

CNIC-01888

CAEP-0189

# 长寿命同质异能核素诱发 $\gamma$ 辐射研究

杨天丽 郝樊华

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 绵阳, 621900)

## 摘 要

长寿命同质异能核素  $^{178m2}\text{Hf}$  诱发  $\gamma$  辐射是近几年内核物理领域中的一个研究热点。文章主要从长寿命同质异能核素诱发  $\gamma$  辐射的研究背景和现状、目前已提出的一种 X 射线诱导高自旋同质异能核素  $\gamma$  辐射(IGE)基本原理假设、放大诱发辐射理论以及生产长寿命同质异能核素  $^{178m2}\text{Hf}$  可能的途径等方面进行了介绍。尽管  $^{178m2}\text{Hf}$  诱导  $\gamma$  衰变的研究结果还存在激烈争论,但从应用角度分析,若能进行有效控制高激发态能量将在解决人类能源危机方面起到推动作用。同时在未来军事领域中所具有的价值也难以估计。

关键词: 诱发  $\gamma$  辐射 同质异能素

# Induced $\gamma$ Emission for Nuclear Isomer Long-Lived

(*In Chinese*)

YANG Tianli HAO Fanhua

(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, CAEP, Mianyang, 621900)

## ABSTRACT

It is pointed that the induced  $\gamma$  emission for long lived isomer  $^{178m2}\text{Hf}$  by low energy X rays has been a topic subject in the nuclear field recently. The background and development status are described. A principle for  $\gamma$  ray transitions induced by X rays and the theoretical about magnificent induced emission have been related. In addition, the possible method of  $^{178m2}\text{Hf}$  produce has been introduced also. Although the argument has existed for the experimental results of induced  $\gamma$  emission, it can push forward in solving energy crisis and in future military field after controlling effectively the releasing of high excited energy for isomer.

**Key words:** Induced  $\gamma$  emission, Nuclear isomer

## 引言

1999年 Texas 大学 C. B. Collins 发表文章<sup>[1]</sup>称,发现用 X 光照射可加速<sup>178m2</sup>Hf 的衰变。这一发现可被用来加速释放储存在同质异能态中的核能,并有效可控地利用诱发  $\gamma$  辐射(如制备  $\gamma$  射线武器等)。2003年8月, www. NewScientist. Com<sup>[2]</sup>网站披露,美国国防部已将研制  $\gamma$  射线武器的技术包含在军用关键技术清单中。如果这项技术研究成功,就有可能出现一种介于常规武器和核武器之间的新型武器,引发新一轮的军备竞赛。

诱发  $\gamma$  辐射基于同质异能核素的存在。高自旋激发态的核素退激发返回基态的跃迁过程伴随很大的角动量改变,因而自发辐射跃迁概率很低,形成长寿命的亚稳态核素,即高自旋同质异能核素。 $\gamma$  射线是具有很短波长和很高能量的光量子,其能量比可见光大百万倍以上,比 X 射线光大 10 倍以上。当原子核从激发态自发跃迁到低能态时,它要发射一个或多个  $\gamma$  光子,就像处于激发态的原子退激发时发出可见光一样。一个显著的例子是<sup>178</sup>Hf 核的一个同质异能态,记为<sup>178m2</sup>Hf。这个同质异能态的寿命是 31 a,激发能为 2.446 MeV。通俗来讲,原则上—盎司纯<sup>178m2</sup>Hf 所储藏的能量能够把 120 t 水从室温加热到沸点。为了使用这一能量,需要一个途径按照要求以可控制的方式迅速的释放。C. B. Collins 的研究<sup>[3]</sup>刺激了对有效可控利用核能的兴趣,意味着<sup>178m2</sup>Hf 同质异能态能够被用很低的光能束照射触发释放它的能量,即低能量泵浦产生  $\gamma$  射线激光。

### 1 长寿命同质异能核素诱发 $\gamma$ 辐射研究现状

研究长寿命同质异能核素的储能特性和退激发方式是现代核物理学的一个重要研究领域。早在 1961 年莫斯科教授 Levrivlin<sup>[4]</sup>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(处于激发态),诱导该受照核素发生  $\gamma$  跃迁。在经历半个世纪的平稳发展后,于上世纪末取得了具有里程碑意义的重大发现:1987<sup>[5]</sup>年在<sup>180m</sup>Ta(半衰期大于  $10^{15}$  a)样品中观察到电磁辐射加速亚稳态核素  $\gamma$  衰变的实验现象;1999 年美国得克萨斯大学 Carl Collins 博士领导的研究小组宣布,采用牙科 X 光机照射<sup>178m2</sup>Hf 样品(半衰期为 31 a),发现有些  $\gamma$  谱线计数显著增强。这些观察结果从科学实验的角度支持了存在辐射诱导  $\gamma$  衰变现象的猜想,为研究、发现和应用长寿命同质异能核素这类高能量密度物质注入了强大的发展动力。

过去的几年,同质异能核素辐射诱导  $\gamma$  衰变研究的重点集中于测定<sup>178m2</sup>Hf 诱导衰变的积分反应截面。这是因为根据文献报道,<sup>178m2</sup>Hf 同质异能核素具有触发光子能量低(20 keV)、能量增益高(20~2 446 keV)、积分反应截面大( $10^{-21}$  cm<sup>2</sup> keV)等特点,相对容易引起诱导  $\gamma$  衰变反应,而且<sup>178m2</sup>Hf 诱导衰变纲图由 X, $\gamma$  级联跃迁构成,其中一部分 X 光的能量与触发 X 光的能量相当,理论上具有建立链式反应的可能性。但是,2001<sup>[6,7]</sup>年 Ahmad 研究组宣布他们实验测定的积分截面数据上限比 Collins 报告的数据低 5 个量级。美国 ANL, LANL 和 LLNL 的研究人员组成联合小组利用阿贡国家实验室“先进光源”(APS)装置输出的 X 光照射<sup>178m2</sup>Hf 样品,对<sup>178m2</sup>Hf 诱导衰变进行了两轮验证实验(2001 年、2002 年),在线数据显示,对于能量大于 6.5 keV 的 X 光辐照,<sup>178m2</sup>Hf 诱导衰变的积分截面在开始的 5 s 内小于  $10^{-27}$  cm<sup>2</sup> keV。与此形成强烈对比的是, Collins 领导有五个国家、八个研究所组成的研究团体在日本第三代同步辐射光源(Spring-8)上成功实现了所有预期的目标,

测试数据不仅全面肯定了 Collins 早期公布的研究结果,而且证实 $^{178m2}\text{Hf}$  诱导衰变可以用更低能量的 X 光辐射诱发。

综合分析诱导  $\gamma$  衰变研究的最新进展,可以发现:关于 $^{178m2}\text{Hf}$  诱导衰变的研究结果存在巨大差异,而且还可能有更多相互矛盾的数据发表,但 X 光诱导  $\gamma$  衰变效应却是被世界多个研究组、大量实验数据证实的科学事实。因此,可以大胆预测,在可预见的将来,X 光诱导  $\gamma$  衰变研究将从主要针对 $^{178m2}\text{Hf}$  逐渐扩展到对更多种类的长寿命同质异能核素的研究,同质异能核素物理和相关的能源应用研究也将会得到迅速发展与深化。

## 2 X 射线诱导高自旋同质异能核素 $\gamma$ 辐射(IGE)基本原理假设

长寿命同质异能态具有较大的自旋角动量(或 K 量子数),自发辐射跃迁返回到基态能级时初、末两态的角动量差很大,则跃迁被禁忌。因此,使之产生跃迁最可能的方式是通过外界激励,利用低能量如 X 射线与核的散射过程诱导发射  $\gamma$  光子。两个核激发态间的电磁跃迁称为 $(\gamma, \gamma')$  反应。若利用硬 X 射线照射样品,X 光子与高自旋同质异能素相互碰撞,将能量传递给核素,发生共振吸收后同质异能素被激发到混合 K 态(又称激发阈能态或中间态)。该态包括高 K 激发态和低 K 激发态能级,其中低 K 基态能级与能量低于混合 K 态的基态带(GSB)中的转动能级满足  $\gamma$  跃迁选择定则,则处于中间态的核子通过发射能量不等的  $\gamma$  光子后衰落到低 K 能带上。低 K 能带中不受 K 量子数阻禁约束,同 K 的各转动能级间自发辐射概率很大,核子通过级联跃迁使同质异能素很快落到基态,并以  $\gamma$  射线荧光形式将储存的高密度能量和入射 X 光子的能量释放出来。图 1 表示了 $(\gamma, \gamma')$  反应将同质异能素激发到第  $j$  个中间态的过程。这种诱导辐射过程又称为另一类核巨共振(NGR)现象。该跃迁过程被 Collins 研究小组认可。

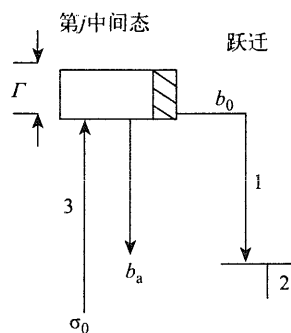


图 1 第  $j$  混合能级的衰变模式概图

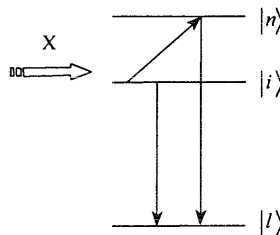


图 2 受激跃迁示意图

## 3 放大诱发辐射理论依据

尽管目前对同质异能素诱导辐射的机理还没有定论,但多方面的理论工作正为之努力。S. Olariu<sup>[7]</sup> 等研究了许多高能量同质异能素受 X 射线诱发的受激跃迁概率。主要包括以下两种跃迁形式:(1)由初态(同质异能态)直接跃迁到末态(一般为基态);(2)由初态(同质异能态)经中间态(K-mixing 态)到末态。

对于第一种跃迁方式: $N(E)$  来表示入射光的强度, $N(E)dE$  代表单位截面上单位时间

内能量处于  $E$  到  $E+dE$  的光子的数目,则单位时间内经能量为  $E$  光子诱发的跃迁概率为

$$w_i^{(1)} = \int_0^{\infty} \sigma_i(E) N(E) dE \quad (1)$$

散射截面  $\sigma_i(E)$

$$\sigma_i(E) = \frac{\pi c^2 h^4}{2E^2} \frac{\Gamma_u (\Gamma_i + \Gamma_l)}{(E - E_u)^2 + h^2 (\Gamma_i + \Gamma_l)^2 / 4} \quad (2)$$

以式中  $\Gamma_u$  是初态  $|i\rangle$  态直接跃迁到末态  $|l\rangle$  的能级宽度,  $\Gamma_i$  是  $|i\rangle$  态的能级宽度  
方程(2)与方程(1)联立解

$$w_i^{(1)} = \frac{\pi^2 c^2 h^3}{E_u^2} \Gamma_u N(E_u) \quad (3)$$

则当受激跃迁概率与自发跃迁概率相当时对应的人射光强度为

$$N_1(E_u) = \frac{(1 + \alpha_u) E_u^2}{\pi^2 c^2 h^3 f_{IT}} \quad (4)$$

对于第二种跃迁,在强度为  $N(E)$  的人射光的辐射下,从  $|i\rangle$  态到基态  $|n\rangle$  态的跃迁概率为

$$w_n^{(1)} = \int_0^{\infty} \frac{2J_n + 1}{2J_i + 1} \frac{\pi c^2 h^4}{2E^2} \frac{\Gamma_m \Gamma_n}{(E - E_m)^2 + h^2 \Gamma_n^2 / 4} N(E) dE \quad (5)$$

方程中  $E_m = E_n - E_i$ ,  $\Gamma_n$  是  $|n\rangle$  态的能级总宽度,  $\Gamma_n \gg \Gamma_i$ ,  $\Gamma_m$  是  $|n\rangle$  态直接跃迁到基态  $|i\rangle$  的部分能级宽度.从态  $|n\rangle$  跃迁到  $|i\rangle$ , 态  $|l\rangle$  和其他低能级  $|l'\rangle$  的能级总宽度  $\Gamma_n$  由以下表达式给出

$$\Gamma_n = (1 + \alpha_m) \Gamma_m + (1 + \alpha_n) \Gamma_{nl} + \sum (1 + \alpha_{n'}) \Gamma_{n'} \quad (6)$$

其中,  $\alpha_{ni}$ ,  $\alpha_{nl}$  和  $\alpha_{n'}$  分别是跃迁  $|n\rangle \rightarrow |i\rangle$ ,  $|n\rangle \rightarrow |l\rangle$  和  $|n\rangle \rightarrow |l'\rangle$  内转换系数.  
跃迁过程  $|i\rangle \rightarrow |n\rangle \rightarrow |l\rangle$  的跃迁概率为

$$w_i^{(2)} = \frac{w_i^{(1)} (1 + \alpha_n) \Gamma_{nl}}{\Gamma_n} \quad (7)$$

则当受激跃迁概率与自发跃迁概率相当时对应的人射光强度为

$$N_2(E_m) = \frac{2J_i + 1}{2J_n + 1} \frac{E_m^2}{\pi^2 c^2 h^3} \frac{1}{F} \frac{t_n}{t_i} \quad (8)$$

上式中

$$F = \frac{(1 + \alpha) \Gamma_m \Gamma_{nl}}{\Gamma_n^2} \quad (9)$$

则方程式(7)和方程式(8)的两边之比为

$$\frac{N_2(E_m)}{N_1(E_u)} = \frac{2J_i + 1}{2J_n + 1} \frac{f_{IT}}{(1 + \alpha_u)} \frac{E_m^2}{E_u^2} \frac{1}{F} \frac{t_n}{t_i} \quad (10)$$

在上式中一般情况下虽然  $1/F \gg 4$ ,但是对于  $^{178m2}\text{Hf}$ , 半衰期  $t_i = 31 \text{ a}$ , 而半衰期  $t_n \leq 1 \text{ s}$ , 所以  $t_n/t_i \ll 1$ , 可以得出结论

$$\frac{N_2(E_m)}{N_1(E_u)} \ll 1 \quad (11)$$

该式表明初态经中间态到末态诱导  $\gamma$  衰变需要的光子强度比直接由初态到末态诱导  $\gamma$  的低很多,且前者受激发跃迁概率也大得多。

## 4 开展长寿命同质异能核素的诱发 $\gamma$ 辐射研究可能的途径

### 4.1 研究难点

即使得克萨斯大学研究组的结果能够被证实,仍然需要克服一系列巨大的障碍才能使之成为实效。需要解决的两大问题是:在目前的技术条件下,如何生产足够数量合适的同质异能核素和能否按人们的意愿可控制地释放能量。

目前同质异能核素的生产费用几近天文数字,需向在新墨西哥州 Kirtland 的美国空军研究实验室从阿拉巴马州北部城市亨茨维尔市的 SRS 技术公司购买所需的 $^{178m2}\text{Hf}$ (SRS 公司接受合同为实验生产 $^{178m2}\text{Hf}$ ),而该公司从其他实验遗弃的核材料中提炼铪,但是产量还不足万分之一克。将来可能会有更便宜的方法生产铪的同质异能态,例如,用高能光子轰击普通铪。SRS 公司的首席科学家 Hill Roberts 认为生产克量级铪同质异能态的技术将会在五年内诞生。

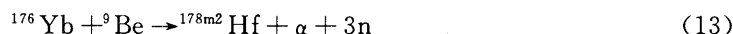
同质异能核素可以储存高能量,但大部分处于激发态的核素会在极短时间内回到基态释放能量。可控制激发则要激发能以人们的意愿释放并被高效率利用。如果能实现它,同质异能核素将是一种非常完美的能源。但实现长效可控制释放还面临许多难题。

即便上述两个困难能够得到解决,将同质异能核素武器化还有一定的难度。康奈尔大学的 Kurt Gottfried 教授认为,将同质异能核素受激产生的能量使用在像核战斗这样的装置中还存在许多技术障碍。为了做成实用的武器,用来产生激发能的装置必须高效、轻便,还需要走很长的路。

### 4.2 $^{178m2}\text{Hf}$ 制备技术

尽管 $^{178m2}\text{Hf}$  诱导  $\gamma$  衰变的研究结果还存在激烈争论,但从应用角度分析, $^{178m2}\text{Hf}$  所具有的优点是目前已知的同质异能核素所无法提供的。制备 $^{178m2}\text{Hf}$  材料是开展相关研究的前提和基础。

目前可用于生产 $^{178m2}\text{Hf}$  的核反应主要采用下列两种:



据俄罗斯联杜布拉联合核子所公布的研究结果,反应式(12)平衡考虑了反应产额与反应质量(即激发态与基态核素比)的需要,是一种较优化的 $^{178m2}\text{Hf}$  生产途径,也是目前世界上加工 $^{178m2}\text{Hf}$  的主要技术手段。采用 U-200 同步辐射加速器输出的  $100\ \mu\text{A}$ ,  $36\ \text{MeV}$  的  $\alpha$  粒子束轰击 $^{176}\text{Yb}$  氧化膜靶(靶厚  $80\ \text{mg}/\text{cm}^2$ ,靶点直径  $5\ \text{mm}$ ),在连续辐照  $2\ 500\ \text{h}$  后,可以产生大约  $0.7\ \mu\text{g}^{178m2}\text{Hf}$  材料,据此估算的生成截面约  $9\ \text{mb}$ 。

美国 Brookhaven 实验室的研究人员通过反应式(13)也得到了 $^{178m2}\text{Hf}$  物质。利用  $65\ \text{MeV}$  的 $^9\text{Be}$  离子束连续轰击 $^{176}\text{Yb}$  靶,最终产生了可计数测量的 $^{178m2}\text{Hf}$  样品,生成反应截面低于  $5\ \text{mb}$ 。

除上文介绍的两种加工方式外,还有大量其他产生 $^{178m2}\text{Hf}$  的研究尝试,如高能  $\gamma$  激发、高能质子反应等,但是作为一种生产技术,还远远没有达到实用化的程度。

$^{178m2}\text{Hf}$  的  $(n, \gamma)$  生产截面只有  $10^{-6}\ \text{b}$ ,同加速器辐照生产截面相比,降低了近四个量级,但是由于反应堆运行功率高(百兆瓦)、辐照量大(公斤级)、连续运行周期长,在反应堆中仍可以大量产生 $^{178m2}\text{Hf}$  同质异能素。目前,俄罗斯联邦杜布拉联合核子所正研究开发从核

废料中提取 $^{178m2}\text{Hf}$ 材料的生产工艺。由于废料核素种类繁多、目标核素种类很少,可以肯定,提纯工艺研究将面临巨大的技术挑战,但是,一旦取得关键技术突破,所带来的科学效益也将是十分诱人的。

## 5 结束语

经过大量文献调研和可行性分析,可以知道长寿命同质异能素诱导 $\gamma$ 衰变研究还限制在基础性层面,核素受激发机制还不清楚,但是它作为一种受控释能源将是未来核能源有效利用的一种研究方向,同时这一现象在军事领域潜在的应用价值也是难以充分估计的,对维护国际政治秩序和人类和平环境具有深远意义。

### 参 考 文 献

- 1 Collins C B et al. Accelerated Emission of Gamma Rays from the 31-yr Isomer of  $^{178}\text{Hf}$  Induced by X-Ray Irradiation. *Physics Review Letters*, 1999, 82: 695
- 2 David Hambling. Gamma-ray weapons could trigger new arm race. *New Scientist*, August 16, p. 4 (2003)
- 3 Collins C B, et al. *Europhysics Letters*. 2002, 57: 677
- 4 Anderson J A, et al. *Physical Review C*, 1988, 38: 2833
- 5 Collins C B, et al. Depopulation of isomer state  $^{180m}\text{Ta}$  by the reaction  $^{180m}\text{Ta}(\gamma, \gamma')^{180}\text{Ta}$ . *Physical Review C*, 1988, 37: 2267
- 6 Ahmad I, et al. *Physical Review Letters*, 2001, 87: 072503-1
- 7 Ahmad I, et al. *Physical Review C*, 2003, 67: 041305 (R)