



高エネルギー放射光を用いた ^{176}Lu 、 ^{180}Ta 核異性体の 生成及び消滅断面積の測定実験

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

内容

1. はじめに・・・ ^{176}Lu 、 ^{180}Ta 核異性体について
2. ^{180}Ta 核異性体の元素合成過程 (s-process)
3. s-process温度計: ^{176}Lu
4. 高エネルギー放射光による光核反応実験
5. まとめ

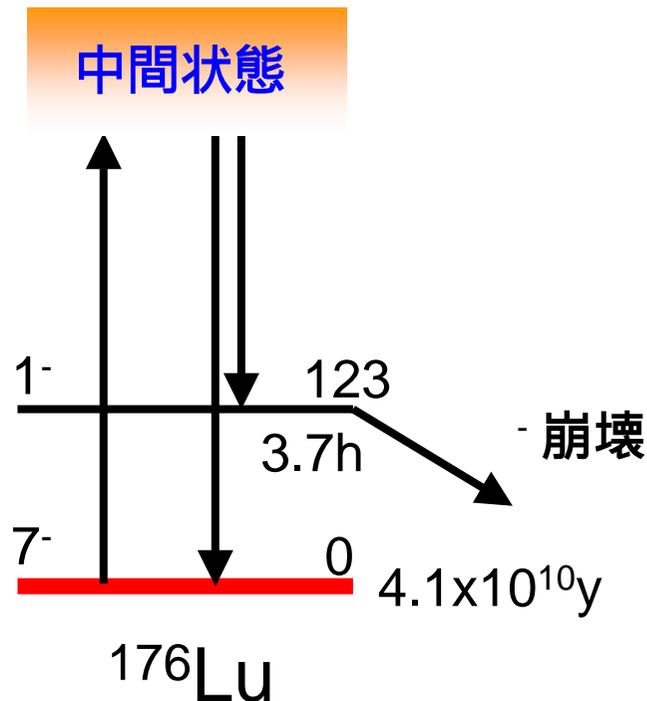
^{176}Lu と ^{180}Ta 核異性体について

^{176}Lu s-process核

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

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

s-process 中の高温状態下で実効的半減期が変化 宇宙温度計



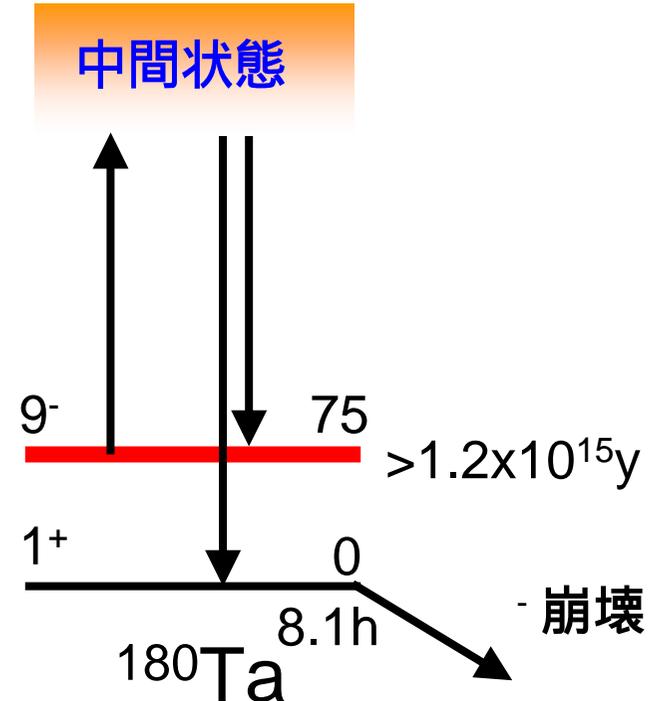
^{180}Ta

基底状態 $I^\pi=1^+$ 8.1h

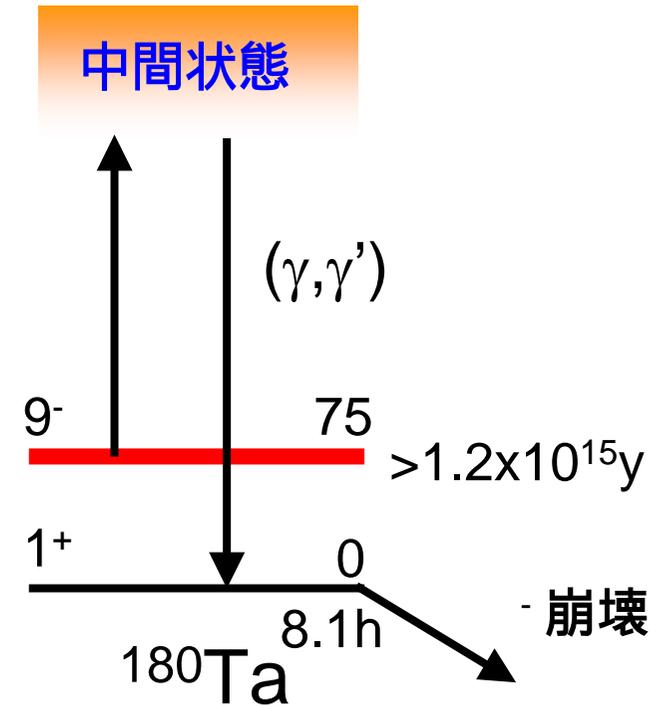
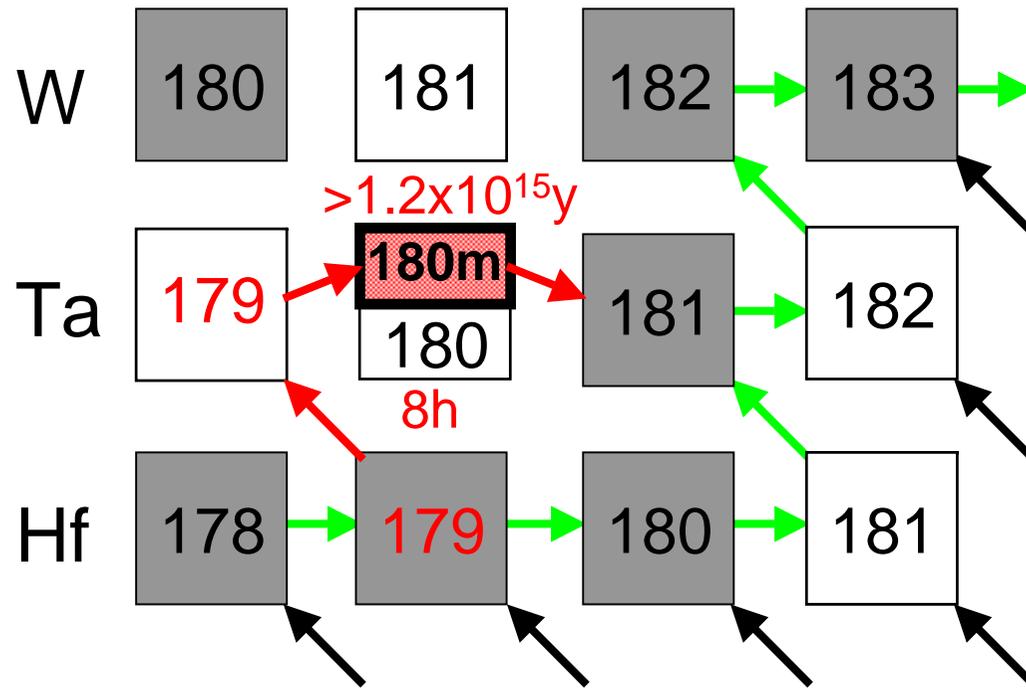
$E_x=75\text{keV}$ $I^\pi=9^-$ $>1.2 \times 10^{15}\text{y}$

天然に存在する唯一の核異性体
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



^{180}Ta 核異性体の生成過程



γ -processパス $^{181}\text{Ta}(\gamma, n)^{180\text{m}}\text{Ta}$

ν -processパス $^{181}\text{Ta}(\nu, \nu' n)^{180\text{m}}\text{Ta}$

s-processパス ($^{179}\text{Hf} \rightarrow ^{179}\text{Ta} \rightarrow ^{180\text{m}}\text{Ta}$)

AGB星 He shell burning

	期間	温度	^{179}Hf	$^{180\text{m}}\text{Ta}$
$^{13}\text{C}(\alpha, n)$	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	unstable

s-process中では、 (γ, γ') 反応により ^{180}Ta 核異性体が消滅する

s-process中での ^{180}Ta 核異性体の光脱励起

光核反応率

$$\lambda(T) = \int_0^\infty \underbrace{cn_\gamma(E, T)}_{\text{光子数 プランク分布}} \underbrace{\sigma_\gamma(E)}_{\text{光核反応 断面積}} dE$$

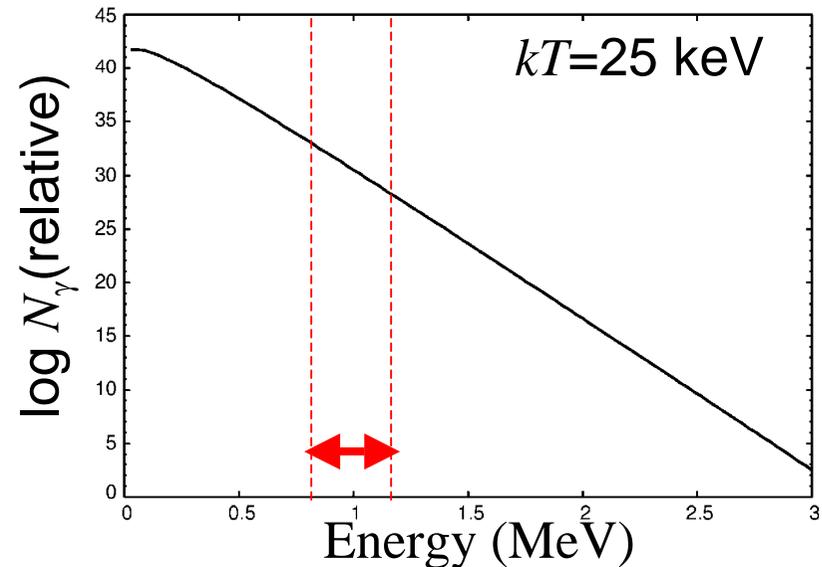
光子数 プランク分布

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

$$T = 1 \sim 3 \times 10^8 \text{K}$$

光核反応
断面積

光子エネルギースペクトル



s-process中では、1 MeV領域のガンマ線が重要

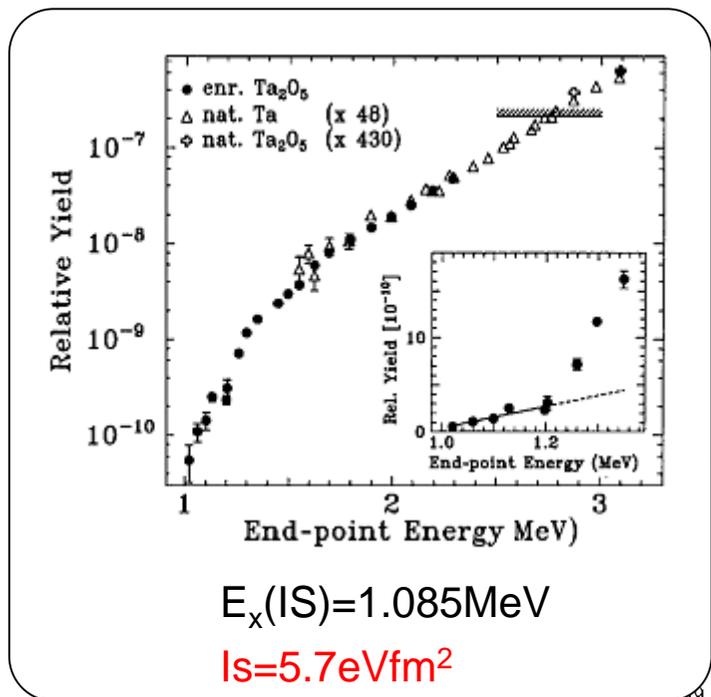
1 MeV以上

Stuttgart Dynamitron 電子加速器 制動放射光

1 MeV以下

適当な光源がなく、断面積測定データなし

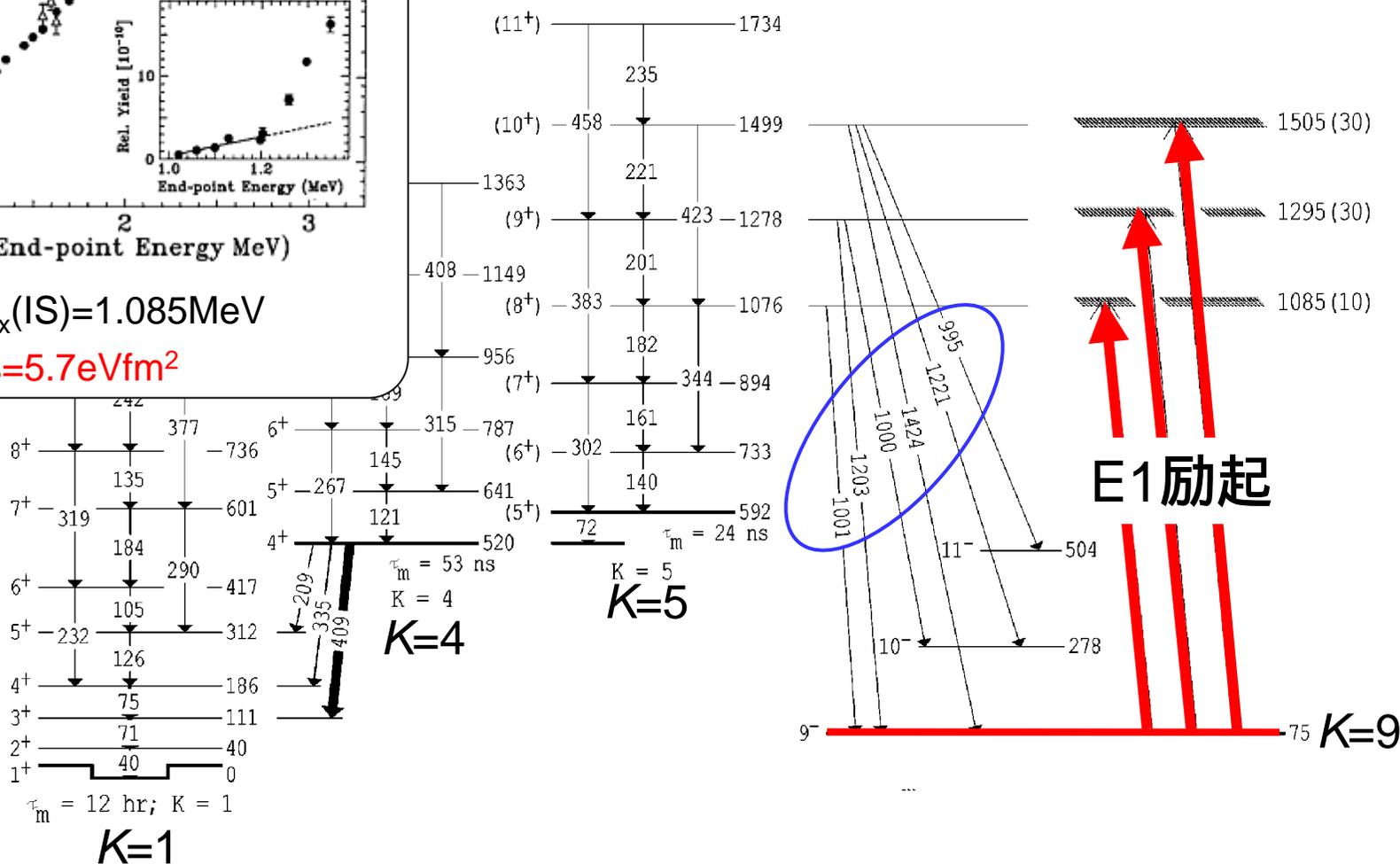
制動放射光による ^{180m}Ta 脱励起実験



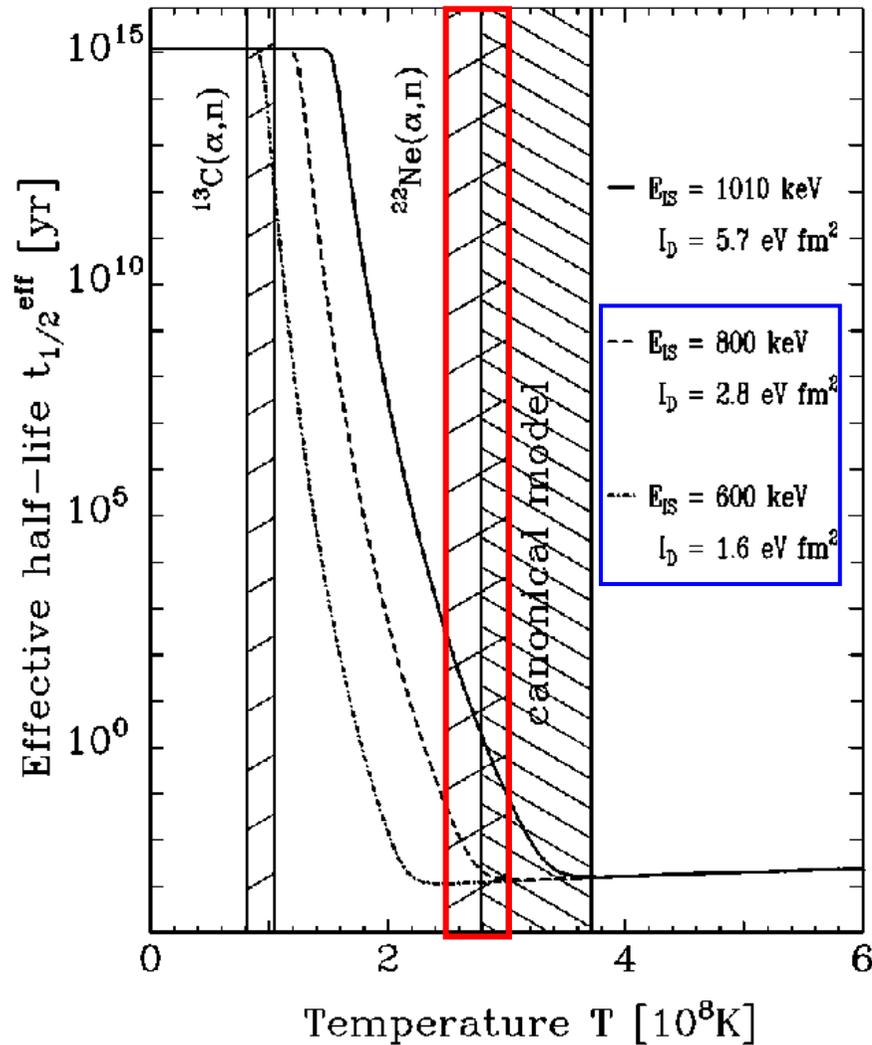
Belic *et al.*, PRL83(1999)5242

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

Ta_2O_5 150mg enriched to 5.45% 6.7mg of ^{180m}Ta



^{180}Ta 核異性体の実効的半減期



強い励起エネルギー依存性

1MeV以下の中間状態が存在

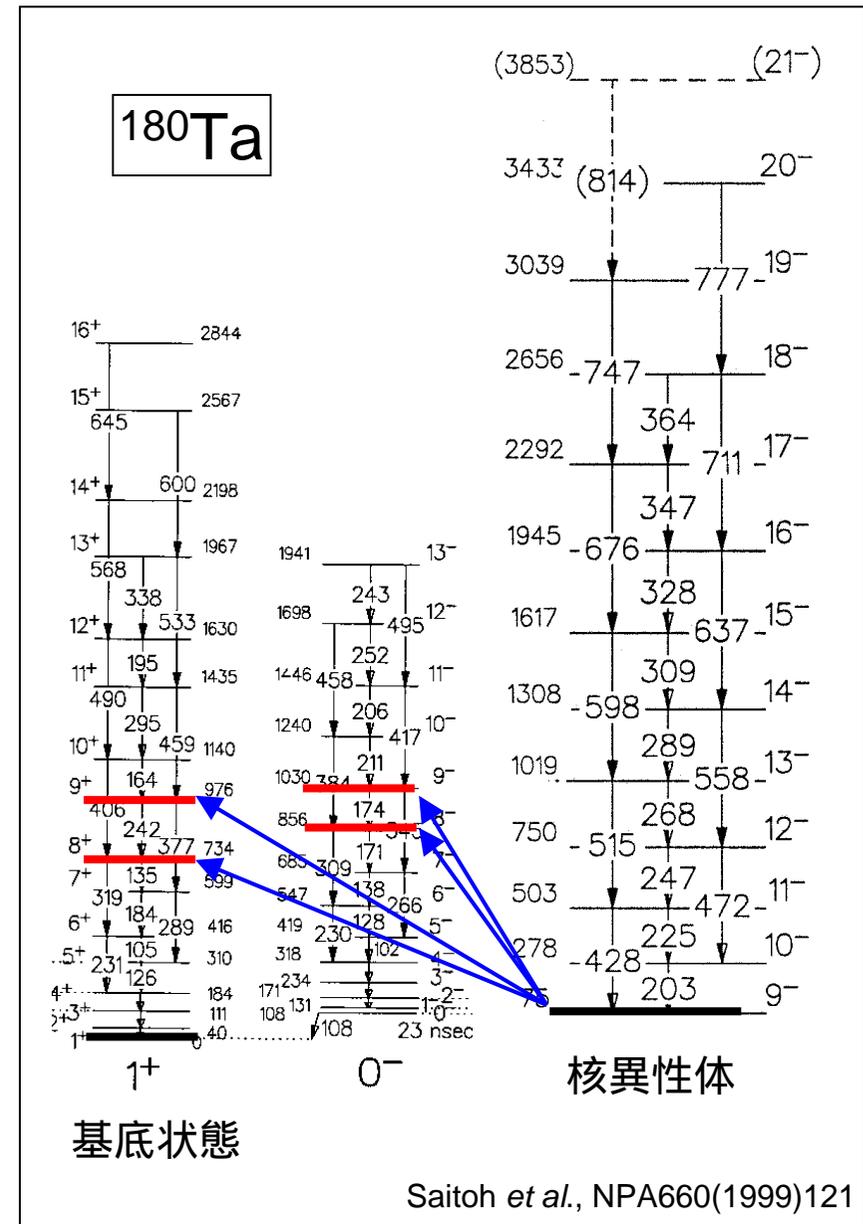
^{180}Ta 核異性体は、s-process
中で残らない可能性大

1MeV以下の中間状態

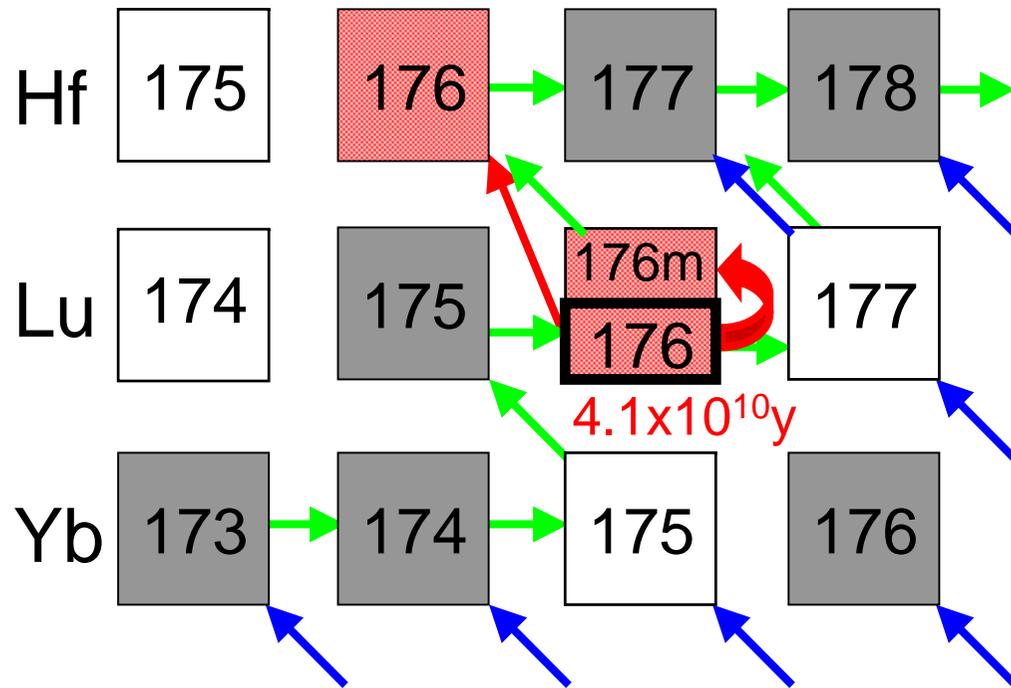
インビームガンマ線核分光法による 詳細な準位構造の解明

	I^π	E_x (keV)	E_g (keV)
$K^\pi = 1^+$	8^+	734	659
	9^+	976	901
$K^\pi = 0^-$	8^-	856	781
	9^-	1030	955

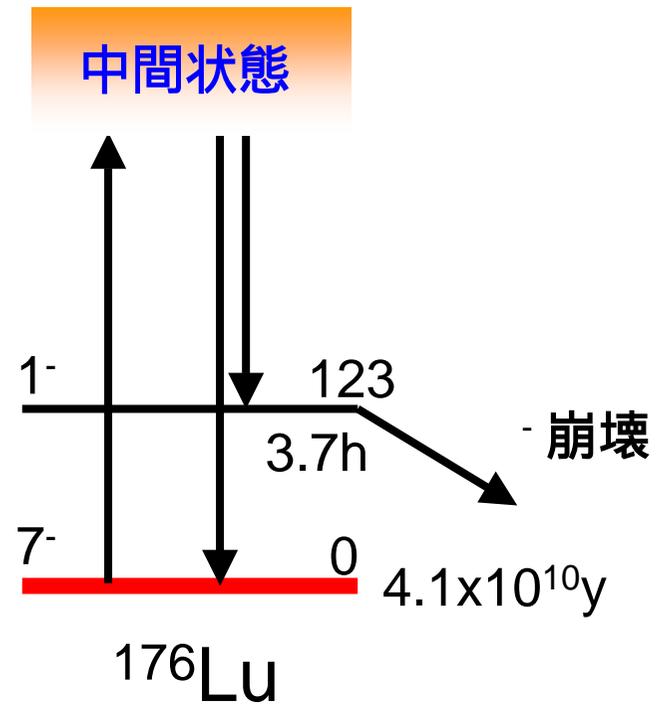
高エネルギー放射光による1MeV
以下の中間状態を經由する光脱励
起の断面積測定



s-process宇宙温度計¹⁷⁶Lu



- s-process
- post r-process
- cosmogenic decay



恒星内での高温状態では、中間状態を経由して核異性体が生成され、**実効的半減期が減少する。**

$$T_{1/2} = 4.08(3) \times 10^{10} \text{yr}$$

Grinyer et al., PRC67(2003)014302

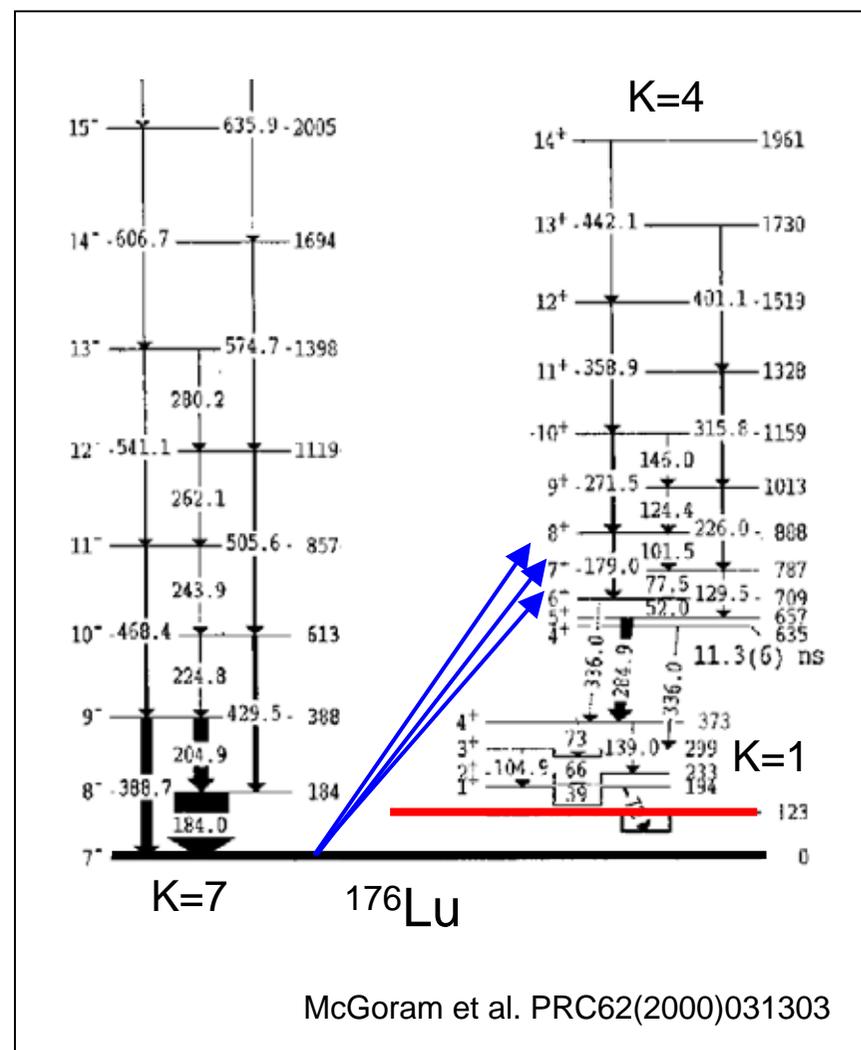
$$T_{1/2} = 3.677(75) \times 10^{10} \text{yr}$$

Nir-EI et al., PRC68(2003)067301

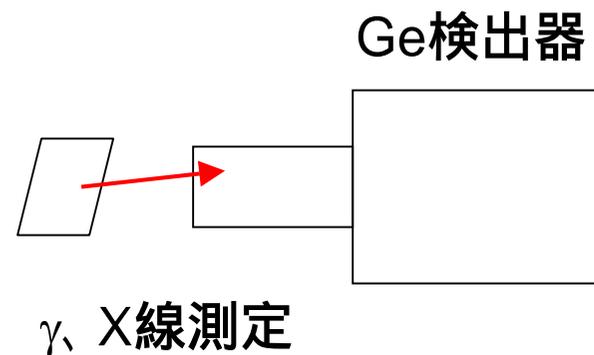
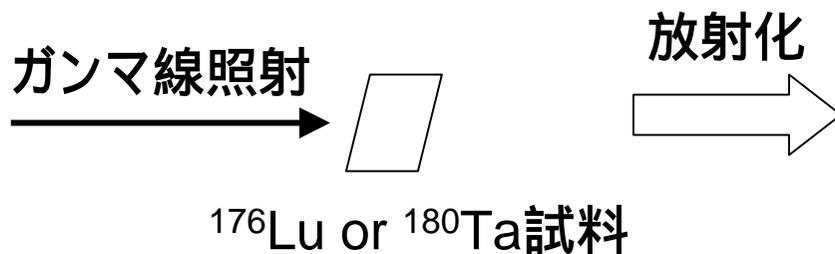
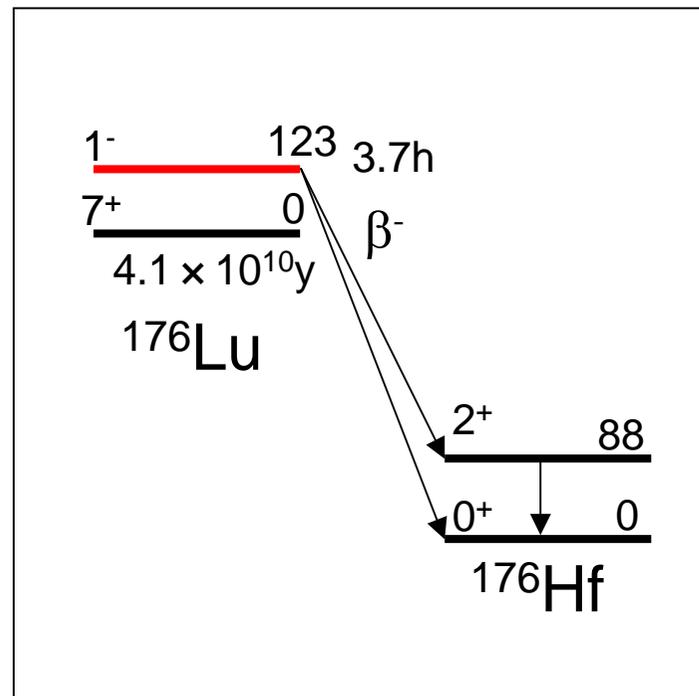
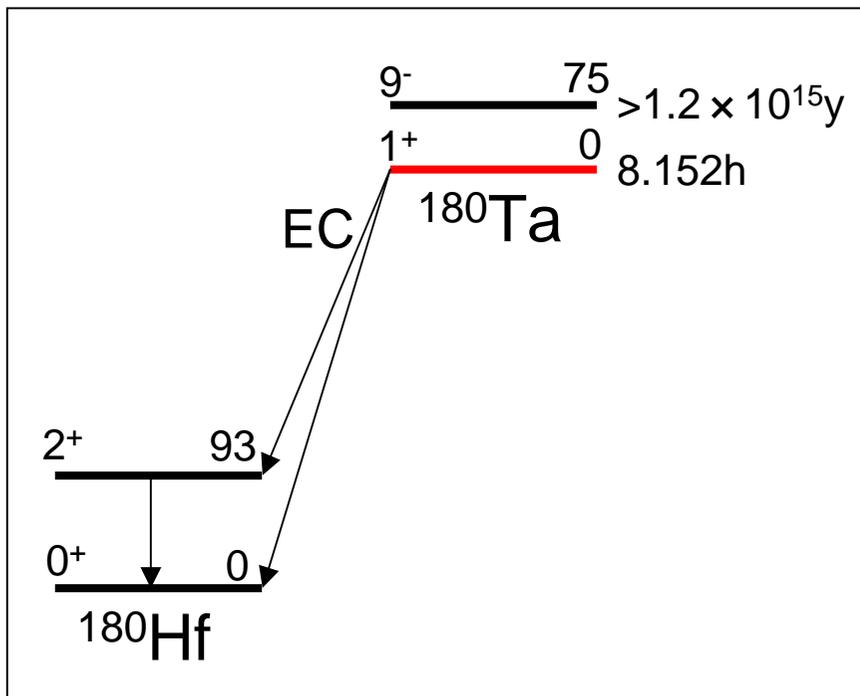
^{176}Lu 核異性体の準位構造

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

基底状態 ($K^\pi = 7^-$) から $K^\pi = 4^+$ バンドへの光励起断面積の測定実験



放射化による崩壊ガンマ線測定



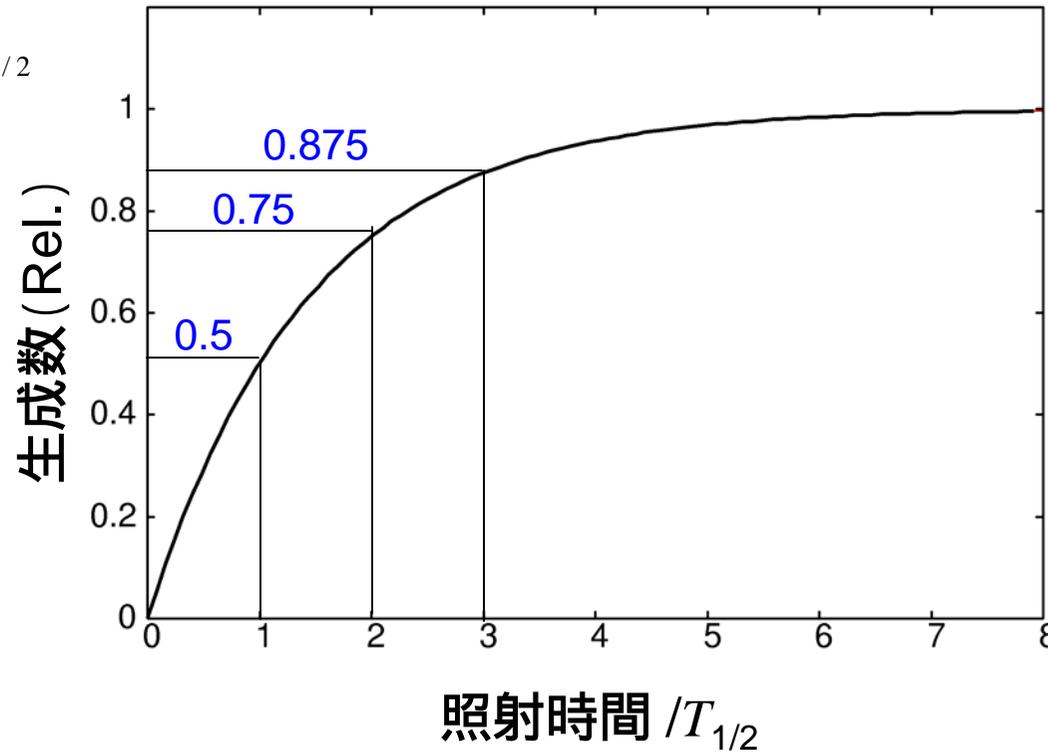
放射化による生成数

t時間照射後の生成数 $N = \frac{Y}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t})$

λ :崩壊定数 $\ln 2 / T_{1/2}$

Y :反応率 $= I \sigma N_t$

$N \propto 1 - (1/2)^{t/T_{1/2}}$

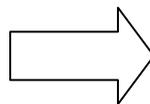


照射時間: 1 ~ 3半減期

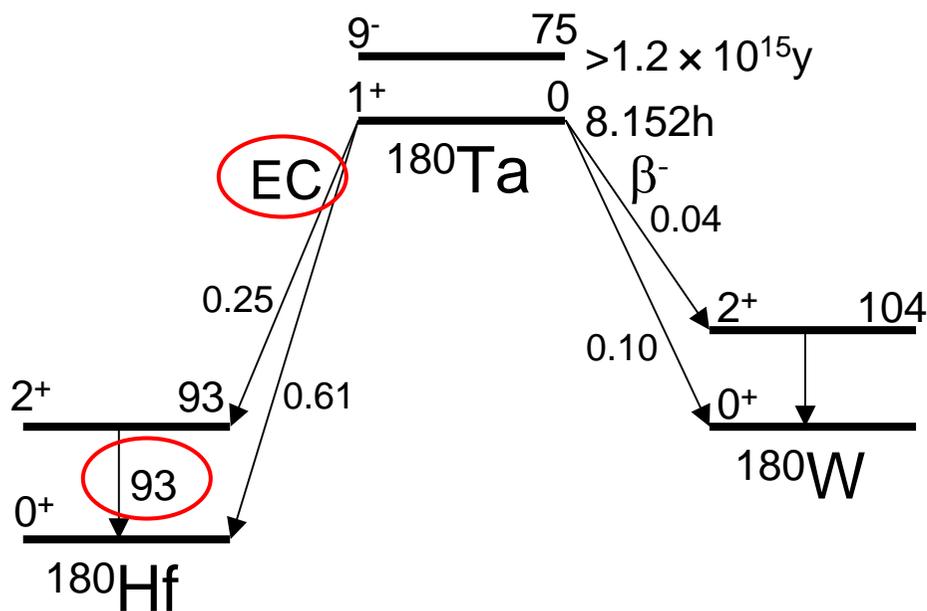
収量の見積もり (^{180}Ta)

$I_\gamma = 1 \times 10^{10} / \text{keV/s}$ (6T, 1mA)
 $I_s = 0.057 \text{ eV b}$
 $N_t = 1 \text{ g/cm}^2 \times 0.012\%$

反応率 $Y = 0.23 / \text{s}$



8時間照射後の生成数 $N = 5 \times 10^3$



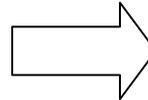
^{180}Ta の1崩壊当たり
 93keV γ 線 4.1%
 55.8keV K₁X線 40.3%
 54.6keV K₂X線 23.4%

55.8 keV X線の測定
 $\epsilon = 10\%$ 、8時間測定
 $N = 100$ カウント

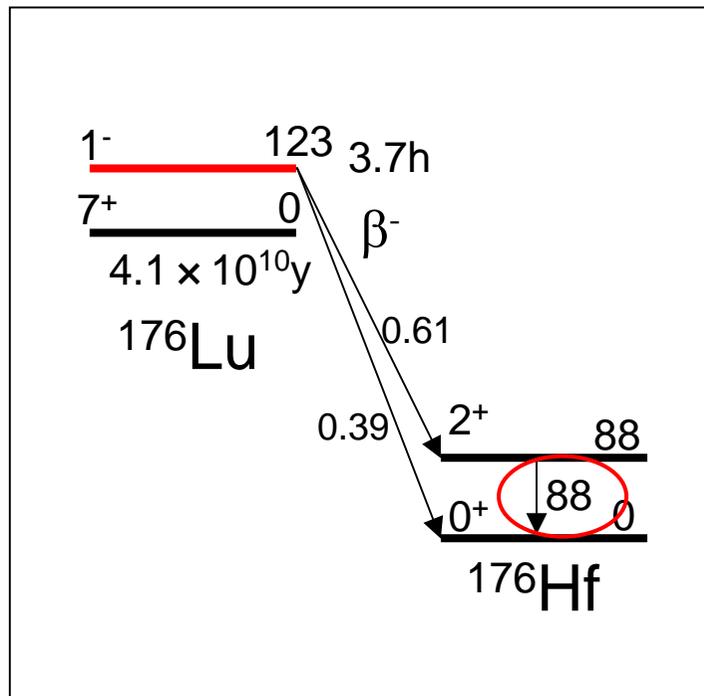
収量の見積もり (^{176}Lu)

$$I_{\gamma} = 1 \times 10^{10} \text{ /keV/s (6T, 1mA)}$$
$$I_s = 0.057 \text{ eV b}$$
$$N_t = 1 \text{ g/cm}^2 \times 2.59\%$$

反応率 $Y = 60 \text{ /s}$



4時間照射後の生成数 $N = 6 \times 10^5$



^{176}Lu 核異性体の1崩壊当たり

88keV γ 線 9.2%

55.8keV K_1 X線 5.2%

54.6keV K_2 X線 3.0%

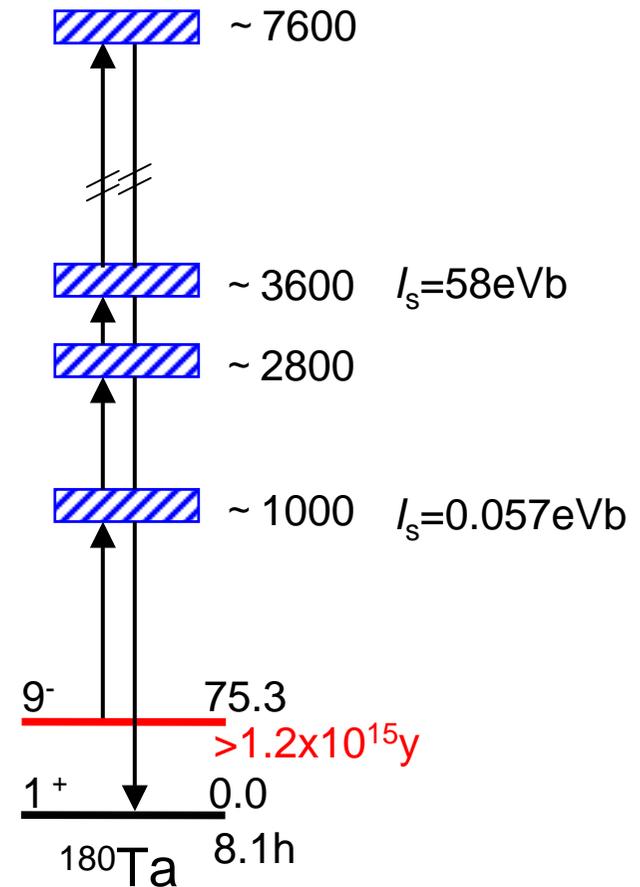
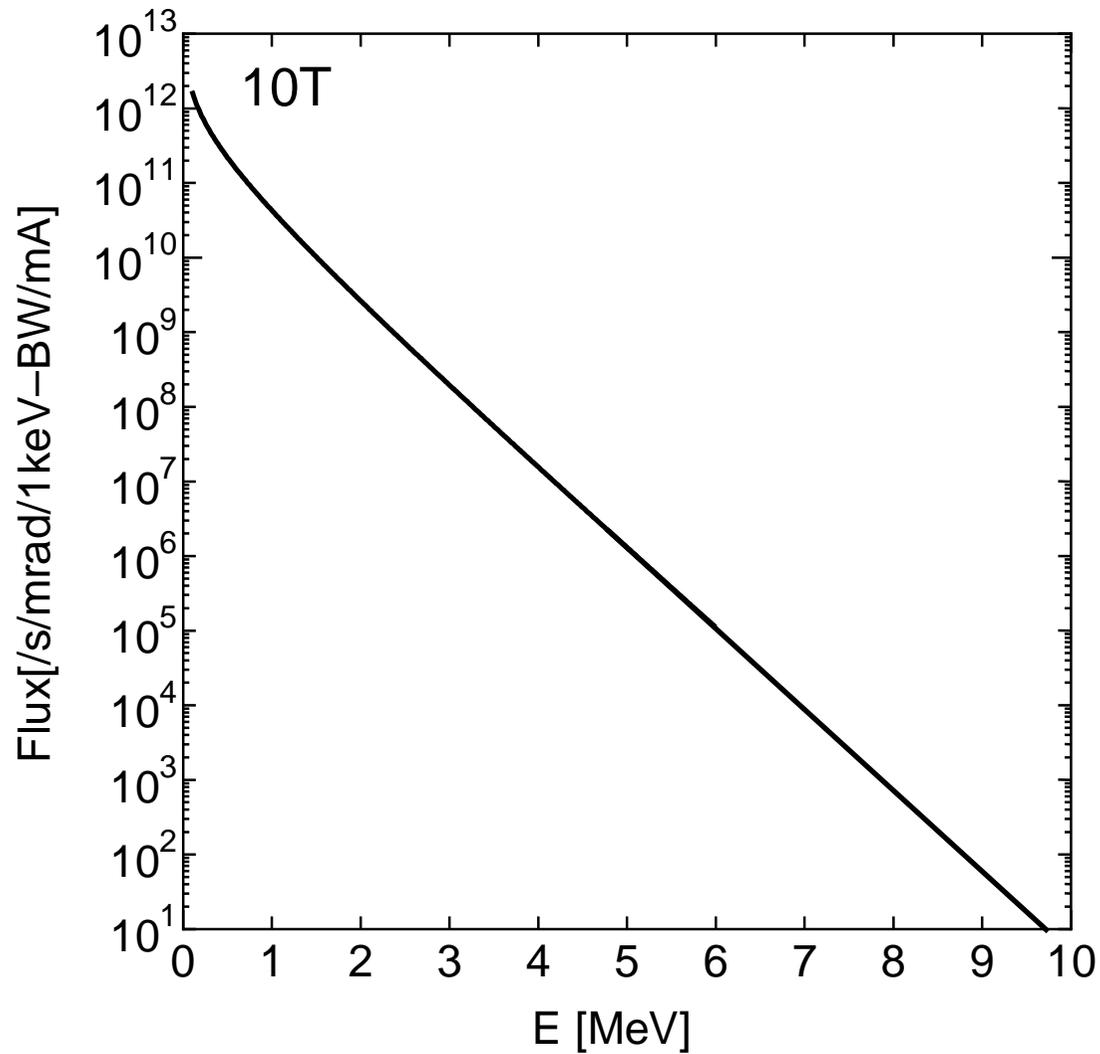
88 keV γ 線の測定

$\epsilon = 10\%$ 、4時間測定

$N = 3000$ カウント

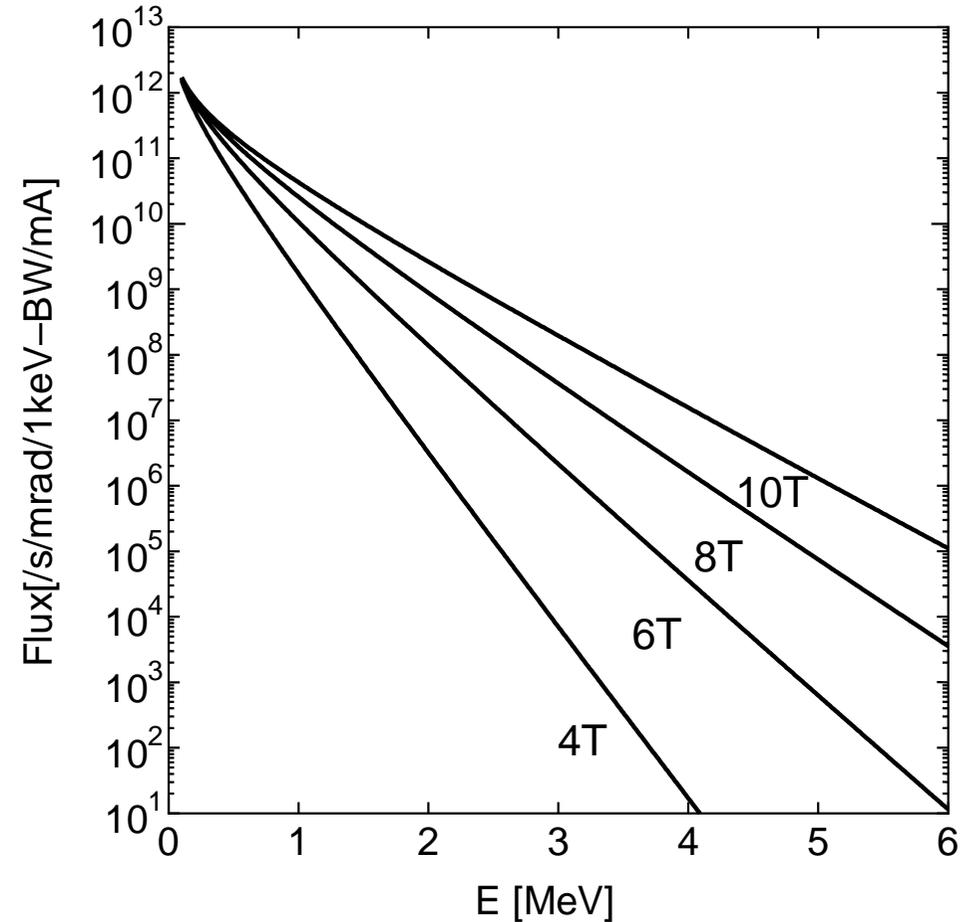
エネルギー準位の高い中間状態からの影響

数MeV以上



励起関数の測定

光子数	N_γ	N_γ	N_γ
	@1MeV /s/keV/mA	@3MeV /s/keV/mA	>8MeV /s/mA
10T	4×10^{10}	2×10^8	3×10^5
Y	1	5	60
8T	3×10^{10}	4×10^7	3×10^3
Y	0.8	0.25	0.6
6T	1×10^{10}	2×10^6	1
Y	0.25	0.04	10^{-4}
4T	2×10^9	7×10^3	1×10^{-7}
Y	0.04	10^{-4}	10^{-11}



差分法による反応断面積の測定

光子数、エネルギー分布の見積もり

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

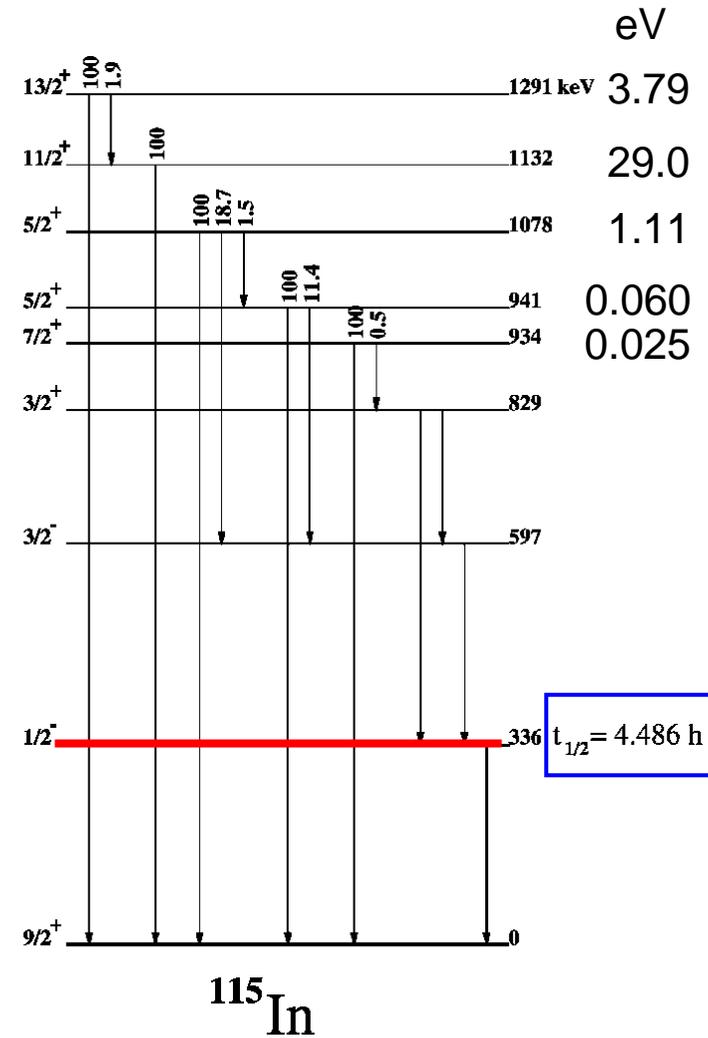
^{113}In (4.3%)、 ^{115}In (95.7%)

^{115}In 核異性体 $T_{1/2}=4.5$ 時間、 $E_X=336\text{keV}$

NRF法

Nuclear Resonance Fluorescence

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



^{180}Ta 核異性体の光脱励起と核構造的特徴

積分断面積 5.7×10^{-5} keV b Belic *et al.*, PRL83(1999)5242

$E_x = 1.076$ MeV $I^\pi = 8^+$ ($K=5$)

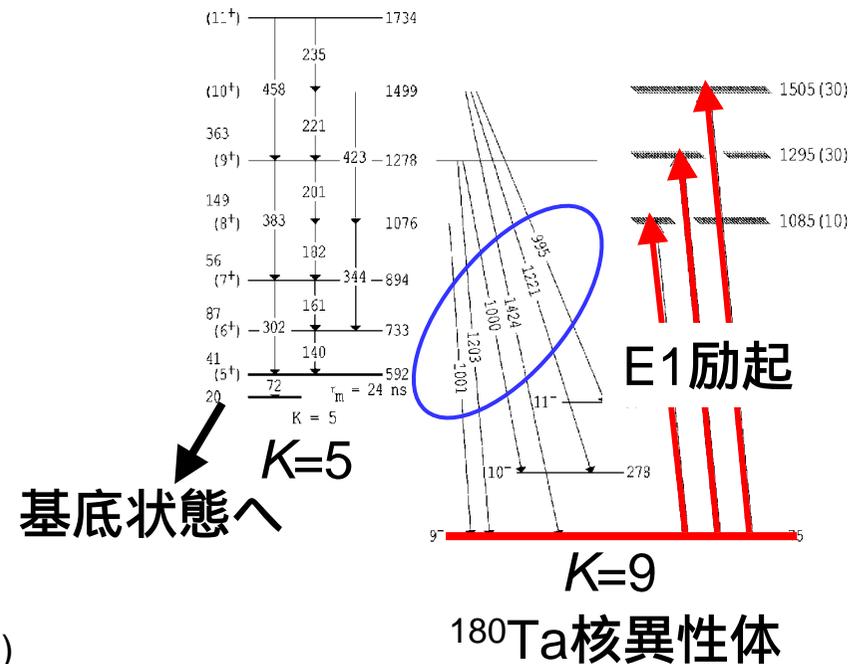
E1励起

Breit-Wigner 分散公式

$$I_s = \pi \left(\frac{\hbar c}{E_{\text{ph}}} \right)^2 \frac{\pi \Gamma_a \Gamma_b}{\Gamma_a + \Gamma_b}$$

Γ_a : バンド内への遷移強度幅
 3.85×10^{-5} eV (回転モデル)

Γ_b : バンド外への遷移強度幅
 2.98×10^{-5} eV Walker *et al.* AI
 PRC64(2001)061302(R)



NRF法によるback decay ガンマ線の観測

まとめ

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

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

励起断面積が小さい

⇒ **高エネルギー放射光を用いた光核反応実験**

放射化実験

$E_\gamma < 1\text{MeV}$ 以下のガンマ線による反応断面積測定

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

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

NRF法によるインビームガンマ線実験

^{180}Ta 核異性体の光励起におけるback decayガンマ線の計測