

CNIC-01805

CAEP-0155

## X 射线诱导高自旋核素 $\gamma$ 辐射研究

杨天丽 郝樊华 刘晓亚 龚建

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 绵阳, 621900)

### 摘 要

综述了 X 射线诱导高自旋核素研究的意义和发展过程, 介绍了诱导  $\gamma$  辐射理论模型和跃迁机理、实验构思和方案, 详细叙述了以同质异能核素  $^{180m}\text{Ta}$  和  $^{178m2}\text{Hf}$  为样品的诱导  $\gamma$  辐射实验, 并对实验结果进行了分析。其合理的理论框架和十分有益的实验数据为低能量泵浦产生  $\gamma$  射线激光提供了有力技术支持。

**关键词:** 诱导  $\gamma$  辐射 自发辐射跃迁 同质异能核素

**Study on Gamma-Ray  
Transitions Induced in Nuclear Spin Isomers by X-rays**  
(*In Chinese*)

YANG Tianli HAO Fanhua LIU Xiaoya GONG Jian  
(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, CAEP, Mianyang, 621900)

ABSTRACT

The development of induced X-ray has been summarized for high spin isomer. The radiation model, transition mechanism and experiment plan have been introduced. The experiments about isomers  $^{180m}\text{Ta}$  and  $^{178m2}\text{Hf}$  have been narrated in detail respectively, and the analysis between those results have been obtained. The reasonable theoretical frame and good experimental data have offered the powerful technique base for pumping  $\gamma$ -ray laser with low energy.

**Key words:** Induced  $\gamma$  radiation, Spontaneous transition, Isomer

## 引言

核禁试条约签定后,一种新兴的战略武器 $\gamma$ 射线武器研究已悄然展开。由于该类武器可以通过 $(\gamma, n)$ 反应产生的中子熔化敌方核弹头中核装置裂变芯,高能康普顿散射电子产生巨大电磁脉冲,暂时或永久破坏核战斗部中的电子元件,以及大气层中使用条件宽,对作战人员也很致命等战略意义,并且, $\gamma$ 射线发射过程本身不涉及核反应,因此,有人担心此类武器将会模糊常规武器与核武器间的关键区别,从而引发新一轮军备竞赛。但专家认为:不拥有 $\gamma$ 射线武器的国家无法与拥有该类武器的国家作战,同时也将促使那些无法取得此类武器的国家制造核武器作为一种威慑,而导致新一轮核扩散。尽管有关 $\gamma$ 射线武器的概念在理论和实验上还没有得到完全证实<sup>[1]</sup>,但得克萨斯大学的研究进展给美国国防部以信心。基于战略防御等目的,俄罗斯、乌克兰、德国、日本、法国、芬兰和罗马尼亚等国的研究者也相继加入了此类武器的预先研究行列<sup>[2]</sup>。

1961年苏联Levrivlin<sup>[3]</sup>教授首先引入了 $\gamma$ 射线激光的概念和实验方案,提出采用低能量射线如X射线照射具有高储能密度、大释能积分截面的同质异能核素,诱导该受照核素发生 $\gamma$ 跃迁。实验设计于1982年<sup>[2]</sup>在达拉斯洲得克萨斯大学量子电子研究中心开始,四年后首次实验在该中心进行<sup>[4]</sup>。实验中将1.2 mg  $^{180m}\text{Ta}$ 样品受6 MeV直线加速器韧致辐射产生的X射线照射,观察到很大的荧光产额。后来又选定 $^{178m2}\text{Hf}$ <sup>[2]</sup>做进一步的研究。随着实验设备更新与实验精度的提高,实验得到了令人振奋的结果: $^{178m2}\text{Hf}$ 的诱导 $\gamma$ 辐射产额比自发辐射跃迁高出1~6个百分点。同时,理论研究者认为,同质异能核素中K量子数混合使得某些禁戒跃迁成为可能是产生大释能积分截面的主要因素。这些合理的理论框架和十分有益的实验数据为X射线泵浦产生 $\gamma$ 射线和短波长高能量强激光源即 $\gamma$ 射线激光器提供了有力的技术支持。

## 1 诱导 $\gamma$ 辐射(IGE)机理

### 1.1 同质异能核素

原子核是原子中最小的组成部分,核中质子和中子高速运动能够吸收电磁波,使得质子或中子跃迁到能量更高的激发态。质子或中子通常又能及时放出能量而跃迁到基态或低激发态上。然而,极少量的核素(如Hf, Ta)具有的高自旋激发态不满足自发跃迁选择定则,激发态与低激发态间的跃迁禁戒,则很高的能量(GJ/g)会被存储10年甚至几十年,直到外界给它以激励。这种处于长寿命高能量激发态的元素称为同质异能核素,类似原子或分子的亚稳态。同质异能核素是产生诱导 $\gamma$ 辐射的基本物质,产生这种 $\gamma$ 辐射的装置一般称为 $\gamma$ 射线激光器。

### 1.2 K量子数阻禁

对于能量极高的重原子核,核形状由正常的球形变形为椭球形。此时角动量J不能完整描述核结构,引入另外一个量子数K(即角动量J在变形核长轴上的投影)。高自旋同质异能核素(如 $^{180m}\text{Ta}$ ,  $^{178m2}\text{Hf}$ )系长寿命多准粒子态,不同角动量的转动带间产生强电磁辐射必须同时满足 $J < L$ 和 $K < L$ 条件。高自旋同质异能核素激发态跃迁到具有相同J不同K的转晕能带(通常是基态带GSB)的辐射衰落严格受K量子数阻禁的约束。相反,在具有相同K不同J的转晕能带间迅速发生自发跃迁(包括 $E_1, M_1, E_2, M_2$ ),且高阶跃迁的强度比

原子分子的同阶跃迁的强度高几个数量级。因此,在高自旋同质异能核素激发态与转晕能带间产生跃迁的关键是需要有一个混合  $K$  量子数的中间能级存在。该混合  $K$  态包括高  $K$  的激发态和低  $K$  的基态能级结构<sup>[5~9]</sup>。

### 1.3 诱导电磁辐射

高能量长寿命的同质异能态发生跃迁的方式是通过外界给予激励,利用低能量如 X 射线与核的散射过程诱导发射  $\gamma$  光子。该过程称为巨  $(\gamma, \gamma')$  共振。前  $\gamma$  表示吸收的光子,后  $\gamma'$  为出射的荧光光子。若利用硬 X 射线照射样品, X 射线光子与高自旋的同质异能素相互碰撞,将能量传递给核素并使之发生共振吸收后激发到混合  $K$  态(又称激发阈能态)。该混合态中包括高  $K$  激发态和低  $K$  的基态能级,这部分低  $K$  的基态能级与能量低于混合  $K$  态的基态带 GSB 中部分转动能级间满足自发跃迁选择定则,处于混合态的核子发射能量从千电子伏到兆电子伏范围不等的  $\gamma$  光子后衰落到低  $K$  能带上。在低  $K$  能带中由于不受  $K$  量子数阻禁的约束,同  $K$  的各转动能级间自发跃迁概率很大,核子通过级联跃迁使同质异能素很快落到稳定的基组态,并以  $\gamma$  射线荧光形式将储存的高密度能量和入射光子的能量释放出来,发出荧光的上能级称为荧光能级。

图 1 表示了  $(\gamma, \gamma')$  反应中将同质异能素激发到第  $J$  中间态的过程。其中  $J$  态表示为混合  $K$  态,左边上箭头 3 表示共振吸收 X 射线过程,右边下箭头 1 为混合  $K$  态到低  $K$  能级的自发辐射衰落过程,下箭头 2 表示同一  $K$  量子数不同  $J$  的转动能级间的自发辐射级联跃迁过程。对这种通过中间混合态使得处于同质异能素的核子转移到发出荧光的相关能级的过程,主要衡量参数为积分截面  $(\sigma\Gamma \equiv \pi b_a b_o \Gamma \sigma_o / 2)$ 。其中  $\sigma_o$  是 Breit-Wigner 截面的峰值,它与入射光波长的平方成正比; $b_o$  是混合态衰落到荧光能级的辐射分支比; $b_o \Gamma$  表示由混合态衰落到荧光能级的辐射宽度(对应着衰落到荧光能级的分支比和同质异能素能级的自然宽度)。用  $N_f$  表示被转移或被泵浦到荧光能级的离子数,若入射泵浦波长满足光性薄条件,则

$$N_f = N_i \Phi_o \int_0^{E_o} \sigma(E) F(E, E_o) dE \quad (1)$$

式中,  $N_i$  是反应初态即样品的离子数,辐照光连续性通过总通量  $\Phi_o$  和  $F$  函数<sup>[7,8]</sup> 来描述。积分是在吸收共振线形范围内进行的,其间连续辐照光强度稳定。利用实验得到的荧光能级的离子产额和已知的辐照光谱数据可以得到积分截面。

## 2 实验研究

### 2.1 实验方案与配置

触发高自旋同质异能核素释放能量的关键是寻找有效的激发阈能混合  $K$  态。通过共振吸收 X 射线将高  $K$  同质异能核素激发到混合  $K$  态,测量并计算混合  $K$  态 Breit-Wigner 截面的峰值  $\sigma_o$ 、向下通过自发辐射态衰落的辐射宽度等,可以得到实验中的激发积分截面

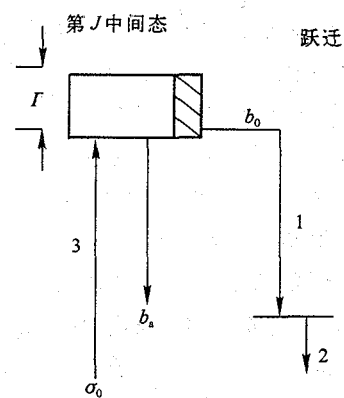


图 1 第  $J$  混合能级的衰变模式概图

和荧光产额。

20 世纪 80 年代中期至 90 年代中期,6 台不同实验环境的韧致辐射源被用来证实满足方程(1)的诱导电磁辐射荧光模型。这些装置包括:国际物理实验室 DNA/PITHON, Harry Diamond 实验室的 DNA/Aurora,得克萨斯大学卫生科学中心的 4 MeV 和 6 MeV 的医用直线加速器,在 Darmstadt 的超导喷射器储存环(S-DALIAC)和得克萨斯大学 TEXAS-X 4 MeV 研究性直线加速器。

得克萨斯大学量子电子研究中心 C. B. Collins 领导的研究组一直致力于探索诱导  $\gamma$  射线辐射的科学原理和可行性,设计并进行了一系列实验。图 2 是该类实验的典型配置概图。图中显示:将同质异能核素样品放置在直径为 1 cm 的阱中,距 X 射线的出射点 5.5 cm。两个独立的 10% 同轴 Ge 探测器呈扇状放在离靶 20 cm 处,探测器与靶间用 Cd 板隔离,每个 Ge 探测器安装了 2 mm 厚的 Cu 屏蔽层。探测器接受的计数被放大,输出信号分别录入到两个 8K 通道的 ADC 和两个 2K 通道的 ADC。另外,实验配置中利用 P-I-N 二极管产生一个时间宽度与 X 射线辐照时间相等的触发脉冲,用来产生两个时间宽度和间隔不同的数字逻辑门,使得 4 个 ADC 装置能够在辐照内和辐照间隔间完全独立并及时收集诱导  $\gamma$  辐射荧光计数。

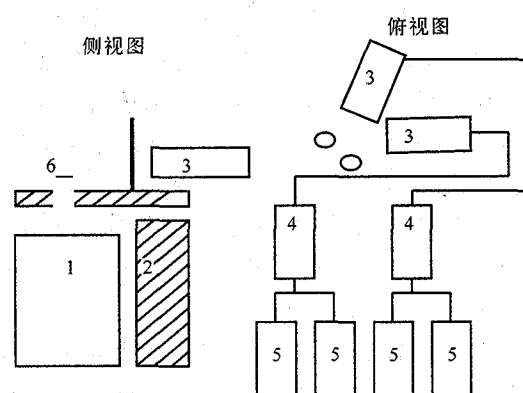


图 2 诱导  $\gamma$  辐射实验配置概图

1—X 射线源;2—水泥墩;3—Ge 探测器;  
4—放大器;5—ADC;6—Hf 靶

## 2.2 高自旋 $^{180m}\text{Ta}$ 在 $(\gamma, \gamma')$ 反应中的激发与去激发

高自旋同质异能核素 $^{180m}\text{Ta}$ 是自然界中唯一存在的同质异能核素,丰度为 0.012%。该同质异能态与基态带间的角动量子数差  $\Delta J=8K$ ,量子数差  $\Delta K=8$ ,最初并不受研究者重视。但是,其样品供给量能够达到 mg 量级,且是自然界中唯一能产生  $10^{15}$  W 能量的材料,因此 $^{180m}\text{Ta}$ 成为光泵浦诱导  $\gamma$  辐射(IGE)实验的首选对象。图 3 是 $^{180m}\text{Ta}$ 的部分能级。 $1^+$ 基态的半衰期为 8.1 h, $9^+$ 同质异能态半衰期大于  $1.2 \times 10^{15}$  a,储存的能量为 75.3 keV。基态 Ta 有 86% 的概率通过轨道电子俘获成为 $^{180}\text{Hf}$ ,另外 14% 的概率发生  $\beta^-$  衰变。

1987 年<sup>[4]</sup>,1.2 mg $^{180m}\text{Ta}$  样品在得克萨斯大学卫生科学中心的 6 MeV 医用直线加速器韧致辐射的照射下,观察到大量的荧光。这是第一次 $(\gamma, \gamma')$ 反应使同质异能态被激发,也是第一次见证了巨 $(\gamma, \gamma')$ 泵浦共振过程中跃迁到混合 K 态存在的事实。mg 量级靶产生的荧光证明了意想不到的反应通道被打开。Carroll J J 等人对实验数据分析后得到 $^{180m}\text{Ta}$  泵浦的 X 射线能级不确定度接近 0.5 eV。随后,为了决定同质异能态到混合 K 态的跃迁能量  $E_j$ ,C. B. Collins 研究小组在 S-DALINAC 设备上,分别采用能量范围在 2.0~6.0 MeV 间的 14 个端点能量

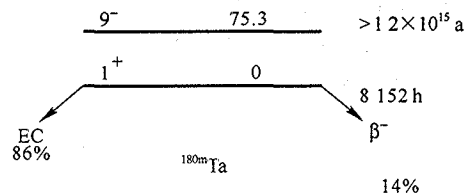


图 3 同质异能素 $^{180m}\text{Ta}$ 的部分能级结构

照射下进行了一系列 $^{180m}\text{Ta}(\gamma, \gamma')^{180}\text{Ta}$ 反应。其中有 12 个高端点能量辐照产生了可以测量的荧光能级。通过调节实验值 $(\sigma\Gamma)_0$ 对方程(1)进行数据拟合得到 $^{180m}\text{Ta}$ 同质异能态粒子布局以及自发辐射到荧光能级的积分截面,即激发阈能为 $(2.8 \pm 0.1)\text{MeV}$ 和 $(3.6 \pm 0.1)\text{MeV}$ 时积分截面分别为 $(12\,000 \times 10^{-29})\text{cm}^2 \cdot \text{keV}$ 和 $(35\,000 \times 10^{-29})\text{cm}^2 \cdot \text{keV}$ 。这些截面几乎是普通核激发截面的 10 000 倍。另外,他们还还对质量数在 180 附近的 19 种同位素进行了巨泵浦共振过程实验,证明 X 射线共振吸收积分截面的确比普通核素的吸收截面值大 10 000 多倍。

俄罗斯核研究联合实验室小组研究了 $^{180m}\text{Ta}(\gamma, \gamma')$ 反应中的去激发机理。实验在 Dubna MT-25 装置上进行(如图 4 所示)。出射电子的能量为 1.8 MeV,转换装置为 2 mm 厚 W 圆片,它与高能电子碰撞发出韧致辐射,含有 $^{180m}\text{Ta}$ 的 100  $\mu\text{m}$  厚的样品放在 W 片后面以吸收韧致辐射发出的 X 射线。由于 In 的光激发截面已知,实验中采用 In 的光激发作为对照,辐照后样品的活性通过分辨率为 3 keV(以 $^{60}\text{Co}$  1 332 keV 线为基准)的 Ge 探测器测量。得到了 $^{180}\text{Ta}$ 基态相对于 $^{115m}\text{In}$ 激发截面以及同质异能核素与基态核素光激发截面比(见表 1)。

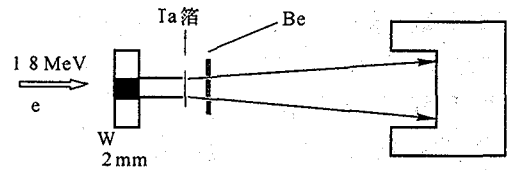


图 4 Dubna MT-25 上的韧致辐射诱导反应的实验概图

表 1 基态 $^{180}\text{Ta}$ 核相对于 $^{115m}\text{In}$ 同质异能核的产额、 $^{180m}\text{Ta}$ 光激发积分截面和截面比

$E_0/\text{MeV}$	$Y(^{180m}\text{Ta})/Y(^{115m}\text{In})$	$\sigma_{\text{int}}(^{115m}\text{In})/(\text{mb} \cdot \text{keV})$	$\sigma_{\text{int}}(^{180m}\text{Ta})/(\text{mb} \cdot \text{keV})$	$\sigma_m/\sigma_0$
6.0	<1	1 200	<2	—
6.5	5.0	2 100	8	0.20
7.0	5.0	3 200	12	0.25
7.5	42	4 400	—	—
8.0	1 600	5 700	—	—

A. G. Belov 等人认为产生大积分激发截面的原因与三方面的因素有关:存在大量的激活混合 K 态,其次混合态的能级宽度较宽,再者是回落到荧光能级的自发跃迁概率也很大。对于 $^{180m}\text{Ta}$ ,端点能量增加使得同质异能核素的产额比快速增加,这个趋势表明激发积分截面的主要贡献来自于存在大量处于激活的超级激发态(即混合 K 态)。

在 $E_r < 6\text{ MeV}$ 条件下,光的平均吸收截面可以表示为:

$$\sigma = \frac{(2I_i + 1) \lambda^2 \Gamma}{(2I_0 + 1) 8\pi D} \quad (2)$$

式中, $D$ 是能级间的平均距离。若 $\Gamma \approx 10^{-2}$ ,根据不同的 $D$ 就可以估计出所要研究的核的光吸收截面。对 $^{180m}\text{Ta}$ 去激发而言,当两能级的自旋相差不大( $\Delta I = 3 \sim 4$ ),积分截面成为 $\gamma$ 射线激光的一种重要标定。图 5 给出了 $^{180m}\text{Ta}(\gamma, \gamma')$ 反应中的激发与去激发过程。 $^{180m}\text{Ta}$ 吸收 X 射线后由 $K=9, J^\pi=9$ 激发到混合 K 态的 $8^+, 9^+, 10^+$ 等能级上,这些能级具有很大的自发跃迁概率,核子很快衰落到 $K=1, J^\pi=7^+, 8^+, 9^+$ 等基态带能级上,进而在该转动带中各能级间迅速通过磁偶极 M1,电四极 E2 跃迁自发辐射衰落到基态 $K=1, J^\pi=1^+$ ,同时放出

不同能量的  $\gamma$  射线荧光。这种  $^{180m}\text{Ta}$  的去激发途径解释了  $^{180m}\text{Ta}(\gamma, \gamma')$  反应中基态  $^{180}\text{Ta}$  的丰度比。

对比上面两个实验小组的实验结果发现：(1) 当  $E_r > 2.8 \text{ MeV}$  时， $^{180m}\text{Ta}$  同质异能核素开始释放所储存的高密度能量，对应的 X 射线吸收积分截面很大。即  $2.8 \text{ MeV}$  是  $^{180m}\text{Ta}$  同质异能核素释能的激发域能。(2)  $E_r$  越高，基态  $^{180}\text{Ta}$  核与同质异能核素截面比越大，表示该核素混合  $K$  态中角动量大者可能向低能级跃迁的概率越大。(3)  $^{180m}\text{Ta}$  激发效率具有边缘效应，表明不是所有能量大于  $2.8 \text{ MeV}$  的射线都能触发该核素释放能量。从另一个角度讲，在同一个混合  $K$  态中，不是所有的低  $K$  能级都能

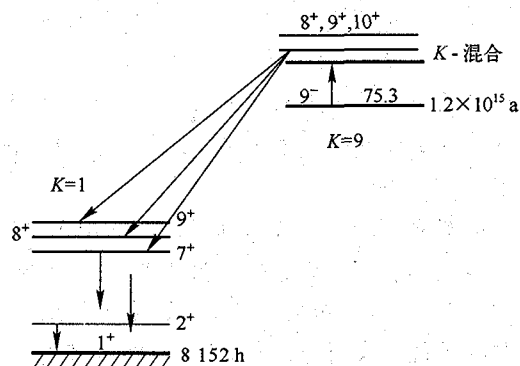


图 5  $^{180m}\text{Ta}$  同质异能核素的去激发过程概图

快速衰落，也不止一个混合  $K$  态中的能级才具有很大的自发跃迁概率而发出  $\gamma$  射线。因此，究竟有哪些混合  $K$  态的能级能满足释能的要求，需要采用原子核能级结构与光谱理论以及光与原子核的散射理论的大型计算程序进行大量细致的计算，也要通过反复实验工作来衡量。而目前，有关该方面的理论工作很少。高自旋  $^{180m}\text{Ta}$  在  $(\gamma, \gamma')$  反应中的激发与去激发过程为进一步研究 X 射线诱导放大  $\gamma$  射线辐射以及研发高能量短波长激光辐射源打开了希望之门。

### 2.3 $^{178m2}\text{Hf}$ 核素的诱导 $\gamma$ 射线辐射

经过十几年的研究得出结论：基于储存能量高、最容易被触发等特点， $^{178m}\text{Hf}$  核素是最佳的诱导  $\gamma$  辐射材料。

#### 2.3.1 $^{178m}\text{Hf}$ 产生 IGE 的相关核能级结构

$^{178}\text{Hf}$  核素有两个显著的同质异能素  $^{178m1}\text{Hf}$  和  $^{178m2}\text{Hf}$ 。第一个核素是  $^{178}\text{Hf}$  核中最外层的  $1h_{7/2}$  轨道上的质子激发到  $1h_{9/2}$  轨道上形成的 2 准粒子体系  $^{178m1}\text{Hf}$ ， $I^\pi = 8^-$ ， $K = 8$  态，半衰期为  $4 \text{ s}$ ，能量为  $1.147 \text{ MeV}$ 。第二个核素是  $^{178}\text{Hf}$  核中最外层的  $1h_{7/2}$  轨道上的中子和质子分别激发到  $1h_{9/2}$  轨道上形成的 4 准粒子体系  $^{178m2}\text{Hf}$ ， $I^\pi = 16^+$ ， $K = 16$  态，半衰期为  $31 \text{ a}$ ，激发能量为  $2.446 \text{ MeV}$ 。前者的能量很快被释放，半衰期很短，但是后者的  $K$  量子数很高，它到低  $K$  带转动态间的  $K$  量子数变化太大  $\Delta K = 14$ ，使得高自旋核素的自发辐射跃迁被禁戒能量很难释放，储存能量很高（能量密度为  $1.3 \text{ GJ/g}$ ）。因此该核素成为目前最理想的诱导  $\gamma$  射线辐射材料。 $^{178m2}\text{Hf}$  核素部分相关能级结构见图 6（纵轴单位为  $\text{MeV}$ ）。图 6 中左边的能级是  $K$  量子数最低的基态带

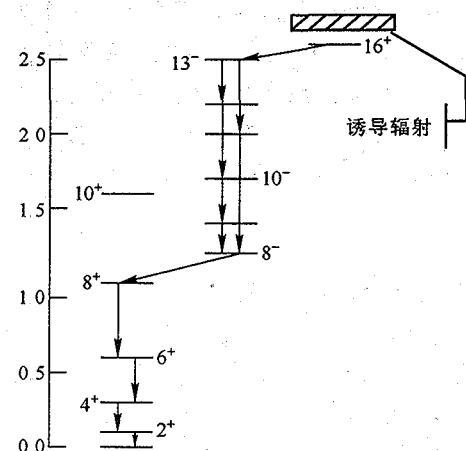


图 6  $^{178m}\text{Hf}$  同质异能核素部分能级结构概图

(GSB),中间显示了  $K=8$  的 2 准粒子体系  $^{178m1}\text{Hf}$  的转动带能级,右边是  $K=16$  的 4 准粒子体系  $^{178m2}\text{Hf}$  的能级,该能级上面的阴影部分是期望  $K$  混合能级。

### 2.3.2 $^{178m2}\text{Hf}$ 核素的诱导放大 $\gamma$ 辐射

C. B. Collins 研究小组在近几年间对  $^{178m2}\text{Hf}$  的 X 射线诱导  $\gamma$  辐射实验进行了集中研究<sup>[9]</sup>。1999 年,利用牙医用的 X 射线脉冲器辐照含有  $6.3 \times 10^{14}$  个  $^{178m2}\text{Hf}$  核的样品。产生韧致辐射的控制电流为 15 mA,端点能量分别是 70 和 90 keV。该实验是第一次对  $^{178m2}\text{Hf}$  核素开展工作。实验中发现:当端点能量为 70 keV 时,Ge 探测器测得 100 多条谱线,其中能量为 426 keV 的谱线强度比自发辐射的强度大;端点能量为 90 keV 时,能量为 426 和 495 keV 的谱线强度也比自发辐射的强度大。另外还发现了 454 keV 谱线。根据核结构的壳层模型理论知道,426 keV 谱线对应基态带的  $8^+ \rightarrow 6^+$  的跃迁、495 keV 和 454 keV 谱线分别对应 2 准粒子体系中的  $11^- \rightarrow 9^-$  和  $10^- \rightarrow 8^-$  跃迁。实验数据清晰表明,这三条谱线的强度比自发辐射的强度分别提高了  $2.0\% \pm 1.3\%$ ,  $6.3\% \pm 2.2\%$  和  $11.5\% \pm 10.7\%$ 。这一令人振奋的实验结果意味着通过 X 射线共振吸收能够诱导并放大  $\gamma$  辐射。

为了寻找产生级联荧光的激发阈能并拓展实验内容,该实验组 2000 年在相同的实验配置下(见图 2),仍然将  $6.3 \times 10^{14}$  个  $^{178m2}\text{Hf}$  核的样品放在端点能量为 63 keV 的韧致辐射中照射,得到了不同于 1999 年的结果。即(1)实验观察到 213.4 keV 和 325.5 keV 两条强度较大的光谱。与自发辐射相比,该两条谱线的强度分别提高了  $1.6\% \pm 1.3\%$  和  $0.33\% \pm 0.22\%$ 。前者是基态带中  $4^+ \rightarrow 2^+$  的跃迁谱线,后者对应着  $6^+ \rightarrow 4^+$  的跃迁。(2)观察到许多以前未曾观察到的新谱线。其中能量为 210.3 keV 的光谱强度较其他的大,它对应的  $\gamma$  光子计数为 1 080,属于  $K^\pi=6^-$  转动带。(3)统计显示  $^{178m2}\text{Hf}$  核素的利用共振吸收触发释放高能量所需的激发光子的能量  $E_x < 20$  keV。假设 X 射线吸收共振带处于 20 keV 以下,则计算得到的积分截面  $\sigma\Gamma > 2.2 \times 10^{-22} \text{ cm}^2 \cdot \text{keV}$ 。

另一种诱导  $\gamma$  射线辐射实验也取得了很好的效果<sup>[10]</sup>。该实验基本思路是通过将重元素核外近核区电子壳层中的电子能量转移到核中以达到激发原子核的目的。Kishimoto 等<sup>[11]</sup>用同步加速辐射(SR)激发  $^{192}\text{Au}$  基态观察到这种非共振激发(NEET)现象。2002 年 C. B. Collins 等人又将该技术用来激发  $^{178m2}\text{Hf}$  核素,实验中采用 Spring-8 同步加速辐射源,输出的 X 射线光子的能量调谐在 9~13 keV,实验观察到了基态带的 213.4 keV( $4^+ \rightarrow 2^+$ ), 325.5 keV( $6^+ \rightarrow 4^+$ ), 426.4 keV( $8^+ \rightarrow 6^+$ )和 2 准粒子体系中 216.7 keV。并且这些  $\gamma$  光谱的强度比自发辐射跃迁的提高了  $2.99\% \sim 3.27\%$ 。另外,根据积分截面表达式  $\sigma_e = fAF$  (其中  $f$  为光谱强度的提高因子, $A$  为自发辐射跃迁速率系数, $F$  是辐照光子流)得到了对应的 NEET 共振积分截面为  $1.77(0.43) \times 10^{-20} \sim 1.95(0.45) \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 。

对于 4 准粒子体系的  $^{178m2}\text{Hf}$  而言,目前的实验工作观察到强度增加的  $\gamma$  光谱中既包括基态带中的跃迁,也包括 2 准粒子体系中转动带能级间的跃迁。这就给人们解释该核素的诱导  $\gamma$  发射机理提供了两种思路:其一,共振吸收后激发到的混合  $K$  态中包括  $K=8$ ,但不包括基态带  $K=2$  的混合态的能级上的核子向 2 准粒子体系  $K=8$  的转动带能级跃迁产生的自发辐射,该转动带中的核子很快回落到  $I^\pi=8^-$ ,  $K=8$  态,然后该态上的核子再通过自发辐射跃迁到基态带的  $I^\pi=8^+$  态,最后在基态带的核子通过自发辐射级联跃迁最终衰落到成为  $^{178}\text{Hf}$  核。其二,混合  $K$  态中既包括  $K=8$  的态也包括基态带  $K$  的态。前者可以通过第一种思路稳定回落到  $^{178}\text{Hf}$  稳定核,后者则直接由混合  $K$  态自发辐射到基态带中高激发



态,再通过级联跃迁发射荧光衰落后为 $^{178}\text{Hf}$ 稳定核。究竟是哪种机制更接近物理本质?目前为止这一问题还没有定论,但希望以上思路可以对寻找真实的发射机理有所帮助。

表 2 得克萨斯与阿贡研究组的实验对比

	C. B. Collins 研究小组	L. Ahamd 研究小组
X 射线谱	窄带可调; $\Delta E=0.5\text{ eV}$	“白光”; $\Delta E=0.5\text{ eV}$
靶材料	未知	Al 和 $\text{HfO}_2$ 的混合物、电镀 Hf
X 射线机理	韧致辐射、同步加速辐射	同步加速辐射
从事此类研究的时间	1986—2004	2001—2004
结论	213.4 keV, 325.5 keV, 426.4 keV, 216.7 keV 等线强度均提高; 积分截面 $\sigma\Gamma > 2.2 \times 10^{-22}\text{ cm}^2 \cdot \text{keV}$	无谱线强度被提高,且能量积分截面小于 $1 \times 10^{-26}\text{ cm}^2 \cdot \text{keV}$

由于 $^{178\text{m}2}\text{Hf}$ 自身有趣的特点以及 Collins 小组的令人感兴趣的实验结果,伊利诺斯州阿贡实验室 L. Ahamd 等人在 2001—2003 年间对此核素的诱导激发过程进行了实验<sup>[12]</sup>。实验在先进光子源(APS)中心采用同步加速器辐射技术实施。实验中 X 射线的能量范围为  $6\text{ keV} < E_r < 20\text{ keV}$ ,测得能量范围为  $100\text{ keV} < E_\gamma < 500\text{ keV}$  的  $\gamma$  射线,其中包括 213, 217, 326, 436 和 495 keV 等。但是,与 C. B. Collins 小组的实验相比,这些  $\gamma$  荧光的强度没有被提高,并且核素的能量积分截面小于  $1 \times 10^{-26}\text{ cm}^2 \cdot \text{keV}$ 。无疑,该实验结果与 C. B. Collins 小组的同步加速辐射实验结果相悖。对比两组实验知道,不同的结果源自不同的实验条件,例如:靶的制备、实验方案、X 射线谱的质量以及人员的实验经验等等(见表 2)。相反的实验结果说明, $^{178\text{m}2}\text{Hf}$  核素在特定的实验条件下存在诱导放大  $\gamma$  辐射,该条件为以后短波长高能激光辐射源或武器的研制与开发提供了必要的技术支持。

对比 $^{180\text{m}}\text{Ta}$ 和 $^{178\text{m}2}\text{Hf}$ 两核素的实验可以知道诱导  $\gamma$  射线辐射的总体思路大致相同,但不同的核素又有自身的发光机理。单离子体系对应的发光机理较为简单,而多准粒子体系则较复杂。在实验方面,要寻找理想的诱导放大  $\gamma$  辐射,依赖于实验精确度的提高和各实验环节参数的优化。若理论方面能详细计算混合 K 态中的主要组成部分,无疑对诱导机制的探索起到事半功倍的效果。

### 2.3.3 其他核素的诱导 $\gamma$ 射线辐射

有关诱导  $\gamma$  射线辐射的实验也在其他的重元素中展开。文献[13]报道,由法国、德国和芬兰等三个国家的研究人员组成的实验小组进行的 $^{180}\text{Hf}(^{40}\text{Ar}, 4n)^{216}\text{Th}$ 和 $^{172}\text{Yb}(^{48}\text{Ca}, 4n)^{216}\text{Th}$ 反应中,靶和聚焦平面两处观测到  $\gamma$  射线。前者是在 JURO-SPHERE II 上探测到的快速  $\gamma$  射线,后者是源自同质异能素的去激发的延迟  $\gamma$  射线。表 3 是由高自旋能级跃迁到转晕带的  $\gamma$  跃迁强度实验值与理论值的比较。其中理论值 1 和 2 分别表示由经验壳层模型和壳层模型的计算结果。显然壳层模型的计算结果更接近实验值。另外,理论计算估计 $^{216}\text{Th}$ 核素中距基态 1 687 keV 的激发态到基态的  $E_3$  跃迁谱线的强度会提高,但实验中由于该跃迁与  $E_1$  跃迁间的竞争而没有观察到。尽管没有得到放大的  $\gamma$  辐射,但该研究中的理论工作为诱导  $\gamma$  辐射提供了重要而有意义的理论指导,即根据实验或理论计算的 X 射线共

振吸收积分截面、同质异能核素的数量以及对应跃迁的自发辐射概率,可以得到较为准确的诱导  $\gamma$  射线辐射强度以及谱线的放大倍数。即:  $I_{\text{deduced}} \propto N_{\text{isomer}} \sigma_x A_{K\text{-mixing}}$  和  $f = I_{\text{deduced}} / I_{\text{spont}}$ 。

表 3  $^{216}\text{Th}$  核素部分  $\gamma$  射线强度的实验值与理论值的比较

$I_i^{\text{e}}$	$I_f^{\text{e}}$	跃迁类型	实验值	理论值 1	理论值 2
$8^+$	$6^+$	$E_2$	0.0017	0.00013	0.050
$11^-$	$8^+$	$E_3$	21	13.8	10.2
$14^+$	$12^+$	$E_2$	<0.245	2.38	0.424

### 3 结 论

目前,由于高能量储存密度和大的能量释放截面,高自旋同质异能核素成为研究的热点。这种利用 X 射线共振吸收以触发长寿命同质异能核素释放高能量  $\gamma$  射线的现象,正在激励研究者致力于短波长高强度辐射源的研制与开发。 $^{180\text{m}}\text{Ta}$  和  $^{178\text{m}2}\text{Hf}$  因其各自特点成为研究对象。德克萨斯大学量子电子研究中心的实验结果令人振奋,而阿贡实验室没有观察到  $^{178\text{m}2}\text{Hf}$  强度增加的  $\gamma$  射线,这正好说明诱导放大  $\gamma$  射线实验的实施需要具备合适的靶材料和实验条件。有关此类型的核内电磁辐射的理论计算工作开展得较少,我们期望通过实验发展和核散射理论计算相结合,为研制电磁辐射泵浦产生  $\gamma$  射线激光提供强有力的支持。

### 致 谢

感谢中国工程物理研究院核物理与化学研究所所长创新基金的支持!

### 参 考 文 献

- 1 Ahmad I, et al. Search for X-ray Induced Acceleration of the Decay of the 31-Yr Isomer of  $^{178}\text{Hf}$  Using Synchrotron Radiation. Phys. Rev. Lett., 2001, 87(072503)
- 2 Collins C B, Davanloo F, Iosif M C, Dussart R. Accelerated Emission of  $\gamma$  Rays from the 31-yr Isomer of  $^{178}\text{Hf}$  Induced by X-ray Irradiation. Phys. Rev. Lett., 1999, 82:695
- 3 Anderson J A, et al. Activation of  $^{178\text{m}}\text{Cd}$  by pulses of Intense Bremsstrahlung. Physical Review C., 1988, 38:2838
- 4 Collins C B, et al. Depopulation of Isomer State  $^{180\text{m}}\text{Ta}$  by the Reaction  $^{180\text{m}}\text{Ta}(\gamma, \gamma')^{180}\text{Ta}$ . Physical Review C., 1988, 37:2267
- 5 Collins C B, et al. The Coherent and Incoherent Pumping of a Gamma Ray Laser with Intense Optical Radiation. J. Appl. Phys., 1982, 53:4645
- 6 Collins C B, et al. Evidence for the Forced  $\gamma$  Emission from the 31-year Isomer Hafnium. Laser Phys., 1999, 9:8
- 7 Collins C B, et al. Resonant Excitation of the Reaction  $^{180\text{m}}\text{Ta}(\gamma, \gamma')^{180}\text{Ta}$  Physical Review C., 1990, 42 (R1813)
- 8 Carroll J J, et al. Photoexcitation of Nuclear Isomers by  $(\gamma, \gamma')$  Reaction. Physical Review C., 1991, 43:1238
- 9 Collins C B, Davanloo F. Gamma Emission from the 31-yr Isomer of  $^{178}\text{Hf}$  induced by X-ray Irradiation.

- Phys. Rev. C , 2000,61(054305)
- 10 Kun Ho Y, et al. Self-consistent Description for X-ray, Auger Electron ,and Nuclear Excitation by Electron Transition Process. Phys. Rev. C , 1993,48:2277
  - 11 Kishimoto S, Yoda Y, et al. Observation of Nuclear Excitation by Electron Transition in  $^{197}\text{Au}$  with Synchrotron X Rays and an Avalanche Photodiode. Phys. Rev. Lett. , 2000, 85:1831
  - 12 Ahmad I, et al. Search for X-ray Induced Decay of the 31-yr Isomer of  $^{178}\text{Hf}$  at Low X-ray Energies. Phys. Rev. C , 2003, 67(024311)
  - 13 Hauschild K, Rejmund M, et al. Isomer Spectroscopy in  $^{216}_{90}\text{Th}_{126}$  and the Magicity of  $^{218}_{92}\text{U}_{126}$ . Phys. Rev. Lett. , 2001,87(072501)