



# 1 MeV領域 線による $^{176}\text{Lu}$ 、 $^{180}\text{Ta}$ 核異性体の 光核反応実験の提案

日本原子力研究所 関西研究所  
光量子科学研究センター

静間 俊行

「超伝導ウィグラー - による高エネルギー放射光の発生とその応用」

2003年3月24, 25日 SPring-8研究会

# 光核科学研究



- 核物理

原子核構造

長寿命核異性体の光脱励起の観測  $^{178\text{m}}\text{Hf}$ ,  $^{180\text{m}}\text{Ta}$

新ガンマ線源、即発エネルギー放出

光核変換、光核分裂

- 天体核物理 恒星内重元素合成過程の解明

p-process 光核反応( $\gamma, n$ )  $E_\gamma > 8\text{MeV}$

レーザー逆コンプトンガンマ線(宇都宮)

s-process 核異性体の光脱励起  $^{180\text{m}}\text{Ta}$ ,  $^{176\text{m}}\text{Lu}$

( $\gamma, \gamma'$ )反応

1MeV領域のガンマ線が重要

( $\gamma, n$ )反応を用いた中性子捕獲断面積測定

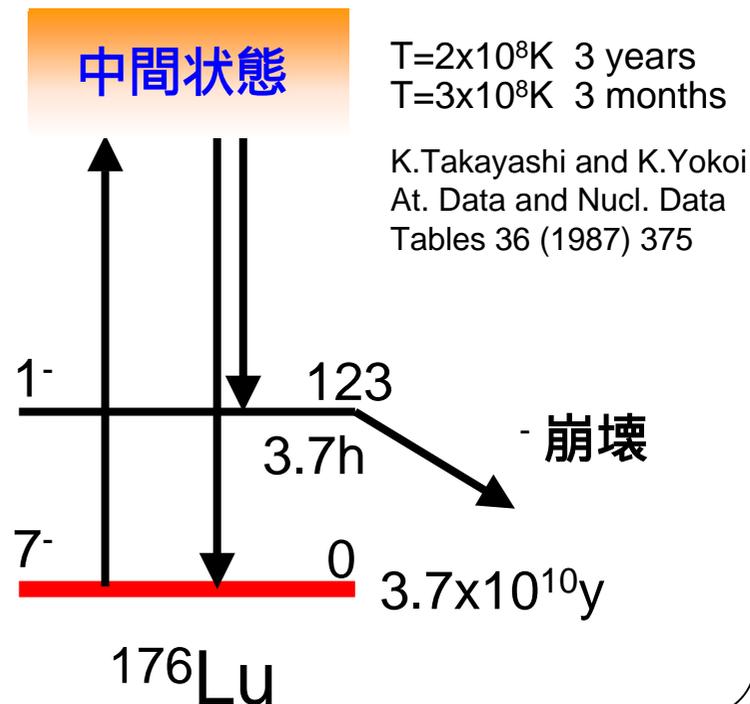
# $^{176}\text{Lu}$ 、 $^{180}\text{Ta}$ 核異性体について

$^{176}\text{Lu}$  s-process 核 **宇宙温度計**

基底状態  $I^\pi=7^-$   $3.7 \times 10^{10}\text{y}$  準安定

$E_x=123\text{keV}$   $I^\pi=1^-$   $3.7\text{h}$

s-process 中の高温状態下で実効的半減期が変化



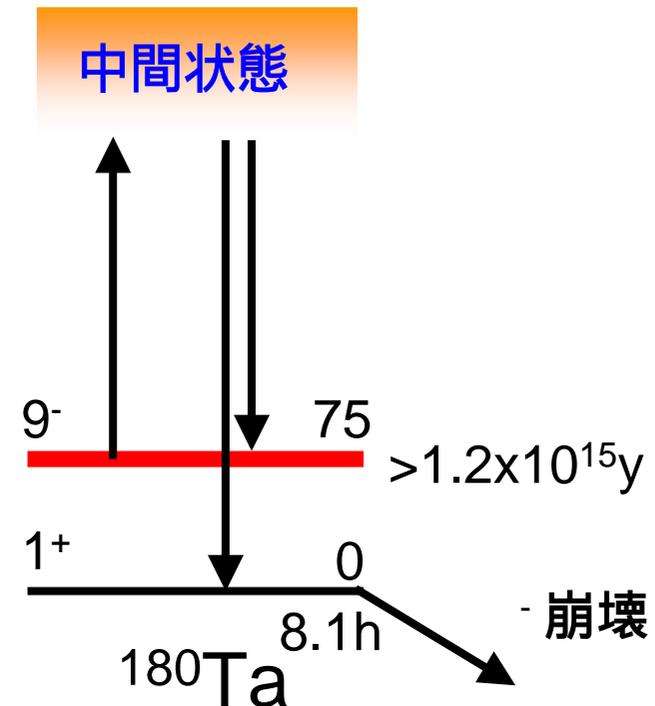
$^{180}\text{Ta}$

基底状態  $I^\pi=1^+$   $8.1\text{h}$  ベータ崩壊

$E_x=75\text{keV}$   $I^\pi=9^-$   $1.2 \times 10^{15}\text{y}$

天然に存在する唯一の核異性体  
 自然界で最も存在量が少ない元素

恒星内元素合成過程がわかっていない



# $^{176}\text{Lu}$ , $^{180}\text{Ta}$ 核異性体の励起、脱励起プロセス

1. 光核反応( $\gamma, \gamma'$ )
2. K殻陽電子消滅
3. 中性子散乱( $n, n'$ )
4. クーロン励起

光子数	Planck distribution	$E_\gamma$	相対比
		0.7	10000
		0.8	500
		0.9	20
		1.0	1
		1.1	0.1

$$N_\gamma(ET) = \left(\frac{1}{\pi}\right)^2 \left(\frac{1}{\hbar c}\right)^3 \frac{E^2}{\exp(E/kT) - 1}$$

$$Y = \int \sigma(E) N_\gamma(E, T) dE$$

s-process中では、1 MeV領域のガンマ線が重要  
1 MeV以上

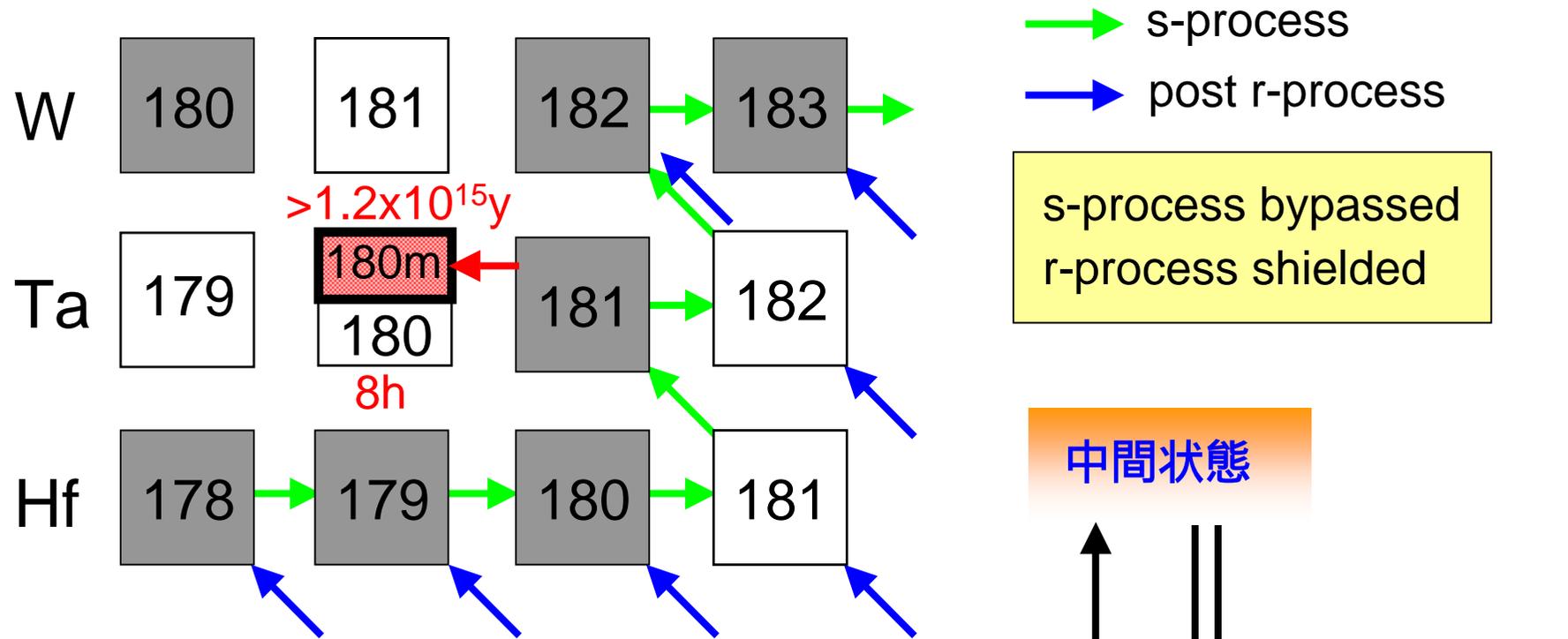
Stuttgart Dynamitron 電子加速器 制動放射光

$$N^{\max} = 10^8 \sim 10^9 / \text{keV/cm}^2/\text{s} \text{ at } E_{\max} = 4 \text{ MeV}$$

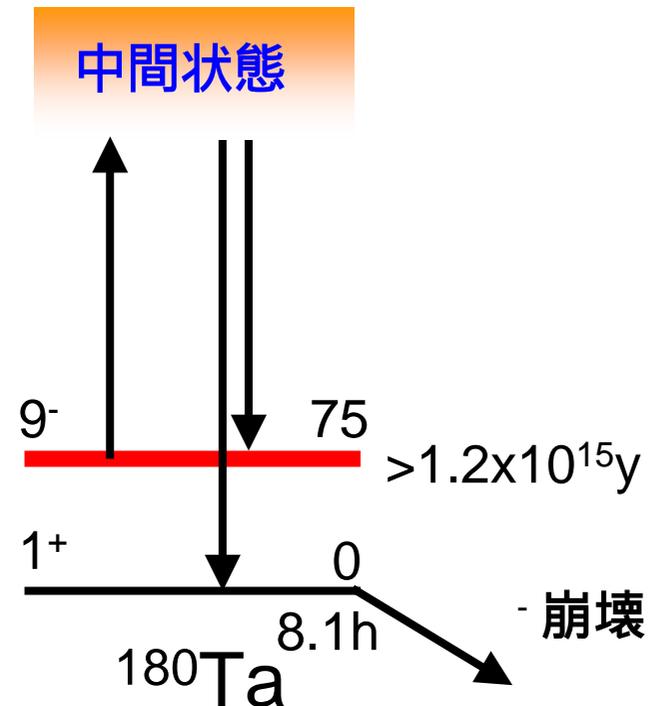
1 MeV以下

適当な光源がないが、励起断面積の測定は行われていない

# 180mTaの合成パス



s-process パス ( $^{179}\text{Hf}$   $^{179}\text{Ta}$   $^{180\text{m}}\text{Ta}$ )  
 post r-process パス ( $^{180\text{m}}\text{Hf}$   $^{180\text{m}}\text{Ta}$ )  
 v-process パス  $^{181}\text{Ta}(\nu, \nu'n)^{180\text{m}}\text{Ta}$   
 $\gamma$ -process パス  $^{181}\text{Ta}(\gamma, n)^{180\text{m}}\text{Ta}$

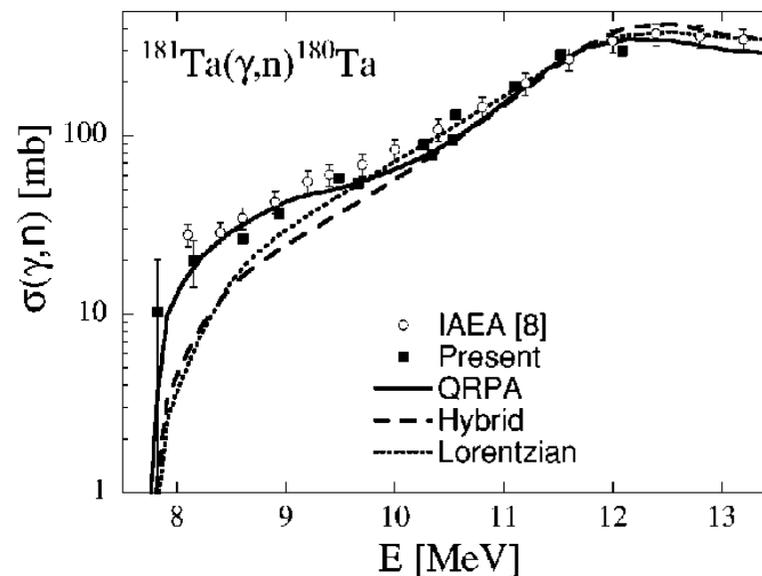
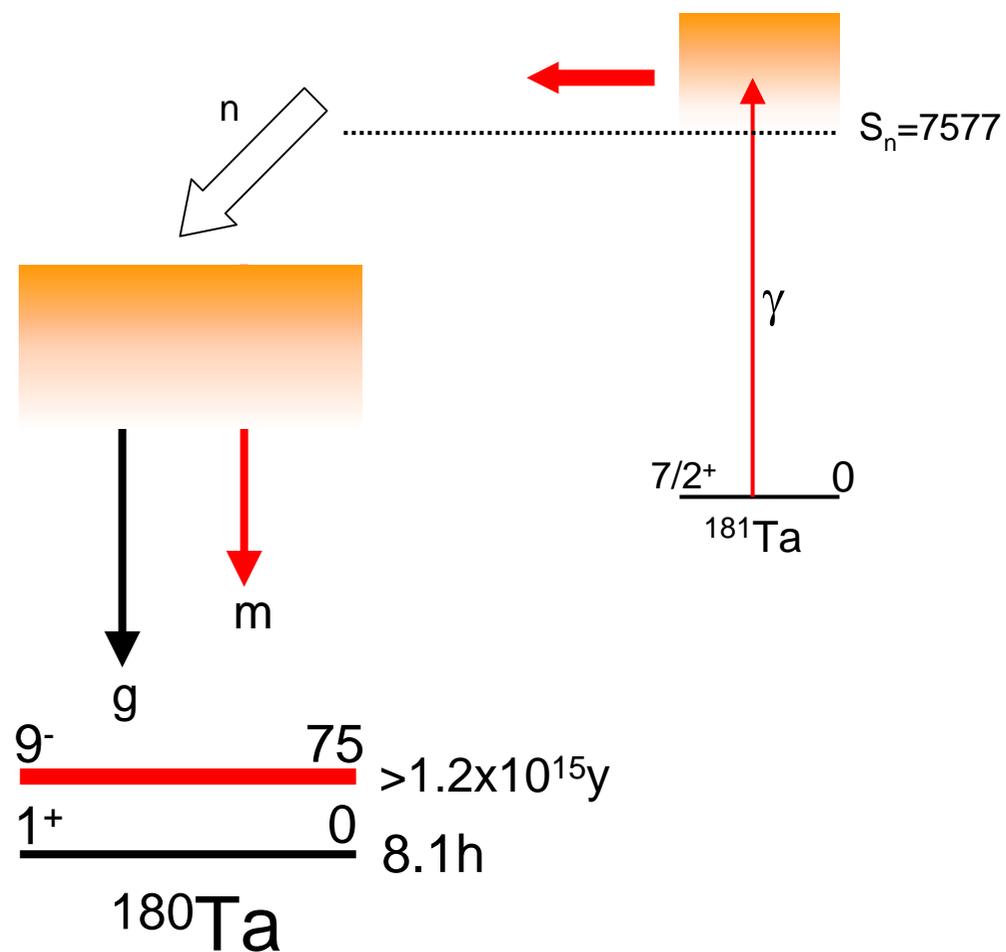


# $^{180m}\text{Ta}$ 生成のシナリオ $\gamma$ -process path

Ta核異性体への反応断面積測定 (AIST)

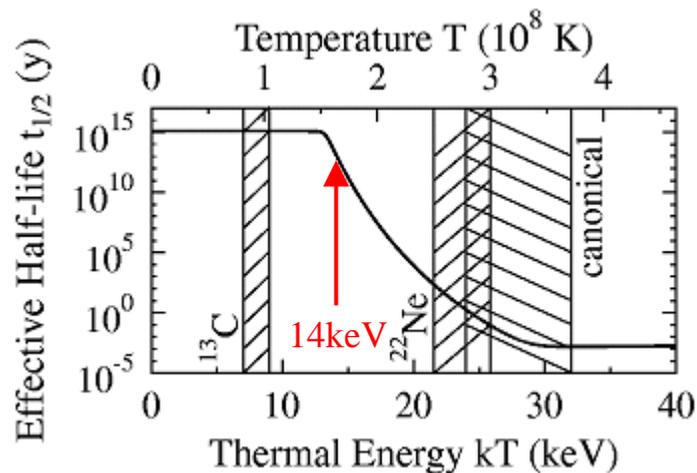
Utsunomiya *et al.*  
PRC67(2002)015807

$^{181}\text{Ta}(\gamma, n)^{180m}\text{Ta}$  反応実験



# 180mTa生成のシナリオ s-process path

PRL83(1999)5242 Belic et al.



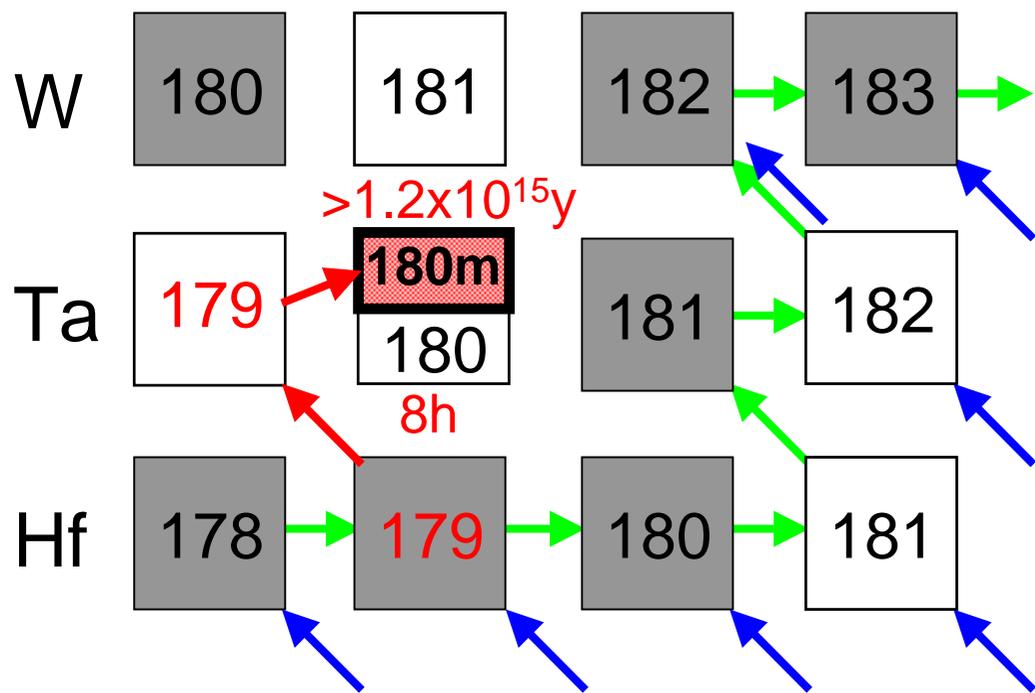
AGB星 He shell burning				
	期間	温度	<sup>179</sup> Hf	<sup>180m</sup> Ta
<sup>13</sup> C(α,n)	100y	8keV 1×10 <sup>8</sup> K	stable	stable
<sup>22</sup> Ne(α,n)	a few years	26keV 3×10 <sup>8</sup> K	unstable	1month

光子数 Planck distribution

$$N_{\gamma}(ET) = \left(\frac{1}{\pi}\right)^2 \left(\frac{1}{hc}\right)^3 \frac{E^2}{\exp(E/kT) - 1}$$

E <sub>γ</sub>	相対比
0.7	10000
0.8	500
0.9	20
1.0	1
1.1	0.1

turnover time 1 day → 数時間で冷却



1MeV以下の中間状態？

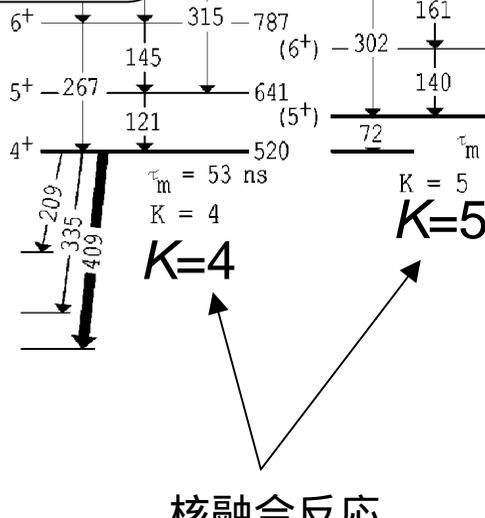
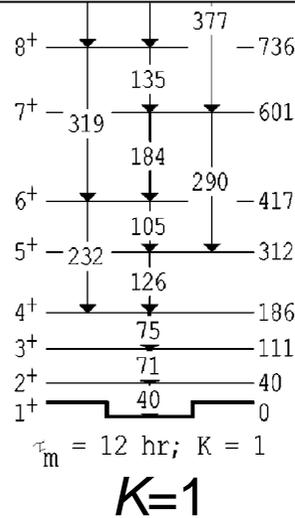
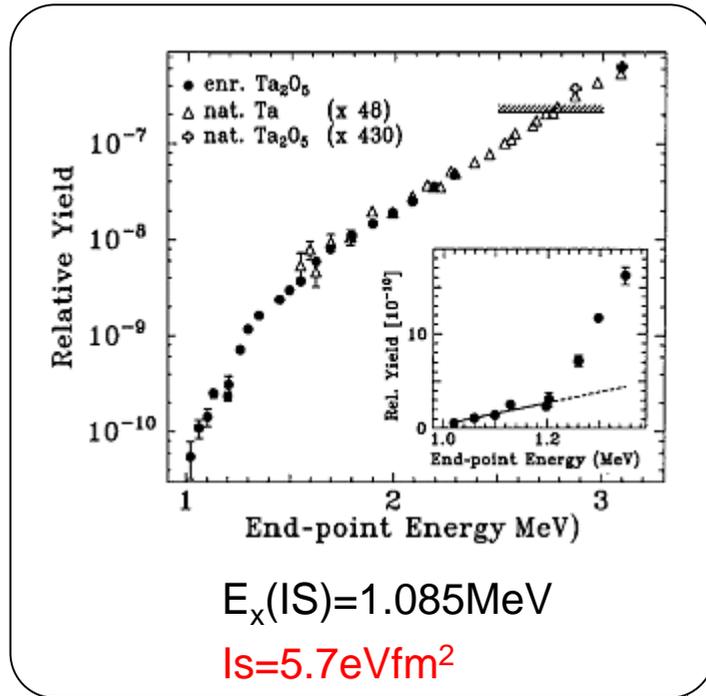
# 制動放射光による $^{180m}\text{Ta}$ 脱励起実験

Belic *et al.*, PRL83(1999)5242

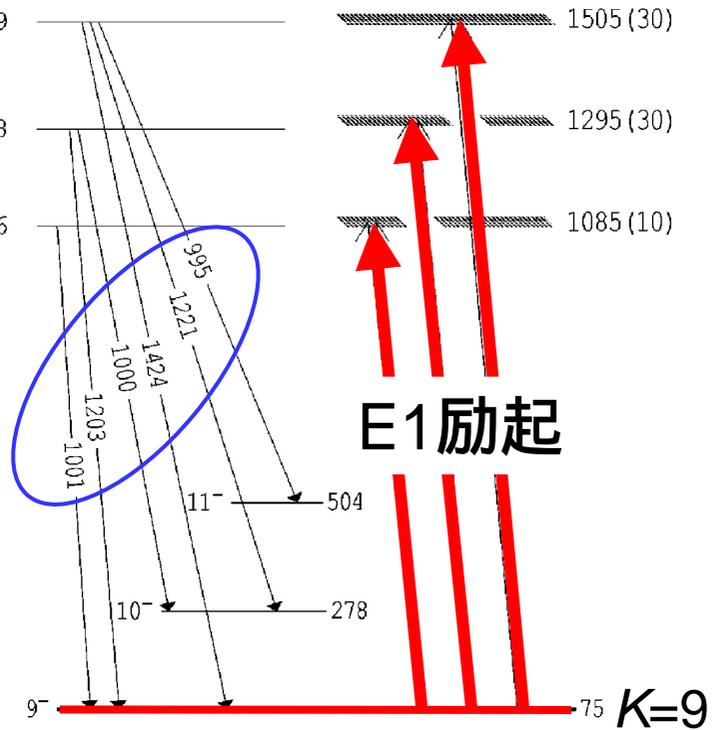
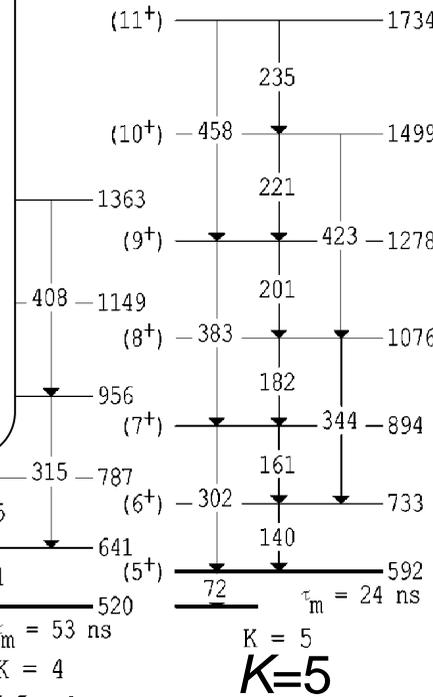
Stuttgart Dynamitron  $450\mu\text{A}$   $10^8 \sim 10^9/\text{keV}/\text{cm}^2/\text{s}$

$\text{Ta}_2\text{O}_5$  150mg enriched to 5.45% 6.7mg of  $^{180m}\text{Ta}$

Natural Ta metal 1.5g 0.012% 0.18mg of  $^{180m}\text{Ta}$



核融合反応  
インビーム実験



# $^{180}\text{Ta}$ 核異性体の光脱励起実験

## 1MeV領域ガンマ線による脱励起断面積の測定

特に、1MeV以下の中間状態の探索

⇒ s-process中で $^{180\text{m}}\text{Ta}$ は残らない！！

	$I^\pi$	$E_x(\text{keV})$	$E_\gamma(\text{keV})$
$K^\pi = 1^+$	$8^+$	734	659
	$9^+$	976	901
	$10^+$	1140	1065
$K^\pi = 0^-$	$8^-$	856	781
	$9^-$	1030	955
	$10^-$	1240	1165

### 高エネルギー放射光

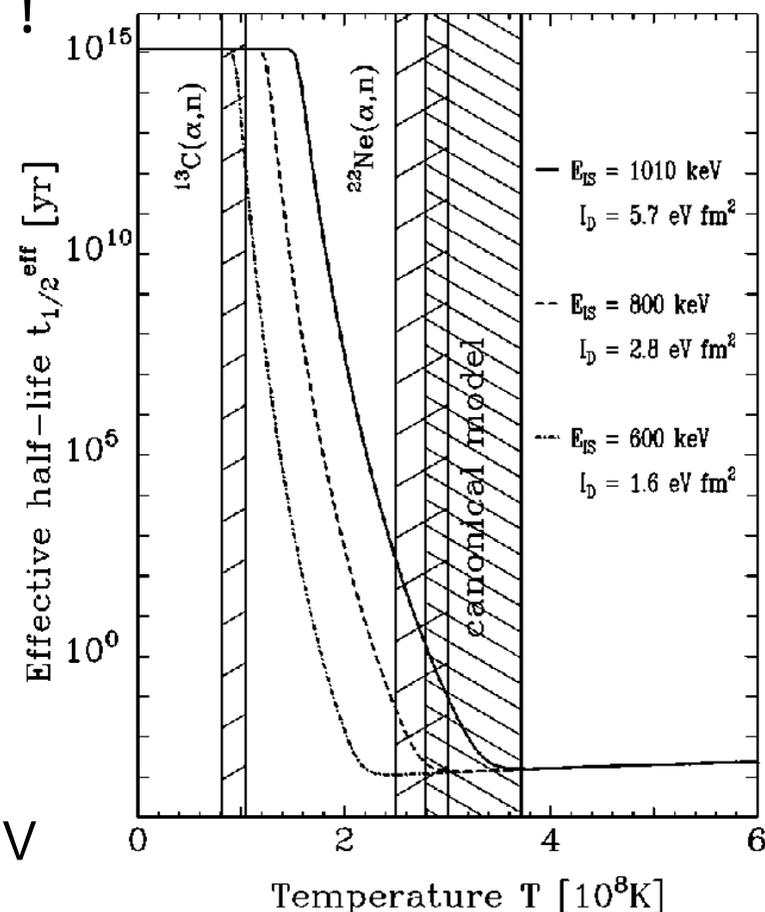
$$N_\gamma = 4.3 \times 10^{10} / \text{s/mrad/keV/mA at 1MeV}$$

### Stuttgart Dynamitron

$$N^{\text{max}} = 10^8 \sim 10^9 / \text{keV/cm}^2/\text{s at } E_{\text{max}} = 4\text{MeV}$$

Enriched  $^{180\text{m}}\text{Ta}$  6.7mg (150mg)

Natural  $^{180\text{m}}\text{Ta}$  0.18mg (1.5g)



# エネルギー準位の高い中間状態からの影響

数MeV以上

10T, 6mA

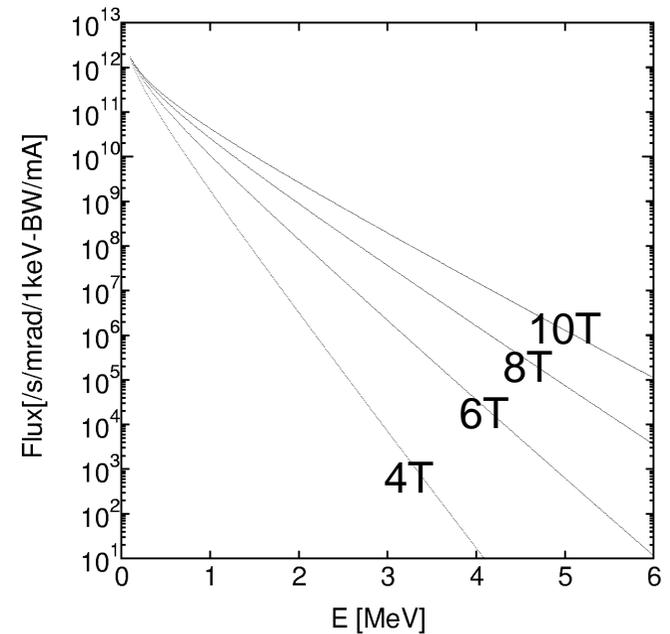
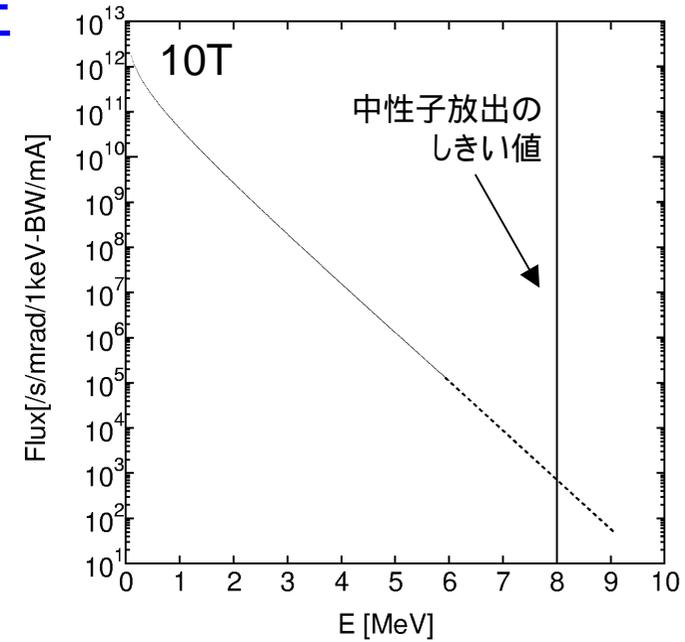
$^{180m}\text{Ta}(\gamma,\gamma')^{180}\text{Ta}$  0.012%

	/s/keV	$\sigma\Gamma$	Y
1MeV	$10^{11}$	$0.057\text{eV}\cdot\text{b}$	$6\times 10^2$
3MeV	$10^8$	$58\text{eV}\cdot\text{b}$	$6\times 10^2$

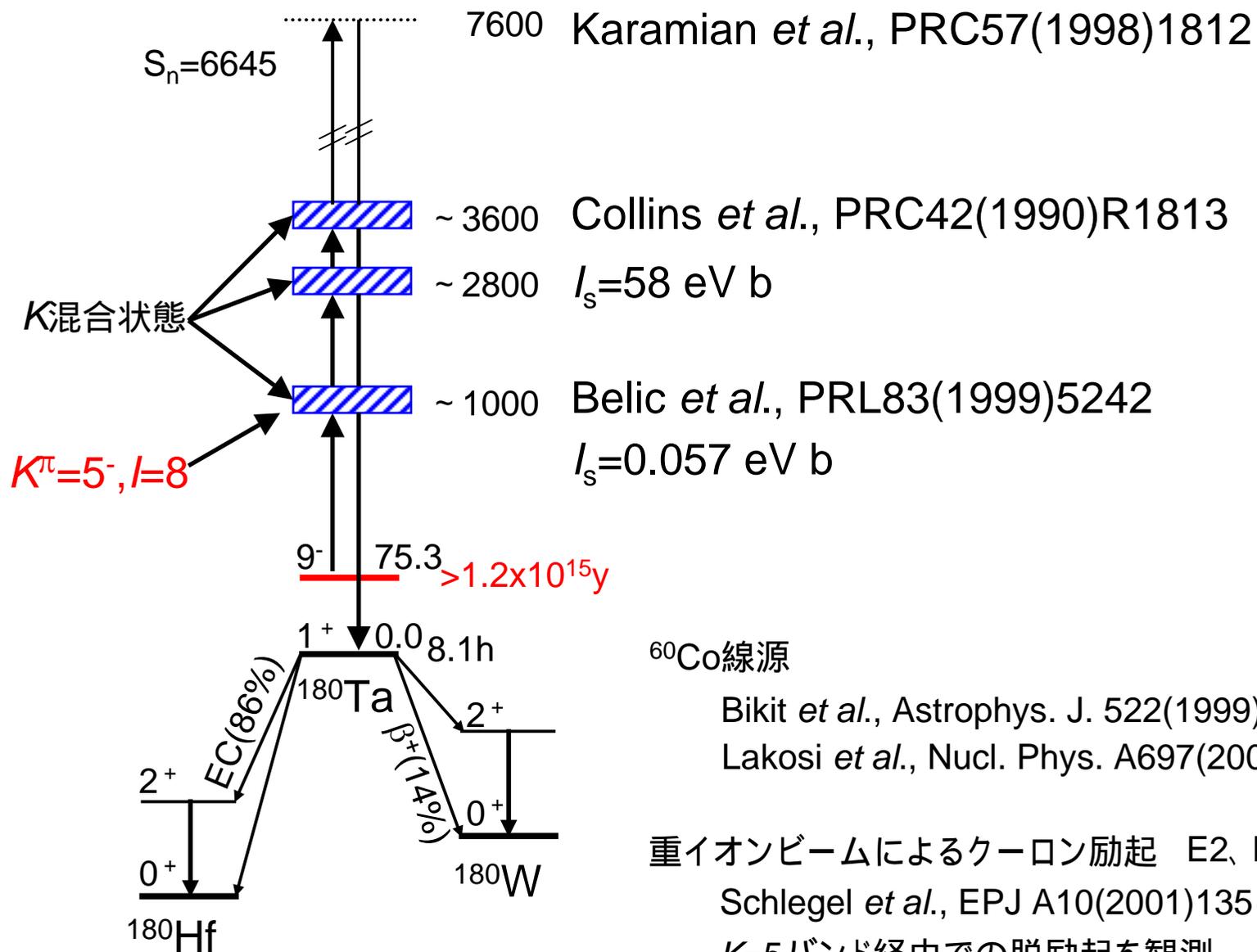
$^{181}\text{Ta}(\gamma,n)^{180}\text{Ta}$  99.988%

	/s	$\sigma$	Y
>8MeV	$10^5$	$50\text{mb}$	$5\times 10^3$

	$N_\gamma$ @1MeV /s/keV/mA	$N_\gamma$ @3MeV /s/keV/mA	$N_\gamma$ >8MeV /s/mA
10T	$4.3\times 10^{10}$	$1.9\times 10^8$	$3\times 10^5$
8T	$2.6\times 10^{10}$	$3.7\times 10^7$	$3\times 10^3$
6T	$1.1\times 10^{10}$	$2.1\times 10^6$	1
4T	$1.6\times 10^9$	$7.0\times 10^3$	$2\times 10^{-7}$



# $^{180}\text{Ta}$ 核異性体の光脱励起

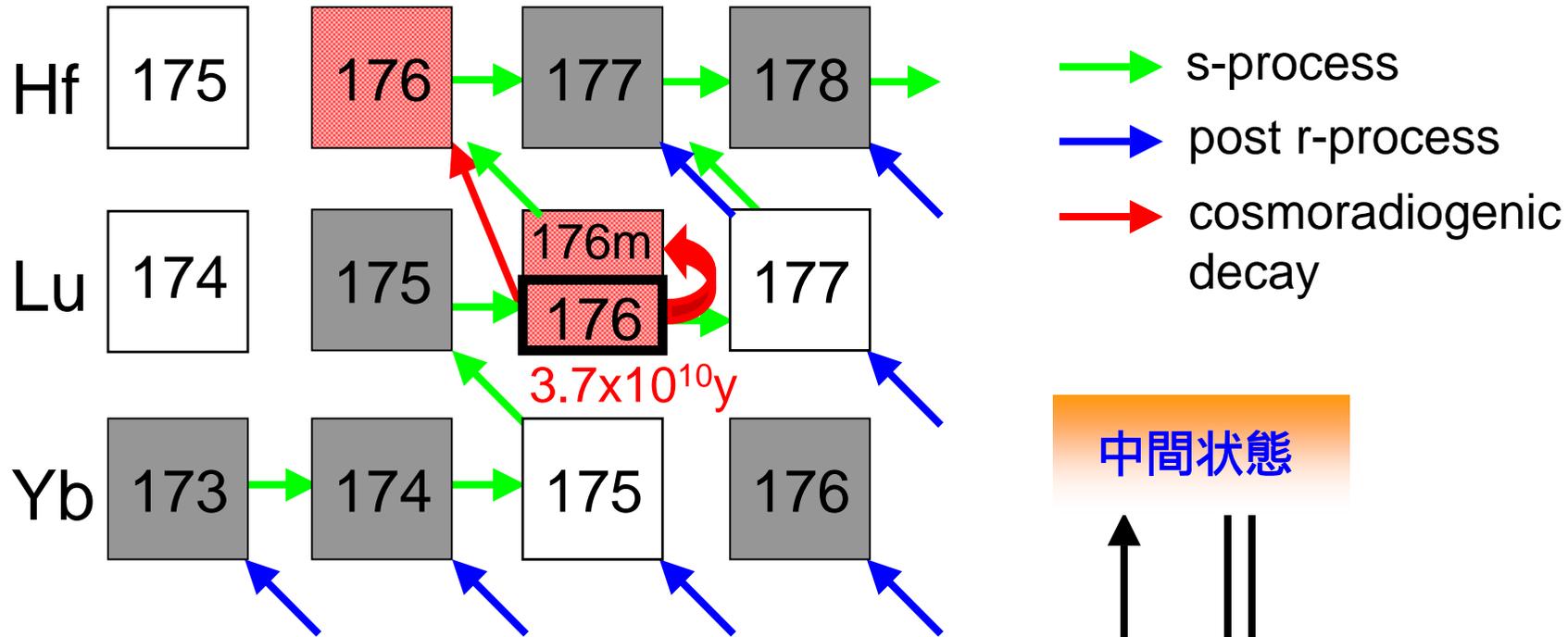


$^{60}\text{Co}$ 線源

Bikit *et al.*, *Astrophys. J.* 522(1999)419  
 Lakosi *et al.*, *Nucl. Phys.* A697(2002)44

重イオンビームによるクーロン励起 E2、E3励起  
 Schlegel *et al.*, *EPJ A*10(2001)135  
 K=5バンド経由での脱励起を観測

# s-process cosmo-thermometer $^{176}\text{Lu}$



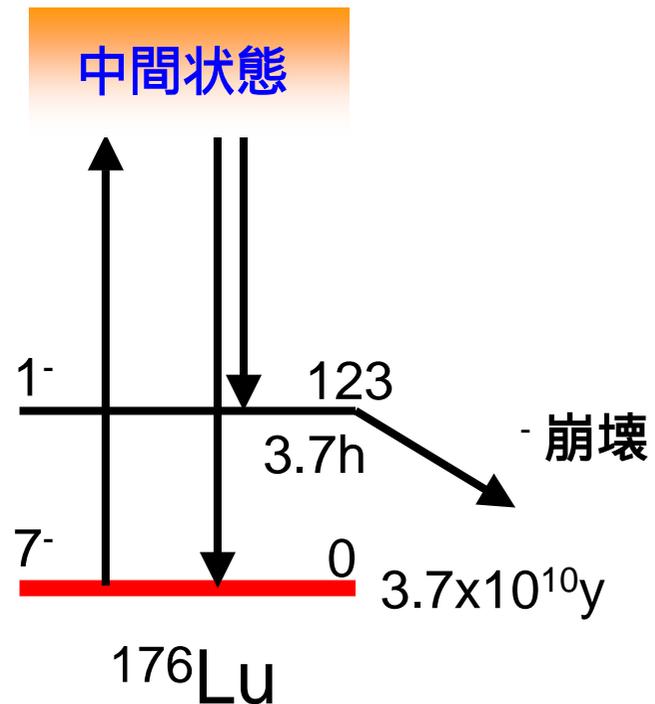
恒星内での高温状態では、 $K$  混合状態を經由して核異性体が生成

**実効的な半減期減少**

基底状態と核異性体のcoupling strength

Branching factor  $f_n$

$$(\sigma N)_{^{176}\text{Lu}} = f_n [(\sigma N)_{^{176}\text{Lu}} + (\sigma N)_{^{176}\text{Hf}}]$$



$T_{1/2} = 4.08(3) \times 10^{10} \text{yr}$  Grinyer et al., PRC67(2003)014302

# $^{176}\text{Lu}$ 核異性体への光励起実験

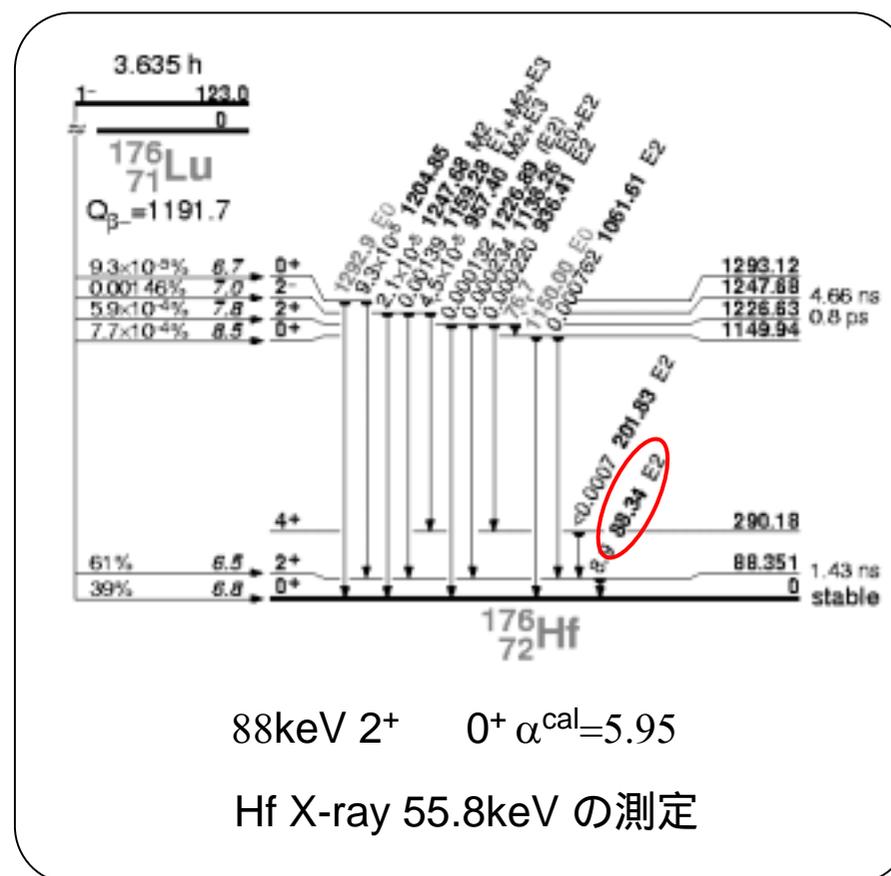
## 1MeV領域ガンマ線による励起断面積の測定

基底状態 ( $K^\pi = 7^-$ ) から  $K^\pi = 4^+$  への励起

	$I^\pi$	Ex (keV)	$E_\gamma$ (keV)
$K^\pi = 4^+$	$6^+$	709	709
	$7^+$	787	787
	$8^+$	888	888

存在比 2.59%

$N = 10^8 \sim 10^9 / \text{keV} / \text{cm}^2 / \text{s}$



88keV  $2^+$   $0^+$   $\alpha^{\text{cal}} = 5.95$

Hf X-ray 55.8keV の測定

# まとめ

1 MeV領域ガンマ線を用いた $^{176}\text{Lu}$ 、 $^{180}\text{Ta}$ の光核反応( $\gamma, \gamma'$ )実験

$^{176}\text{Lu}$  s-process温度計

$^{180\text{m}}\text{Ta}$  元素合成の解明(s-process)

稀少同位体  $^{176}\text{Lu}$ (2.59%)、 $^{180\text{m}}\text{Ta}$ (0.012%)

励起断面積が小さいため、大強度ガンマ線源が必要

特に、1 MeV以下の中間状態については適当な光源がなく、それらを経由する励起断面積はわかっていない。

⇒ **高エネルギー放射光を用いた光核反応実験**

( $\gamma, n$ )反応や、高い中間状態を経由する( $\gamma, \gamma'$ )反応の影響

磁場を変え、励起関数測定

照射時間 半減期程度  $^{180}\text{Ta}$ (8時間)、 $^{176}\text{Lu}$ (4時間)

**光子数や、光子スペクトルの正確な見積もりが必要**