

## $^{72}\text{Ge}_{40}$ 的低激发态能级研究\*

李 燕 顾嘉辉 余笑寒 刘静怡 曹玉祥  
曾寄萍 李文新 石双惠

(中国科学院上海原子核研究所 上海 201800)

**摘要** 用低本底反康谱仪(HpGe-NaI)和 HpGe-HpGe的三参数符合 $\gamma$ - $\gamma$ -T系统,对 $^{72}\text{Ga}$ 的衰变 $\gamma$ 单谱、符合谱进行了研究,实验共获得 $2.3 \times 10^7$ 个符合事件.根据实验结果建立了含有26个能级、87条 $\gamma$ 射线的 $^{72}\text{Ga}$ 的衰变能级纲图,其中包含首次测到7条 $\gamma$ 射线 225.92、826.97、1349.71、1475.32、1667.91、2105.28、2247.39keV和4个能级 3248.01、3396.27、3806.10、3864.56keV;并为2939.83keV能级和112.59、937.97、2402.25、2939.95keV 4条 $\gamma$ 射线的存在提供了证据;实验没有发现113.5、1155.7、1192.4keV  $\gamma$ 射线和能级3307.1keV存在的证据;并把317.72keV  $\gamma$ 射线的跃迁,由原来的能级3757.26keV跃迁到3439.51keV能级,改为3565.85keV到3248.01keV能级跃迁.

**关键词** 衰变  $\gamma$ 射线 符合 能级

### 1 引言

1974年J.H.hamilton<sup>[1]</sup>发现 $^{72}\text{Se}$ 的基态、低激发态并不是具有一种永久的振子特性,在它的第2个 $0^+$ 态上建立起一个完美的转动带,并显示出形变特性,这一发现引起了人们对 $A \approx 70$ 核的兴趣.半衰期为14.1h的 $^{72}\text{Ga}$ 的衰变子体 $^{72}\text{Ge}$ 一直被认为是一个形变核,它的主要实验数据来自D. C. Camp<sup>[2]</sup>和A. C. Rester<sup>[3]</sup>的测量,为此,使用分辨率更好的探测器研究 $^{72}\text{Ga}$ 的衰变能级再度受到关注.

### 2 实验方法及数据处理

$^{72}\text{Ga}$ 放射性是通过 $^{71}\text{Ga}(n, \gamma)$ 反应产生的.由于Ga的稳定同位素只有 $^{69}\text{Ga}$ 、 $^{71}\text{Ga}$ ,故实验用光谱纯的 $\text{Ga}_2\text{O}_3$ 作靶子,放入中子通量为 $2.1 \times 10^{11}\text{n/s}$ 的反应堆辐照3.5—4h,经过约2h的冷却后,用王水溶解靶,生成 $^{72}\text{Ga}$ 溶液,经过多次滴定反复烘干,制成测量所需的点放

1998-03-12收稿

\* 国家自然科学基金(19635030)和中国科学院支持项目(KJ952-S1-420)资助

射源. 本实验共辐照 3 个样品, 每个样品重 20mg. 从放射源取出反应堆后, 冷却约 12h, 开始正式测量, 此时,  $^{69}\text{Ga}(n, \gamma)^{70}\text{Ga}$  产生的  $^{70}\text{Ga}$  (半衰期  $T_{1/2} = 21.15\text{min}$ ) 已衰变掉, 仅留下了放射性核素  $^{72}\text{Ga}$ .

在实验的测量过程中共采用两套谱仪. 一套是由 CANBERRA 公司生产的 HpGe-NaI 低本底反康普顿谱仪, 主探测器是一个  $130\text{cm}^3$  的 HpGe 探测器, 其能量分辨率为  $1.9\text{keV}$  (对  $^{60}\text{Co}$  的  $1.33\text{MeV}$  的  $\gamma$  射线),  $36\text{--}2515\text{keV}$  (共 4096 道) 的本底积分计数率为 1.2, 实验测量  $^{72}\text{Ga}$  的  $\gamma$  单谱和反康普顿谱. 源放在距 HpGe 探测器轴线上约  $25\text{cm}$  处, 用约  $2.5\text{cm}$  厚的有机玻璃吸收  $\beta$  射线, 对  $^{72}\text{Ga}$  衰变  $\gamma$  能谱的低能区、高能区分别进行了 81.7h、42.5h 的跟踪测量. 测量高能区时, 在放射源和探测器之间放置了  $2.5\text{cm}$  厚的铅和  $0.98\text{cm}$  的铬吸收片. 图 1 为  $^{72}\text{Ga}$  衰变的  $\gamma$  单谱. 实验使用  $^{152}\text{Eu}$ 、 $^{56}\text{Co}$  放射源对谱仪进行了能量刻度和相对效率刻度, 表 1 列出了  $^{72}\text{Ge}$  的  $\gamma$  射线的能量和相对强度.

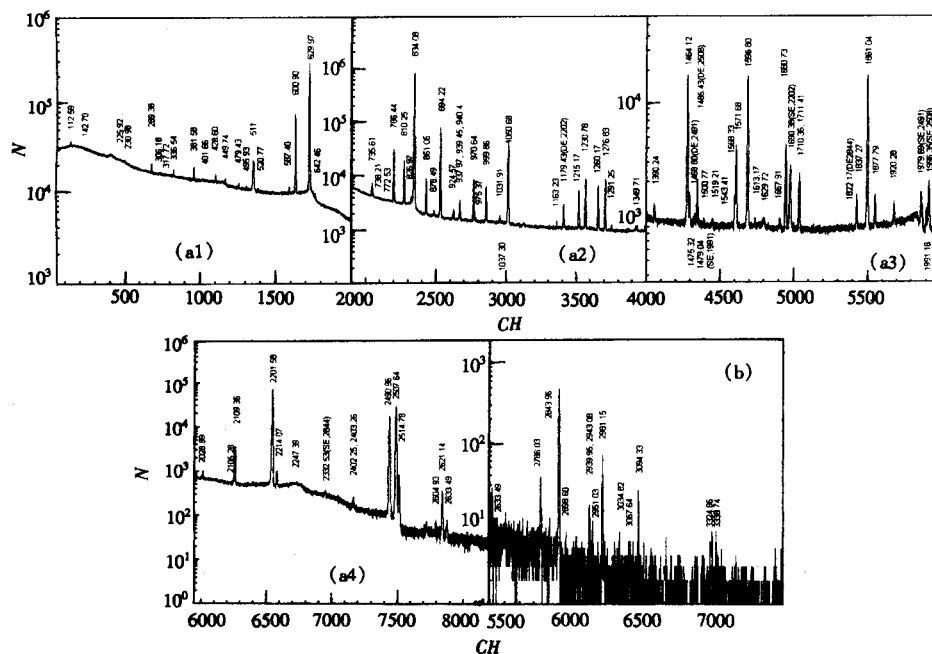


图1  $^{72}\text{Ga}$  衰变的  $\gamma$  能谱

图中所示数字为  $\gamma$  射线的能量 (keV)

(a)  $^{72}\text{Ga}$  衰变  $\gamma$  射线低能部分的能谱;

(b)  $^{72}\text{Ga}$  衰变  $\gamma$  射线高能部分的能谱.

$^{72}\text{Ga}$  衰变的  $\gamma$  符合谱的测量采用的是  $\gamma\text{--}\gamma\text{--}T$  三参数快慢符合谱仪, 来自两个  $\gamma$  探测器的信号分别做时幅转换器 (TAC) 的起始和终止信号, 由时幅转换器 (TAC) 产生一个开启 3 个幅度数字转换器 (ADC) 的门信号, 在门信号开启的时间内, 幅度数字转换器 (ADC) 记录的两个能量信号和一个时间信号构成一个符合事件. 该谱仪由效率为 50% 的同轴型 HpGe 和 20% 的 N 型 (带铍窗) 的 HpGe 探测器组成, 其能量分辨率分别为  $2.0\text{keV}$ 、 $1.9\text{keV}$  (对  $^{60}\text{Co}$  的  $1.33\text{MeV}$  的  $\gamma$  射线), 两个探测器互成  $90^\circ$ , 在  $45^\circ$  方向用  $2\text{cm}$  厚的铅板隔

表1  $^{72}\text{Ga}$ 衰变产生 $\gamma$ 射线的能量和相对强度

本工作											
$E_\gamma$ /keV		$I_\gamma$ (%)		$E_\gamma$ /keV		$I_\gamma$ (%)		$E_\gamma$ /keV		$I_\gamma$ (%)	
112.59	4	0.111	8	939.45	4	0.282	15	1861.04	3	5.71	33
142.70	9	0.013 <sup>n)</sup>	5	940.4 <sup>b)</sup>		0.008 <sup>d)</sup>	25	1877.79	5	0.249	27
225.92 <sup>n)</sup>	14	0.017 <sup>n)</sup>	6	970.64	4	1.15	6	1920.28	7	0.187	14
230.98	6	0.025	4	975.37	8	0.040	3	1991.18	10	0.163	9
289.38	4	0.220	13	999.86	4	0.841	44	2028.89	9	0.131	20
306.18	9	0.046	8	1031.91	6	0.074	7	2105.28 <sup>n)</sup>	16	0.032	3
317.72	14	0.018	6	1037.30	18	0.018	2	2109.36	3	1.16	7
336.54	4	0.135	9	1050.68	4	7.29	38	2201.58	3	28.4	1.6
381.58	4	0.329	18	1163.23	6	0.086	8	2214.07	5	0.240	21
401.66	14	0.015	7	1215.17	4	0.860	45	2247.39 <sup>n)</sup>	1	0.029	8
428.60	4	0.238	14	1230.78	4	1.52	9	2402.25	24	0.040	4
449.74	5	0.201	13	1260.17	3	1.24	6	2403.26	55	0.008	2
479.43	5	0.105	9	1276.83	3	1.63	10	2490.96	3	8.06	46
495.93	7	0.049	8	1291.25	9	0.055	6	2507.64	3	13.8	8
520.77	7	0.061	8	1349.71 <sup>n)</sup>	10	0.165	10	2514.78	4	0.308	18
587.40	4	0.152	11	1390.24	12	0.089	8	2582.54 <sup>b)</sup>	16	0.016	3
600.90	4	6.11	32	1464.12	3	3.71	21	2604.93	20	0.013	2
629.97	4	27.2	14	1475.32 <sup>n)</sup>	18	0.029	3	2621.14	5	0.149	10
642.46 <sup>b)</sup>	8	0.068	8	1500.77	22	0.004	4	2633.49	15	0.014	2
735.61	4	0.388	21	1519.21	28	0.042	6	2786.03 <sup>b)</sup>	11	0.034	3
738.21	7	0.055	4	1543.41 <sup>b)</sup>	51	0.020 <sup>n)</sup>	15	2843.96	4	0.445	26
772.53	11	0.030	6	1568.33	6	0.197	15	2898.60 <sup>b)</sup>	4	0.008	2
786.44	4	3.49	18	1571.68	3	0.871	55	2939.95	15	0.012	2
810.25	4	2.17	14	1596.80	3	4.61	27	2943.08	96	0.002	1
826.97 <sup>n)</sup>	5	0.511	27	1613.17	49	0.042	7	2951.03 <sup>b)</sup>	30	0.005	1
834.08	4	100		1629.72	27	0.020	3	2981.15	7	0.056	4
861.05	4	0.960	74	1667.91 <sup>n)</sup>	19	0.054	7	3034.82	61	0.007	1
878.49	6	0.070	6	1680.73	3	0.993	52	3067.64 <sup>b)</sup>	41	0.008	1
894.22	4	10.6	5	1710.36	5	0.479	26	3094.33	13	0.024	2
924.57	4	0.137	41	1711.41	5	0.007	3	3324.86	26	0.008	1
937.97	9	0.079	5	1837.27	5	0.246	15	3338.75 <sup>b)</sup>	24	0.006	1

n) 首次测得的  $\gamma$ 射线; a) 能量由符合谱中的峰位确定; b) 无法确定其在纲图中的位置; c) 相对强度由反康谱顿谱确定; d) 相对强度由 937.97、939.45、940.4keV3 条 $\gamma$ 射线的总相对强度减去 937.97keV 和 939.45keV 的相对强度所得。

开,以减少两个探测器之间的相互散射。实验数据获取采用列表方式,记录在微机硬盘上,本实验共获得  $2.3 \times 10^7$  个符合事件。图 2 为用 827keV、1350keV 的 $\gamma$ 射线开门得到的符合 $\gamma$ 谱。表 2 列出实验测得的部分 $\gamma$ - $\gamma$ 符合关系。从表 2 中可以看出,当置门 894keV

时,其级联 $\gamma$ 射线 834keV 很强,看不到与它无级联关系的 630keV  $\gamma$ 射线,由此可知,该符合谱仪符合效果比较好.

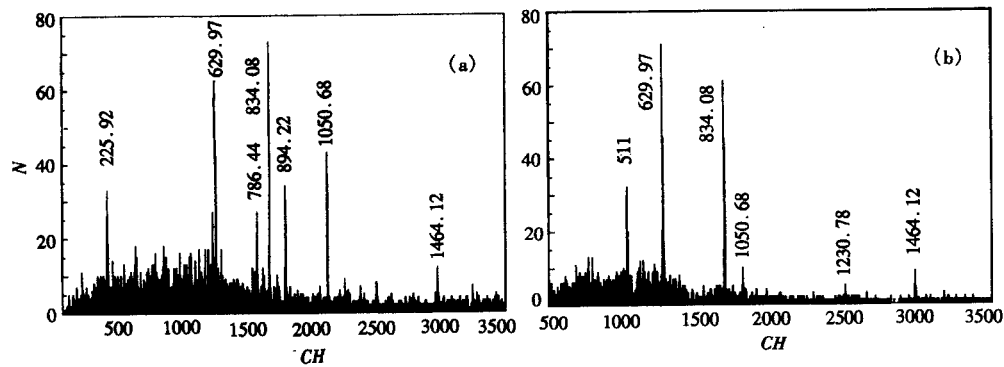


图2 置门827keV (a)和1350keV (b) $\gamma$ 射线所得符合 $\gamma$ 谱

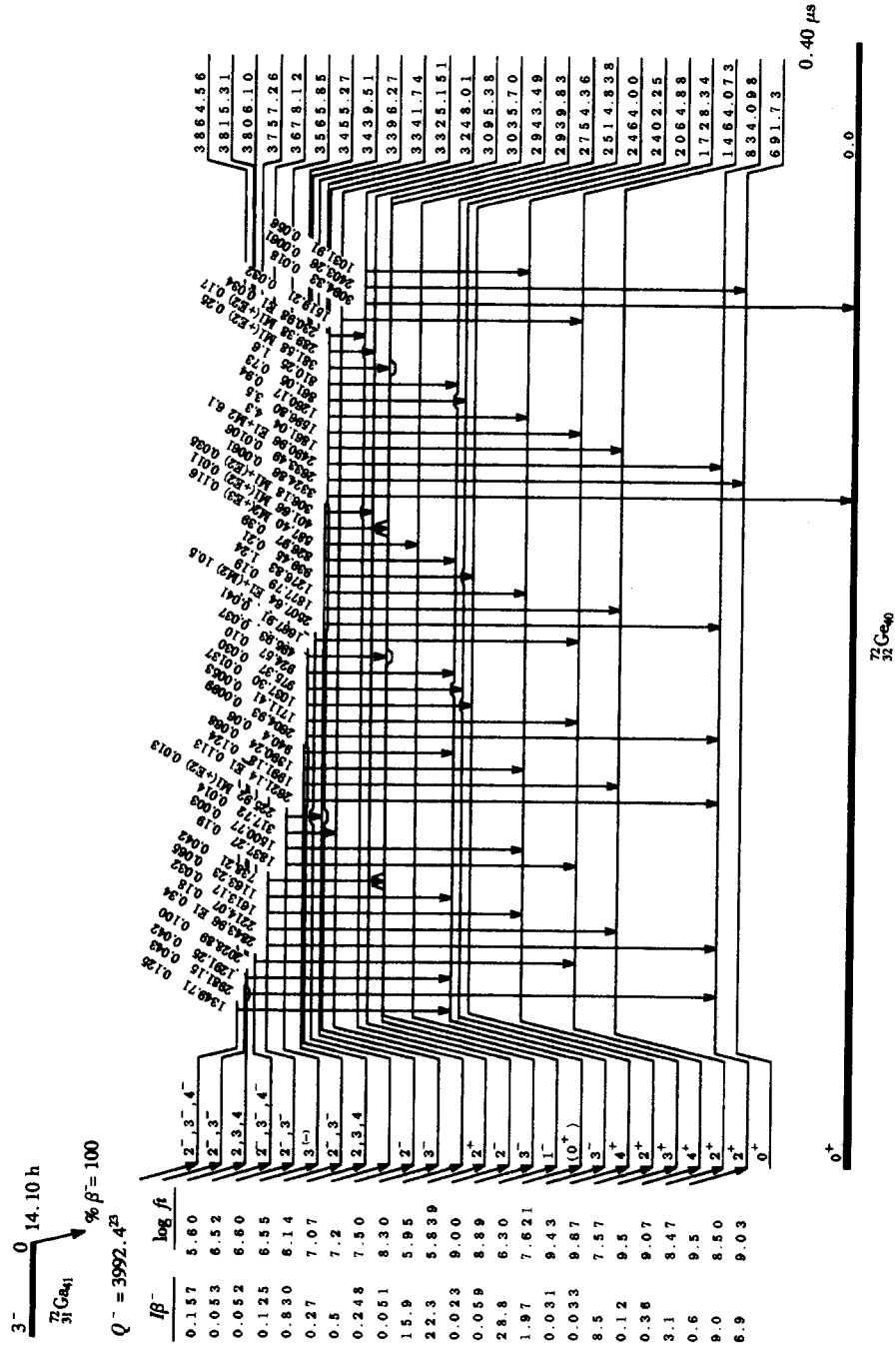
图中所示数字为 $\gamma$ 射线的能量 (keV) .

表2  $^{72}\text{Ga}$ 衰变 $\gamma$ 射线的部分 $\gamma$ - $\gamma$ 符合关系

置门 (keV)	符合 $\gamma$ 射线 (keV)
113	630, 810, 834, 938, 1568, 1710
318	1519
630	382, 428, 450, 479, 601, 810, 827, 834, 861, 878, 925, 938, 971, 1000, 1051, 1260, 1277, 1572, 1861, 1878, 1991, 2214, 2402
786	827; 无1192
827	226, 630, 786, 834, 894, 1051, 1464
834	289, 337, 382, 428, 450, 587, 601, 630, 643, 736, 786, 810, 827, 861, 894, 939, 971, 1000, 1051, 1215, 1231, 1260, 1277, 1291, 1597, 1837, 1861, 1920, 2029, 2109, 2202, 2508, 2844
894	337, 382, 429, 736, 786, 810, 834, 861, 925, 1215, 1519, 1597, 1668, 1711, 1837, 2029,
939	630, 834, 938, 1568, 1710, 2402
1051	226, 429, 521, 630, 810, 827, 834, 925, 1163, 1291, 1464; 无1192
1350	601, 630, 786, 1051, 1231, 1464
1519	894
1668	894
2940	402, 738

### 3 结果分析及衰变纲图

从表 1 可以看出,本实验测得的 $\gamma$ 射线的相对强度值比 D. C. Camp<sup>[2]</sup>和 A. C. Rester<sup>[3]</sup>的结果大,主要原因是在他们的工作中,选用 834.08keV 的测量强度值做相对强度归一,而 834.08keV 的测量强度实际是 826.97 和 834.08keV 2 条 $\gamma$ 射线的测量强度之和. 834.08keV  $\gamma$ 射线的强度很大,当时的 Ge (Li)探测器的分辨率远不如 HpGe 探测器的分辨率,很难把较弱的 826.97keV  $\gamma$ 射线从 834.08keV 的 $\gamma$ 射线中分开,因此,他们的实验结果偏小.



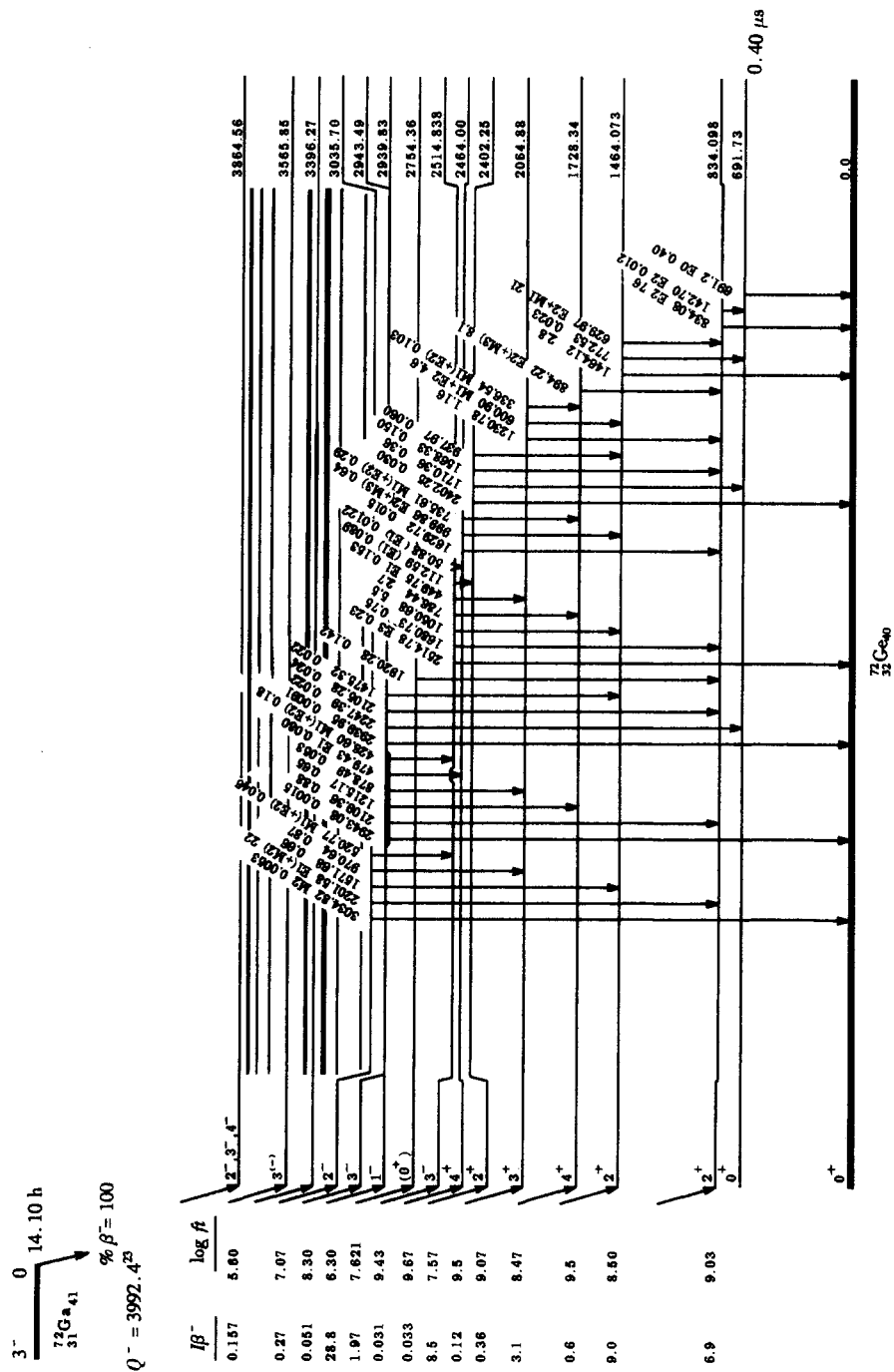


图3  $^{72}\text{Ge}_{40}$  的衰变能级纲图

从符合谱的分析结果来看,用 $\gamma$ 射线 826.97keV 开门所得的符合谱中有 786.44 和 1050.68keV  $\gamma$ 射线,在用 786.44 和 1050.68keV 开门,其符合谱中都有 826.97keV  $\gamma$ 射线,由此断定新 $\gamma$ 跃迁 826.97keV 应该发生在能级 3341.74keV 与 2514.838keV 之间;在 826.97keV 和 1050.68keV  $\gamma$ 射线置门的符合谱中均发现 225.92keV  $\gamma$ 射线存在,因此认为新 $\gamma$ 射线 225.92keV 是能级 3565.85—3341.74keV 跃迁的 $\gamma$ 射线;用 894.22keV  $\gamma$ 射线开门,符合谱中有新 $\gamma$ 射线 1519.21 及 1667.91keV,反过来,用两者分别置门,得到的符合谱中均有 894.22keV  $\gamma$ 射线,由此说明新 $\gamma$ 射线 1519.21 和 1667.91keV 应该是新能级 3248.01 和 3396.27keV 退激至能级 1728.34keV 上的新 $\gamma$ 射线;在 1050.68 和 1349.71keV  $\gamma$ 射线置门的符合谱中,发现 1291.25 和 1349.71keV  $\gamma$ 射线应该是跃迁至 2514.838keV 上的新 $\gamma$ 射线,故分别增加新能级 3806.10 和 3864.56keV;通过对置门 112.59、939.45 和 2939.95keV 得到的符合谱的分析,首次确认了 NDS<sup>[4,5]</sup>中未确定的 112.59、937.97、2402.25 和 2939.95keV  $\gamma$ 跃迁; $\gamma$ 射线 317.72keV 因只与 1519.21keV  $\gamma$ 射线级联,故其跃迁位置应移动;1475.32、2105.28 和 2247.39keV 3 条 $\gamma$ 射线出现在单谱测量中,因符合计数太少而无法确定它们的级联关系,考虑到在<sup>72</sup>As 衰变到<sup>72</sup>Ge 的 $\beta^+$ 衰变中,这 3 条 $\gamma$ 射线由能级 2939.95keV 分别退激到能级 1464.073、834.098 和 691.73keV 上,而在<sup>72</sup>Ga 衰变到<sup>72</sup>Ge 的 $\beta^-$ 衰变中有未确定的 2939.95keV  $\gamma$ 射线,故把这 3 条 $\gamma$ 射线与 2939.95keV  $\gamma$ 射线归于能级 2939.95keV 的退激 $\gamma$ 射线. 另外, NDS 中编评数据给出的 10 条 $\gamma$ 射线 113.5、1155.7、1192.4、1543.41、2898.60、3067.64、2582.54、2786.03、2951.03、3338.75keV 在本工作的单谱测量中(除 113.5、1155.7、1192.4keV 外)都被测到,但在符合谱数据分析中没有发现相应的符合关系;单谱中的 642.46keV  $\gamma$ 射线只出现在用 834.08keV  $\gamma$ 射线开门的符合谱中,无法断定它在纲图中的位置.

基于本实验测量的数据,采用 NDS 中 $\gamma$ 射线 50.88 和 691.2keV (E0 跃迁)的能量值、 $\gamma$ 射线的内转换系数及多极性,用 ENSDF (Evaluated Nuclear Structure Data File) 的分析校验程序算出了<sup>72</sup>Ga 衰变到<sup>72</sup>Ge $\beta^-$ 衰变分支比和  $\log ft$ . 在本实验的测量数据中,讨论能级的自旋和宇称的实验依据只有  $\log ft$  值和 $\gamma$ 射线的强度,因此只讨论个别可以讨论的能级的  $J^\pi$  值,给出试探性的自旋和宇称. 若本工作的  $\log ft$  值与文献<sup>[4-6]</sup>中的能级的自旋和宇称无矛盾,则沿用文献 [4-6] 的结果. <sup>72</sup>Ga 的基态  $J^\pi$  值为  $3^-$ , 新能级 3864.56keV 的  $\log ft$  值表明<sup>72</sup>Ga 基态衰变到该能级属容许跃迁,故新能级的  $J^\pi$  值可能为  $2^-$ 、 $3^-$  和  $4^-$ ; 能级 3757.26keV 的  $\log ft$  值显示出容许跃迁和一级禁戒跃迁的特征,参照其具有负宇称的特性<sup>[4,5]</sup>, 它的自旋值为  $2^-$ 、 $3^-$  和  $4^-$ ; 由能级 3439.51keV 和 3806.10keV 的  $\log ft$  值知,与其相关的 $\beta$ 跃迁均为容许跃迁和一级禁戒跃迁,因此只能推断它们的自旋值为 2, 3 和 4.

根据上述分析结果,我们提出一个新的<sup>72</sup>Ga 的衰变能级纲图(如图 3 所示),它共有 26 个能级、87 条 $\gamma$ 射线,其中 4 个能级 3248.01、3396.27、3806.10、3864.56keV 和 7 条 $\gamma$ 射线 225.92、826.97、1349.71、1475.32、1667.91、2105.28、2247.39keV 为本实验首次测到的;实验为能级 2939.83keV 和 112.59、937.97、2402.25、2939.95keV 4 条 $\gamma$ 射线的确认提供了实验依据;并把 317.72keV  $\gamma$ 射线由原来的能级 3757.26keV 跃迁到能级 3439.51keV 改为由能级 3565.85keV 跃迁到 3248.01keV. 否认了 NDS 承认的能级 3707.1keV 和 $\gamma$ 射线 113.5、1155.7、1192.4keV 的存在;而其放入纲图中的、未完全确定的 $\gamma$ 射线 2582.54、2786.03、

2951.03、3338.75keV 虽在单谱测量中被测得,但因无相关的符合关系存在而无法确定其在纲图中的位置;NDS 没有放入  $^{72}\text{Ga}$  衰变纲图中的  $\gamma$  射线 1543.41、2898.60、3067.64keV,在本实验的单谱测量中也被测量到。另外, $\gamma$  射线 642.46keV 未能放入  $^{72}\text{Ga}$  的衰变纲图中。

作者衷心感谢回旋加速器运行组人员和其他有关人员的支持和帮助。

### 参 考 文 献

- 1 Allan Bromley D. Treatise on heavy-ion physics. Vol.8. New York and London; Plenum Press, 1989
- 2 Camp D C et al. Nucl. Phys., 1968, **A121**:561
- 3 Rester A C et al. Nucl. Phys., 1971, **A162**:461
- 4 King M M. Nucl. Data Sheet, 1994, **73**:215
- 5 King M M. Nucl. Data Sheet, 1989, **56**:1
- 6 Landolfo E et al. Phys. Rev., 1994, **C50**(2):733

## Study of the Low Excited States of $^{72}\text{Ge}^*$

Li Yan Gu Jiahui Yu Xiaohan Liu Jingyi

Cao Yuxiang Zeng Jiping Li Wenxin Shi Shuanghui

(Shanghai Institute of Nuclear Research, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

**Abstract** The radioactive decay of  $^{72}\text{Ga}$  has been investigated by means of NaI-HpGe Compton-suppress spectrometer, and  $\gamma$ - $\gamma$  coincidence measurements performed with two HpGe detectors coupled to three-parameter ( $\gamma$ - $\gamma$ -T) data acquisition system.  $2.3 \times 10^7$  coincidence events are collected. A new decay scheme of  $^{72}\text{Ga}$  including 26 levels, 87  $\gamma$ -rays is established. The extensive coincidence relationships are used to identify the  $\gamma$ -rays and levels of  $^{72}\text{Ge}$ , such as new  $\gamma$ -rays of 225.92, 826.97, 1349.71, 1475.32, 1667.91, 2105.28, 2247.39keV and new levels of 3248.01, 3396.27, 3806.10, 3864.56keV. The unsure transitions of 112.59, 937.97, 2402.25, 2939.95keV and level of 2939.83keV are confirmed in this work. No evidence has been observed for the existences of 113.5, 1155.7, 1192.4keV  $\gamma$ -rays and level of 3707.1keV. The transition of 317.72keV  $\gamma$ -ray is moved from 3757.26—3439.51keV level to 3565.85—3248.01keV level.

**Key words** decay,  $\gamma$ -ray, coincidence, level

Received 12 March 1998

\* Supported by the Nation Natural Science Foundation of China (19635030) and the Chinese Academy of Sciences (KJ952-S1-420)