

## $^{208}\text{Hg}$ $\beta^-$ 衰变 $\gamma$ 纲图\*

张立 胡青元 赵进华 郑纪文 李占奎 李世红 甘再国  
于涌 范红梅 郭斌 张天梅 王春芳 王同庆 靳根明

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

森田浩介<sup>1</sup> 吉田敦<sup>1</sup> 蒲越虎<sup>1</sup> 工藤久昭<sup>2</sup> 矢野安重<sup>1</sup>

1 (日本理化学研究所回旋加速器室)

2 (日本新潟大学核化学系)

**摘要** 以 $^{18}\text{O}$ 重离子束轰击厚天然铅靶,通过多核子转移反应生成 $^{208}\text{Hg}$ 核. 辐照铅片放入离线熔化铅靶气相热色谱装置中处理,分离并收集汞元素产物. 完成了 $4\pi\Delta E_{\beta}\gamma\text{-}\gamma, \gamma\text{-X}(\gamma)$ 关联事件谱及 $\gamma$ 射线时序单谱测量. 建议了21条 $\gamma$ 射线,以及能量为1365,1727keV的两条 $^{208}\text{Tl}$ 新能级的 $^{208}\text{Hg}$   $\beta^-$ 衰变部分 $\gamma$ 纲图.

**关键词** 衰变纲图 能级  $\gamma\text{-}\gamma$ 关联

### 1 引言

重核区双满壳核 $^{208}\text{Pb}$ 邻近核的研究对核结构壳模型研究和发展有重要价值.  $^{208}\text{Tl}$ 核可以看成 $^{208}\text{Pb}$ 核芯和一个价中子粒子及一个价质子空穴的偶合. 其价中子处于 $N=126$ 大壳,而价质子处于 $Z=82$ 大壳.  $^{208}\text{Tl}$ 核的性质主要由质子空穴与中子粒子间跨壳残余相互作用决定.  $^{208}\text{Tl}$ 核的重要地位引起了实验核物理学家和理论核物理学家的浓厚兴趣,自20年代中期以来,先后有数十篇有关此核的实验<sup>[1-6]</sup>和理论<sup>[7-11]</sup>研究报道.

以往关于 $^{208}\text{Tl}$ 能级的实验研究是通过对天然钍放射系中间产物 $^{212}\text{Bi}$ 的 $\alpha$ 衰变研究进行的. 实验内容包括 $^{212}\text{Bi}$ 发射 $\alpha$ 谱的精细结构<sup>[1]</sup>, $\alpha$ 粒子与跟随 $\gamma$ 射线的 $\alpha\text{-}\gamma$ 关联,与内转换电子间的 $\alpha\text{-e}$ 关联,内转换系数,同质异能态寿命测量等<sup>[2-5]</sup>. 到60年代中期,已从实验上确认了 $^{208}\text{Tl}$ 的7个激发态能级,对其中包括基态的6个能级给出了自旋、宇称指定;观察到8条 $\alpha$ 跟随 $\gamma$ 射线,并测定了 $\gamma$ 射线的能量和相对 $\gamma$ 分支比. 然而,进入70年代之后再无新进展. 图1中汇总了迄今从 $^{212}\text{Bi}$   $\alpha$ 衰变研究所得出的信息<sup>[6]</sup>.

本工作首次从 $^{208}\text{Hg}$ 的 $\beta^-$ 衰变来研究 $^{208}\text{Tl}$ 能级. 各种不同质量公式计算预计, $^{208}\text{Hg}$

1999-07-27 收稿

国家自然科学基金(19575056)和中国科学院重大项目资助

823—828

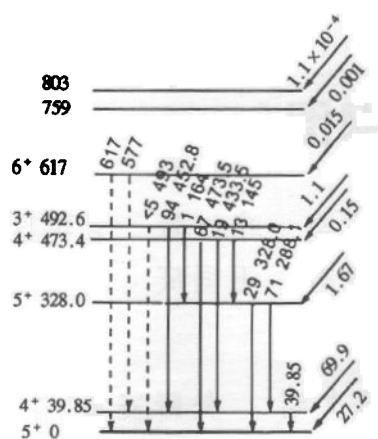


图 1  $^{212}\text{Bi}$  衰变研究所得  $^{208}\text{Tl}$  能级结构(引自文献[6])  
右方斜线上注明  $^{212}\text{Bi}$  衰变  $\alpha$  馈送到各能级的分支比.

$\beta$  衰变的最大  $Q_\beta$  值约为  $2.8\text{MeV}^{[12]}$ , 有可能馈送至比目前已知的  $^{208}\text{Tl}$  最高能量的  $803\text{keV}$  能级更高能量的能级. 另一方面, 已知的  $^{208}\text{Tl}$  低位态能级均为  $3^+$  以上的较高自旋态, 尽管  $759$  和  $803\text{keV}$  两条能级自旋、宇称尚未从实验确定, 但现有的一些理论计算预示, 很大可能为  $5^+$  和  $6^+$ <sup>[9,10]</sup>. 由于基态自旋为  $0^+$  的偶偶核  $^{208}\text{Hg}$  的半寿命已被测定为  $42\text{min}^{[13,14]}$ , 考虑到它的  $\beta$  衰变能范围, 可以预计  $^{208}\text{Hg}$  的  $\beta$  衰变应为一级禁戒跃迁<sup>[13]</sup>, 因此不可能直接能馈送至如图 1 所示的已知能级. 几乎所有基于壳模型框架对  $^{208}\text{Tl}$  能级结构的理论计算均预示, 在能量高于  $1\text{MeV}$  以上的较高激发态中可能存在着正宇称或负宇称的较低自旋态<sup>[7,9,10]</sup>, 因此通过  $^{208}\text{Hg}$   $\beta$  衰变研究有可能观察到  $^{208}\text{Tl}$  新的高激发能级. 从图 1 还可看出,  $\alpha$  衰变馈送至  $759$  和  $803\text{keV}$  能级的分支比极低, 以至于实验上无法观察到相应的跟随衰变  $\gamma$  射线. 由于  $^{208}\text{Hg}$  核是  $100\%$  的  $\beta^-$  衰变, 因此会有许多新的  $\gamma$  跃迁被观察到. 这些实验数据将为用壳模型来研究典型的  $^{208}\text{Pb}$  附近核的能级结构以及  $\beta$  和  $\gamma$  跃迁特性提供新的实验依据.

## 2 实验

### 2.1 $^{208}\text{Hg}$ 测试源的获得

本工作的难点之一是  $^{208}\text{Hg}$  测试源的获得. 以  $^{18}\text{O}$  束轰击铅靶,  $^{208}\text{Hg}$  核主要是通过从靶核  $^{208}\text{Pb}$  核中移出两个质子, 同时添加两个中子的奇异多核子转移反应过程生成的, 平均生成截面大约为  $5\mu\text{b}^{[15]}$ . 如此微弱的截面使获得可进行  $\gamma$ - $\gamma$  关联测量源的条件变得非常临界. 本工作共完成了两次实验. 第一次用日本理化学研究所(RIKEN)的中能重离子加速器引出的  $50\text{MeV/u}$   $^{18}\text{O}$  束, 经  $1\text{mm}$  的铝降能片后入射到对束流全阻止的铅靶片上. 第二次使用兰州重离子国家实验室 SFC 加速器引出的  $8.4\text{MeV/u}$  的  $^{18}\text{O}$  束照射天然铅靶片. 两次实验中, 辐照后的铅靶片均放入离线的熔化铅靶气相热色谱装置中进行处理. 有关该装置的结构和工作原理在文献[13]中已有详细介绍. 靶片在该装置中被加热至熔化. 在熔化状态下, 反应中生成的 Hg 以及其它低熔点的元素 Tl, Po, At 等产物被挥发出来, 并在穿过气相热色谱管时彼此分离. 其中只有 Hg 元素产物可穿过处于  $-10^\circ\text{C}$  至  $-20^\circ\text{C}$  低温的传输管尾部, 被收集到尾端的金箔收集器上. 此金箔即为放入探测系统的测试源.

### 2.2 探测系统及数据获取

本工作主要探测、记录  $\gamma$ - $\gamma$  关联事件谱, 并同时记录时间序列单谱. 在 RIKEN 使用

中能束的实验中,为了抑制对 EC 衰变的缺中子 Hg 同位素的探测,实验采用塑料闪烁体  $4\pi\Delta E_\beta$  输出作为开门信号,测量并记录  $E_\gamma-E_\gamma$  符合事件谱. 使用的两台 γ 射线探测器,一台是效率为 50% 的 N 型高纯锗(HpGe)探测器,另一台是单个效率为 20% 的 4 单元 Clover 组合 HPGe γ 探测器,两探测器夹角为 90°. 在近物所用低能<sup>18</sup>O 束实验中,使用了两台成 90° 放置的,效率为 30% 的 P 型 HPGe γ 射线探测器,并在其中一台 γ 探测器的对面用一台小平面 X 射线探测器以探测 X 射线及较低能量的 γ 射线. 实验记录  $\gamma_1, \gamma_2, X, t$  4 参数事件谱及  $\gamma_1, \gamma_2$  各自的时间序列 γ 单谱.

### 2.3 数据分析

数据分析依下述 3 个步骤进行:

(1) 以已知<sup>208</sup>Tl 能级间跃迁的 γ 射线<sup>[6]</sup> 开门,通过 γ-γ 关联关系寻找对应于<sup>208</sup>Tl 两个已知较高的 759 和 803keV 激发能级向其它已知能级间跃迁的新 γ 射线.

(2) 分别以新找到的 γ 射线及原来已知的 γ 射线开门,结合原有的 γ 射线级联关系,确定在 803keV 以上的新能级和新跃迁 γ 射线.

(3) 从累加的时间序列单谱所得到的各相关 γ 射线的时间衰减中,提取各 γ 射线强度及衰减半寿命. 通过与已知的<sup>208</sup>Hg β<sup>-</sup> 衰变半寿命<sup>[13,14]</sup> 比较,进一步确认对 γ 射线的指定. 通过对各 γ 射线衰减的最小二乘法拟合,得到外推至辐照结束时刻的 γ 射线强度,结合 γ 射线探测效率曲线,给出各 γ 射线相对分支比估算值.

## 3 实验结果

在两次实验中所观察到的 γ 射线间的符合关系是一致的. 表 1 列出用已知 γ 射线拉门所得到的与对应于 759 和 803keV 两条较高能级向下跃迁的新 γ 射线间的关联关系. 表 2 给出在确认 1727 和 1365keV 两条新能级时所依据的 γ 射线级联关系.

表 1 两次实验所得已知能级间跃迁 γ 射线 (单位:keV)

拉门 γ 射线		所得新 γ 射线					
452.8	44.1	310.4	266.9				
164	310.4	266.9					
473		142	285.6				
145		142	143.6	285.6			
288	44.1	142	143.6	266.9	285.6	289	310.4
328		142	143.6	266.9	285.6	289	310.4
39.8	44.1	142	143.6	266.9	285.6	289	310.4

表 2 确认 1727 和 1365keV 两条新能级所依据的 γ 射线级联关系 (单位:keV)

新能级	相关 γ 射线(对应的能级跃迁)	有级联关系的 γ 射线								
1727	925(1727→803)	44	39.8	145	310	266.9				
	968(1727→759)	142	143.6	288.1	328	39.8	266.9	285.6	453	164
	1234(1727→493)	39.8	453	164	328	493	288.1			
1365	606(1365→759)	145	164	328	288	473.5	433.5	39.8	266.9	
	562(1365→803)	44	310	142	433.5	143.6	288.1	328		

图 2 中给出确认 1727keV 能级及  $\gamma$  射线级联关系的拉门  $\gamma$  谱之一例. 图 3 示出部分  $\gamma$  射线的时间衰减曲线. 综合以上实验数据, 本工作尝试建立了包括 21 条  $\gamma$  射线, 及能量为 1727 和 1365keV 两条新能级的  $^{208}\text{Hg}$   $\beta^-$  衰变  $\gamma$  纲图, 如图 4 所示.

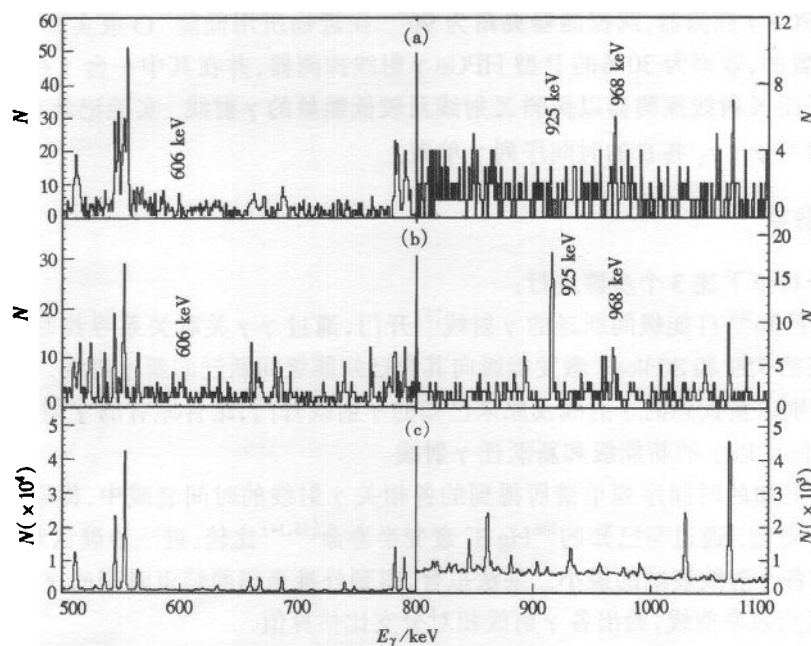


图 2 (a)用  $^{208}\text{Tl}$  第一激发态向基态跃迁的 39.8keV  $\gamma$  射线拉门;(b)从 795keV 能级向下跃迁的 266.9, 142, 及 285.4keV 3 条  $\gamma$  射线拉门谱的叠加;  
(c)500—1100keV 未拉门单谱

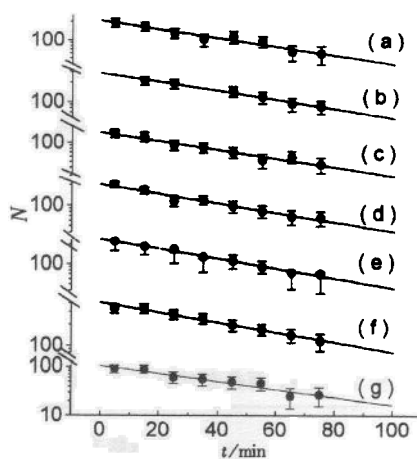


图 3 部分  $^{208}\text{Hg}$   $\beta^-$  衰变跟随  $\gamma$  射线的时间衰减曲线  
各曲线对应的  $\gamma$  射线 (keV), 半寿命 (min) 依次为: (a)452.8, 40.8; (b)39.86, 43.0;  
(c)288.1, 43.0; (d)285.4, 43.4; (e)44.1, 40.8; (f)266.9, 43.0; (g)310.8, 37.4.

## 4 讨论

(1)  $\gamma$  射线和相对分支比:  $^{212}\text{Bi}$   $\alpha$  衰变研究中观察到的对应  $^{208}\text{Tl}$  较低位能级间跃迁的已知  $\gamma$  射线, 在  $^{208}\text{Hg}$   $\beta^-$  衰变跟随  $\gamma$  射线中均观察到了. 我们注意到这些  $\gamma$  射线的相对分支比相对于  $\alpha$  衰变跟随  $\gamma$  情况有较大变化. 图 4 中  $\gamma$  射线能量在  $\pm 0.4\text{keV}$  范围内是准确的. 但从  $\gamma$  射线单谱数据中提取分支比时, 由于  $\gamma$  单谱测量本底的涨落和较低的计数统计, 误差可能在  $\pm 5\%—10\%$ . 在关联事件谱中还观察到另外一些较弱的  $\gamma$  线, 由于衰减半寿命提取的困难, 分支比 15% 以下的弱  $\gamma$  线均不能给出分支比值, 因此没列入图 4 的纲图中.

(2)  $^{208}\text{Tl}$  高激发态能级的自旋、宇称: 由于  $^{208}\text{Hg}$  的生成截面低, 收集到的产额也很低, 因此无法通过角关联测量给出较高激发态的自旋、宇称指定. 这里我们尝试通过与理论计算进行比较, 并对 759, 803, 1365, 1727keV 4 条能级的自旋、宇称做一讨论. 关于  $^{208}\text{Tl}$  能级谱的理论计算已有很多报道. 最后, 顾金南<sup>[9]</sup> 和张长华等<sup>[10,11]</sup> 对包括  $^{208}\text{Tl}$  在内的  $^{208}\text{Pb}$  附近核的能谱和一级禁戒  $\beta$  跃迁进行了系统计算. 他们使用大基壳模型程序 OXBASH, 对残余相互作用则采用加入了电荷交换项修正的表面  $\delta$  相互作用 (MSDI), 计算中包括了与  $^{208}\text{Pb}$  最近的价质子空穴在 50—82 大壳中的 8 条单粒子轨道, 和在 126—184 大壳中的 6 条粒子轨道. 计算的模型空间比前人计算的大得多<sup>[7]</sup>. 顾金南和张长华两次计算结果与已有的实验数据不仅能量位置, 而且能级的自旋、宇称都符合得很好. 两次计算 759 和 803keV 两能级给出的自旋宇称均为  $5^+$  和  $6^+$ .

由于偶偶核  $^{208}\text{Hg}$  基态自旋为  $0^+$ , 它的  $\beta^-$  衰变馈送到 803keV 及以下能级是高级禁戒的, 因此主要是馈送到较高能量上新寻找到的 1727 和 1346keV 两条新能级. 依前所述, 基于测定的约为 42min 的  $^{208}\text{Hg}$  半寿命和对最大  $\beta$  衰变能的估计, 基态  $^{208}\text{Hg}$  向这两个能级的  $\beta$  跃迁的比较半衰期约为 5.5 和 6.2, 均在一级禁戒跃迁的范围. 而理论计算在实验给出的两条能级相应能量附近预示会有激发能级存在, 但使用不同相互作用势计算预言的能级自旋宇称值都很不相同<sup>[10,11]</sup>, 表明计算所用相互作用势对  $\beta$  跃迁类型或自旋宇称的预言较之对能谱的计算结果更灵敏<sup>[11]</sup>. 比较计算所给出的两条新能级可能的组态波函数<sup>[9]</sup> 与  $^{208}\text{Hg}$  基态波函数后, 预计 1727 和 1346keV 两能级可能均为负宇称态. 它们的自旋宇称分别为  $1^-$  和  $2^-$ .

本工作给出了  $^{208}\text{Hg}$  衰变纲图的首次实验测量结果, 包括 21 条  $\gamma$  线和两条新能级. 结果可以在壳模型基础上得到解释.

感谢日本理化学研究所的 A. Ambe 教授和 S. Ambe 博士在使用放射化学实验室和终端设备给予的方便. 感谢顾金南同志给予的有益讨论. 感谢日本理化学所加速器运行

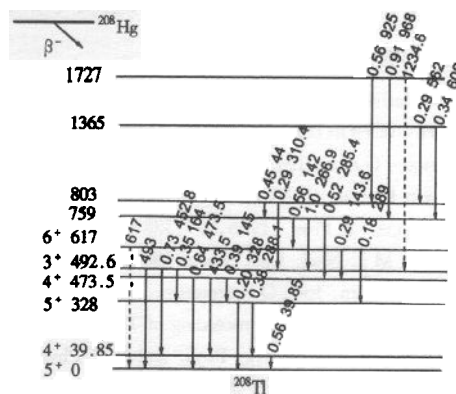


图 4  $^{208}\text{Hg}$   $\beta^-$  衰变部分纲图  
虚线为不确定的  $\gamma$  射线.

人员及中国科学院近物所兰州重离子加速器运行人员对本工作的大力支持.

### 参考文献 (References)

- 1 Lod Rutherford O M et al. Proc. Roy. Soc., 1932, **A139**: 617—637
- 2 JOHN W HORTON, Phys. Rev., 1956, **101**: 717—725
- 3 Bertolini G et al. Nucl. Phys., 1962, **30**: 599—612
- 4 Benott R et al. IL NUOVO CIMENTO, 1967, **IL A(1)**: 125—132
- 5 Karl Ilgen. Z. Phys., 1966, **197**: 328—342
- 6 Martin M J. Nucl. Data Sheets, 1986, **47**: 797—810
- 7 Yeong E Kim, John O Rasmussen. Phys. Rev., 1964, **135(1B)**: B44—B51
- 8 PRYCE M H L. The Proceeding of The Physical Society A, 1952, **65(394A)**: 51—79
- 9 GU JinNan. High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 1994, **18**: 429—435  
(顾金南. 高能物理与核物理, 1994, **18**: 429—435)
- 10 ZHANG ChangHua, GU JinNan. High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 1997, **21(8)**: 734—739  
(张长华, 顾金南. 高能物理与核物理, 1997, **21(8)**: 734—739)
- 11 ZHANG ChangHua, GU JinNan. High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 1997, **21(9)**: 812—817  
(张长华, 顾金南. 高能物理与核物理, 1997, **21(9)**: 812—817)
- 12 ZHANG Li. High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 1991, **15(2)**: 187—190  
(张立. 高能物理与核物理, 1991, **15(2)**: 187—190)
- 13 ZHANG Li, JIN GenMing, ZHAO JinHua et al. Phys. Rev., 1994, **C49**: R592—R596
- 14 ZHANG Li, ZHAO JinHua, ZHENG JiWen et al. Chin. Phys. Lett., 1997, **14(7)**: 507—509
- 15 ZHANG Li, ZHAO JinHua, ZHENG JiWen et al. Phys. Rev., 1998, **C58(1)**: 156—163

### $\gamma$ Scheme Following $^{208}\text{Hg}$ $\beta^-$ Decay\*

ZHANG Li HU QingYuan ZHAO JinHua ZHENG JiWen LI ZhanKui  
LI ShiHong GAN ZaiGuo YU Yong FAN HongMei GUO Bin  
ZHANG TianMei WANG ChunFang WANG TongQing JIN GenMing  
(Institute of Modern Physics, The Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

K. Morita<sup>1</sup> A. Yoshita<sup>1</sup> PU YueHu<sup>1</sup> H. Kuto<sup>2</sup> Y. Yano<sup>1</sup>

<sup>1</sup> (The Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN), Wako, Saitama, 351-0198, JAPAN)

<sup>2</sup> (Nagasaki Institute of Applied Science, Niigata University, JAPAN)

**Abstract** The  $^{208}\text{Hg}$  has been produced in multi-nucleon transfer reactions induced by  $^{18}\text{O}$  ion beam on a thick, natural lead target. The irradiated lead pieces were put into agasthermochromatographic device, in which the Hg-element products were separated and collected. The  $4\pi\Delta E_{\beta-\gamma-\gamma}$  and  $\gamma\text{-X}(\gamma)$  coincidence as well as time-successive  $\gamma$ -ray single spectrum measurements were performed. A partial  $\gamma$  scheme following  $^{208}\text{Hg}$   $\beta^-$  decay has been proposed for the first time, which has taken into account 21  $\gamma$ -rays and two new energy levels at 1365 and 1727 keV, respectively.

**Key words** decay scheme, energy level,  $\gamma$ - $\gamma$  correlation

Received 27 July 1999

\* Supported by NSFC(19575056) and Major Subject of The Chinese Academy of Sciences