

^{106}Ag 高自旋态结构*

贺创业¹ 竺礼华^{1,3;1)} 吴晓光¹ 王治民¹ 刘颖¹ 崔兴柱^{1,2} 张振龙^{1,2}
孟锐^{1,2} 马瑞刚¹ 孙惠斌³ 温书贤¹ 李广生¹ 杨春祥¹

1 (中国原子能科学研究院 北京 102413)

2 (吉林大学物理系 长春 130023)

3 (深圳大学理学院 深圳 518060)

摘要 利用能量为60MeV的 ^{11}B 束流,通过 $^{100}\text{Mo} (^{11}\text{B},5\text{n})^{106}\text{Ag}$ 熔合蒸发反应布居 ^{106}Ag 的高自旋态,用15台带BGO反康的HPGe探测器进行在束 γ 谱学测量.通过 γ - γ 符合矩阵开窗分析和DCO比值分析,建立了 ^{106}Ag 新的能级纲图,增加了26条新的 γ 跃迁和10条新能级.通过与其相邻同位素奇奇核的系统比较,对 ^{106}Ag 的4条转动带的组态及结构性质进行了初步讨论.

关键词 高自旋态 在束 γ 谱学 能级纲图 转动带

1 引言

近年来,对 $A \approx 100$ 核区的核结构研究中,发现该区存在丰富的核结构信息,如原子核的三轴形变、形状跃迁、形状共存和扁椭形变等等^[1, 2].另外,理论预言^[3],在该核区,由于质子费米面位于 $\pi g_{9/2}$ 子壳的顶部,而中子费米面位于 $\nu h_{11/2}$ 子壳的底部,因此,基于 $\pi g_{9/2} \otimes \nu h_{11/2}$ 组态的转动带可能出现 $A \approx 130$ 区那样的手征双重带现象^[4].最近实验上开展了在此核区寻找手征双重带的研究,如在 ^{104}Rh 核中,已经找到了 $A \approx 100$ 核区的第一例手征双重带^[5].本文主要介绍 ^{104}Rh 的同中子素核 ^{106}Ag 新的高自旋态实验结果.

2 实验方法和数据分析

实验是在中国原子能科学研究院的HI-13串列加速器核物理国家实验室完成的.通过熔合蒸发反应 $^{100}\text{Mo} (^{11}\text{B},5\text{n})^{106}\text{Ag}$ 布居 ^{106}Ag 的高自旋态,用15台带BGO反康的HPGe探测器测量反应产物的退激 γ 射线,其中5台放置在与束流线成 90° 的位置,4台放置于 45° ,4台放置于 135° ,其余2台分别放置于 55° 和 125° .这些探测器对 ^{60}Co 标准源1332.5keV γ

射线的能量分辨率在1.9—2.2keV之间,相对效率为20%—40%.

实验靶 ^{100}Mo 的厚度为 $2.5\text{mg}/\text{cm}^2$,并带有 $11\text{mg}/\text{cm}^2$ 的Pb衬.根据统计模型程序CASCADE的计算,结合激发函数测量的结果,选取 ^{11}B 束流的最佳能量为60MeV,并在该能量下进行 γ - γ 符合测量,以事件-事件模式共记录了约 130×10^6 个两重以上的 γ - γ 符合事件.

在实验数据的离线处理时,对各探测器进行增益匹配,并将 γ - γ 符合事件反演生成对称化的 E_γ - E_γ 二维能量矩阵,此外还按照探测器相对束流方向夹角的不同,将实验数据反演成非对称化的DCO矩阵,用于确定 γ 射线跃迁多极性分析,进而指定相关能级的自旋值.

采用基于PC-Linux的RADWARE软件^[6]对上述二维矩阵进行开窗谱分析.在 γ - γ 开窗谱分析中,存在 $^{11}\text{B}+^{100}\text{Mo}$ 其他反应道产物 γ 射线的干扰,这些反应道主要产物为 ^{107}Ag , ^{105}Ag , ^{107}Pd , ^{106}Pd , ^{104}Rh 和 ^{103}Rh .根据 γ - γ 级联关系以及 γ 射线能量和强度的平衡原则,最后得到 ^{106}Ag 新的能级纲图,如图1所示.在本工作之前,早期的研究工作^[7, 8]给出了 ^{106}Ag 的部分高自旋能级.我们建立的能级纲图共增加了26条新

2005-12-08 收稿

* 国家自然科学基金(10175090, 10105015, 10375092, 10575133)和国家重点基础研究发展规划项目(TG2000077405)资助

1) E-mail: zhulh@iris.ciae.ac.cn

γ 跃迁(图中γ 跃迁能量后面用*标示), 并对文献[7, 8]的纲图做了很大的修改与扩充.

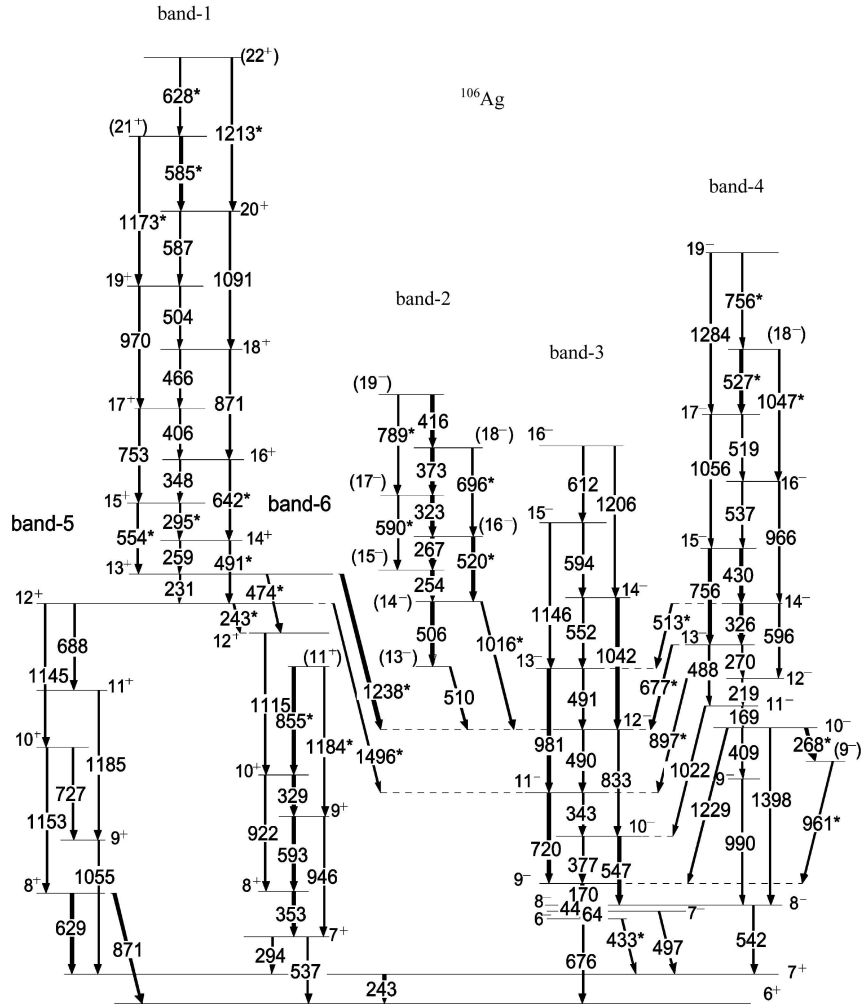


图 1 通过 ¹⁰⁰Mo(¹¹B, 5n)¹⁰⁶Ag 反应建立的 ¹⁰⁶Ag 能级纲图(* 为本工作新发现的 γ 跃迁)

表 1 列出 ¹⁰⁶Ag γ 跃迁的能量、强度及 DCO 比值, 一些 γ 射线由于较弱或受到污染峰的干扰, 未能给出其强度及 DCO 比值, 因此也不能确定其跃迁多极性. γ 跃迁的多极性与 DCO 比值之间的关系^[9]可以根据 ¹⁰⁶Ag 和同一反应中其他核的已知多极性的较强 γ 跃迁的 DCO 比值得到, 对于本次实验中的探测器几何, 当用 M1(ΔI=1) 跃迁的 γ 峰开窗时, 得到 ΔI=2 的 γ 跃迁的 DCO 比值接近 1.7, 而 ΔI=0 和 1 的 γ 跃迁的 DCO 比值则接近 1.0.

2.1 正宇称带

图 1 中由 1055, 1153, 1185, 1145keV 和 629, 727, 688keV γ 跃迁组成的带 5 (band-5) 与文献[8]报道的结果完全一致, 而由 922, 1115, 1184keV 和 593, 329, 855keV γ 跃迁组成的带 6 (band-6) 中 855 和 1184keV 两条 γ 跃迁是本次实验中新观测到的, 由于这两条 γ 跃迁的强度很弱, 表 1 中没有给出它们的 DCO 比值.

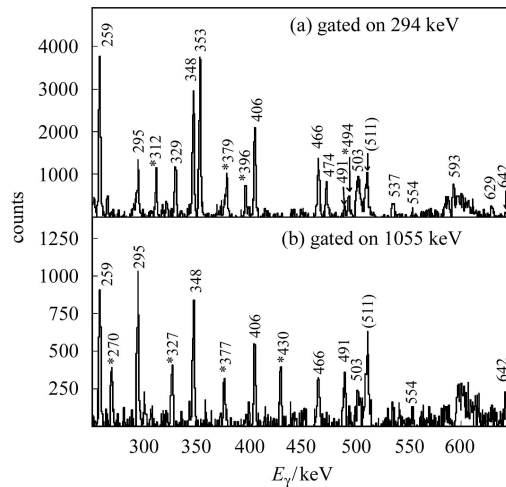


图 2 ¹⁰⁶Ag 的 294keV γ 跃迁(a)与 1055keV γ 跃迁(b)开窗谱图
(a) 图中标* 的峰是来自 ¹⁰⁷Ag 污染峰; (b) 图中标* 的峰为 ¹⁰⁶Ag 负宇称带 4 中的 γ 跃迁.

根据临近核系统学比较, 暂时指定这两条 γ 跃迁的初始能级自旋宇称为 (11^+) .

12^+ 能级以上跃迁组成的带1(band-1)中, 295, 491, 585, 628, 554, 642, 1173和1213keV γ 跃迁是本次实验中新观测到的. 特别是从 15^+ 到 14^+ 能级间的295keV跃迁, 在文献[8]建立的能级纲图中是没有的, 只有一条在低位能级 7^+ 到 7^+ 间的294keV γ 跃迁, 且强度很大. 但本次实验数据分析显示, 在294keV射线的开窗谱中(见图2(a))可以看到在295keV能量位置有一个很强的 γ 峰, 这说明除了294keV射线之

外, 还存在一条能量与之非常接近的 γ 跃迁. 另外用与294keV ($7^+ \rightarrow 7^+$) γ 跃迁没有级联关系的带5(band-5)中的1055keV ($9^+ \rightarrow 7^+$) γ 射线(图2(b))的开窗谱, 也观测到了295keV跃迁, 说明有一条位于高位能级间的295keV跃迁. 通过对带1中的259和348keV两条 γ 跃迁的仔细开窗分析, 并考虑到259和295keV与554keV之间的能量匹配关系, 以及295和348keV与642keV之间的能量匹配关系, 确认新观测到的295keV跃迁是一条退激到 14^+ 能级的跃迁, 并根据其DCO比值建议其为 $\Delta I=1$ 的跃迁.

表1 从60MeV $^{11}\text{B}+^{100}\text{Mo}$ 反应中提取的 ^{106}Ag γ 跃迁的能量、相对强度及DCO比值

$E_\gamma^{\text{a)}$	$I_\gamma^{\text{b)}$	$R_{\text{DCO}}^{\text{c)}$	$J_i^{\pi \text{d)}$	$J_f^{\pi \text{d)}$	$E_\gamma^{\text{a)}$	$I_\gamma^{\text{b)}$	$R_{\text{DCO}}^{\text{c)}$	$J_i^{\pi \text{d)}$	$J_f^{\pi \text{d)}$
169	54 (3)	1.18 (19)	11^-	10^-	642	123 (8)	1.61 (98)	16^+	14^+
170	489 (6)	1.30 (10)	9^-	8^-	676	1000 (7)	0.92 (7)	6^-	6^+
219	155 (4)	1.08 (14)	12^-	11^-	688	82 (6)	1.07 (27)	12^+	11^+
231	170 (8)	0.87 (17)	13^+	12^+	727	88 (8)	0.63 (29)	10^+	9^+
243	354 (6)	1.33 (12)	7^+	6^+	753	51 (6)	1.71 (88)	17^+	15^+
243	187 (6)	1.28 (18)	12^+	12^+	756	26 (3)	e)	19^-	(18^-)
254	20 (3)	0.73 (43)	(15^-)	(14^-)	756	34 (3)	e)	15^-	13^-
259	301 (5)	1.17 (16)	14^+	13^+	833	140 (3)	1.50 (32)	12^-	10^-
267	35 (3)	0.71 (33)	(16^-)	(15^-)	871	156 (7)	1.60 (71)	18^+	16^+
268	46 (2)	0.81 (42)	10^-	(9^-)	897	76 (4)	0.85 (23)	12^-	11^-
270	150 (5)	1.07 (12)	13^-	12^-	922	166 (8)	1.54 (28)	10^+	8^+
294	758 (7)	1.01 (14)	7^+	7^+	946	100 (7)	1.70 (56)	9^+	7^+
295	393 (9)	1.35 (32)	15^+	14^+	961	41 (9)	0.97 (59)	(9^-)	9^-
323	25 (4)	0.81 (42)	(17^-)	(16^-)	966	24 (3)	2.04 (85)	16^-	14^-
326	158 (5)	1.00 (14)	14^-	13^-	970	88 (7)	1.88 (99)	19^+	17^+
343	456 (7)	1.08 (6)	11^-	10^-	990	194 (10)	0.98 (38)	9^-	8^-
348	287 (5.6)	0.99 (15)	16^+	15^+	981	91 (4)	1.70 (48)	13^-	11^-
353	79 (13)	0.99 (27)	8^+	7^+	1016	74 (4)	1.99 (23)	(14^-)	12^-
373	23 (3)	0.65 (29)	(18^-)	(17^-)	1022	119 (4)	0.93 (26)	11^-	10^-
377	655 (8)	1.12 (6)	10^-	9^-	1042	67 (3)	1.74 (30)	14^-	12^-
406	235 (6)	0.87 (17)	17^+	16^+	1047	62 (3)	1.47 (72)	(18^-)	16^-
409	55 (6)	0.62 (17)	10^-	9^-	1055	617 (9)	1.44 (16)	9^+	7^+
416	22 (4)	0.89 (30)	(19^-)	(18^-)	1056	79 (5)	1.78 (77)	17^-	15^-
430	166 (6)	0.97 (16)	15^-	14^-	1115	230 (7)	1.51 (28)	12^+	10^+
433	88 (3)	0.99 (38)	6^-	7^+	1145	98 (14)	1.52 (41)	12^+	10^+
466	351 (8)	0.86 (23)	18^+	17^+	1146	37 (3)	1.52 (52)	15^-	13^-
474	140 (7)	0.76 (22)	13^+	12^+	1153	110 (7)	1.93 (70)	10^+	8^+
490	536 (8)	1.05 (8)	12^-	11^-	1173	57 (7)	1.53 (56)	(21^+)	19^+
491	339 (11)	1.01 (23)	13^-	12^-	1184	54.7 (30)	e)	(11^+)	9^+
497	425 (7)	0.80 (17)	7^-	7^+	1185	206 (8)	1.98 (49)	11^+	9^+
519	54 (3)	1.19 (54)	17^-	16^-	1206	19 (3)	1.62 (63)	16^-	14^-
527	56 (3)	0.75 (36)	(18^-)	17^-	1213	75 (7)	1.68 (90)	(22^+)	20^+
537	205 (8)	1.07 (36)	7^+	6^+	1229	38 (3)	0.98 (44)	10^-	9^-
542	715 (8)	0.98 (15)	8^-	7^+	1238	89 (6)	0.92 (41)	13^+	12^-
552	121 (4)	1.18 (15)	14^-	13^-	1284	20 (3)	1.77 (62)	19^-	17^-
585	79 (12)	0.90 (30)	(21^+)	20^+	1398	39 (5)	1.70 (71)	10^-	8^-
587	79 (13)	1.28 (35)	20^+	19^+	1496	16 (5)	e)	12^+	11^-
629	117 (8)	0.73 (19)	8^+	7^+					

a) γ 射线的能量, 单位keV, 能量误差 $<0.5\text{keV}$; b) γ 射线相对强度, 以676keV γ 射线的强度为1000, 误差主要来源是统计误差; c) γ 射线的DCO比值, 由多极性为1的 γ 射线开窗得到; d) J_i^π 为跃迁初态自旋宇称, J_f^π 为跃迁末态自旋宇称; e) 由于 γ 射线强度较弱或其他干扰 γ 射线的影响, 无法提取其DCO比值.

2.2 负宇称带

在图 1 中的负宇称态中, 带 3(band-3) 和带 4(band-4) 与文献[8]的结果是相符的, 这两条带分别是 ^{106}Ag 的转晕带和次晕带. 在实验结果中, 带 4 新增了一条 18^- 能级和 3 条 γ 跃迁, 它们的能量分别是 756, 527 和 1047keV. 并且在带 4 与带 3 之间发现了几条新的连接跃迁, 它们分别是带 4 的 14^- 能级到带 3 的 13^- 能级的 513keV γ 射线、带 4 的 13^- 能级到带 3 的 12^- 能级的 677keV γ 射线和带 4 的 12^- 能级到带 3 的 11^- 能级的 897keV γ 跃迁.

在图 1 的能级纲图中负宇称带 2(band-2) 是这次实验中新建立的, 主要包括 254, 267, 323, 373 和 416keV 等 γ 跃迁. 虽然其中某些 γ 跃迁在文献[8]中也观测到了, 但在他们建议的能级纲图中, 这些 γ 射线与晕带 3 的 343 和 490keV γ 射线没有符合关系, 且它们之间的级联关系没有转动带特征. 从图 3 的开窗谱可以看到 254, 267, 323, 373 和 416keV 等 γ 射线间有强的级联关系, 具有转动谱特征. 此外, 根据这些开窗谱中 520, 590, 696, 789keV γ 射线与它们之间的符合关系, 以及能量匹配关系, 建立了这些 γ 射线的级联关系及相应能级顺序. 而且, 它们与晕带 3 中的 490 和 343keV γ 射线有很好的符合关系, 却与 981keV γ 射线没有符合关系, 进一步开窗分析发现带 2 是通过 506keV 与 510keV 的级联跃迁和 1016keV 直接跃迁退激到晕带 3 的 12^- 能级上.

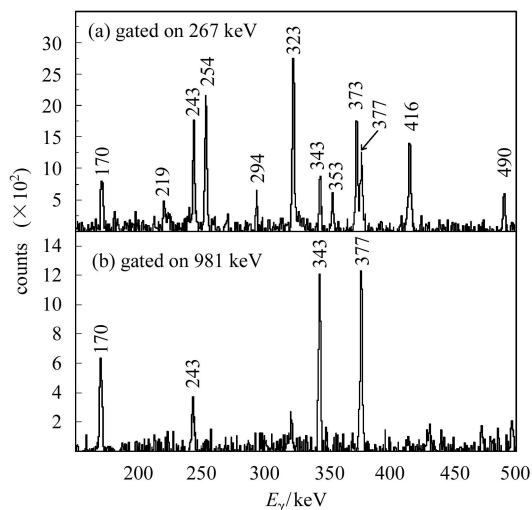


图 3 ^{106}Ag 带 (2) 中 267keV γ 跃迁 (a) 与带 (3) 中 981keV γ 跃迁 (b) 开窗谱

2.3 正负宇称带间的连接跃迁

在文献[7, 8]的能级纲图中, 正负宇称带是分立的两部分, 这次实验观测到了它们之间的连接跃迁. 在

对带 1 中 14^+ 能级到 13^+ 能级间的 259keV γ 跃迁以及 14^+ 能级以上其他的 γ 跃迁的开窗谱中 (见图 4), 分别看到了负宇称带 3 的 12^- 能级以下的所有 γ 跃迁, 说明正负宇称带部分能级间有连接跃迁, 并且在 259keV 开窗谱中, 看到两条弱的高能伽玛峰, 能量分别为 1238 和 1496keV. 根据 259, 343keV 和 490keV γ 射线开窗谱中的各 γ 射线的符合关系及相应能级之间的能量关系, 确认 1496 和 1238keV 两条 γ 跃迁分别对应从带 1 的 12^+ 和 13^+ 能级到带 3 的 11^- 和 12^- 能级间的两条连接跃迁.

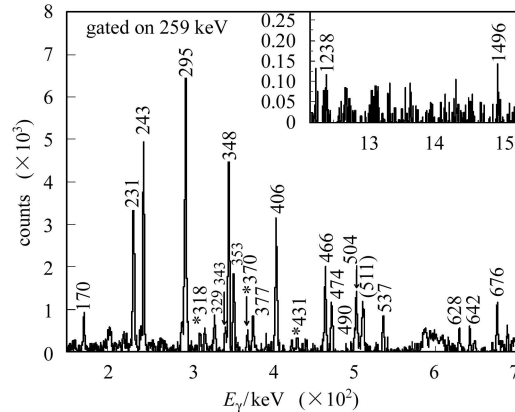


图 4 ^{106}Ag 259keV γ 跃迁开窗谱

图中的小窗口为开窗谱的高能部分, 图中能量为 318, 370, 431keV 的 γ 跃迁为来自于 ^{107}Ag 的污染峰.

3 讨论

从图 1 可以看出, ^{106}Ag 的能级纲图主要由 6 条正负宇称带以及一些低位能级组成. 在低位能级中, 主要的 6^+ 态为已知的同质异能态, 它被解释为 $[\pi(g_{9/2})^{-3} \otimes \nu d_{5/2}]$ 组态与核芯 ^{110}Sn 的耦合形成的^[10, 11]. 正宇称带 5 和 6 与文献[7, 8]的结果相符, 它们的带头能级自旋分别是第一个 7^+ (即 629 和 1055keV γ 跃迁的末态) 和第二个 7^+ (即 353 和 946keV γ 跃迁的末态), 带头能级能量差约 300keV. 根据 Nilsson 单粒子能级图, 以及文献[7]中的分析, 建议正宇称带 5 和 6 的组态分别为 $\pi g_{9/2} \otimes \nu d_{5/2}$ 的半退耦带和 $\pi g_{9/2} \otimes \nu g_{7/2}$ 的耦合带. 实际上, 在同位素核 ^{100}Ag ^[12], ^{102}Ag ^[13] 和 ^{108}Ag ^[10] 中也存在这样两个组态的类似带结构. 而在 ^{104}Ag 中, 也观测到了一条组态为 $\pi g_{9/2} \otimes \nu g_{7/2}$ 的正宇称带^[14, 15].

正宇称带 1 主要由一系列级联的强 M1 跃迁组成, E2 跃迁较弱. 加进 295keV γ 跃迁后, 这条带的能级 (或 γ 跃迁) 能量具有很好的转动谱特征. 这条带的带头自旋很高 (12^+), 也没有旋称劈裂^[8], 这些特征与高

K 的磁转动带很相似, 因此, 这条带可能是一条建立在一对拆对顺排的 $h_{11/2}$ 中子组态上的四准粒子磁转动带.

负宇称带2是本次实验中新增加的, 它与同中子核 $^{108}\text{In}^{[16]}$ 的 band-7 很相似, 可能具有相似的组态结构, 在文献[16]中这条带的组态指定为 $\pi g_{9/2} \otimes \nu((g_{7/2}/d_{5/2})^2 h_{11/2})$ 的四准粒子转动带. 在同位素核 ^{100}Ag , ^{102}Ag , ^{104}Ag 和 ^{108}Ag 中没有看到类似的结构.

负宇称带3为 ^{106}Ag 的转晕带, 文献[7]将这条带的组态指定为 $\pi g_{9/2} \otimes \nu h_{11/2}$. 与它周围同位素核 ^{100}Ag , ^{102}Ag , ^{104}Ag 和 ^{108}Ag 的带结构比较, 发现它们都有这一组态的负宇称带, 并且呈现这样的规律, 即随着中子数的减少, 该组态带强度变得越来越弱. 在 ^{100}Ag 中, $\pi g_{9/2} \otimes \nu h_{11/2}$ 组态带不像其他几个核素那样能级序列很规则, 不具有 $\Delta I=1$ 的转动结构特征. 这可能是由于 ^{100}Ag 比起其他几个核素更靠近双幻核 ^{100}Sn , 价核子较少, 核心极化作用较弱, 不能形成稳定的形变, 在转动过程中, 球形与椭球形状共存, 这些对 ^{100}Ag 能级结构有着非常强烈的影响.

负宇称次晕带4在文献[7, 8]中有很详细的讨论, 并做了一些系统学比较, 但没有确定指出该带的组态. 我们发现带3与带4在 13^- 到 16^- 间的能级能量非常

接近, 尤其在自旋态为 14^- 时, 它们之间的能量只相差 39keV , 这些特征似乎与手征双重带的特征相符合, 但要确定它们是否是手征双重带, 还需实验上进一步进行寿命测量工作.

4 结论

通过 $^{11}\text{B}+^{100}\text{Mo}$ 反应研究了 ^{106}Ag 的高自旋态, 建立了新的能级纲图. 增加了26条新的 γ 跃迁, 正宇称带的能级被推高到 22^+ ; 发现了一条新的转动带, 观测到了正负宇称带之间的连接跃迁. 发现存在两条能量为 295keV 的 γ 跃迁, 并建议 12^+ 能级以上可能是一条建立在拆对顺排的 $h_{11/2}$ 中子组态上的四准粒子磁转动带. 通过 ^{106}Ag 的正负宇称带与其相邻的同位素奇奇核进行比较, 发现它们的结构非常相似, 尤其它们的负宇称带, 具有相同的组态. ^{106}Ag 的负宇称晕带3与次晕带4的能级能量非常相似, 推测可能是一对建立在 $\pi g_{9/2} \otimes \nu h_{11/2}$ 组态上的手征双重带. 有关这方面的结论, 还有待进一步的实验测量和理论分析.

作者感谢中国原子能科学研究院串列加速器运行组的工作人员为本实验提供稳定的束流, 同时感谢制靶组的许国基研究员为本实验提供实验靶.

参考文献(References)

- Keller H J, Frauendorf S, Hagemann U et al. Nucl. Phys., 1985, **A444**: 261—284
- Sohler D, Timar J, Dombardi Zs et al. Nucl. Phys., 2004, **A733**: 37—52
- Peng J, Meng J, Zhang S Q. Phys. Rev., 2003, **C68**: 044324
- Hecht A A, Beausang C W, Amro H et al. Phys. Rev., 2003, **C68**: 054310
- Vaman C, Fossan D B, Starosta K. Phys. Rev. Lett., 2004, **92**: 032501
- Radford D C. Nucl. Instrum. Methods, in Phys. Res., 1995, **A361**: 297
- Rakesh Popli, Rickey F A, Samuelson L E et al. Phys. Rev., 1981, **C23**(3): 1085—1104
- Jerrestam D, Klamra W, Gizon J et al. Nucl. Phys., 1994, **A577**: 786—812
- LI G S. Chin. Phys. Lett., 1999, **16**(11): 796—797
- Espinoza-Quinones F R, Cybulska E W, Emodlato L G R et al. Phys. Rev., 1995, **C52**: 104—112
- Hattori T, Adachi M, Taketani H. J. Phys. Soc. Jpn., 1976, **41**: 1830
- Alfier D, Alber D, Kluge H et al. Z. Phys., 1996, **A355**: 135—143
- Ravi Kumar V, Thirumala Rao B V, Lakshmiarayana V et al. Z. Phys., 1995, **A351**: 249—258
- Chattopadhyay S, Banerjee P, Bhattacharya S et al. Phys. Rev., 2004, **C69**: 044317
- Goswami A, Saha Sarkar M, Datta Pramanik U et al. Z. Phys., 1995, **A353**: 231—232
- Chiara C J, Fossan D B, Janzen V P et al. Phys. Rev., 2001, **C64**: 54314

High Spin State Structure of $^{106}\text{Ag}^*$

HE Chuang-Ye¹ ZHU Li-Hua^{1,3,1)} WU Xiao-Guang¹ WANG Zhi-Min¹ LIU Yin¹
CUI Xing-Zhu^{1,2} ZHANG Zhen-Long^{1,2} MENG Rui^{1,2} MA Rui-Gang¹
SUN Hui-Bin³ WEN Shu-Xian¹ LI Guang-Sheng¹ YANG Chun-Xiang¹

1 (China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

2 (Department of Physics, Jilin University, Changchun 130023, China)

3 (School of Science, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract The high spin states of ^{106}Ag have been populated via the $^{100}\text{Mo}(^{11}\text{B},5\text{n})^{106}\text{Ag}$ reaction with a beam energy of 60MeV at HI-13 Tandem accelerator of China Institute of Atomic Energy. The gamma-gamma coincidences were measured using a gamma-ray detector array. By analyzing the gamma-gamma coincidence and their DCO ratios, the level scheme of ^{106}Ag has been updated, in which twenty-six new gamma transitions and ten new levels are added. The rotational structure of ^{106}Ag has been compared with its neighboring odd-odd isotopes and its configurations are discussed briefly.

Key words high spin state, in-beam gamma-ray spectroscopy, level scheme, rotational band

Received 8 December 2005

* Supported by National Natural Science Foundation of China (10175090, 10105015, 10375092, 10575133) and Major State Basic Research Development Program (TG2000077405)

1) E-mail: zhulh@iris.ciae.ac.cn