集体带结构、单质子与不同偶-偶核芯的耦合特性进行了讨论.

关键词 核结构, ^{187}Au , 形状共存, 粒子-芯耦合.

1 引 言

近年来对于缺中子偶-偶核素 Pt 与 Hg 的形状共存的研究^[1]加深了人们对此区核结构的理解. 而对于奇质子核素 Au, 因其质子数 ($Z = 79$) 位于 Pt ($Z = 78$) 与 Hg ($Z = 80$) 之间, 其能级结构不仅体现形状共存的特点, 而且可以显示出质子的单粒子(或空穴)态与相邻的偶-偶核 (Pt, Hg) 芯的相互作用特性^[2]. 经过人们多方面的研究, 发现 Au 的某些奇 A 核能级结构中, 不同的形状共存带之间 $\Delta I = 0$ 的跃迁的内转换系数特别大^[3], 这一点可以用来作为识别两个带是否属于形状共存带的“指纹”. 对于 ^{187}Au 的能级结构的实验研究, 人们也已作了多次报道^[4-6]. 但与相邻核素相比, 研究的深度尚远远不够. 本工作是作为与国外合作研究的一部分, 进一步研究 ^{187}Au 低自旋态下的尽可能完整的能级结构特性. 通过深入的 γ - γ 符合与 γ -e (内转换电子)符合, 发现了许多

* 国家自然科学基金资助.

新的跃迁与能级结构。这里报道主要的实验结果，并对其重要的核结构特点进行讨论。

2 实验与结果

实验是在美国橡树岭国家实验室的 UNISOR 同位素分离器上进行的，所用核反应为 $^{177}\text{Hf}(^{19}\text{F}, 9n)^{187}\text{Tl}$ 与 $^{177}\text{Hf}(^{16}\text{O}, 6n)^{187}\text{Hg}$ ，对应的束流能量分别为 175MeV 与 130 MeV。用在线同位素分离器分离出质量数为 187 的反应产物后，进行 ^{187}Hg 的 β 蜕变 γ 与内转换电子谱的符合测量，从而得到 ^{187}Au 的能级结构数据。以上两种反应可产生 ^{187}Hg 的不同的同质异能态，因而对 ^{187}Au 的自旋态的布居有些区别。分离后的同位素（质量数为 187）沉积在磁带上，定期转动磁带，进行固定时间间隔的数据获取。探测装置由 3 套 Ge(Li) 与一套 Si(Li) 组成，其中两套 Ge(Li) 探测器进行 γ - γ 符合测量，一套 Ge(Li) 与 Si(Li) 进行 γ -e（内转换电子）符合测量。测量内转换电子的同时也得到 X 射线的能谱。UNISOR 的数据获取分析系统用以记录数据。具有时间关联的二重符合事件用“在线获取”方法逐个记录在磁带上，然后进行“离线”数据分析与处理。总计得到 5.8×10^7 个 γ - γ 与 3.3×10^7 个 γ -e（包括 X 射线）符合事件。

在建立了 γ - γ 与 γ -e 两种矩阵后，在清华大学进行了 γ - γ 与 γ -e 符合的数据分析。因橡树岭计算机类型与我们使用的 VAX 机不同，首先进行了数据格式的转换。采用国外较新的数据分析程序包进行符合分析。主要分析由前一个核反应（即 $^{177}\text{Hf}(^{19}\text{F}, 9n)^{187}\text{Tl}$ ）所产生的实验数据。由于此反应产物涉及到 ^{187}Tl 的 β 蜕变链

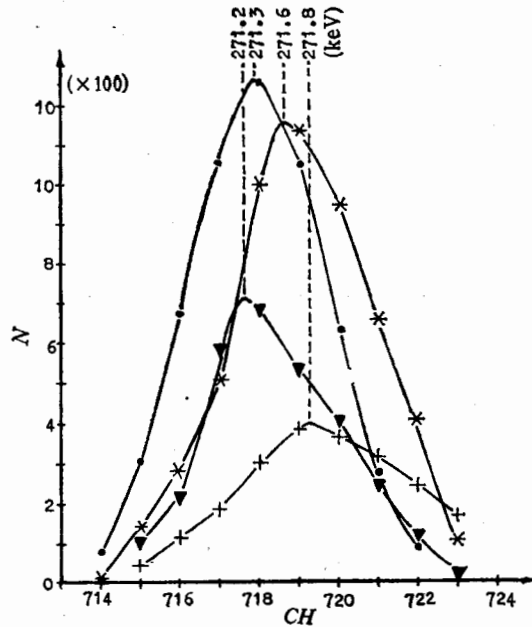


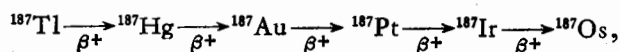
图1 用逐道增加开门能量方法分解 271keV 重峰图

—○—103.3keV; —*—185.5keV; —+—205.4keV; —▼—298.5keV.

表 1 ^{187}Au 的内转换系数和 γ 跃迁多极性

$E_{\gamma}(\text{keV})$	理论值 $\alpha_K \times 10^3$			实验值 $\alpha_K \times 10^3$	γ 跃迁多极性	$I^{\pi}_i \rightarrow I^{\pi}_f$
	E1	E2	M1			
130.4	170	450	2700	2652(257)	M1 + E2	9/2 ⁻ → 7/2 ⁻
142.8	137	376	2225	2523(103)	M1	11/2 ⁻ → 13/2 ⁻
153.5	120	321	1816	1654(62)	M1 + E2	
153.8	120	321	1816	1165(55)	M1 + E2	7/2 ⁻ → 5/2 ⁻
185.6	73	205	1150	104(9)	E1	7/2 ⁻ → 5/2 ⁺
203.4	57	164	826	476(14)	M1 + E2	3/2 ⁺ → 1/2 ⁺
205.4	56	160	804	422(18)	M1 + E2	7/2 ⁻ → 9/2 ⁻
220.8	46	134	658	198(9)	M1 + E2	5/2 ⁺ → 3/2 ⁺
233.4*	41	116	563	116	E2	13/2 ⁻ → 9/2 ⁻
240.3	38	108	520	116(6)	E2	5/2 ⁺ → 1/2 ⁺
255.0	33	93	441	506(19)	M1	7/2 ⁺ → 5/2 ⁺
257.3	32	91	440	316(36)	M1 + E2	11/2 ⁺ → 9/2 ⁺
271.3	28	80	372	407(19)	M1	
271.6	28	80	372	201(8)	M1 + E2	5/2 ⁺ → 3/2 ⁺
271.8	28	80	372	475(38)	M1	
284.2	25	71	329	218(22)	M1 + E2	
298.5	22	63	288	67(4)	E2	13/2 ⁻ → 9/2 ⁻
300.3	22	62	280	311(28)	M1	5/2 ⁺ → 3/2 ⁺
319.2	19	54	240	52(4)	E2	15/2 ⁻ → 11/2 ⁻
322.8	19	52	233	504(15)	M1 + E2 + E0	9/2 ⁻ → 9/2 ⁻
334.7	17	48	211	59(8)	E2	17/2 ⁻ → 13/2 ⁻
349.4	16	43	188	99(13)	M1 + E2	
363.4	14	39	169	254(27)	M1	9/2 ⁻ → 7/2 ⁻
376.2	13	36	154	136(9)	M1 + E2	11/2 ⁻ → 9/2 ⁻
387.9	12	34	142	787(47)	M1 + E2 + E0	13/2 ⁻ → 13/2 ⁻
392.2	12	33	138	240(16)	M1	5/2 ⁺ → 3/2 ⁺
393.4	12	33	137	207(9)	M1	7/2 ⁺ → 5/2 ⁺
407.5	11	30	125	219(22)	M1	9/2 ⁻ → 7/2 ⁻
410.3	11	30	122	103(12)	M1 + E2	11/2 ⁺ → 9/2 ⁺
435.2	10	26	104	163(17)	M1	5/2 ⁺ → 3/2 ⁺
438.8	9	25	102	29(3)	E2	13/2 ⁺ → 9/2 ⁺
449.4	9	24	76	33(21)	E2	15/2 ⁻ → 11/2 ⁻
459.5	9	23	90	77(11)	M1 + E2	13/2 ⁻ → 11/2 ⁻
462.0	8	23	89	86(7)	M1 + E2	15/2 ⁻ → 13/2 ⁻
470.2	8	22	85	27(3)	E2	9/2 ⁺ → 5/2 ⁺
472.5	8	22	84	17(3)	E2	11/2 ⁺ → 7/2 ⁺
476.2	8	21	82	27(5)	E2	9/2 ⁺ → 5/2 ⁺
581.7	5	13	50	133(26)	M1	7/2 ⁺ → 5/2 ⁺

* 归一到 E2 跃迁



虽然经过质量分离,在 ^{187}Au 的激发态退激 γ 谱中仍有其它大量的干扰谱线,如 ^{187}Pt , ^{187}Ir 等,加之 ^{187}Au 的多个重峰,使数据分析极其复杂。由内转换电子谱中的 X 射线与 γ

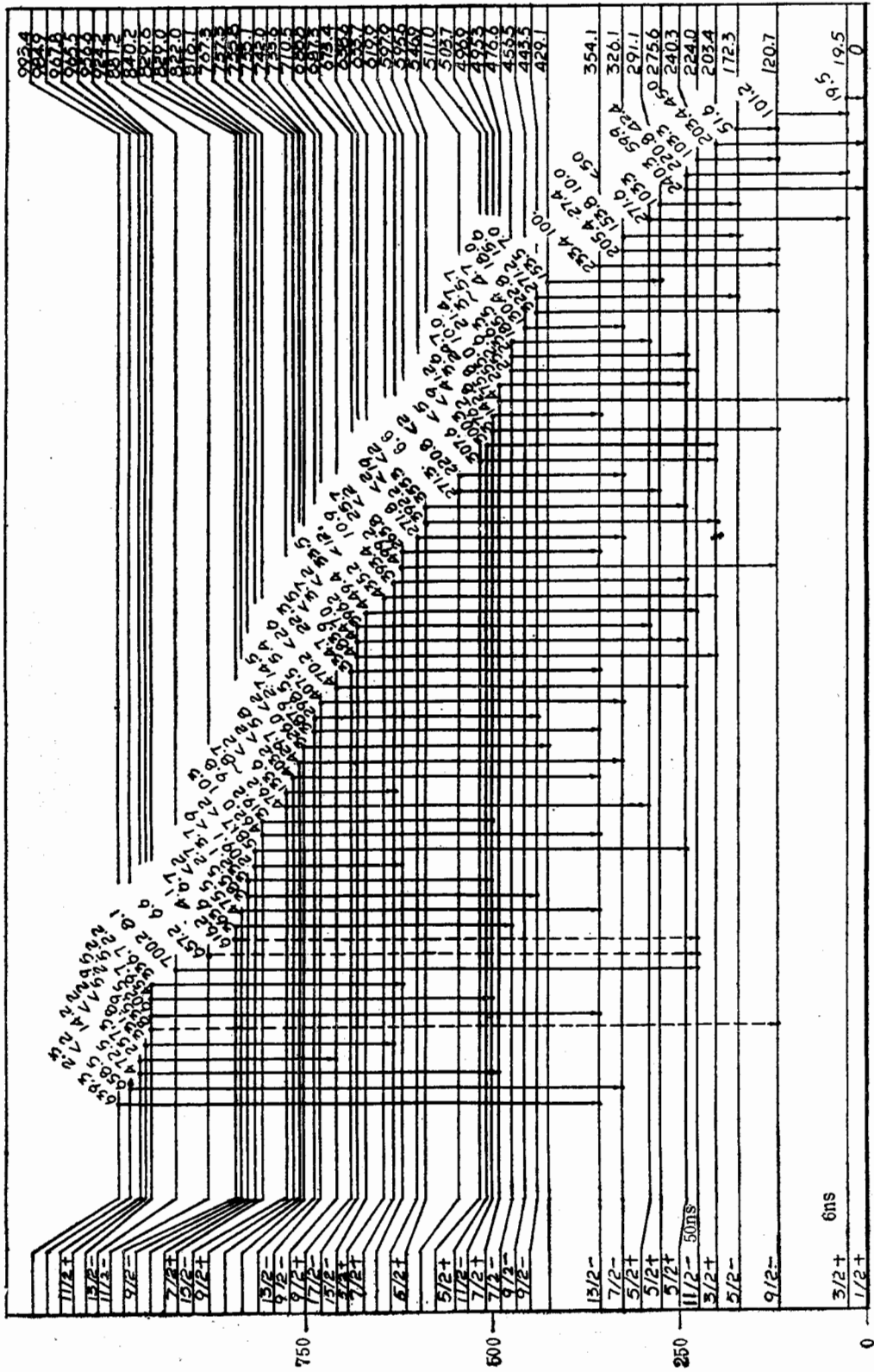


图 2(a) ^{187}Au 能级图 (1)
 实线由符合分析得到, 虚线由投影谱分析得到, 能量单位为 keV, 并标出相对跃迁强度。

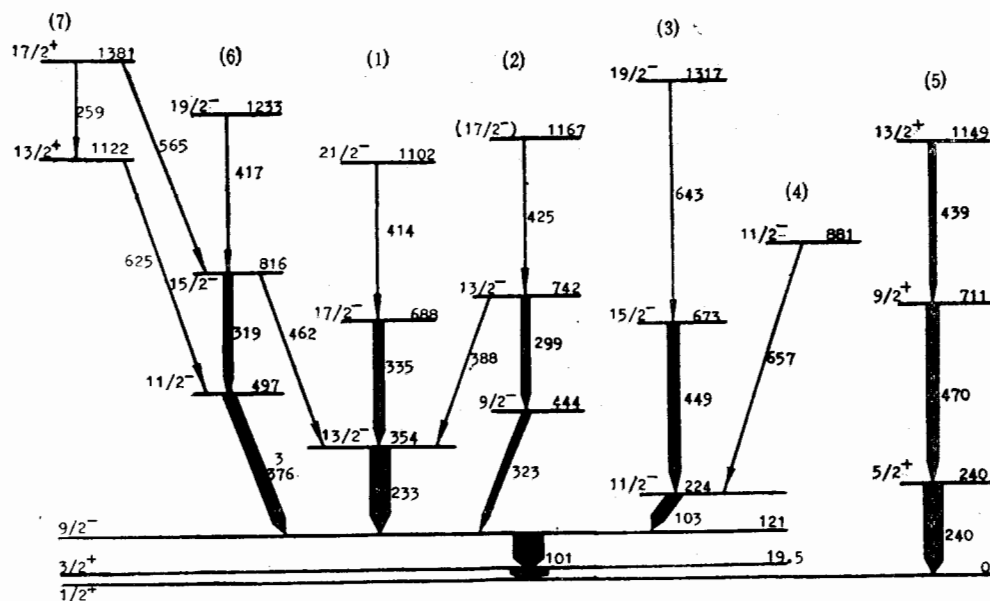


图3 ^{187}Au 的带结构

射线的符合可以剔除一些干扰峰,但 ^{187}Au 的弱峰在 X- γ 符合中很难识别。主要由“开门”进行 γ - γ 符合分析识别 ^{187}Au 的 γ 跃迁谱线。对于复杂的多重峰,采用文献[4]中逐道移动开门道址求相应符合峰面积法进行分解,即沿 γ - γ 符合矩阵的一个轴在多重峰附近开一系列“窄门”,逐道增加开门能量,在所得 γ 符合谱中,求出一系列与此重峰符合的不同 γ 能量的峰面积,则得到一系列“门能量”——峰面积计数曲线,曲线的最大值点即为重峰分解后的能量,再由 γ - γ 符合关系确定该 γ 射线在能级图中的跃迁位置。图1

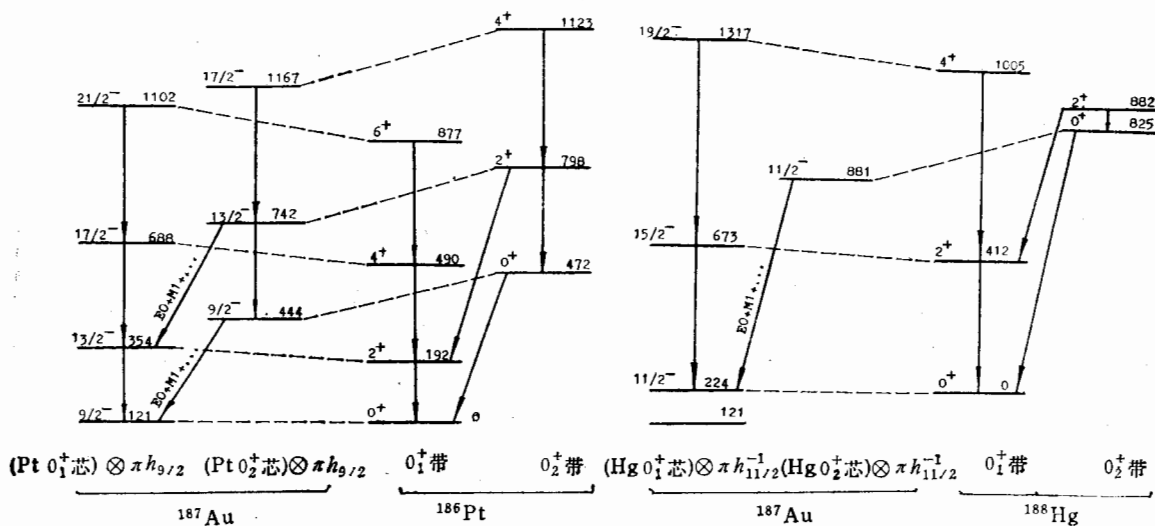


图4 单质子 $\pi h_{9/2}$ 粒子态与 ^{186}Pt 芯耦合示意图

图5 单质子 $\pi h_{11/2}^{-1}$ 空穴态与 ^{188}Hg 芯耦合示意图

为 271keV 4 重峰分解的例子。横坐标为沿 271keV 峰附近开门的中心道位, 纵坐标为符合谱上峰面积, 4 条曲线对应 4 个符合峰, 将 271keV 的 4 重峰分开 (如曲线顶部所示)。图 2 为新建的 ^{187}Au 低激发态的能级图。图中标出了 γ 跃迁的能量、相对强度、各跃迁的初末态能级的能量。共识别 84 条能级, 111 条 γ 跃迁谱线。与以前的数据^[7]相比, 新发现 41 条能级, 65 条跃迁。由 γ - γ 及 γ -e 符合分析, 共得到 38 个内转换系 (见表 1), 验证并扩展了以前的数据, 由此定出 γ 跃迁的多极性及其初末态的自旋与宇称。

3 结果讨论

^{187}Au 质子的费米面位于 $1h_{11/2}$ 与 $1i_{13/2}$ 之间, 中间跃过 $Z = 82$ 的球壳层, 因质子数离满壳层差 3 个, 其结构反映出典型的形状共存特点^[9]。一方面, 由于离满壳层很近, 具有近球形结构特征; 另一方面, 由于高 j 侵入态的影响, 反映出形变的特征。但由于单粒子的作用, 使这种奇 A 核的形状共存较之偶-偶核更加复杂^[9]。

为讨论方便, 将复杂能级图中表征重要核结构特征的集体带结构列于图 3。即使在由 β 蜕变所得到的低激发态谱中, 仍可显示出 7 条集体带结构特点。带 (1) 为建立在 $\pi h_{9/2}$ 组态混合, 带头能量为 121keV 的长椭圆形变带, 带 (2) 也为建立在 $\pi h_{9/2}$ 组态混合, 带头能量为 444keV 的长椭圆形变带, 带 (3) 为建立在 $\pi h_{11/2}$ 质子空穴组态混合能级为 224keV 的扁椭圆形变带, 带 (4) 只观测到一个带头, 能级为 881keV, 也是由 $\pi h_{11/2}$ 质子空穴态组态混合引起的, 此带头在文献 [2, 9] 中也有报道。除了上面 4 个集体带外, 尚有其它 3 个集体带, 这 3 个集体带仅在高自旋态的研究^[5, 6]中作过报道: 带 (5) 为一基态转动带, 带头为 $1/2^+$, 为一扁椭圆形变; 带 (6) 的带头为 $11/2^-$, 能级为 497keV, 可能也是由于 $\pi h_{9/2}$ 质子与核芯激发态的耦合引起的; 带 (7) 的带头为 $13/2^+$, 能级高达 1122keV, 此带与 $i_{13/2}$ 的质子组态混合有关^[9], 为一形变较大的扁椭圆球带。

进一步的研究表明, 前 4 个带, 即带 (1)–(4) 具有重要的特征, 即带 (1) 与带 (2)、带 (3) 与带 (4) 分别为两组形状共存带。这种形状共存带可以用相邻的 $Z \pm 1$ 的偶-偶核芯同单质子的粒子态或空穴态的耦合来解释^[3, 4]。图 4 与图 5 分别为这种耦合的示意图。相邻偶-偶核 $^{186}\text{Pt} (Z = 78)$ 与 $^{188}\text{Hg} (Z = 80)$ 都发现了重要的基于 0_1^+ 与 0_2^+ 的形状共存带^[1, 10]。 ^{186}Pt 的基带 (0_1^+ 带) 为长椭形的, 形状共存带 (0_2^+ 带) 为弱的扁椭形的, ^{187}Au 的 $\pi h_{9/2}$ 单质子态分别与 ^{186}Pt 的这两种芯耦合, 形成了 ^{187}Au 的两个形状共存带 (1) 与 (2)。耦合后的带 (1) 仍为长椭球形, 而带 (2) 则由核芯的弱扁椭球形变为弱长椭球形, 其原因尚需进一步研究。而对于 ^{188}Hg , 其基带 (0_1^+ 带) 为弱的扁椭圆形变, 共存带 (0_2^+ 带) 为长椭圆形变, 这样, 在 ^{187}Au 中形成的带 (3) 与带 (4) 分别为 $\pi h_{11/2}$ 的单空穴态与 ^{188}Hg 两种芯耦合后的结果。耦合后的带 (3) 仍为扁椭圆形变, 而带 (4) 由于缺乏其它带的成员, 尚不清楚是属于长椭还是扁椭圆形变。

对于这种奇 A 核的形状共存带, 近年来发现在具有形状共存的结构中, 相同自旋宇称的态 ($\Delta I = 0$) 之间跃迁的内转换系数特别大。这种大的内转换系数, 可以用来识别形状共存带。表 2 列出此次重新测得的两条这种内转换系数以及以前别人测得的一条的结果。可以看出, 在不同形状之间的 $\Delta I = 0$ 的跃迁中, 实验值比理论值大很多。这种大

的内转换系数,用 $E1$ 、 $E2$ 、 $M1$ 跃迁不足以说明其缘由,从而解释为是由强的 $E0$ 跃迁分量引起的^[3,4]。这种强的 $E0$ 分量可能是由于不同形状的集体带间的跃迁的禁戒程度特别大而造成的,其微观机制尚需进一步弄清楚。也曾有人提出,这种强的内转换系数可能是由于 $M1$ 跃迁过程异常所引起的^[11],但赞同者较少。

表2 几种 $\Delta I = 0$ 的强内转换系数理论与实验比较

$E_\gamma(\text{keV})$	$I^\pi_i \rightarrow I^\pi_f$	理论值 ($\alpha_K \times 10^3$)			实验值 ($\alpha_K \times 10^3$)
		$E1$	$E2$	$M1$	
322.8	$9/2^- \rightarrow 9/2^-$	19	52	233	504
387.9	$13/2^- \rightarrow 13/2^-$	12	34	142	787
657.2	$11/2^- \rightarrow 11/2^-$		1.1	3.6	100*

* 引自文献 [6]。

4 结 束 语

本实验通过对 ^{187}Au 低激发态的能级结构研究,发现了多条新的能级与 γ 跃迁,建立了新的较完整的 ^{187}Au 低自旋态的能级图,并测定了内转换系数。与以往的结果结合起来分析,在低激发态结构中抽出多条表征集体运动的带结构。对两组体现单粒子与偶-偶核芯的形状共存带间的耦合特性进行了讨论。引人注目的形状共存带间的大的内转换系数通常认为是由强的 $E0$ 跃迁分量引起的,这种强的 E_0 跃迁分量是否在别的核区的形状共存核结构中也存在,是一个值得进一步研究的问题。

参 考 文 献

- [1] J. H. Hamilton et al., *Rep. Prog. Phys.*, **48**(1985) 631.
- [2] C. D. Papanicolopus et al., *Z. Phys.*, **A330**(1988) 371.
- [3] E. F. Zganjar et al., *Nucl. Phys.*, **A520**(1990) 427C.
- [4] E. F. Zganjar et al., 4th Int. Conf. on Nucl. far from Stability, (1981) 630, Geneva.
- [5] C. Bourgeois et al., *Z. Phys.*, **A333**(1989) 5.
- [6] J. K. Johanson et al., *Phys. Rev.*, **C40**(1989) 132.
- [7] *Nucl. Data Sheets*, **62**(1991) 151.
- [8] K. Heyde et al., *Phys. Rep.*, **102**(1983) 292.
- [9] C. Bourgeois et al., *Phys. Rev.*, **A295**(1978) 424.
- [10] J. H. Hamilton et al., *Phys. Rev. Lett.*, **35**(1975) 562.
- [11] C. Bourgeois et al., *Nucl. Phys.*, **A386**(1982) 308.

Level Structure of ^{187}Au and Particle-Core Coupling

Zhu Shengjiang Chen Zhichao

(Physics Department, Tsinghua University, Beijing 100084)

E. F. Zganjar¹ M. O. Kortelahti¹ J. L. Wood² H. K. Carter³

J. H. Hamilton⁴ A. V. Ramayya⁴ X. Zhao⁴

¹ (Department of Physics, Louisiana State University, Baton Rouge, La, U.S.A)

² (School of Physics, Georgia Tech., Atlanta, Ga, U.S.A)

³ (UNISOR, Oak Ridge Associated Universities, Oak Ridge, Tenn., U.S.A)

⁴ (Physics Department, Vanderbilt University, Tenn., U.S.A)

Received on November 9, 1992

Abstract

The low spin level structure of ^{187}Au has been studied by isotopically separated method. The reaction was $^{177}\text{Hf}(^{19}\text{F}, 9n)^{187}\text{Tl}$ with beam energy 175MeV. The level scheme of ^{187}Au was expanded and enhanced through analyzing γ - γ and γ -e coincidence data. The collective band structures and the coupling single proton with different even-even cores were discussed.

Key Words Nuclear structure, ^{187}Au , Shape coexistence, Particle-core coupling.