

缺中子核 ^{197}Bi 的能级结构研究*

周小红 孙相富 郭应祥 雷祥国 刘忠
陈新峰 张玉虎 金寒涓 罗亦孝

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

温书贤 袁观俊 李广生 杨春祥

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

1995-03-14 收稿

摘 要

用100MeV ^{16}O 束流轰击厚的天然Re靶和 ^{187}Re 同位素靶,布居了 ^{197}Bi 的高自旋激发态.用 γ - γ - t 符合测量,发现并修正了已有的 ^{197}Bi 能级纲图中的错误,确定了 ^{197}Bi 的三个新的高自旋同质异能态,识别出了11条新 γ 跃迁.并从奇 A Bi核能级结构的系统性,对本工作确定的半寿命 $t_{1/2} = 19.3 \pm 4.9\text{ns}$ 的同质异能态的组态和衰变性质进行了探讨.本工作还测量了 γ 跃迁的角分布,建议了 ^{197}Bi 的新的能级纲图.

关键词 γ - γ - t 符合,能级纲图,同质异能态.

研究 $Z=83$ 的奇 A Bi同位素晕态结构有两个目的.其一是了解由同中素 $^{209}\text{Bi}(\pi)$ 和 $^{211}\text{At}(\pi^3)$ 定义的单质子轨道与相应偶 A Pb核中子空穴态耦合时的准粒子特性,研究单质子态与中子空穴态之间的剩余相互作用与中子数的关系.基于已知的 ^{196}Pb 核能级结构知识^[1]和壳模型弱耦合理论,可用最后一个奇质子轨道与 ^{196}Pb 的中子空穴态耦合成的三准粒子态对 ^{197}Bi 的晕态进行解释,这为指定特定能级的组态提供了基础.其二是研究 $N=126$ 中子壳随中子数的减少.由于 $h_{9/2}$ 这一高角动量的质子空穴侵入态能量的降低,可能导致在奇 A Bi核的晕谱中出现例如由增强的约化跃迁几率 $B(E2)$ 值和转动能级结构所呈现的集体运动.通过对这些集体运动现象的研究,可以探讨质子数和中子数的不平衡对势能面的影响. $^{197}\text{Bi}(N=114)$ 的高自旋态已由T. Chapurlat等用 $^{192}\text{Pt}(^{10}\text{B}, 5n)^{197}\text{Bi}$ 反应进行过研究^[2],但由于缺乏对低能 γ 的符合测量,其能级纲图中有一定的不确切性.本工作用 $^{187}\text{Re}(^{16}\text{O}, 6n)^{197}\text{Bi}$ 反应重新研究了 ^{197}Bi 的能级结构,确定了 ^{197}Bi 的三个新的高自旋同质异能态,识别出了11条新的 γ 跃迁.并对原纲图中的可疑之处做了检验纠正,给出了一个新的能级纲图.

实验使用原子能研究院HI-13串列静电加速器提供的100MeV ^{16}O 束流轰击厚的天然Re靶(^{187}Re 占63%, ^{185}Re 占37%). $^{187}\text{Re}(^{16}\text{O}, 6n)^{197}\text{Bi}$ 是主要反应道之一.用6套BGO(AC)HPGe探测器和一台探测低能 γ 的小平面探测器进行了 γ - γ - Δt 符合

* 国家自然科学基金资助.

测量 (其中 Δt 是符合的两个 γ 线到达探测器的时间差). 符合时间窗为 600 ns, 符合测量的时间分辨是 14ns. HPGe 探测器对 ^{60}Co 源 1332keV γ 线的能量分辨率在 2.0—2.3keV 之间. 用带铅衬的厚约 $1\text{mg}/\text{cm}^2$ 的 ^{187}Re 同位素靶和厚的天然 Re 靶, 在与束流方向成 $18^\circ, 37^\circ, 55^\circ, 90^\circ, 110^\circ, 145^\circ$ 的六个角度上分别进行了角分布测量, 并用函数 $W(\theta) = \left(1 + \frac{A_2}{A_0} P_2(\cos\theta) + \frac{A_4}{A_0} P_4(\cos\theta)\right)$ 对实验数据进行了拟合, 得到了角分布系数 $\frac{A_2}{A_0}, \frac{A_4}{A_0}$. 在整个实验过程中, 为了降低 K_x 射线在 HPGe 探测器中的计数, 在每台 HPGe 探测器前放置了不同厚度的铜皮和铅皮, 这就大大降低了 HPGe 探测器对低能 γ 的探测效率. 本工作是用小平面对探测器与 HPGe 探测器的符合确定低能 γ 的符合关系. 符合事件以 $E_\gamma - E_\gamma - \Delta t$ 的格式记录在磁带上, 共获取了约 100×10^6 个符合事件. 在离线数据处理时, 把符合事件整理成了带不同时间条件的符合矩阵. 对于每条 γ 线都做了无时间条件限制及延迟 ($-600\text{ns} < \Delta t < -30\text{ns}$) 和超前 ($30\text{ns} < \Delta t < 600\text{ns}$) 时间条件的拉门谱. 仔细地分析比较这些拉门谱, 确定了 ^{197}Bi 的同质异能态的位置, 并对级联 γ 的次序给予了合理的排列. 本研究建议的 ^{197}Bi 的能级纲图见图 1. ^{197}Bi 同质异能态的

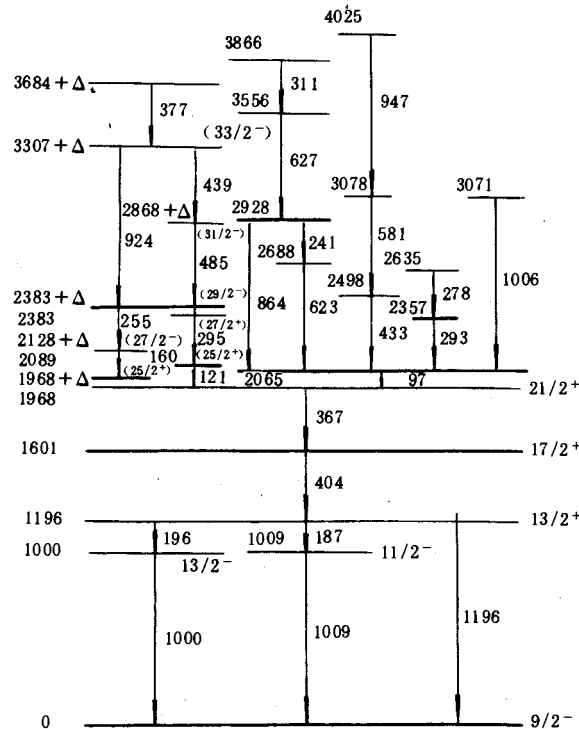


图 1 本工作建议的 ^{197}Bi 能级纲图

寿命是通过反演特定的 γ 符合之间的时间谱求得的. 自旋和宇称的指定是基于对角分布测量结果、观测到的能级寿命、 γ 射线的相对强度、内转换系数及强度平衡的综合考虑. 本研究指定的 ^{197}Bi 的所有 γ 跃迁的能量、相对强度、角分布系数及跃迁多极性见表 1.

表 1 本工作指定的 ^{197}Bi γ 跃迁的性质

E_γ (keV) ^(a)	I_γ (%) ^(b)	A_2/A_0	A_4/A_0	$J_i^\pi \rightarrow J_f^\pi$
97.2	13			$\rightarrow 21/2^+$
121.1	7			$(25/2^+) \rightarrow 21/2^+$
159.9	19	-0.08(3)	-0.01(3)	$(27/2^-) \rightarrow (25/2^+)$
186.9	51	-0.18(7)	0.009(6)	$13/2^+ \rightarrow 11/2^-$
196.4	31 ^(c)	-0.09(2) ^(d)	0.01(1) ^(d)	$13/2^+ \rightarrow 13/2^-$
240.7	8			
255.2	13	-0.10(3)	-0.02(4)	$(29/2^-) \rightarrow (27/2^-)$
277.7	6			
292.7	8	0.18(4)	0.04(3)	
294.7	32	-0.13(1)	-0.03(2)	$(27/2^+) \rightarrow (25/2^+)$
310.6	4			
366.9	94	0.09(2)	0.02(1)	$21/2^+ \rightarrow 17/2^+$
377.4	5 ^(c)			$\rightarrow (33/2^-)$
404.3	100	0.12(1)	0.03(2)	$17/2^+ \rightarrow 13/2^+$
433.1	7			
438.6	8	-0.31(7)	0.03(5)	$(33/2^-) \rightarrow (31/2^-)$
484.9	17	-0.30(3)	-0.04(3)	$(31/2^-) \rightarrow (29/2^-)$
580.5	6			
622.9	10	-0.19(6) ^(e)	-0.02(5) ^(e)	
627.3	13			
863.6	16 ^(c)	0.07(3)	-0.03(4)	
923.5	14			$(33/2^-) \rightarrow (29/2^-)$
946.5	6 ^(c)			
999.9	31	0.212(4) ^(f)	-0.07(6) ^(f)	$13/2^- \rightarrow 9/2^-$
1005.9	5 ^(c)			
1009.4	51	-0.31(2)	0.00(0)	$11/2^- \rightarrow 9/2^-$
1196.3	18	0.19(3)	-0.11(2)	$13/2^+ \rightarrow 9/2^-$

(a) γ 跃迁能量从单谱和符合谱拟合峰位给出, 误差在 $\pm 0.5\text{keV}$ 以内.

(b) γ 跃迁的相对强度用 404keV 跃迁归一, 即取它的强度为 100. 对于 $E_\gamma \geq 200\text{keV}$, 误差在 10% 以内, $E_\gamma < 200\text{keV}$, 误差在 50% 以内.

(c) 相对强度从符合谱估计得到.

(d) 有来自 ^{198}Pb 能量为 198keV 的强 γ 线的干扰.

(e) 干扰主要来自 ^{198}Bi 能量为 625keV 的强 γ 线.

(f) 包括了 ^{199}Bi 的 1001keV $E2$ 跃迁.

本研究建议的 ^{197}Bi 的能级纲图在 $21/2^+$ 态以下与文献 [2] 的结果一致. 文献 [2] 的 $\gamma-\gamma$ 符合数据表明 295keV 跃迁在时间上先于 367keV 跃迁, 说明它们之间存在一同质异能态. 用脉冲束测量的 367keV γ 线的时间分布有一瞬时峰, 这表明 367keV 跃迁并不直接退激该同质异能态. 但在用脉冲束进行时间测量时发现了一能量为 97keV, 寿命为 60ns 的 γ 线. 于是在没有符合数据的情况下, 假定了 97keV 跃迁即为 295keV 和 367keV 跃迁之间的连接 γ 跃迁, 由它直接退激该同质异能态. 本研究进行了小平面探测器和 HPGe 探测器之间的符合测量, 对低能 γ 跃迁的符合关系做了研究. 图 2(b) 是用

97keV 跃迁为门的拉门谱, 表明它与 295keV γ 线之间没有任何符合关系. 但我们发现了另外一条能量为 121keV 的 γ 线, 它不仅与 295keV 跃迁延迟符合, 而且与 367keV 跃迁瞬时符合. 图 2(c)是用 121keV γ 线为门的拉门谱. 这样就十分可靠地确定了文

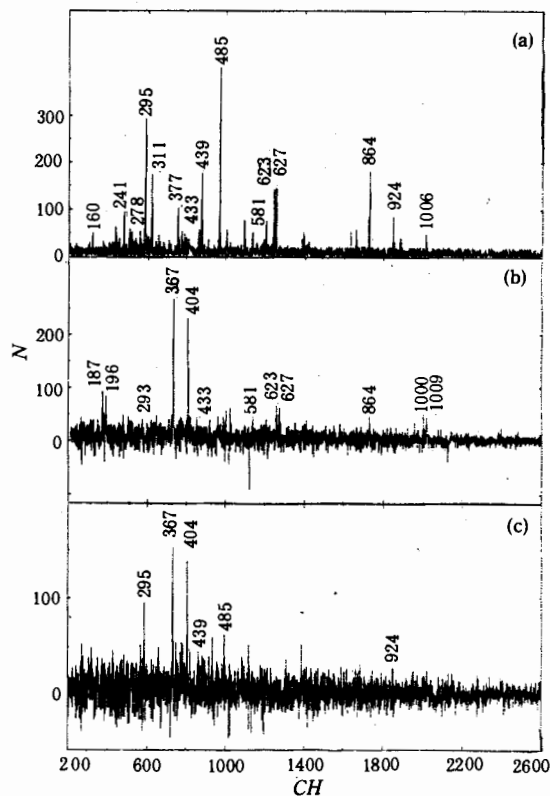
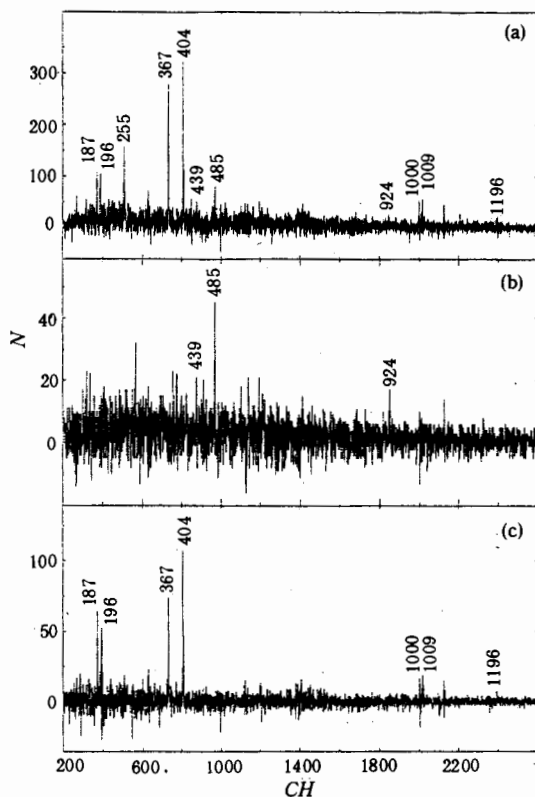


图 2

(a) 367keV γ 线在时间窗 $-600\text{ns} < \Delta t < -30\text{ns}$ 条件下的拉门谱, 即 367keV 跃迁比和它符合的 γ 跃迁至少晚 30ns, (b) 和 (c) 分别是未加时间窗限制的 97 和 121keV 跃迁的拉门谱.

献 [2] 中的 97keV 跃迁不应是 295keV 和 367keV 跃迁之间的连接 γ 跃迁, 121keV γ 线才是这个连接跃迁. 由于 HPGe 探测器在低能区康普顿本底高和探测效率低, 我们未能给出 121keV γ 线可靠的角分布数据, 但它的强度分布各向异性倾向为 $\Delta I = 2$ 的跃迁. 能量为 121keV 的 γ 线对于 $M2$ 和 $E2$ 跃迁的内转换系数分别是 $\alpha_{M2} \approx 45$ 和 $\alpha_{E2} \approx 3$, 单谱测量给出 121keV γ 线相对于 404keV γ 线的相对强度为 $I_r = 7 \pm 2$, 见表 1. 这样从强度平衡考虑, 可以排除 $M2$ 跃迁的可能性. 另外, 为了确定该同质异能态的寿命, 首先分别用 367 和 404keV γ 跃迁做门反演符合时间谱, 用文献 [3] 给出的方法求得 $17/2^+$ 同质异能态的半寿命 $t_{1/2} = 13.6 \pm 3.7\text{ns}$, 在实验误差范围内与文献 [2] 的结果相符. 这说明我们求寿命的方法是可信的. 然后反演了 295 和 367keV 跃迁之间的符合时间谱, 结果见图 4 (b). 为了便于比较, 图 4 (a) 给出了 404 和 1009keV 跃迁之间的瞬时符合时间谱. 从中可见, 图 4 (b) 的右边明显地变宽了, 这说明在 295 与 367keV 跃迁之间有一短寿命的同质异能态. 我们得到了此同质异能态的半寿命 $t_{1/2} = 19.3 \pm 4.9\text{ns}$. 文献 [2] 用

图 3 160keV γ 线的拉门谱

(a) 未加时间窗限制. (b) $-600\text{ns} < \Delta t < -30\text{ns}$ 条件下的拉门谱, 选择了比 160keV 跃迁早的 γ 线. (c) $30\text{ns} < \Delta t < 600\text{ns}$ 条件下的拉门谱, 选择了在时间上比 160keV 跃迁晚的 γ 线.

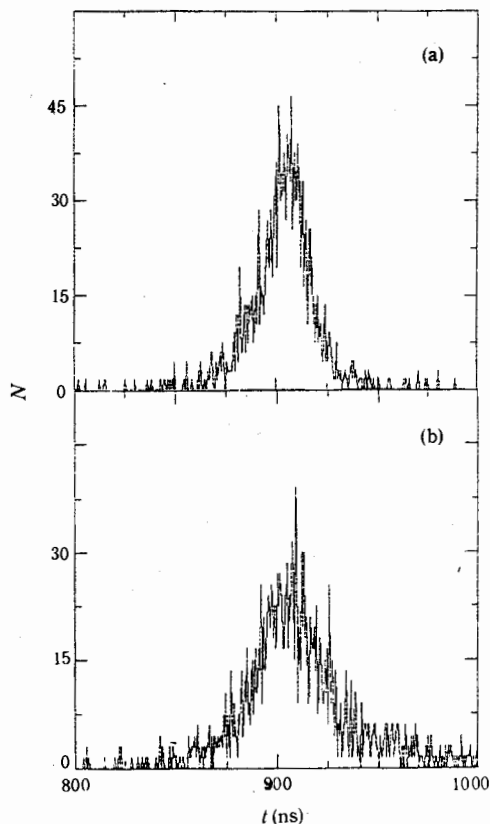


图 4

(a) 404 和 1009keV 跃迁的瞬时符合时间谱
(b) 295 和 367keV 跃迁的符合时间谱

同样的方法给出半寿命 $t_{1/2} \approx 60 \pm 20\text{ns}$, 由于本工作比文献 [2] 有比较好的统计符合计数, 因此我们的结果具有更高的可信度. 对于能量为 121keV 的 $E2$ 跃迁, $t_{1/2} = 19.3\text{ns}$ 给出的约化跃迁强度 $B(E2) = 1.3\text{W.u.}$. 该值很好地符合奇 A Bi 核的 $\frac{25^+}{2} \rightarrow \frac{21^+}{2}$ 跃迁的 $B(E2)$ 值的系统性变化规律^[4-8]. 综上所述, 我们指定了 121keV 跃迁退激的同质异能态的 J^π 值可能是 $\frac{25^+}{2}$. 在 $\frac{25^+}{2}$ 能级之上, 除 295keV 跃迁外, 本研究的 γ - γ 符合数据还给出 485, 439, 924 和 377keV 四条 γ 线, 它们都与 121keV 跃迁符合并在时间上先于 295keV 跃迁, 证实了文献 [2] 中测定的 $\frac{29^-}{2}$ 同质异能态的存在. 其中 924 和 377keV 这两条 γ 线是本工作新发现的.

通过仔细分析 160 和 255keV γ 线的拉门谱, 确定了它们之间的瞬时符合关系, 并

且发现它们在时间上晚于 485, 439, 924keV 跃迁, 但先于 367keV 跃迁. 图 3 (a)、(b)、(c) 是 160keV γ 线带不同时间条件下的拉门谱, 从中可以确定, 有一个介于 160 和 367keV 跃迁之间, 并由一未被探测到的低能 γ 退激的同质异能态. 由于 160 和 255keV γ 线强度较弱, 未能给出此同质异能态的寿命. 160 和 255keV γ 线的角分布测量结果表明它们均为 $\Delta I=1$ 的跃迁. 考虑到效率修正, 在 485keV 跃迁的拉门谱中, 160keV γ 线的强度至少是 255keV γ 线强度的三倍. 这表明 255keV 跃迁的内转换系数大于 160keV 跃迁的内转换系数. 因此, 160keV 跃迁的多极性应为 $E1$, 而 255keV 跃迁的多极性为 $M1$. 这样, 本工作确定的介于 160 和 367keV 跃迁之间的新同质异能态的 J^π 值可能是 $\frac{25^+}{2}$, 未被探测到的从此同质异能态退激的低能 γ 应该是 $E2$ 跃迁.

本工作的符合数据表明 367 与 97keV γ 线之间瞬时符合, 并且 97keV 跃迁退激一个同质异能态. 有许多 γ 跃迁都溃入到此同质异能态, 图 2 (a) 是 367keV γ 线在时间窗 $-600\text{ns} < \Delta t < -30\text{ns}$ 条件下的拉门谱 (即 367keV 比和它符合的 γ 线至少晚 30ns). 由于位于 97keV 跃迁之前的 γ 线强度较弱, 本工作无法从 γ - γ 符合时间谱中得到此同质异能态寿命. 864, 623 及 241keV γ 线都与 97keV 跃迁符合, 它们在时间上先于 367keV 跃迁, 但晚于 627keV 跃迁. 这肯定了文献 [2] 指定的介于 864 和 627keV 跃迁之间的同质异能态. 623 和 241keV 跃迁与 627keV 跃迁的符合关系是本工作确定的. 本工作识别的 433, 581, 947, 293, 278, 1006keV 这些新 γ 线都与 97keV 跃迁符合, 而且在时间上先于 367keV 跃迁. 另外, 278keV 跃迁还在时间上先于 293keV 跃迁, 这又确定了介于它们之间的一个新的同质异能态. 由于本研究不能给出 97keV 跃迁可靠的角分布数据, 因此不能指定这部分能级的 J^π 值, 对它们的性质还需进一步研究.

壳模型弱耦合理论认为奇 A Bi 核的晕态是由奇质子与相应偶 A Pb 核的中子空穴态耦合而成的, 并且角动量服从半经验的 $J_{\text{max}} - 1$ 规律^[9]. 本工作确定的由 121keV 跃迁退激的 $\frac{25^+}{2}$ 同质异能态激发能和退激它的 γ 约化跃迁强度都很好符合奇 A Bi 核的系统性变化规律^[4-8]. 这样, $\frac{25^+}{2} \rightarrow \frac{21^+}{2}$ 跃迁可解释为 $(\pi h_{9/2} \otimes v_{9^-})_{25^+/2} \rightarrow (\pi h_{9/2} \otimes v_{7^-})_{21^+/2}$ 的跃迁. 随着中子数的减少, $\frac{25^+}{2} \rightarrow \frac{21^+}{2}$ 跃迁的 $B(E2)$ 值有缓慢增加的趋势, 但从 $^{200}\text{Pb} \rightarrow ^{196}\text{Pb}$ 发现 $9^- \rightarrow 7^-$ 的跃迁 $B(E2)$ 值有完全相同的增加趋势^[10]. 因此, $\frac{25^+}{2} \rightarrow \frac{21^+}{2}$ 跃迁本质上是相应偶 A Pb 核的 $9^- \rightarrow 7^-$ 的跃迁, 而 $\pi h_{9/2}$ 这个价质子仅仅作“旁观者”而已. 对于 $\frac{29^-}{2} \rightarrow \frac{27^+}{2}$ 这个未被探测到的低能跃迁, 基于奇 A Bi 核能级结构的系统性并结合文献 [2] 给出的寿命测量结果, 可被解释为 $(\pi h_{9/2} \otimes 12^+)_{29/2^-} \rightarrow (\pi h_{9/2} \otimes 9^-)_{27/2^+}$ 跃迁. 奇 A Bi 核能级结构的系统性变化的一个显著的特点是随着中子数的减少, $\frac{13^+}{2}$ 能级能量的迅速降低, 这一能级是由 $\pi i_{13/2}$ 轨道与相应 Pb 核的 0^+ 态耦合而成的. 特别对于 ^{197}Bi , 这一能级降低的程度更为明显. 这可能是由于随着中子数的减少, 中子空穴态 $v_{13/2^-}$ 更容易被激发的缘故. 本工

作鉴别出的 ^{197}Bi 的几个新的高自旋同质异能态的起源是否与这个 $\pi i_{13/2}$ 质子轨道有关, 很值得在理论上做深入的探讨.

参 考 文 献

- [1] M. Pautrat et al., *Nucl. Phys.*, **A201** (1973) 449.
- [2] T. Chapuran et al., *Phys. Rev.*, **C33** (1986) 130.
- [3] 王韶舜, 核与粒子物理实验方法, 原子能出版社, 269 页.
- [4] W. F. Piel et al., *Phys. Rev.*, **C31** (1985) 2087.
- [5] T. Lonnroth, *Z. Phys.*, **A307** (1982) 175.
- [6] R. Brock et al., *Nucl. Phys.*, **A278** (1977) 45.
- [7] H. Hubel et al., *Nucl. Phys.*, **A294** (1978) 177.
- [8] T. Lonnroth et al., *Phys. Scr.*, **19** (1979) 233.
- [9] L. Peker et al., *Sov. J. Nucl. Phys.*, **4** (1967) 20.
- [10] R. Lutter et al., *Nucl. Phys.*, **A229** (1974) 230.

Study of Excited States in Neutron-Deficient ^{197}Bi

Zhou Xiaohong Sun Xiangfu Guo Yingxiang Lei Xiangguo Liu Zhong
Chen Xinfeng Zhang Yuhu Jin Hanjuan Luo Yixiao

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

Wen Shuxian Yuan Guanjun Li Guangsheng Yang Chunxiang

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

Received 14 March 1995

Abstract

High-spin states in ^{197}Bi were populated by bombarding natural Re target and isotope ^{187}Re target with ^{16}O beam of 100 MeV. Using comprehensive γ - γ - t coincidence measurements, three new isomers in ^{197}Bi were established and eleven new γ -transitions were identified, while errors in the existing level scheme were corrected. From the level structure systematics of the odd-mass Bi isotopes, the configuration and decay properties of a new isomer with $t_{1/2} = 19.3 \pm 4.9\text{ns}$ in ^{197}Bi were discussed. The γ -ray angular distributions were also measured. A new level scheme of ^{197}Bi was proposed.

Key words isomer, level scheme, γ - γ - t coincidence.