



# $^{176}\text{Lu}$ と $^{180}\text{Ta}$ 核異性体の光核反応実験

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

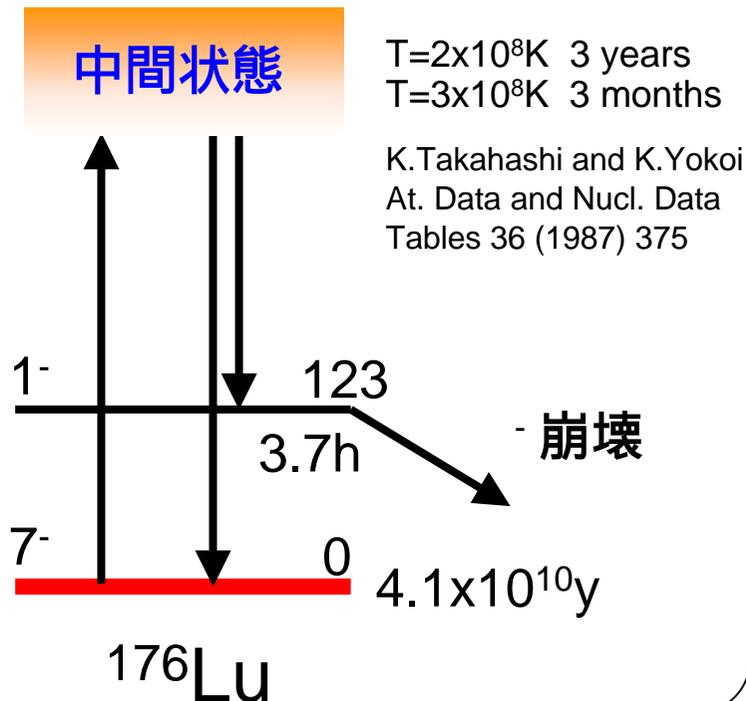
# $^{176}\text{Lu}$ と $^{180}\text{Ta}$ 核異性体について

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

基底状態  $I^\pi=7^-$   $4.1 \times 10^{10}\text{y}$  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



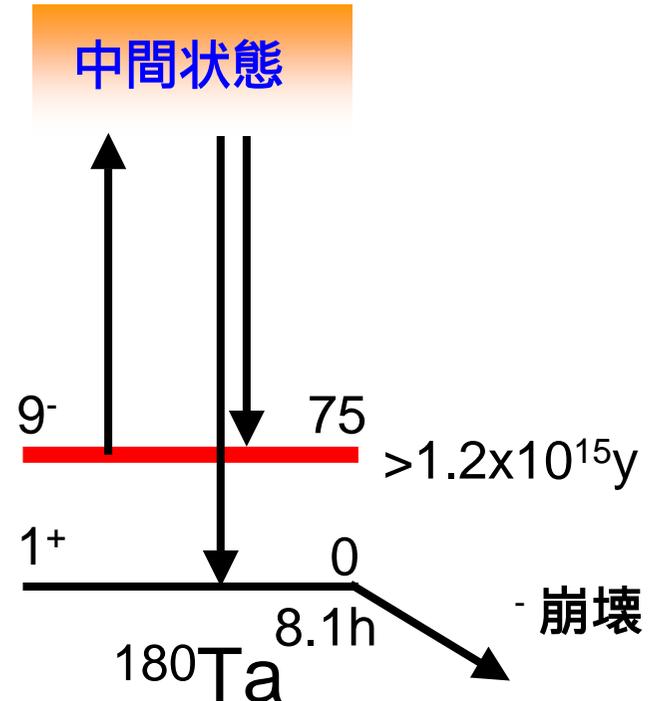
$^{180}\text{Ta}$

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**



# 恒星内における重元素の合成過程

中性子捕獲反応

s-process →

r-process →

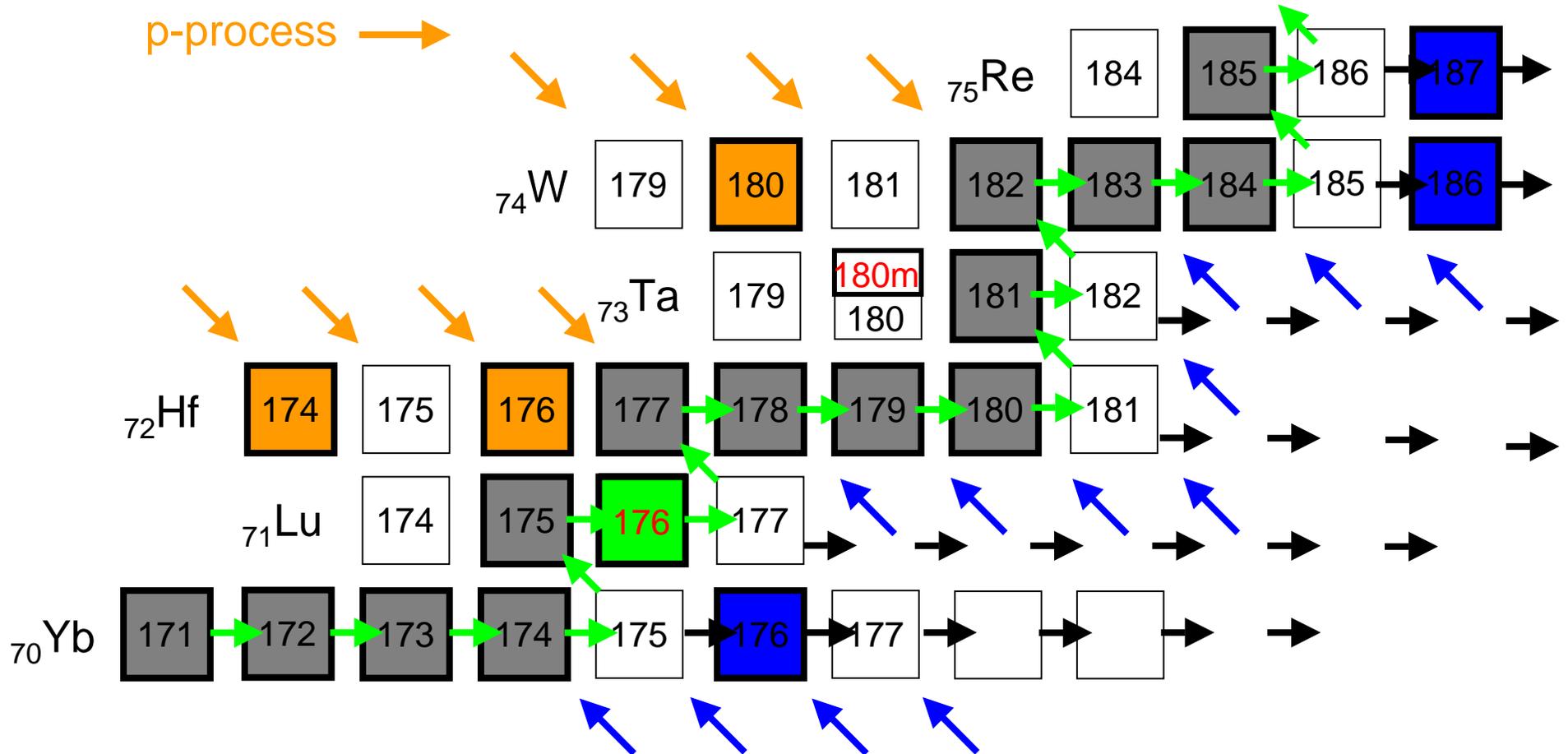
post r-process →

$^{176}\text{Lu}$  s-process 核

$^{180}\text{Ta}$  ???

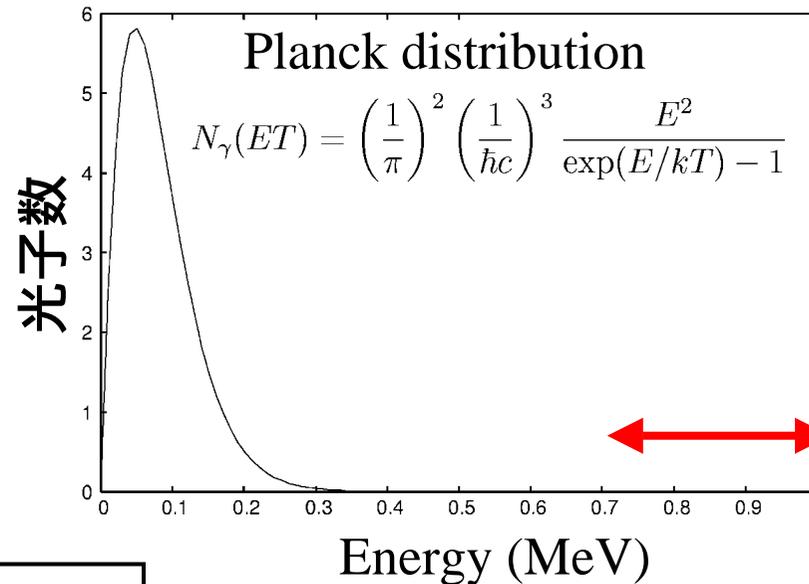
光吸収反応 ... etc

p-process →



# $^{176}\text{Lu}$ , $^{180}\text{Ta}$ 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



$E_{\gamma}$	相対比
0.7	10000
0.8	500
0.9	20
1.0	1
1.1	0.1

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

s-process中では、1 MeV領域のガンマ線が重要

1 MeV以上

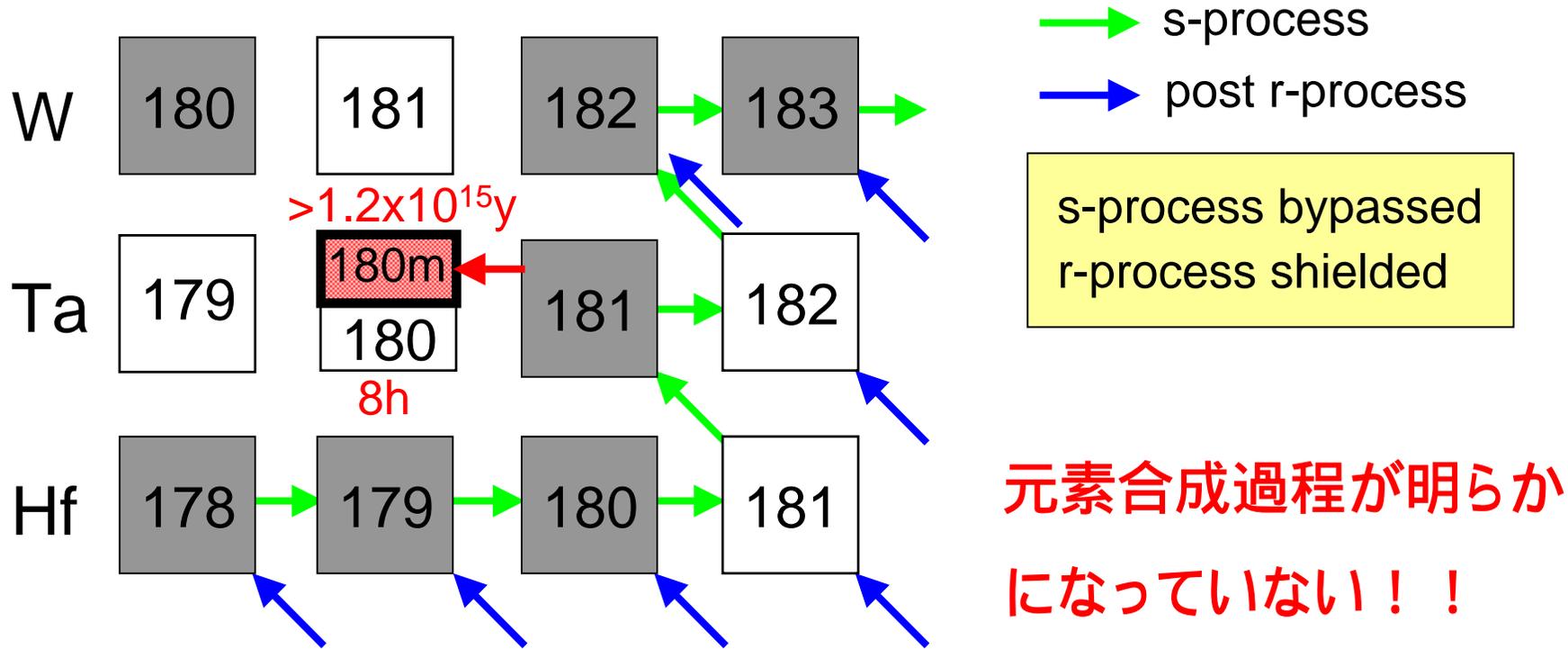
Stuttgart Dynamitron 電子加速器 制動放射光

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

1 MeV以下

適当な光源がなく、断面積測定データなし

# 180mTaの元素合成



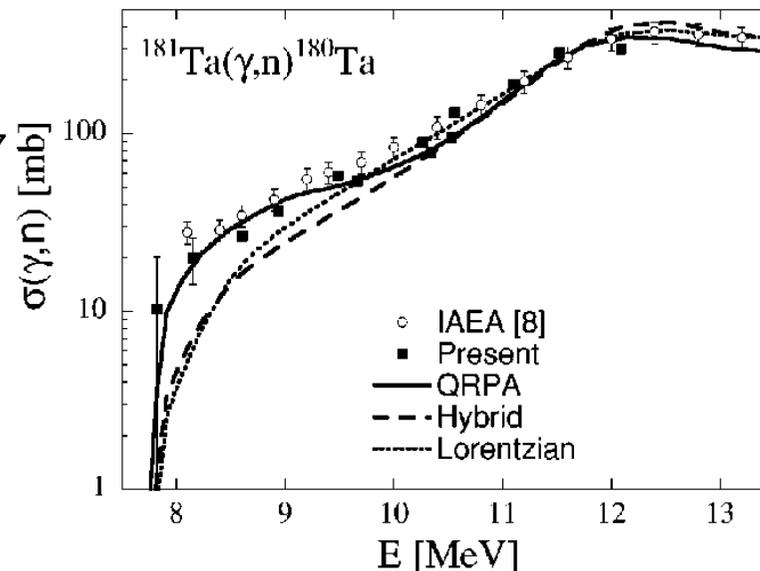
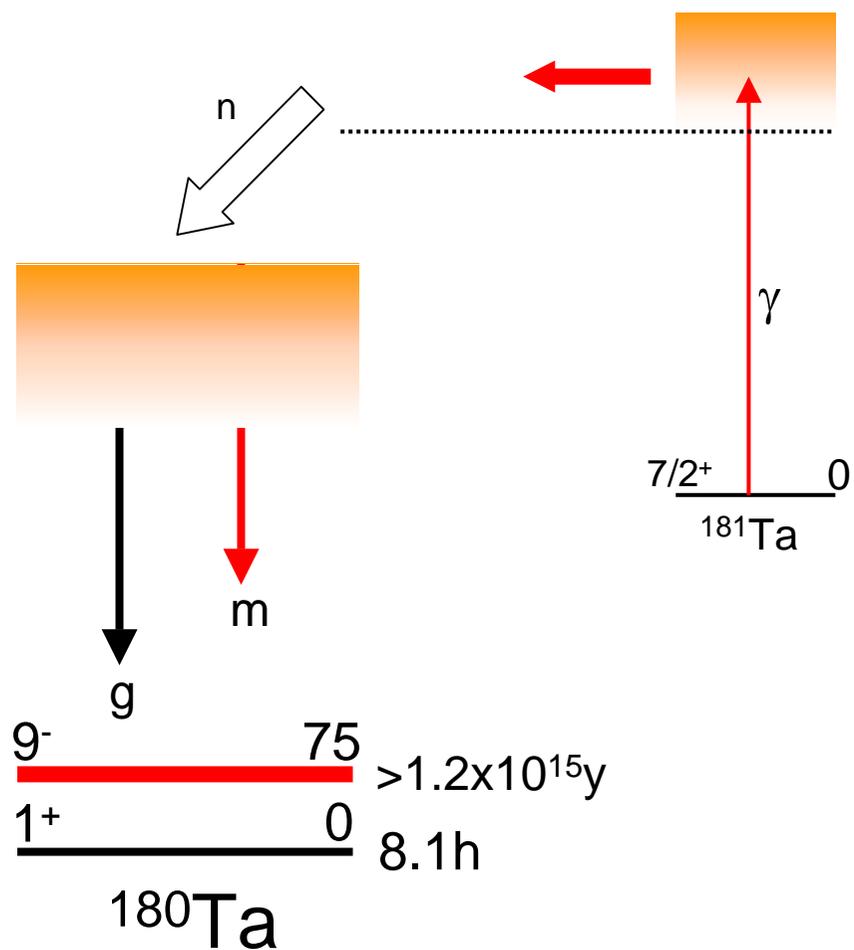
- s-process パス ( $^{179}\text{Hf}$   $^{179}\text{Ta}$   $^{180m}\text{Ta}$ )
- post r-process パス ( $^{180m}\text{Hf}$   $^{180m}\text{Ta}$ )
- v-process パス  $^{181}\text{Ta}(\nu, \nu'n)^{180m}\text{Ta}$
- $\gamma$ -process パス  $^{181}\text{Ta}(\gamma, n)^{180m}\text{Ta}$

# $^{180m}\text{Ta}$ 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)

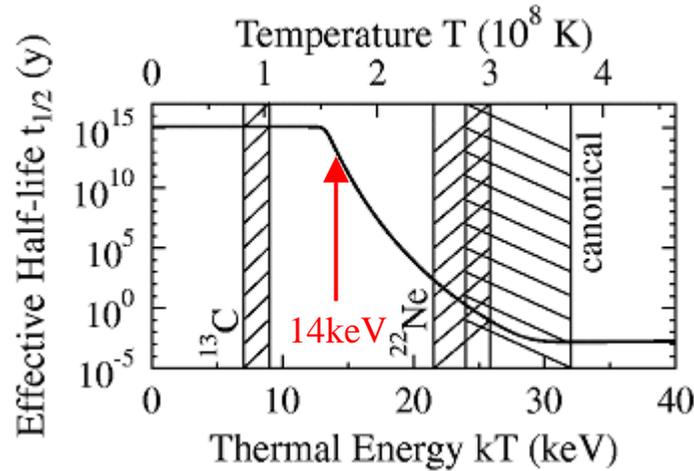
$^{181}\text{Ta}(\gamma, n)^{180m}\text{Ta}$  反応実験

Utsunomiya *et al.*  
PRC67(2002)015807



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

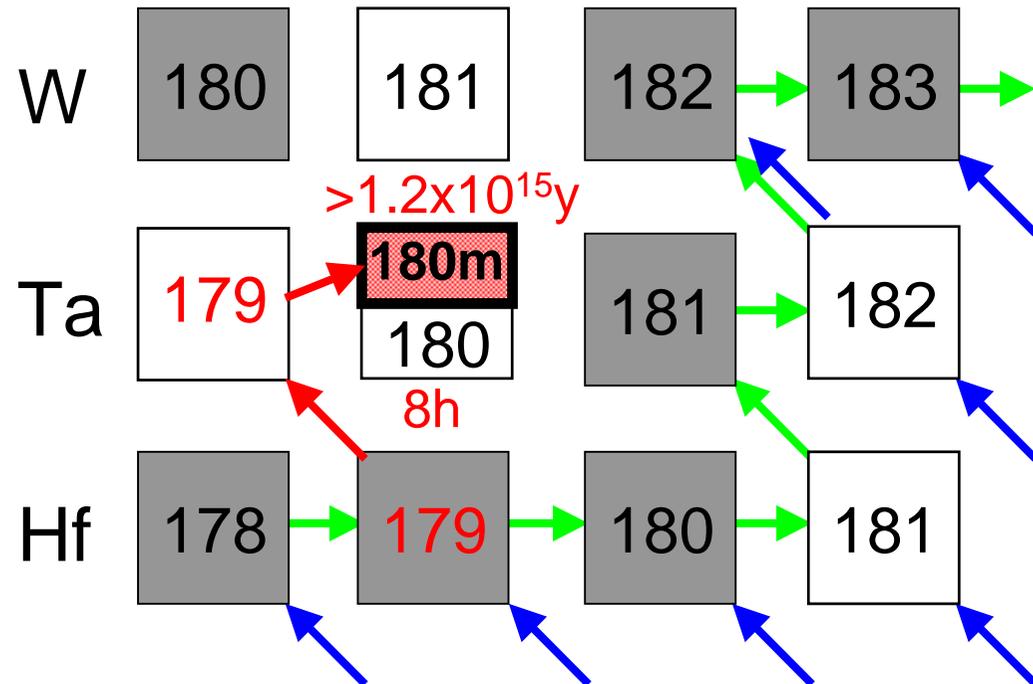
PRL83(1999)5242 Belic *et al.*



AGB星 He shell burning				
	期間	温度	$^{179}\text{Hf}$	$^{180m}\text{Ta}$
$^{13}\text{C}(\alpha,n)$	100y	8keV $1 \times 10^8\text{K}$	stable	stable
$^{22}\text{Ne}(\alpha,n)$	a few years	26keV $3 \times 10^8\text{K}$	unstable	1month

turnover time 1 day  $\longrightarrow$  数時間で冷却

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

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


1MeV以下の中間状態？

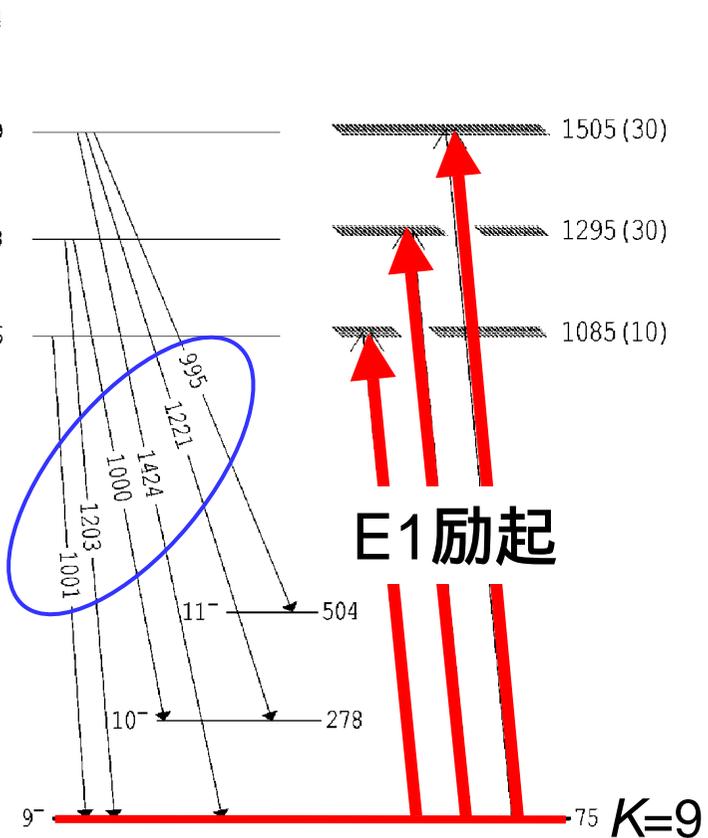
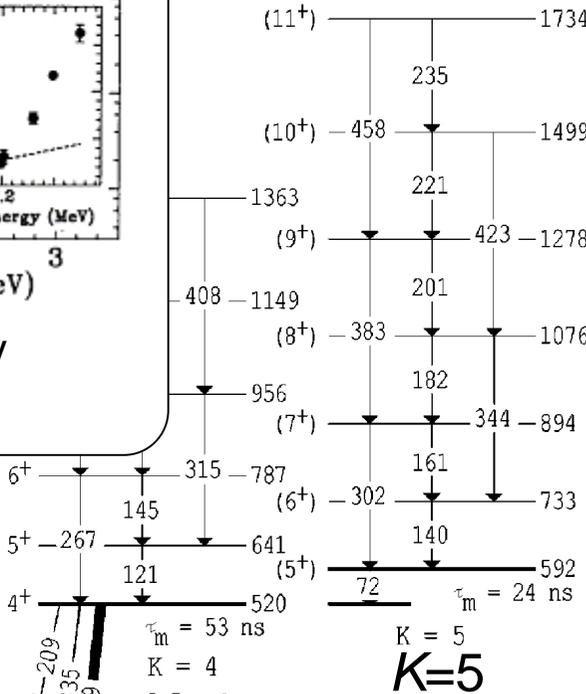
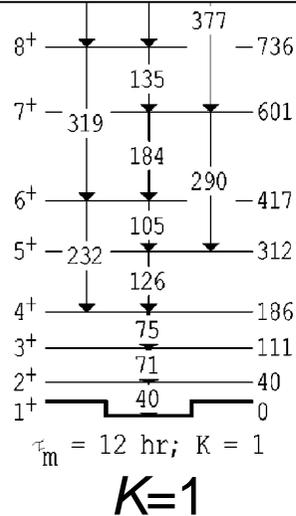
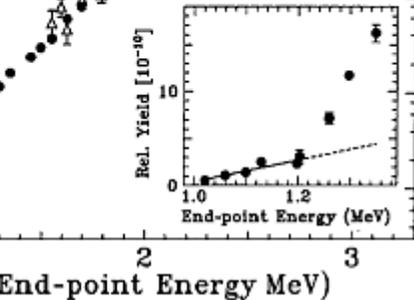
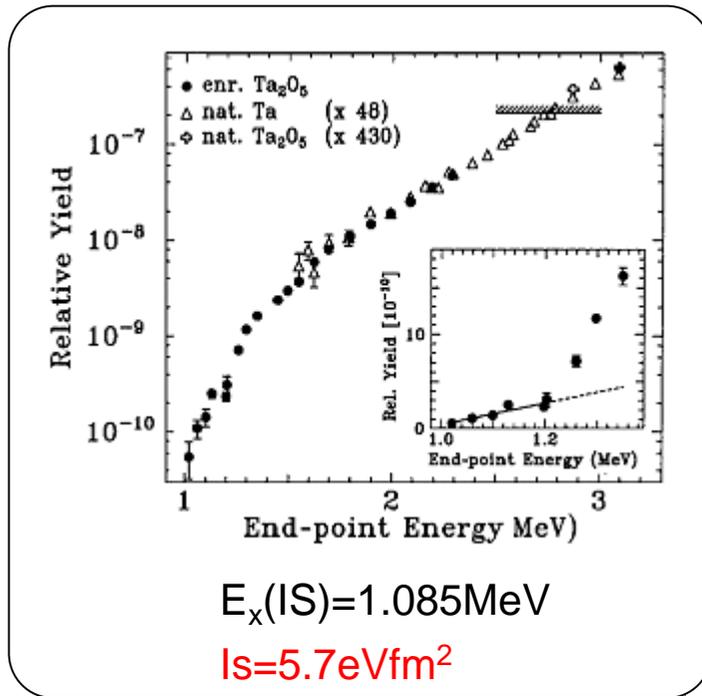
# 制動放射光による $^{180m}\text{Ta}$ 脱励起実験

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！！

	$I^\pi$	$E_x$ (keV)	$E_\gamma$ (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

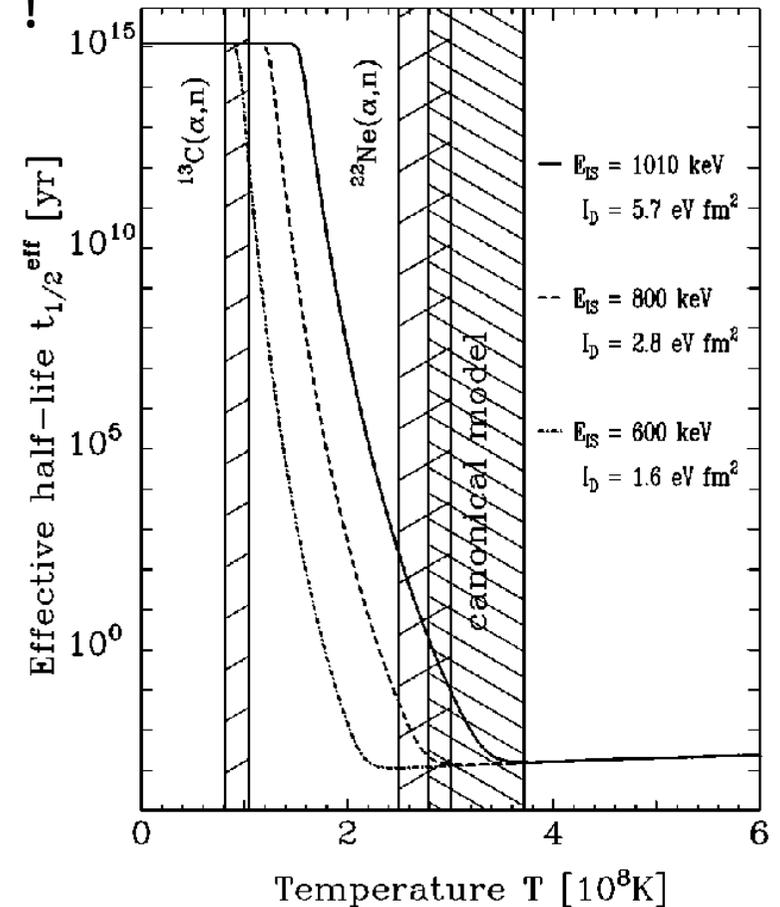
$$N_\gamma = 4.3 \times 10^{10} / \text{mrad/keV/s/mA at } 1\text{MeV}$$

### Stuttgart Dynamitron

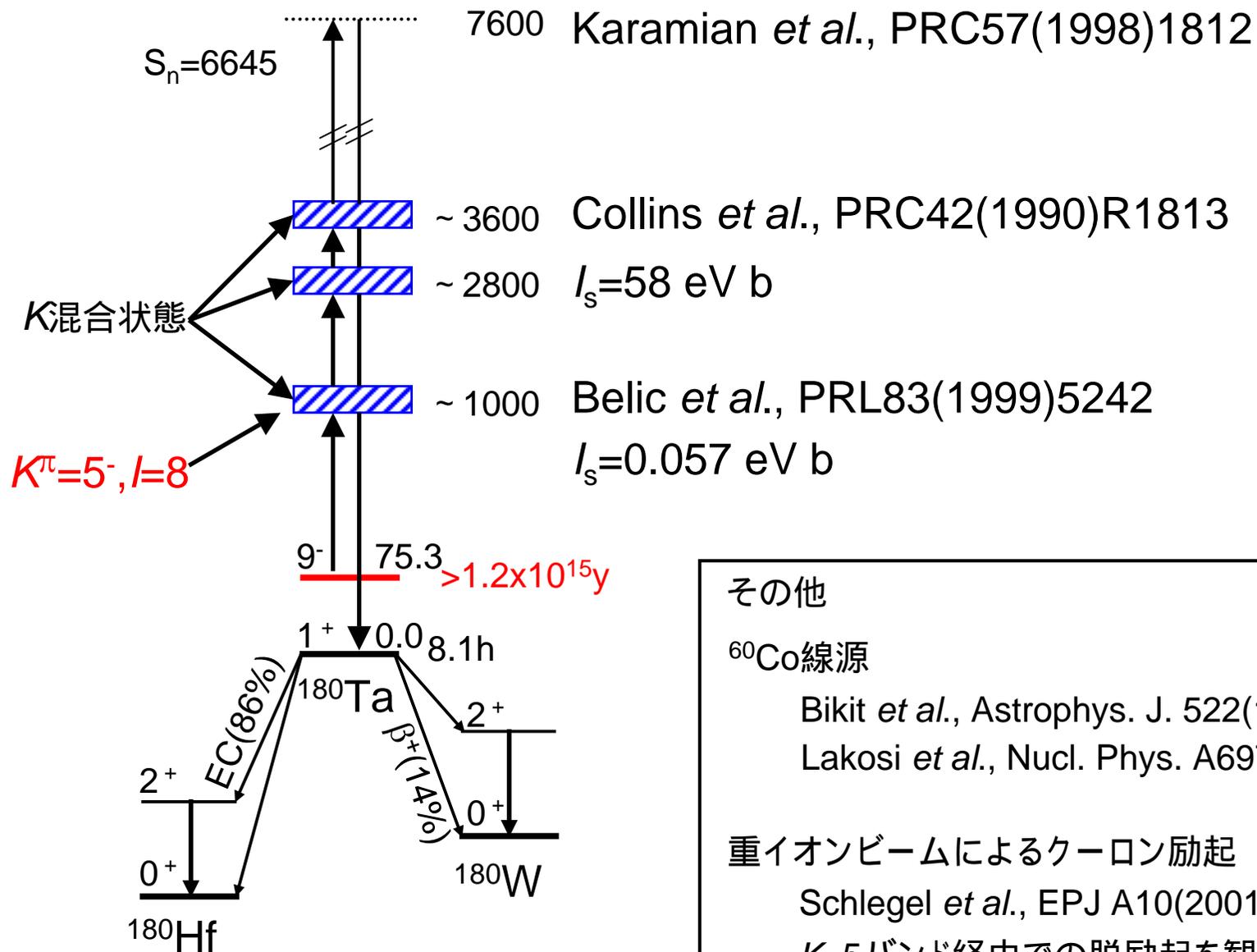
$$N^{\text{max}} = 10^8 \sim 10^9 / \text{keV/cm}^2/\text{s at } E_{\text{max}} = 4\text{MeV}$$

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

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



# 180mTa光脱励起の中間状態



その他

$^{60}\text{Co}$ 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

# エネルギー準位の高い中間状態からの影響

10T, 1mA

数MeV以上

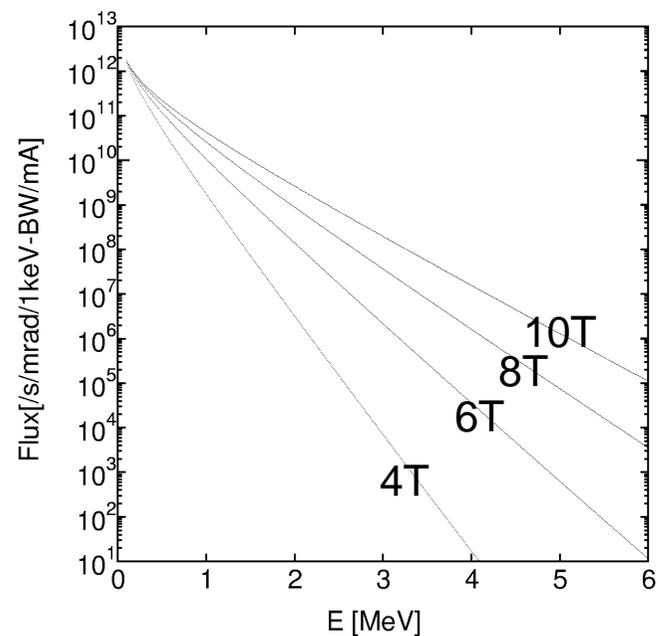
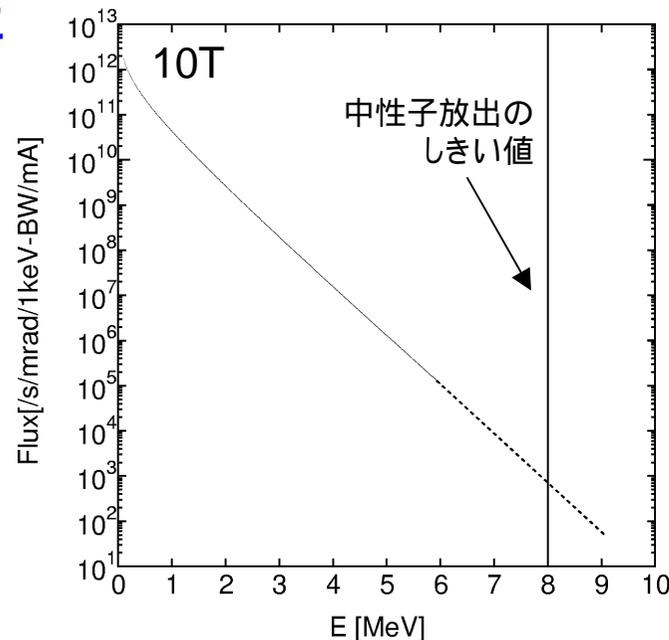
$^{180m}\text{Ta}(\gamma,\gamma')^{180}\text{Ta}$  0.012%

	/s/keV	$\sigma\Gamma$	Y/s
1MeV	$4 \times 10^{10}$	0.057eV·b	5
3MeV	$2 \times 10^8$	58eV·b	23

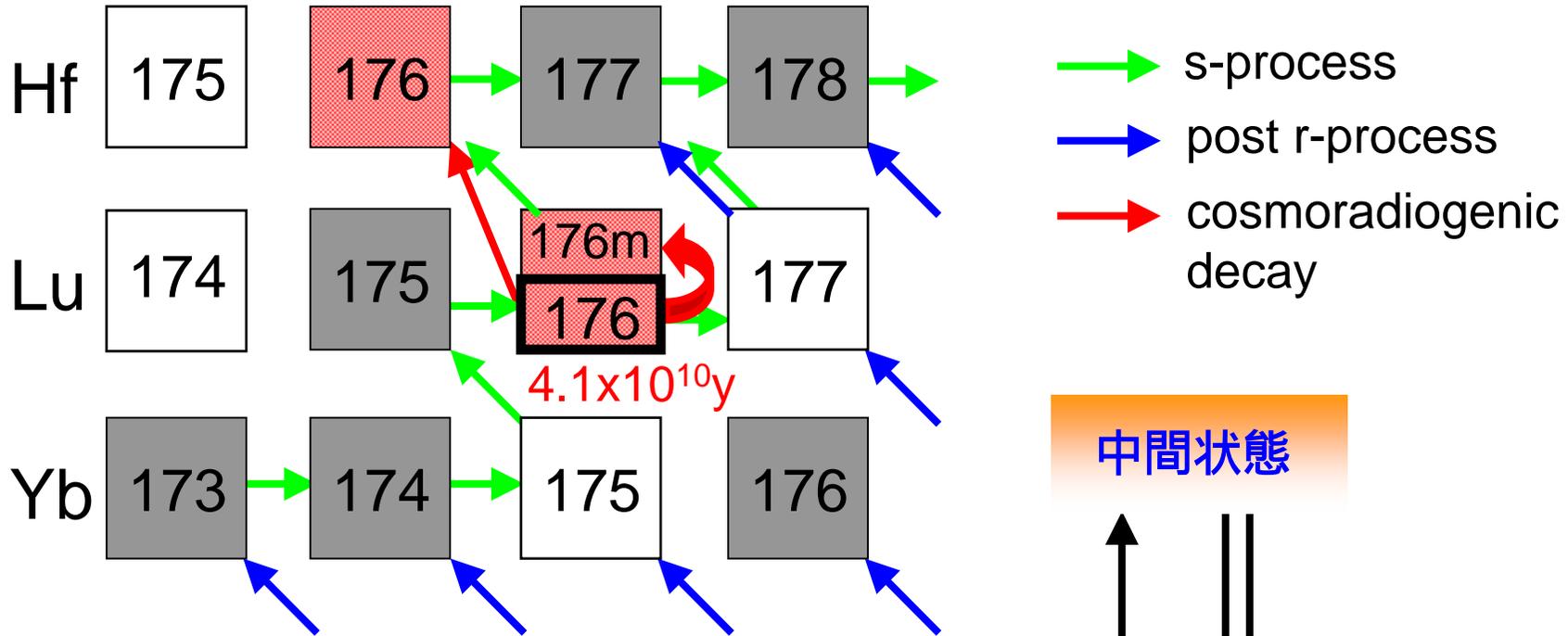
$^{181}\text{Ta}(\gamma,n)^{180}\text{Ta}$  99.988%  $S_n=7.577$  MeV

	/s	$\sigma$	Y/s
>8MeV	$3 \times 10^5$	50mb	300

	$N_\gamma$ @1MeV /s/keV/mA	$N_\gamma$ @3MeV /s/mA	$N_\gamma$ >8MeV /s/mA
10T	$4 \times 10^{10}$	$2 \times 10^8$	$3 \times 10^5$
8T	$3 \times 10^{10}$	$4 \times 10^7$	$3 \times 10^3$
6T	$1 \times 10^{10}$	$2 \times 10^6$	1
Y	1	0.2	$10^{-3}$
4T	$2 \times 10^9$	$7 \times 10^3$	$1 \times 10^{-7}$
Y	0.2	$10^{-3}$	$10^{-10}$



# 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

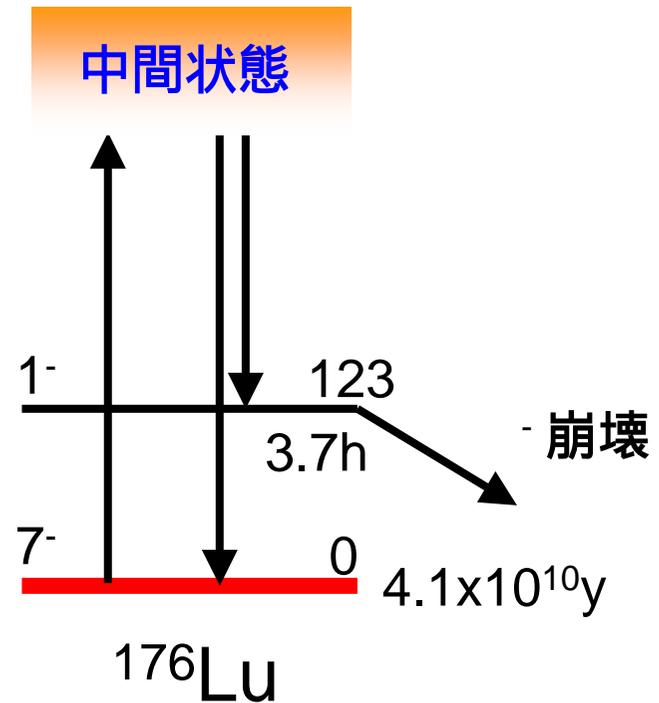
実効的な半減期減少

基底状態と核異性体のcoupling strength

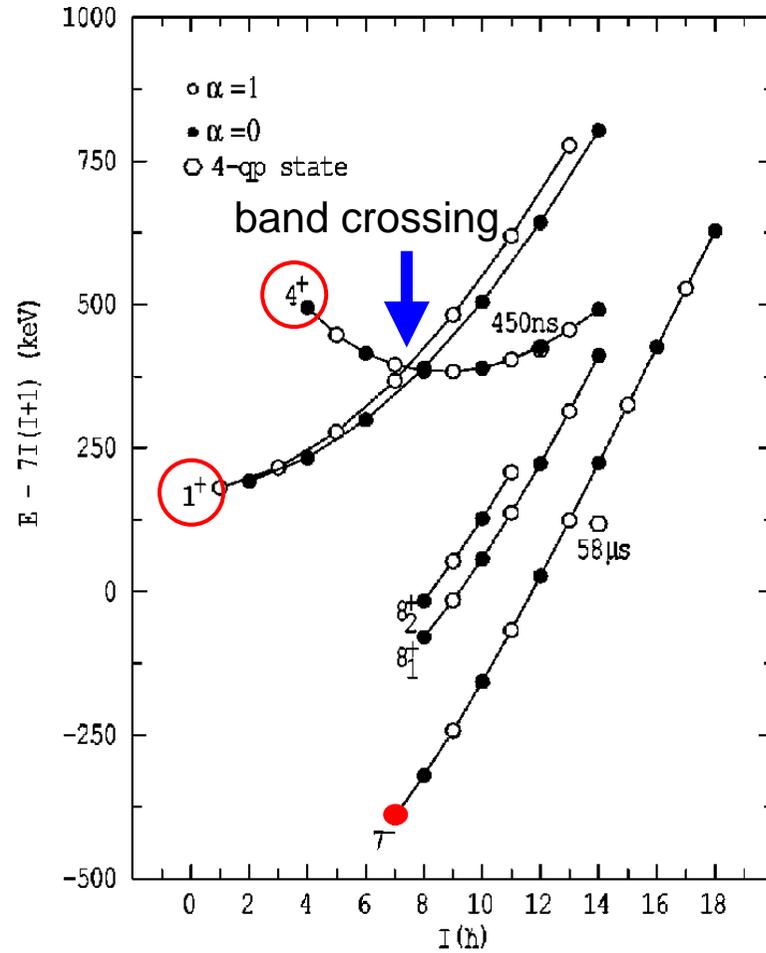
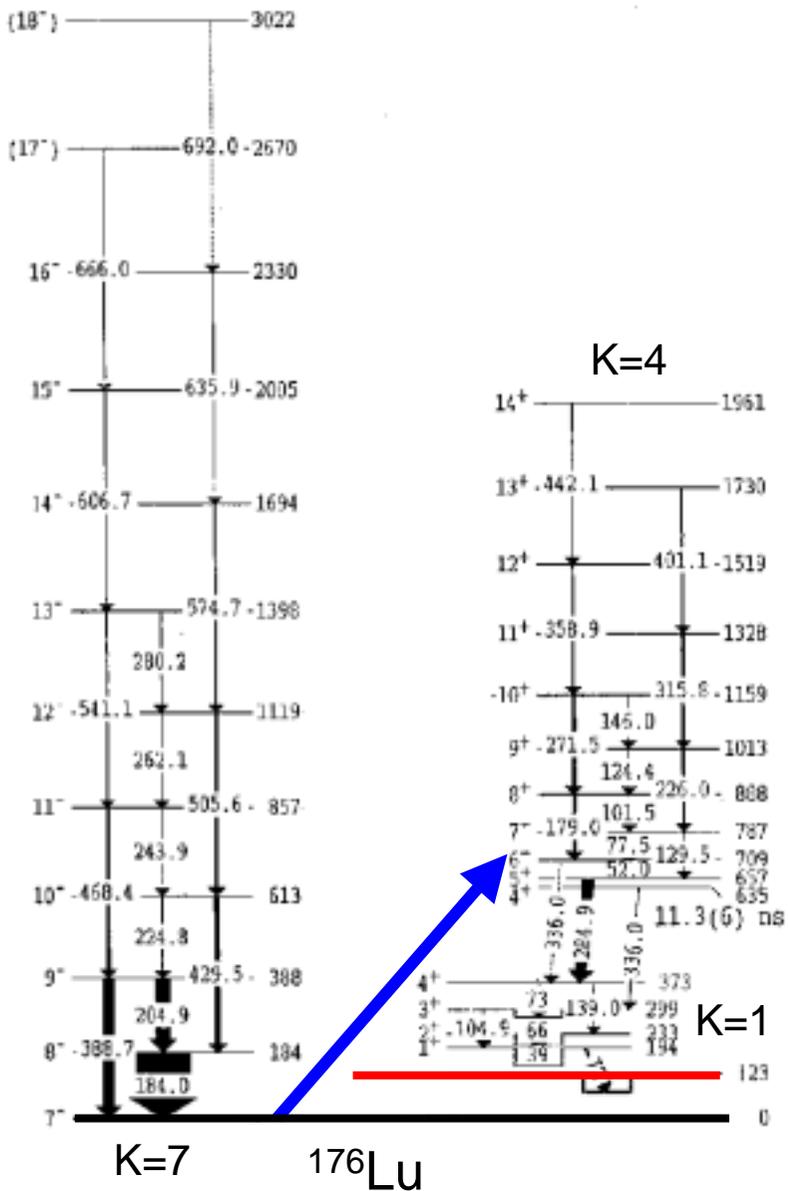
Branching factor  $f_n$

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

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



# $^{176}\text{Lu}$ の準位構造



McGoram et al. PRC62(2000)031303

# $^{176}\text{Lu}$ 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

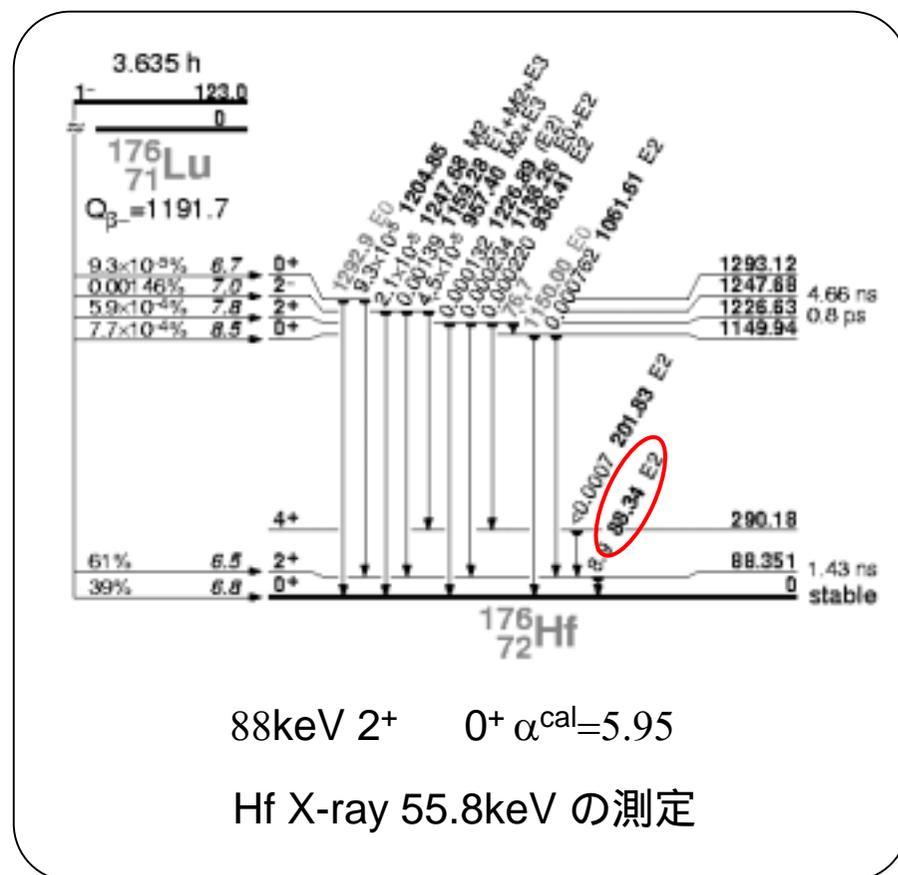
	$I^\pi$	$E_x(\text{keV})$	$E_\gamma(\text{keV})$
$K^\pi = 4^+$	$6^+$	709	709
	$7^+$	787	787
	$8^+$	888	888

### 天然存在比

$^{175}\text{Lu}$ (97.41%)、 $^{176}\text{Lu}$ (2.59%)

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

$(\gamma, n)$  反応の影響なし



# 実験での留意点

光子数や、エネルギー分布の見積もり

放射化法  $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma')^{115\text{m}}\text{In}$

NRF(Nuclear Resonance Fluorescence)法

$^{115}\text{In}$ 、 $^{13}\text{C}$ 、 $^{27}\text{Al}$  インビームガンマ線計測

$(\gamma, n)$ 反応や、高い中間状態を経由する

$(\gamma, \gamma')$ 反応の影響

適切な磁場(3 ~ 6 T)の選択

励起関数の測定(磁場を変化)

$^{176}\text{Lu}$  基底状態( $4.1 \times 10^{10}$  y)からの崩壊ガンマ線

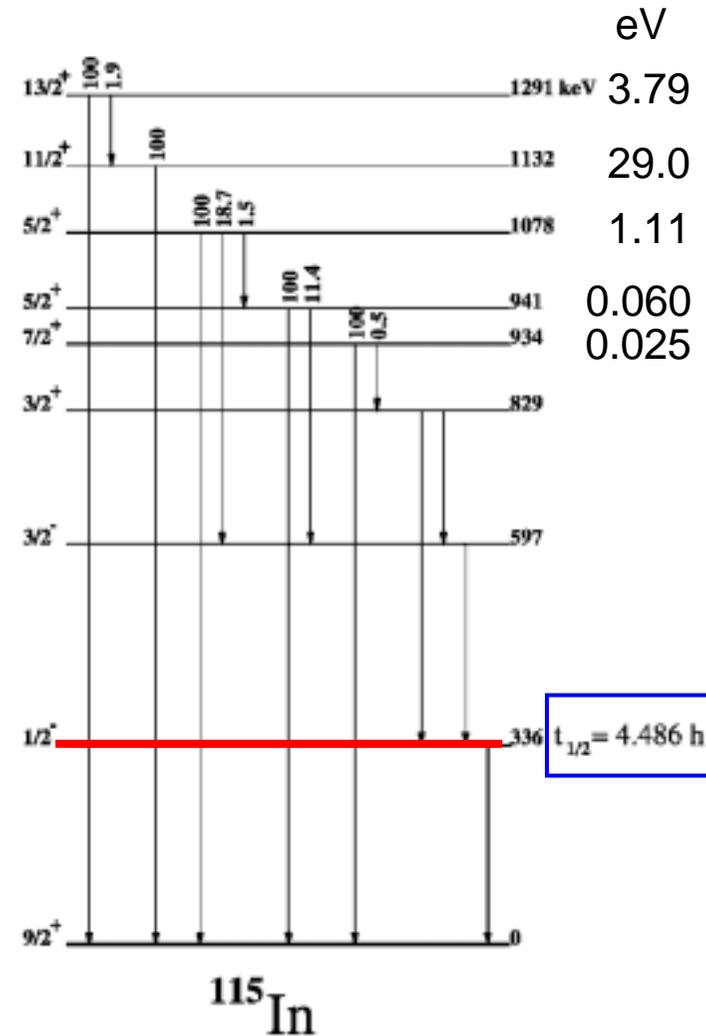
天然 $^{176}\text{Lu}$  1.5g 2.59% 39mg

崩壊数 80 /s

$N_{\text{ph}} = 10^{11}$  /s/keV  $\sigma\Gamma = 0.05$  eV b

$^{176}\text{Lu}$ 核異性体 半減期3.7時間  $Y = 300$  /s

⇒ 濃縮ターゲット



# 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

⇒ **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

**光子数や、エネルギー分布の正確な見積もりが必要**

$^{115}\text{In}(\gamma, \gamma')^{115\text{m}}\text{In}$ 反応を利用

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