



# ガンマ線分光による核異性体研究

日本原子力研究開発機構

量子ビーム応用研究部門

静間俊行

# 核異性体(アイソマー)とは

通常 ( $10^{-15} \sim 10^{-12}$ 秒) よりも長い寿命を持つ核の励起状態

スピンギャップアイソマー、核分裂アイソマー、Kアイソマー

なぜ興味が持たれているのか？

## 1. 核構造の詳細な情報が得られる

励起エネルギー、寿命、g因子等の測定から一粒子ポテンシャル、変形度、対エネルギーなどの核構造情報を得ることが可能

実験上のメリット

比較的長い寿命をもつため、回路や物理的遮蔽により他の遷移との識別が可能 核反応メカニズムの解明(アイソマー生成比の測定)  
核破碎反応、光核反応...

## 2. 特異なアイソマーの存在

長寿命アイソマー:  $^{180\text{m}}\text{Ta}$ ,  $^{176\text{m}}\text{Lu}$ ,  $^{178\text{m}}\text{Hf}$ ...

超重元素探索:  $\tau(\text{アイソマー}) > \tau(\text{基底状態})$

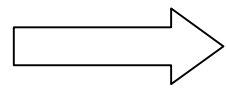
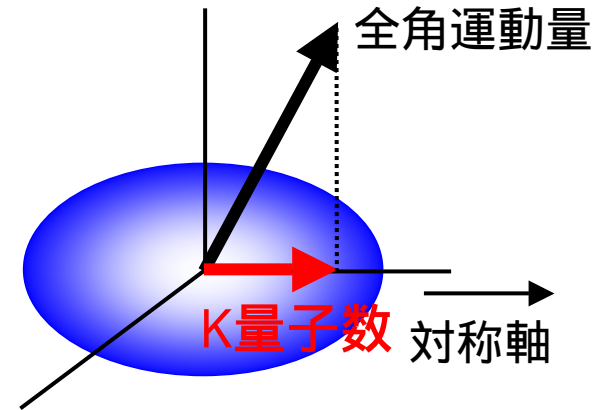
## 3. 応用研究

光核反応によるアイソマー放射化同位体分析

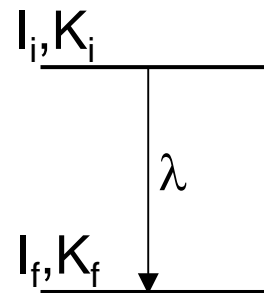
# Kアイソマー

## 軸対称変形核

全角運動量の対称軸成分 ( $K$ )  
が運動の恒量となる



ガンマ線遷移に対して、全角運動量に加えて**K量子数に関する選択則**が適用される。



スピン選択則

$$\lambda \quad \Delta I = I_i - I_f$$

**K選択則 (K selection rule)**

$$\lambda \quad \Delta K = K_i - K_f$$

# Kアイソマー崩壊の特徴

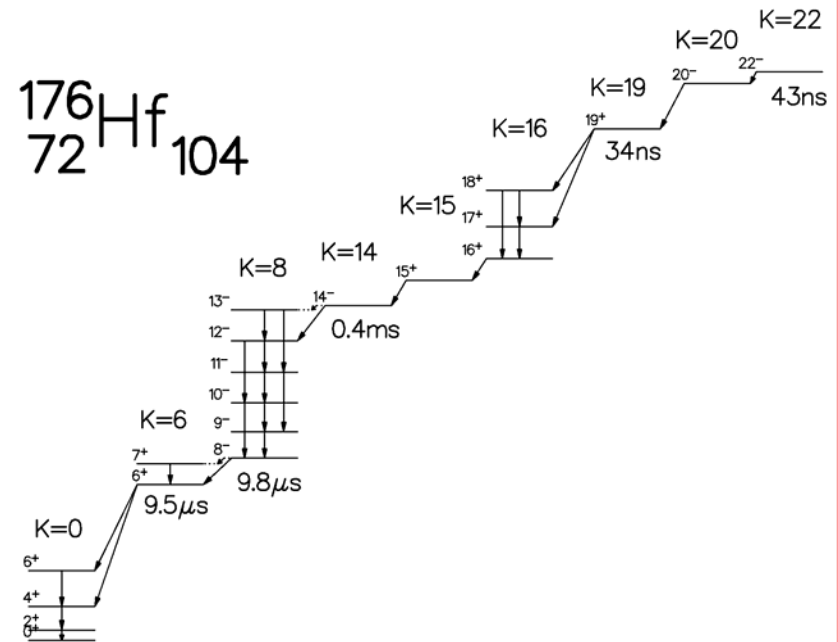
1. 異なるK量子数をもつ状態間の遷移はK量子数の差が最小になるように起きる。

2. K量子数の差が大きな遷移は強く禁止される。

長寿命核異性体の存在

$^{178\text{m}}\text{Hf}$   $K^\pi=16^+$  半減期31年

$^{180\text{m}}\text{Ta}$   $K^\pi=9^-$  半減期 $>1.2 \times 10^{15}$ 年



Hindrance factor

$$F = T_\gamma / T_W \quad T_\gamma: \text{partial } \gamma\text{-ray half-life}$$

$$T_W: \text{ワイスコップ値}$$

$$f_\nu = F^{1/\nu} \quad \nu = \Delta K - \lambda: K\text{禁止の度合い}$$

経験値  $f_\nu = 10 \sim 100$   $\Delta K$ が1増す毎に半減期が10 ~ 100倍増加する  
 $\Delta K$ が大きい場合、非常に長い半減期をもつ

# K アイソマーの異常崩壊

$^{174}\text{Hf}$ 、 $^{176}\text{W}$ 、 $^{182}\text{Os}$ 核において、経験則を大きく破る遷移の観測

$$f_{\nu} = 2.3 \sim 5.5 \quad \Delta K = 14, 25$$

経験値 ( $f_{\nu} = 10$ ) と比べ、 $10^4 \sim 10^{10}$  倍の遷移強度

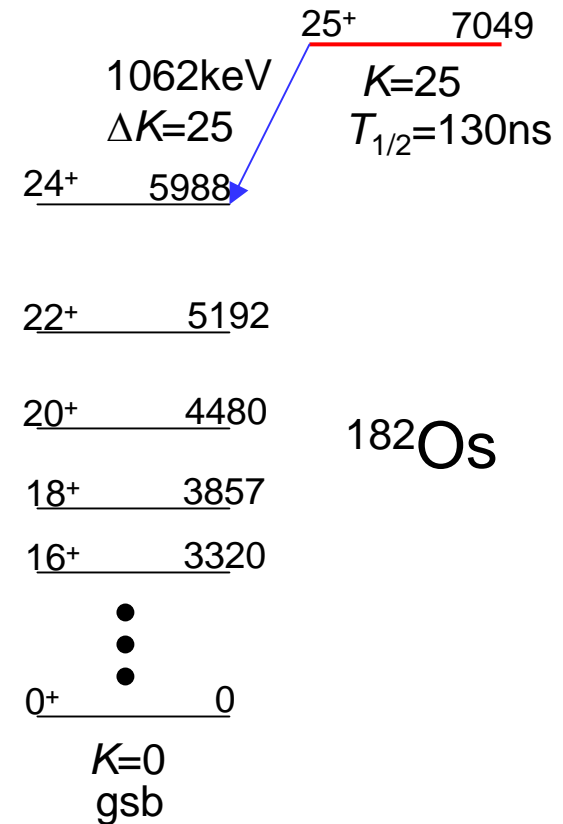
K混合を引き起こす相互作用

$$\text{コリオリ相互作用} \quad I \cdot K = I_z K_z - I_+ K_- - I_- K_+$$

$$\Delta K = \pm 1 \text{ 混合}$$

→ より大きな $\Delta K$ の混合

ガンマ変形への自由度



*P. Chowdhury et al.,  
NPA485(1988)136*

# $\Delta K=10$ 以上のE2遷移

	$T_{1/2}$	$E_\gamma$ (keV)	$\Delta K$	$F$	$F_V$
● $^{172}\text{Hf}$	<2ns	1797	12	$<2.1 \times 10^5$	<3.4
● $^{174}\text{Hf}$	3.7 $\mu\text{s}$	627	14	$4.7 \times 10^6$	3.6
		1291	14	$3.9 \times 10^8$	5.2
● $^{176}\text{W}$	35ns	1122	14	$>1.5 \times 10^5$	$>2.7$
		1541	14	$>1.7 \times 10^6$	$>3.3$
● $^{177}\text{W}$	<1ns	1764	11	$<2.7 \times 10^5$	<4.0
● $^{178}\text{W}$	<1ns	1571	12	$<1.4 \times 10^4$	<2.6
$^{179}\text{W}$	750ns	576	14	$7.9 \times 10^5$	3.1
$^{182}\text{W}$	1.4 $\mu\text{s}$	1086	10	$6.2 \times 10^5$	5.3
● $^{182}\text{Os}$	6ns	1530	16	$1.2 \times 10^5$	2.3
● $^{183}\text{Os}$	<3ns	1768	12	$<1.1 \times 10^5$	<3.2
	24ns	1079	17	$1.8 \times 10^4$	3.4
$^{184}\text{Os}$	20ns	1092	10	$1.8 \times 10^4$	3.4
● $^{186}\text{Os}$	24ns	1142	10	$<9.6 \times 10^3$	<3.1

*T. Shizuma et al.,  
NPA626(1997)760*

*T. Shizuma et al.,  
NPA696(2001)33*

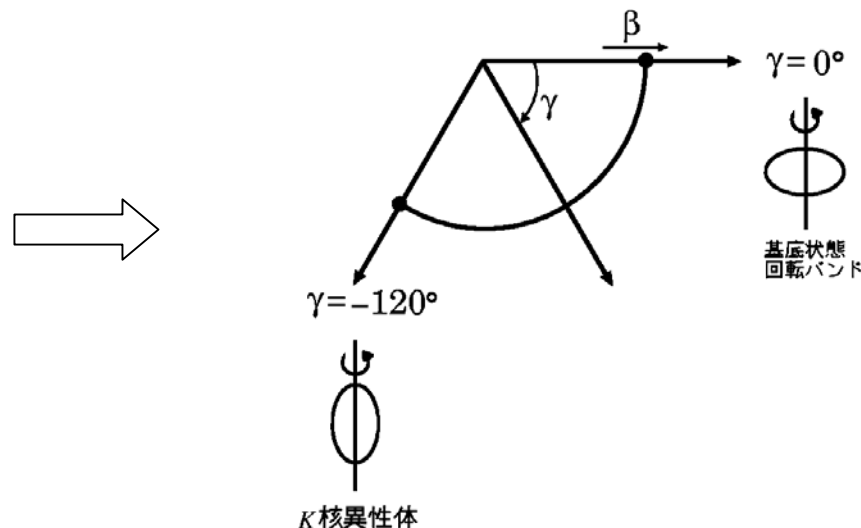
# ガンマトンネリング模型

K.Narimatsu, Y.R.Shimizu and T.Shizuma  
NPA601(1996)69

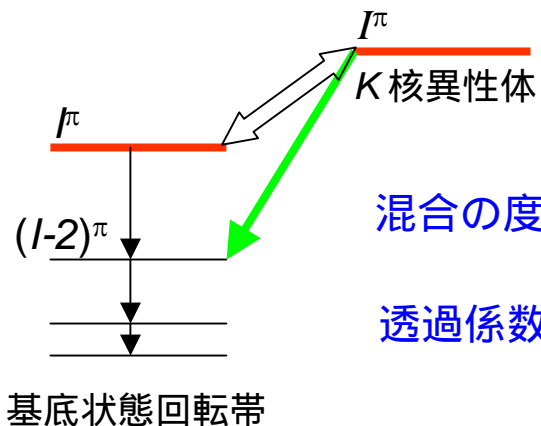
$\beta$ - $\gamma$ 変形座標

	$\beta$	$\gamma$
基底状態	$\sim 0.25$	$0^\circ$
アイソマー	$\sim 0.25$	$-120^\circ$

ガンマ変形方向の自由度で区別可能



## トンネリングによる遷移確率



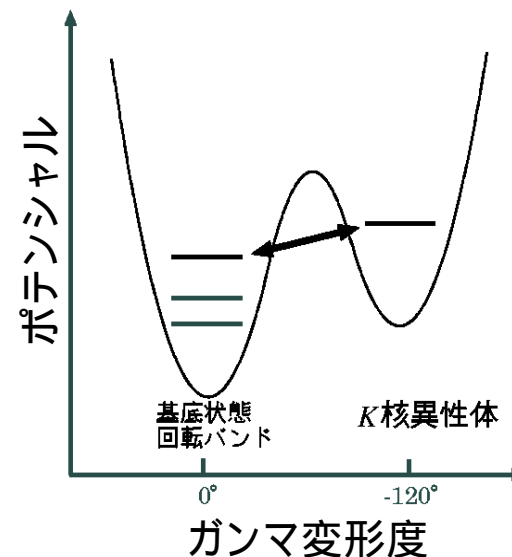
同スピン・パリティをもつ  
状態が混合

混合の度合い  $\alpha(I)^2 \approx \left( \frac{\hbar\omega_0}{2\pi\Delta E_I} \right)^2 T$

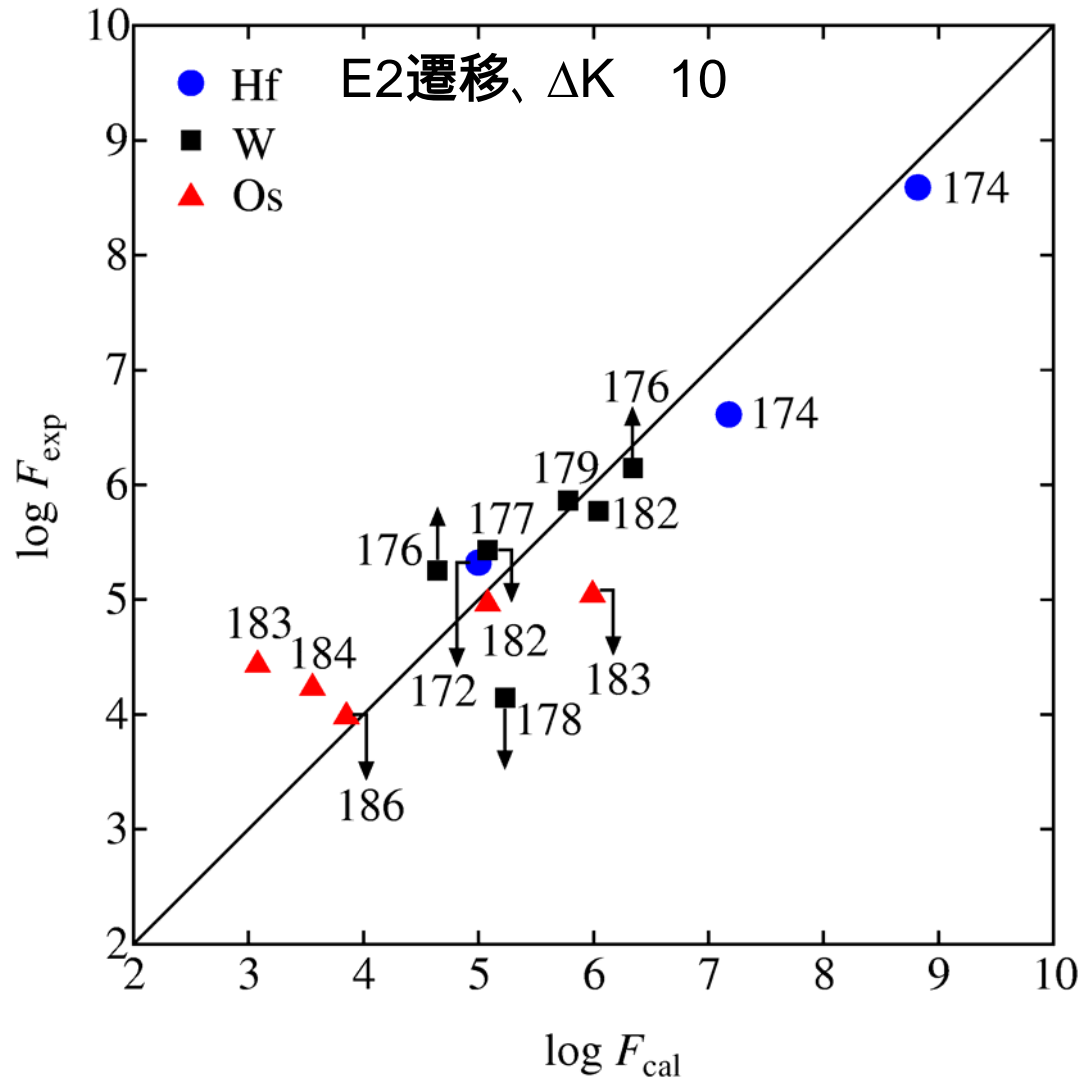
透過係数  $T \approx \exp\left(-\frac{2W}{\hbar}\right)$

$$= \exp\left(-\frac{2}{\hbar} \int_{path} \sqrt{2M_0(V - \hbar\omega_0/2)} ds\right)$$

遷移確率  $B(E2)^{cal} = \alpha(I)^2 \frac{5}{16\pi} Q_0 \langle IK20 | I-2K \rangle$



# 遷移確率 (F値) の比較 $F=T_{\gamma}/T_W$

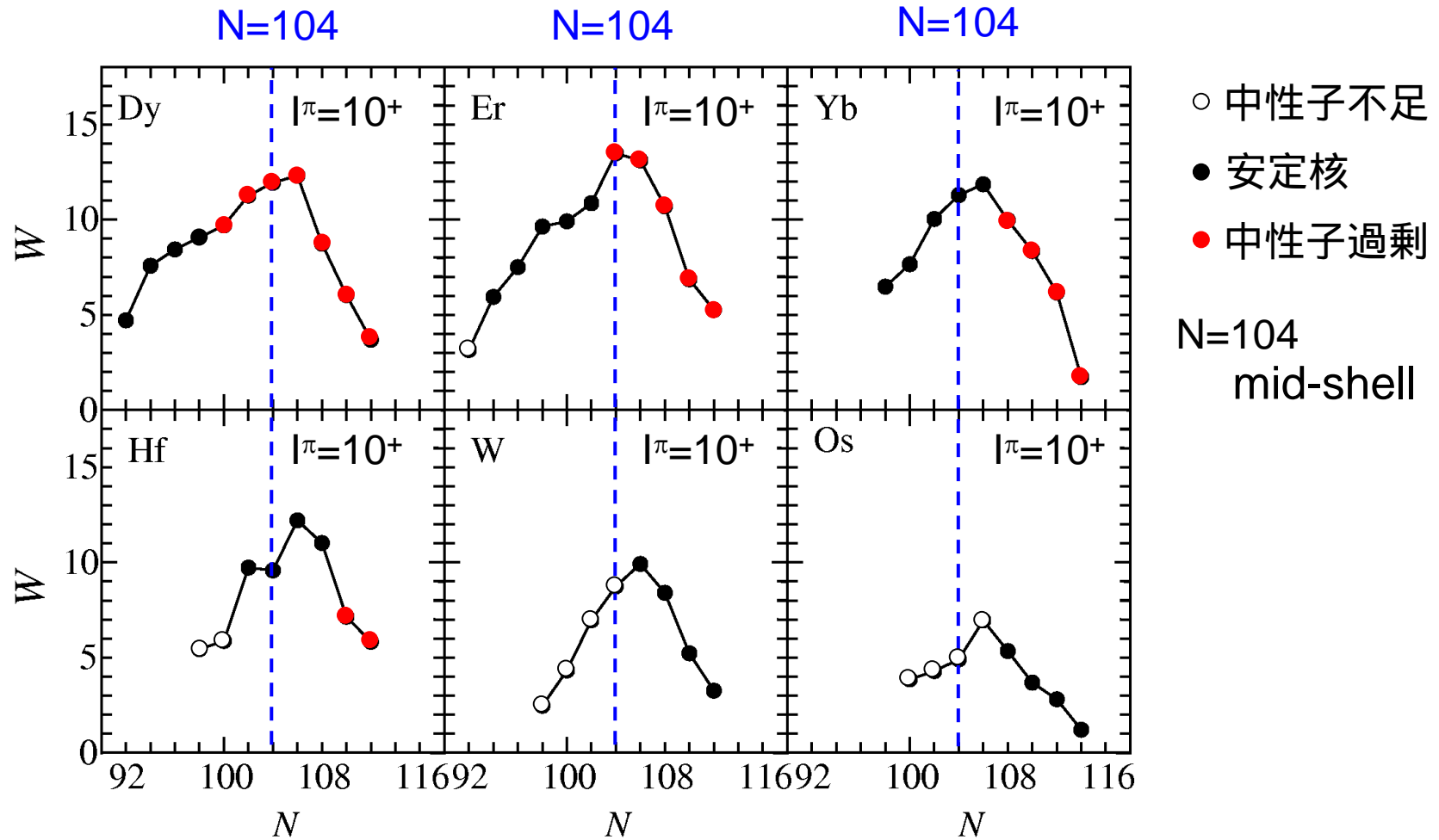


- $\Delta K$ が大きな遷移については、ガンマ変形に対する自由度が重要
- E2遷移の相対強度の説明  
Collective enhancement
- 他の変形共存状態に対しても有効  
超変形状態、オブレートアイソマー
- K混合に対する斜軸回転の影響  
 $\Delta K$  6  $F_{cal}$   $F_{exp}$
- 中性子過剰核では？



# Actionの中性子数依存性

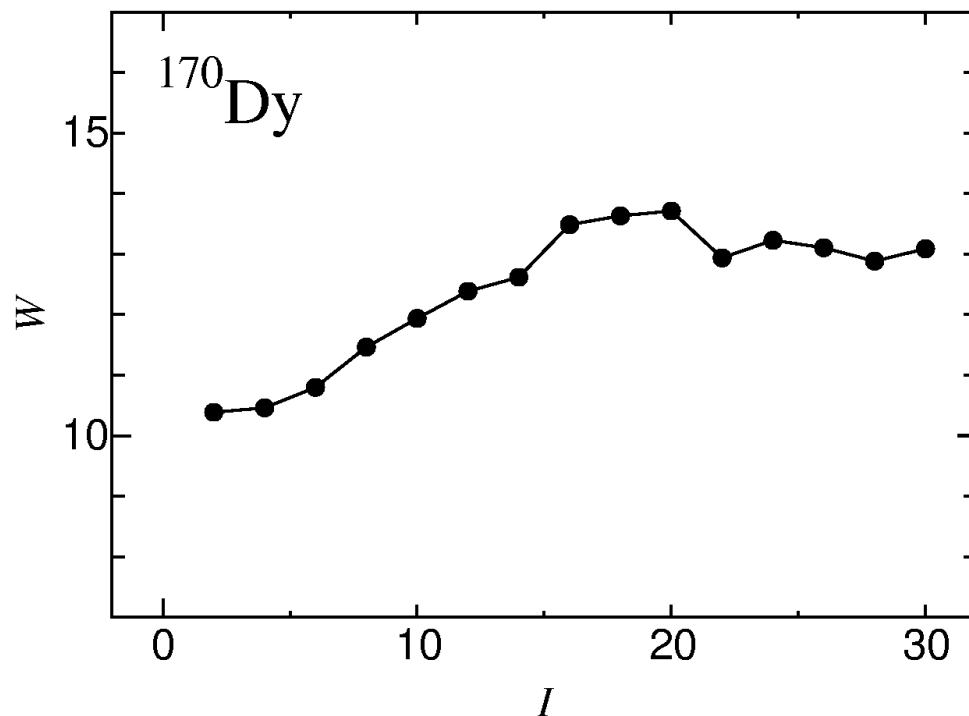
$$\log F_{\text{cal}} \propto -\log[B(E2)^{\text{cal}}] \propto 2W / \hbar \quad F = T_{\gamma} / T_W$$



# Double mid-shell 核 $^{170}_{66}\text{Dy}_{104}$

Z: 50 ~ 82, N: 82 ~ 126

Actionのスピ依存性

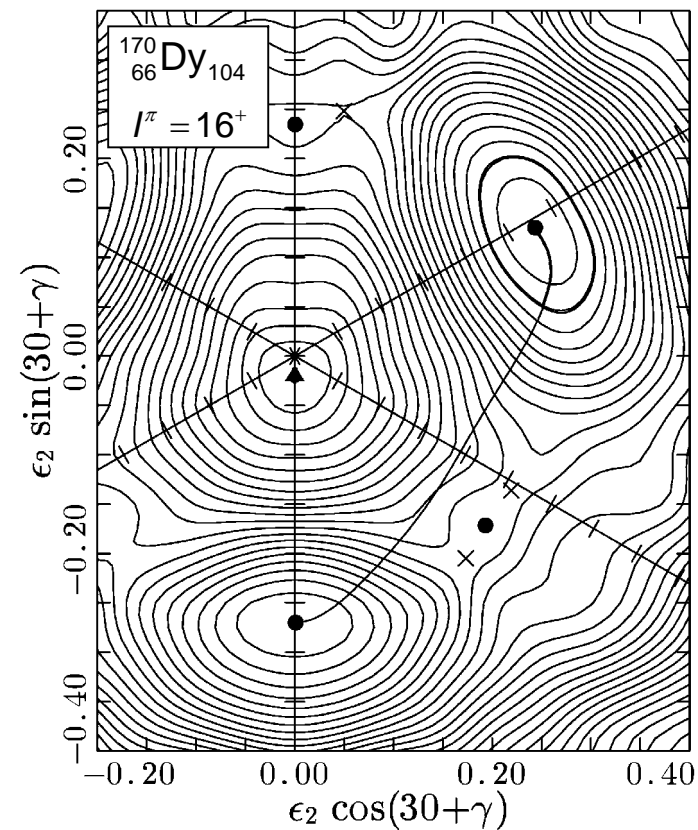


$^{170}_{66}\text{Dy}_{104}$   $K^\pi=15^+$   $\pi 7/2^+[404]7/2-[523]$   
 $\nu 7/2-[514]9/2^+[624]$

$^{178}_{72}\text{Hf}_{106}$   $K^\pi=16^+$   $\pi 7/2^+[404]9/2-[514]$   
 $\nu 7/2-[514]9/2^+[624]$

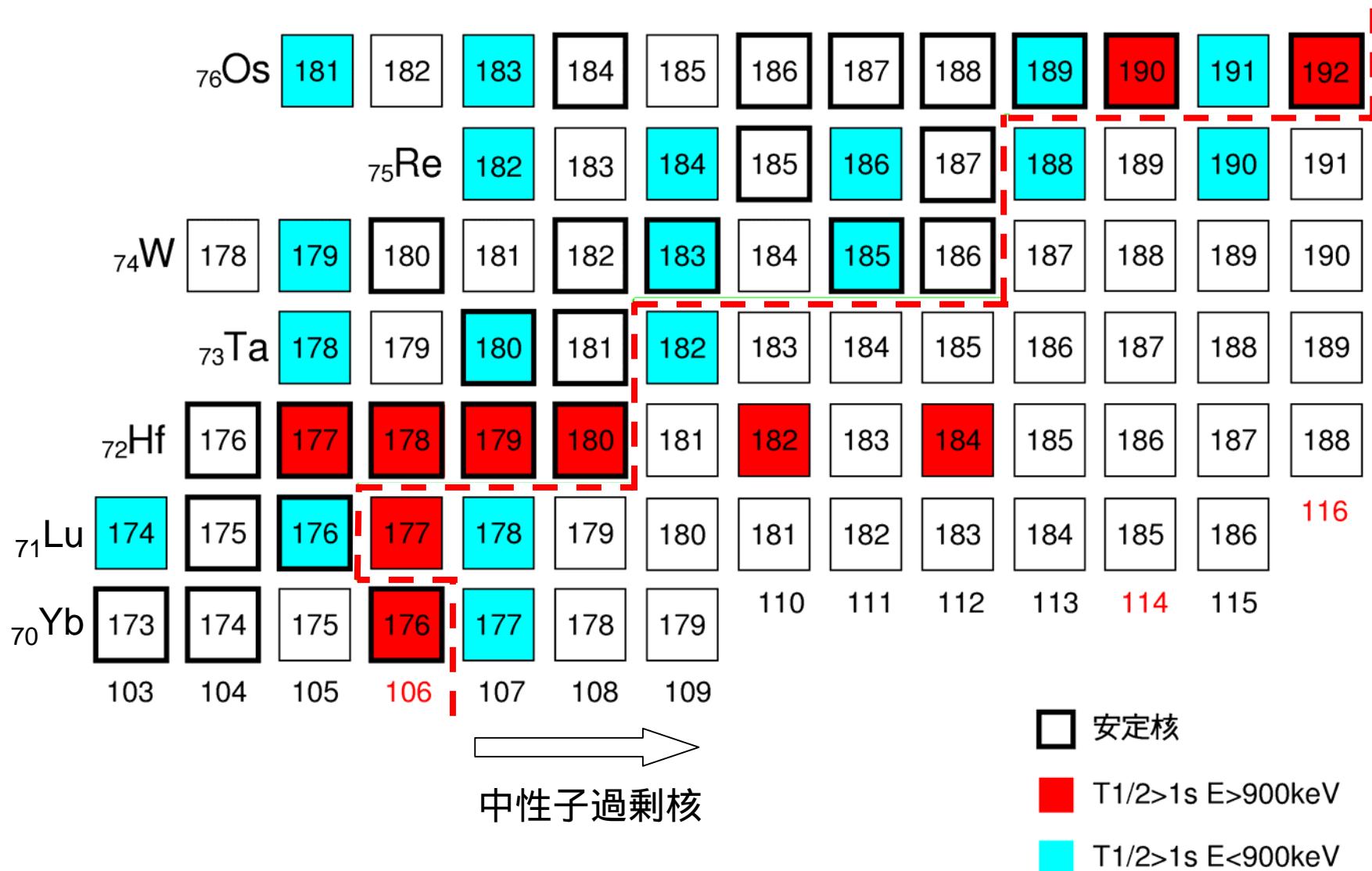
半減期31年

Potential Energy Surface



# 長寿命核異性体

半減期1秒以上のアイソマー



# 中性子過剰領域の核分光実験

## 核融合反応

高スピン・高励起状態の生成に適しているが、複合核形成の後、主に中性子放出により脱励起するため、中性子不足側の核が生成されやすい。

⇒ **多核子移行反応による中性子過剰核の生成**

## 深部非弾性散乱反応

N/Z平衡、大きな角運動量移行

生成核種が多く、断面積が小さい

Recoil shadow法との組み合わせ

**核子移行反応** ( $^{18}\text{O}, ^{16}\text{O}$ )反応を用いた2中性子移行反応

発熱反応だが、断面積が小さい( $\sigma < \sim 1\text{mb}$ )

⇒ 反応チャンネルの同定が必要

# 深部非弾性散乱反応実験

## 核異性体探索---Recoil Shadow法による遅延ガンマ線計測

原研タンデム+ブースター加速器

ビーム:  $^{82}\text{Se}$  630MeV

ターゲット: 高濃縮 $^{186}\text{W}$  (98.2%)

厚さ  $450\mu\text{g}/\text{cm}^2 \times 2$

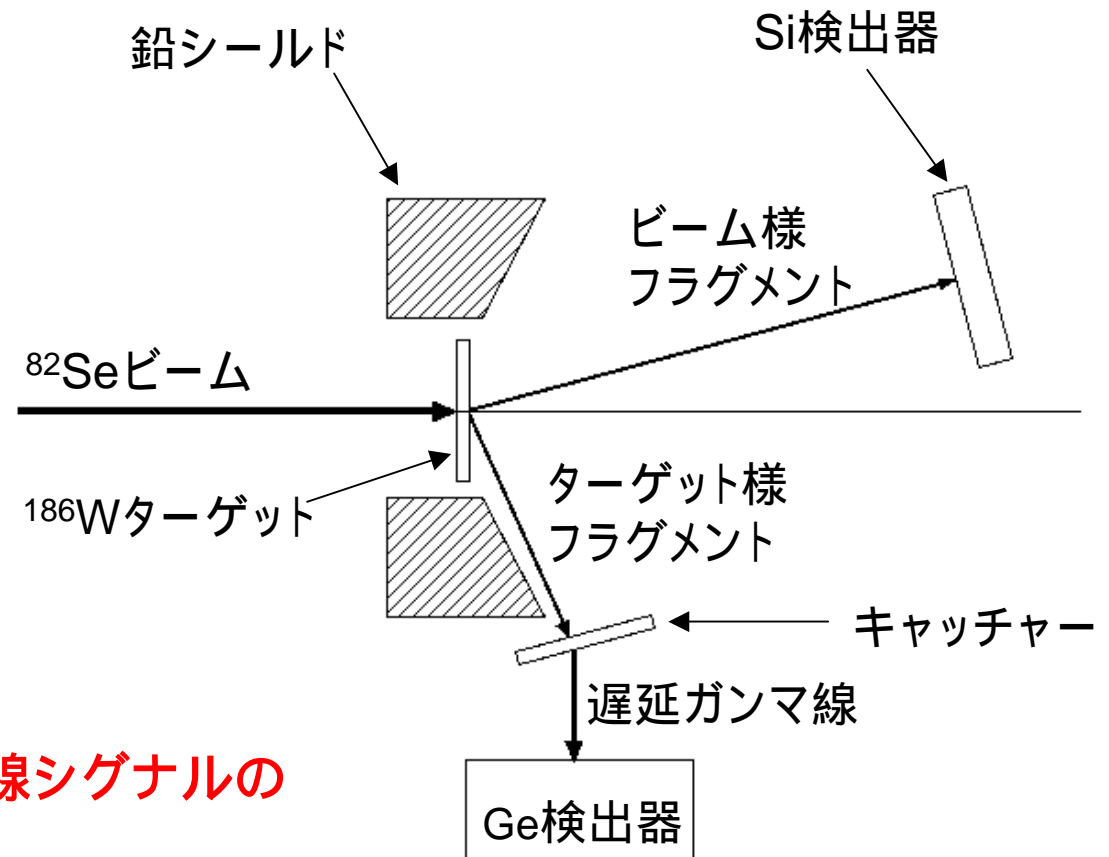
ガンマ線計測: Ge検出器4台

散乱ビーム計測: Si検出器

シリコン検出器シグナルとガンマ線シグナルの  
同時計測

Si- $\gamma$ -t;  $1.6 \times 10^8$  events

Si- $\gamma$ - $\gamma$ -t;  $3.9 \times 10^7$  events



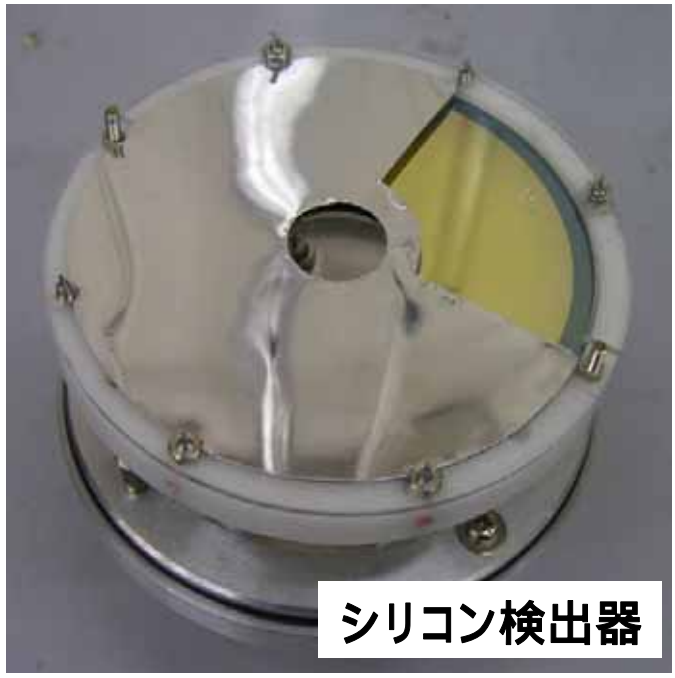
ゲルマニウム検出器



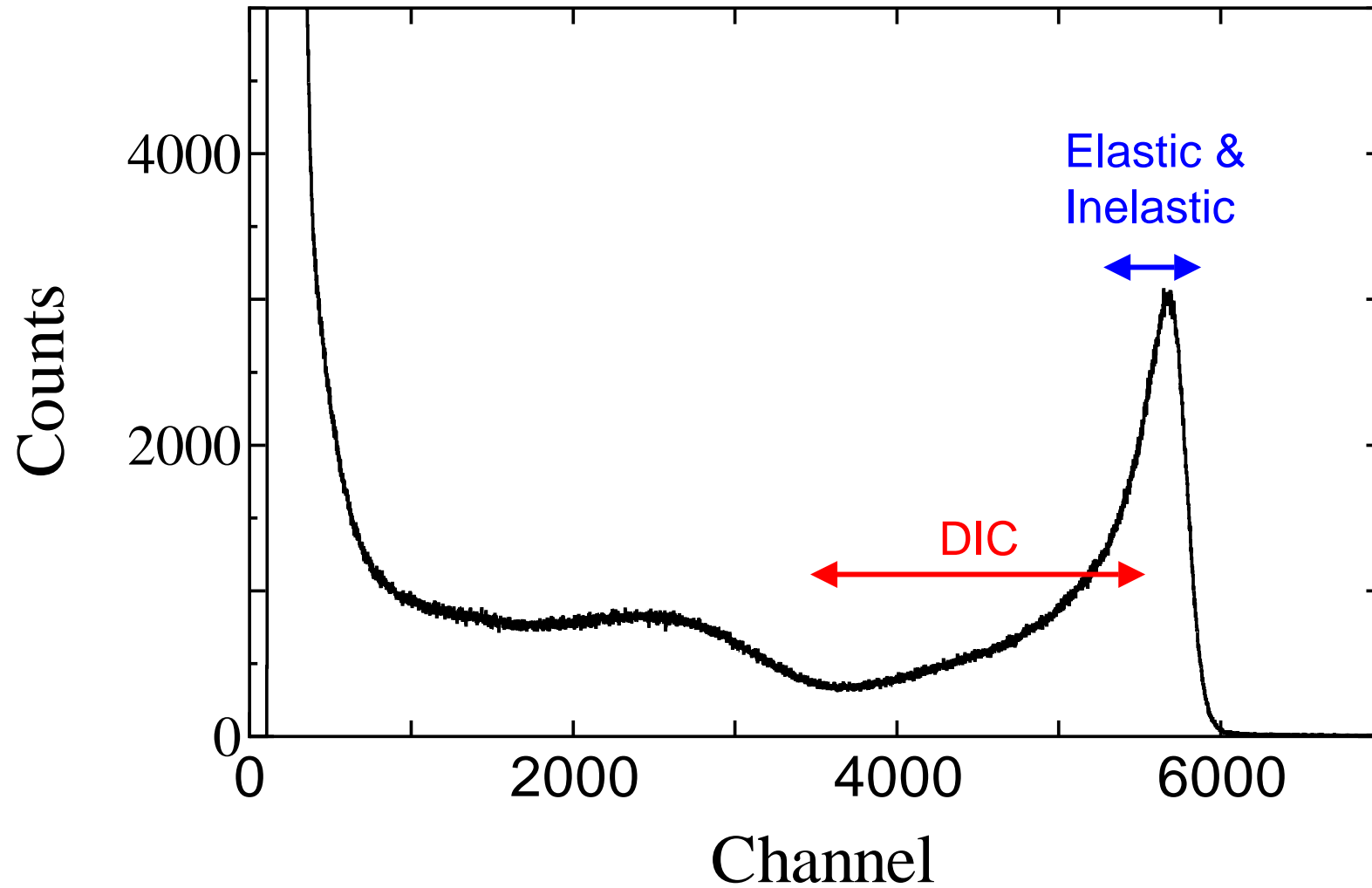
ターゲットチェンバー



シリコン検出器

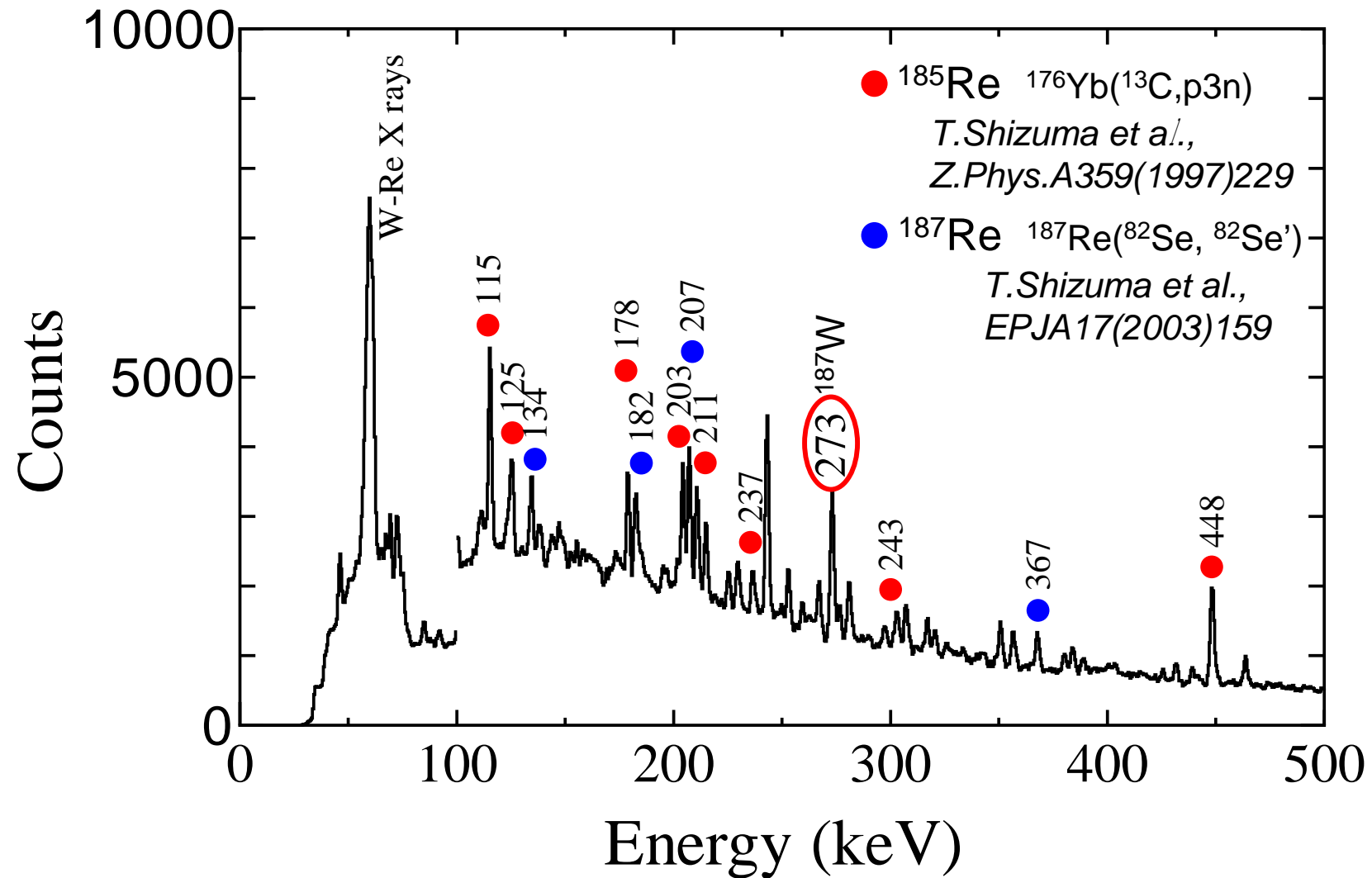


# 散乱粒子スペクトル



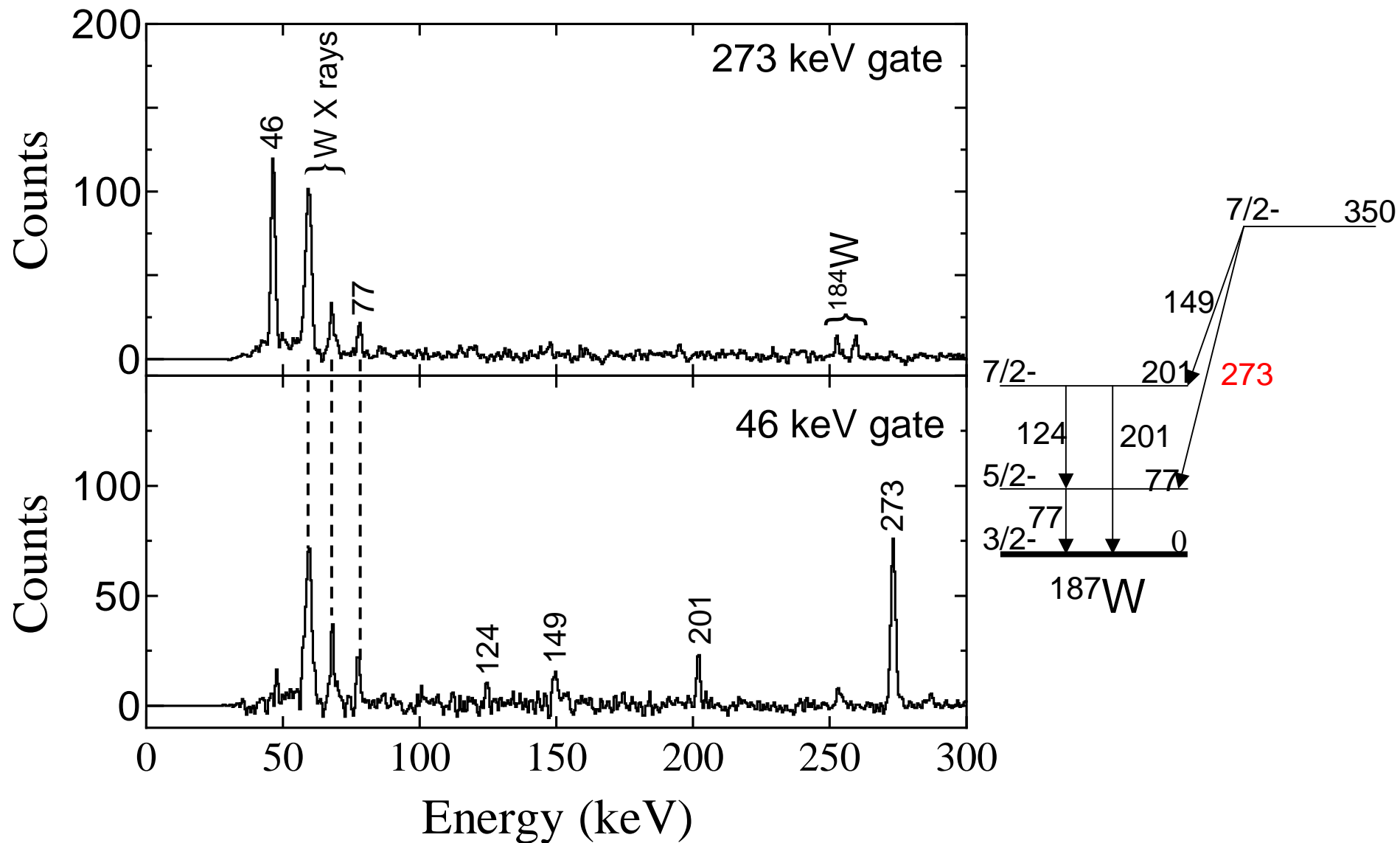
# 遅延ガンマ線スペクトル

シリコン+時間ゲート

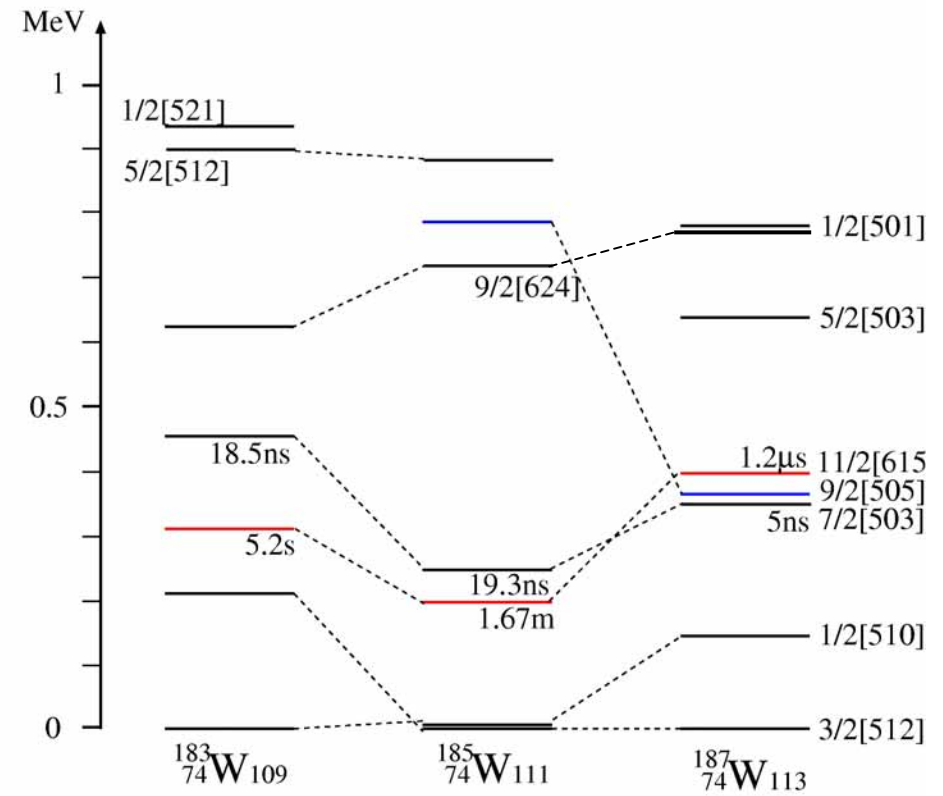
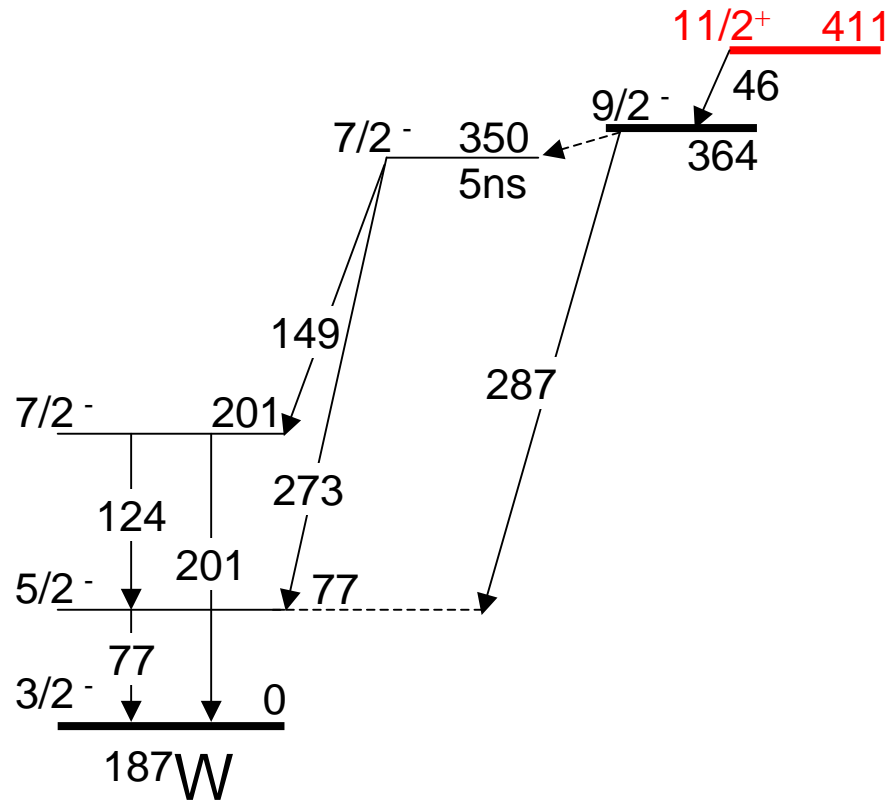




# コインシデンススペクトル

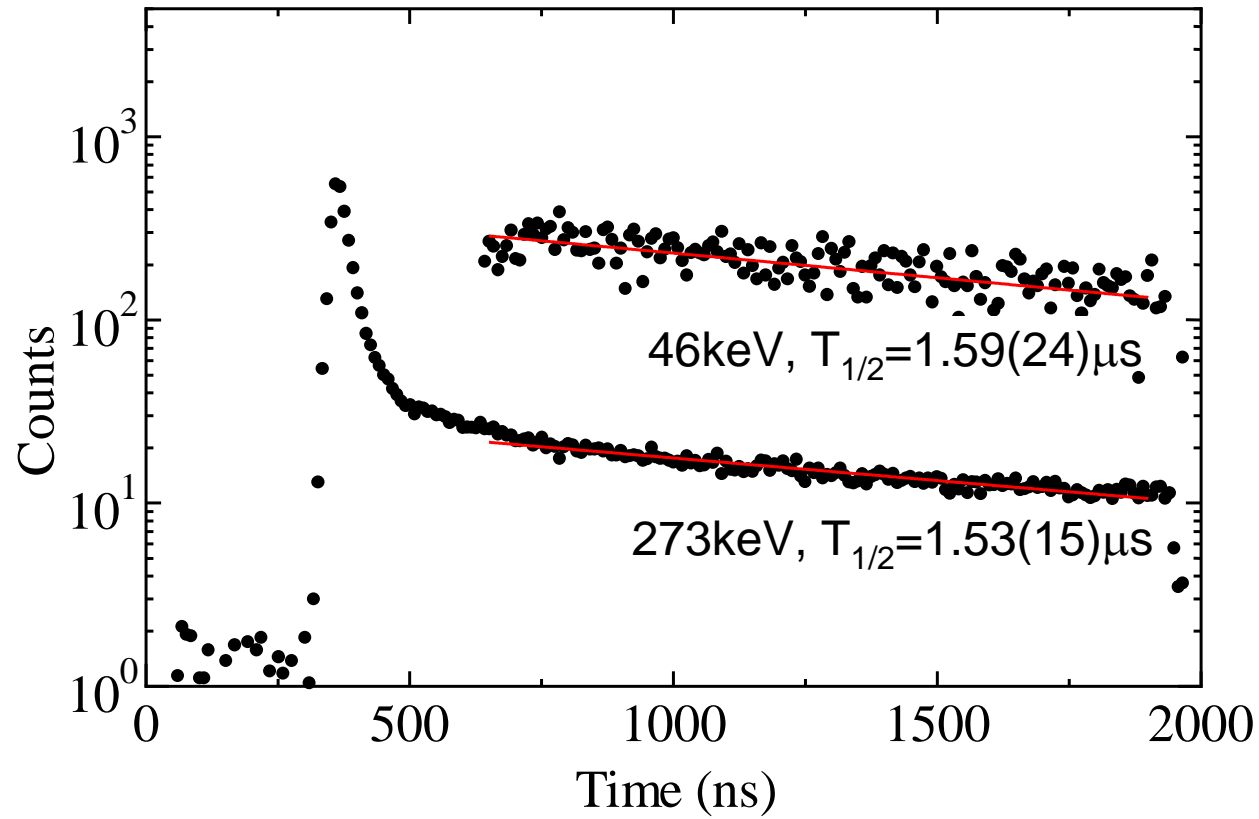


# $^{187}\text{W}$ の準位様式



*T. Shizuma et al.,  
PRC71(2005)067301.*

# 減衰曲線



11/2<sup>+</sup>アイソマー

半減期: 1.55(13)  $\mu\text{s}$

46 keV、E1遷移

$T_{\gamma} = 2.5\mu\text{s}$

Hindrance Factor

$$F = \frac{T_{1/2}^{\gamma}}{T_{1/2}^{sp}} = 1.1 \times 10^6$$

# 核子移行反応実験

原子力機構 タンデム + ブースター加速器

$^{18}\text{O}$  (180MeV) +  $^{186}\text{W}$ 、 $^{181}\text{Ta}$  発熱反応、断面積が小さい( $\sigma < \sim 1\text{mb}$ )

ビーム電流: 0.1 ~ 0.3 pA

ターゲット: Self-supporting  $^{186}\text{W}$  (0.4mg/cm<sup>2</sup> x 2)

nat. Ta foil (3.9mg/cm<sup>2</sup>)

シリコンE- $\Delta$ E検出器による散乱粒子測定

反応チャンネルの識別

ゲルマニウム検出器: 7 ~ 8台

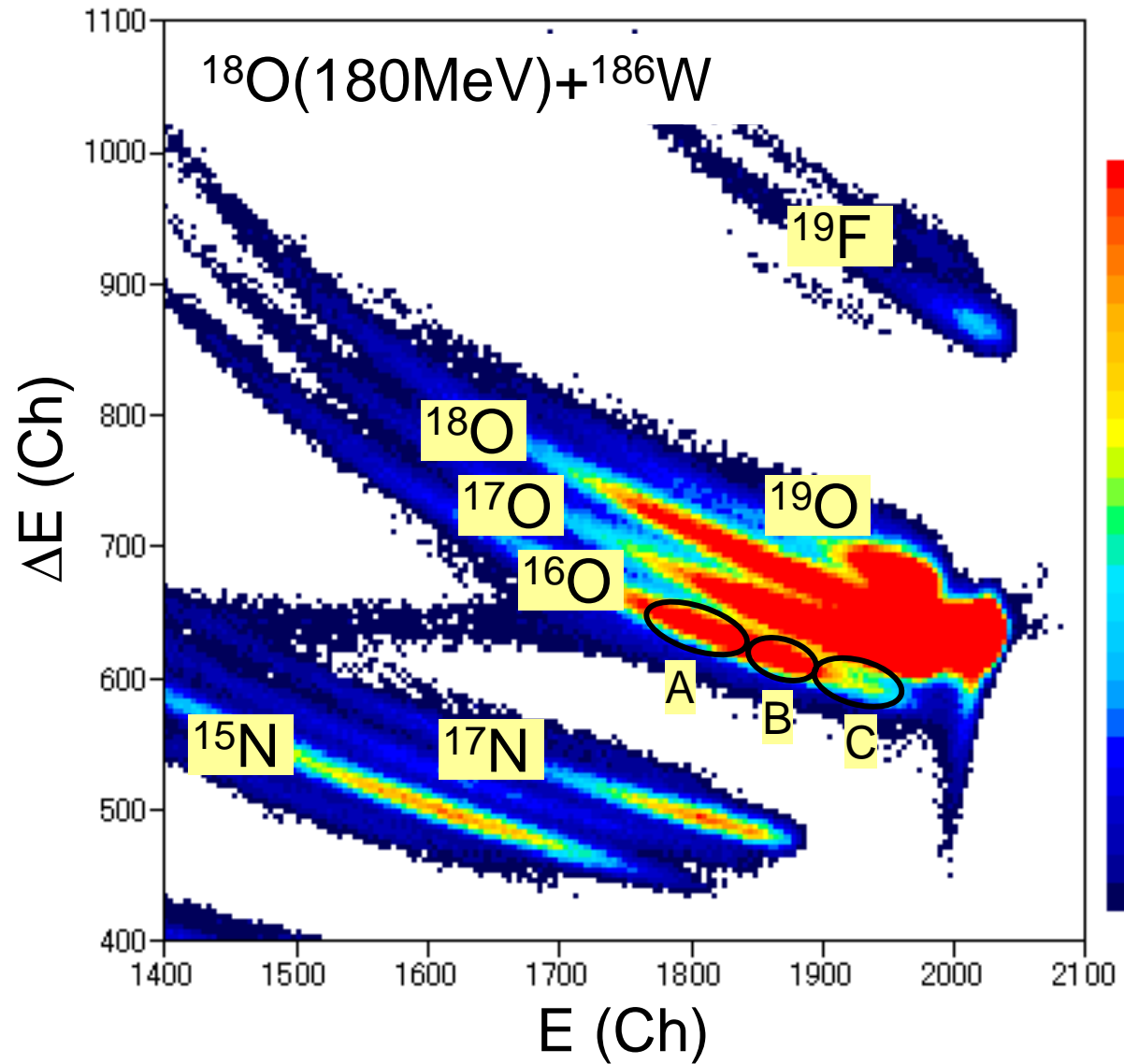
Si- $\gamma$ ;  $1.6 \times 10^8$  events

Si- $\gamma$ - $\gamma$ ;  $6.8 \times 10^7$  events

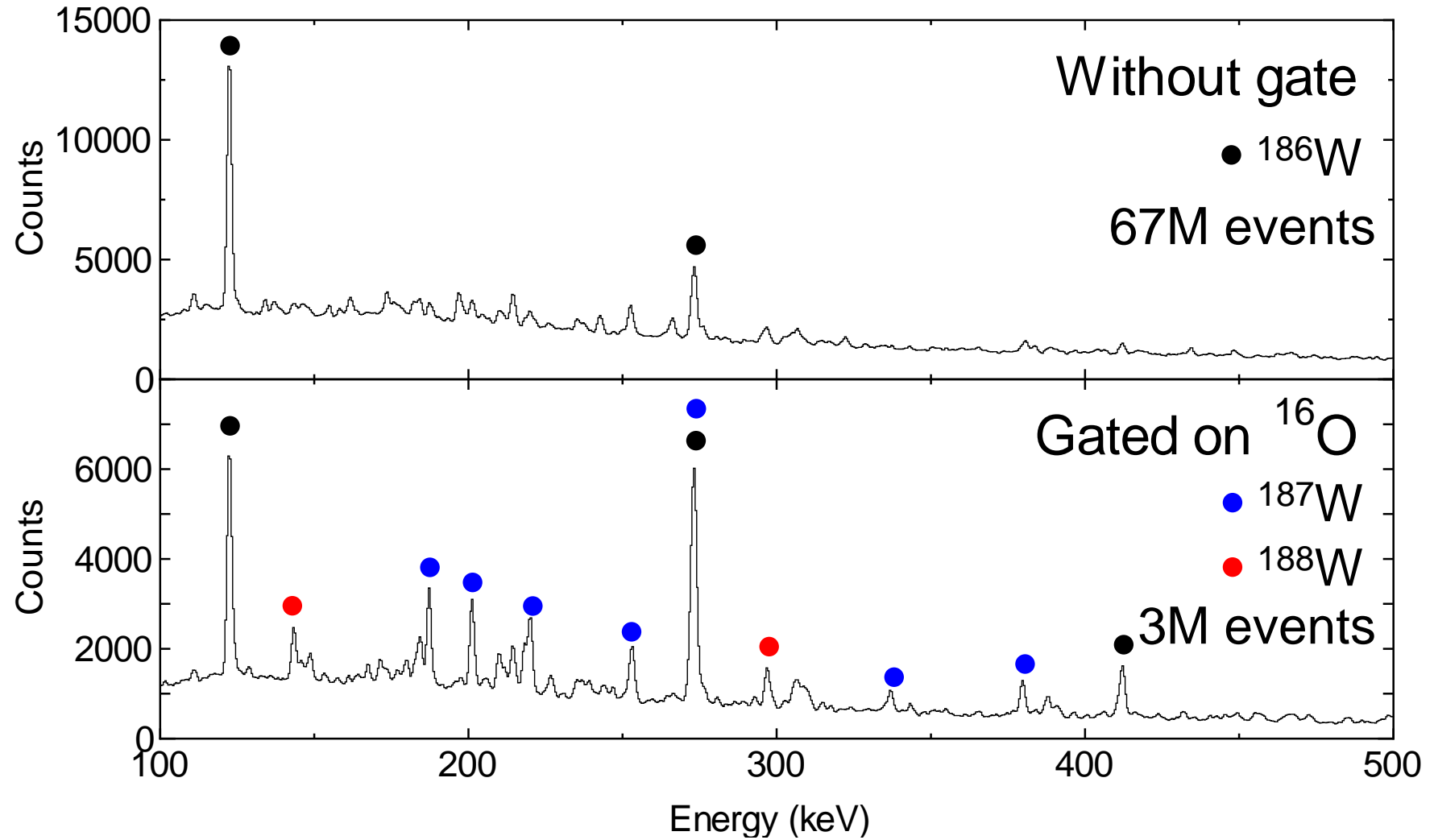
# 実験装置



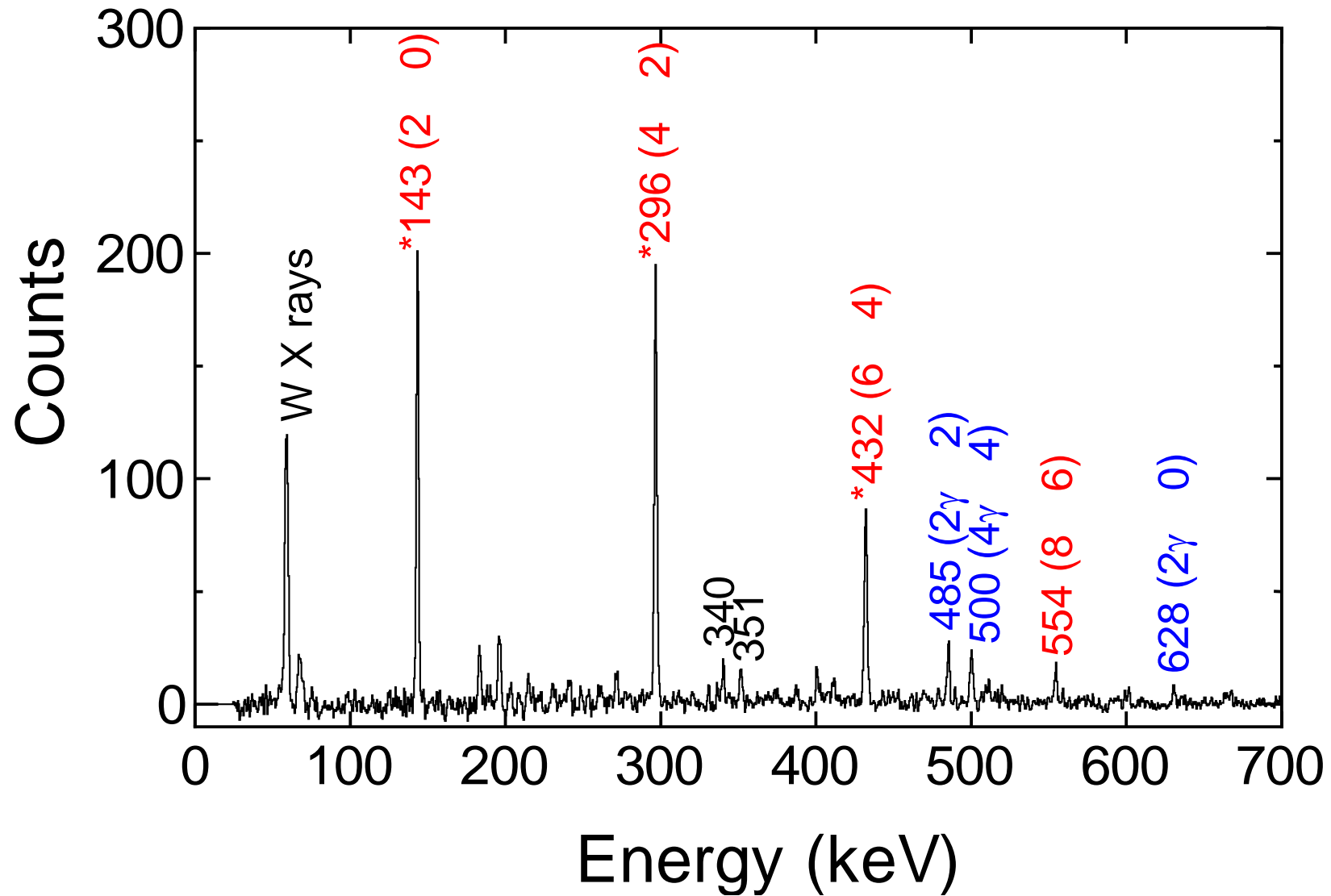
# Si E- $\Delta E$ プロット



# ガンマ線スペクトル

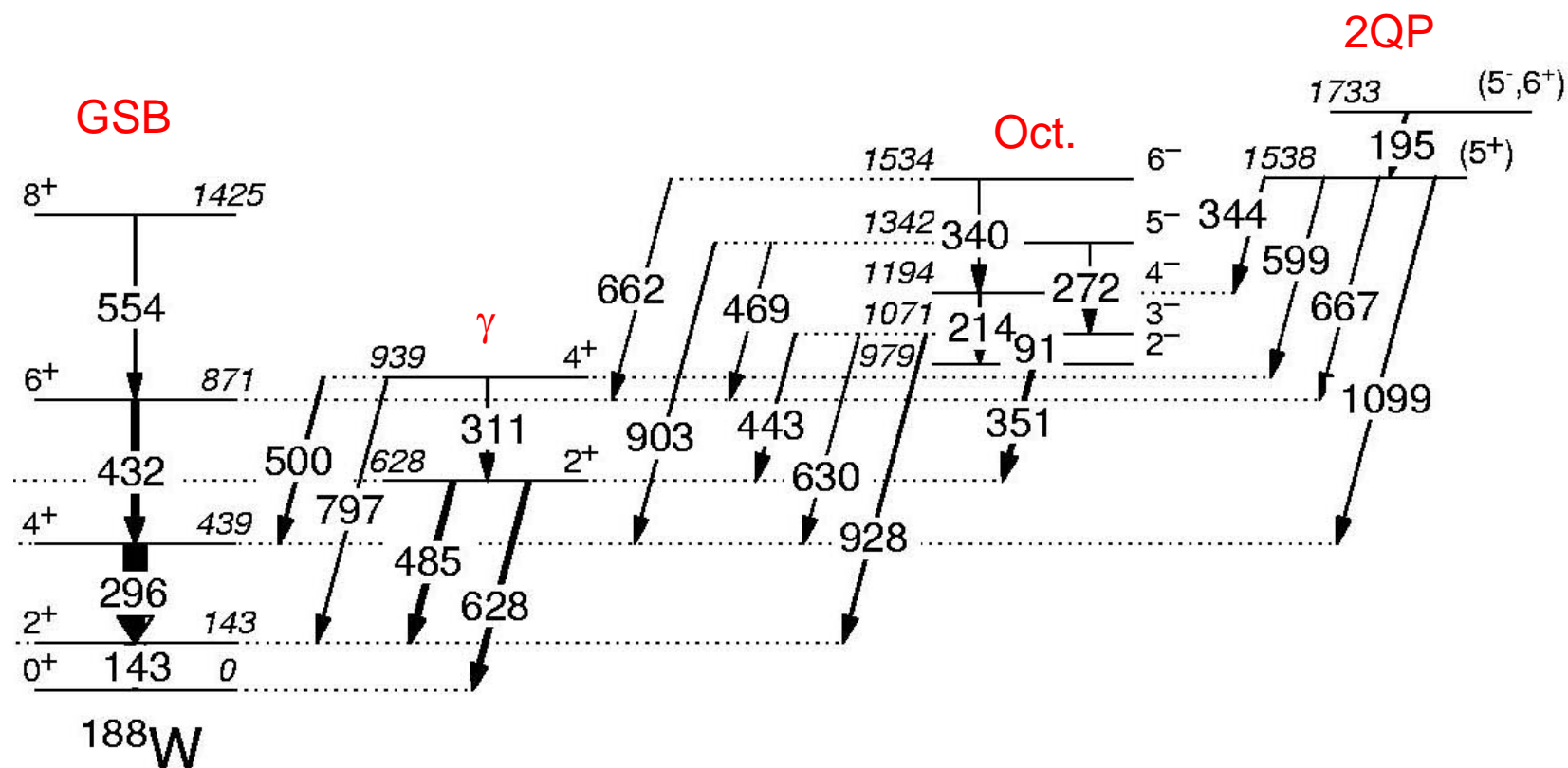


# ガンマ線コインシデンススペクトル





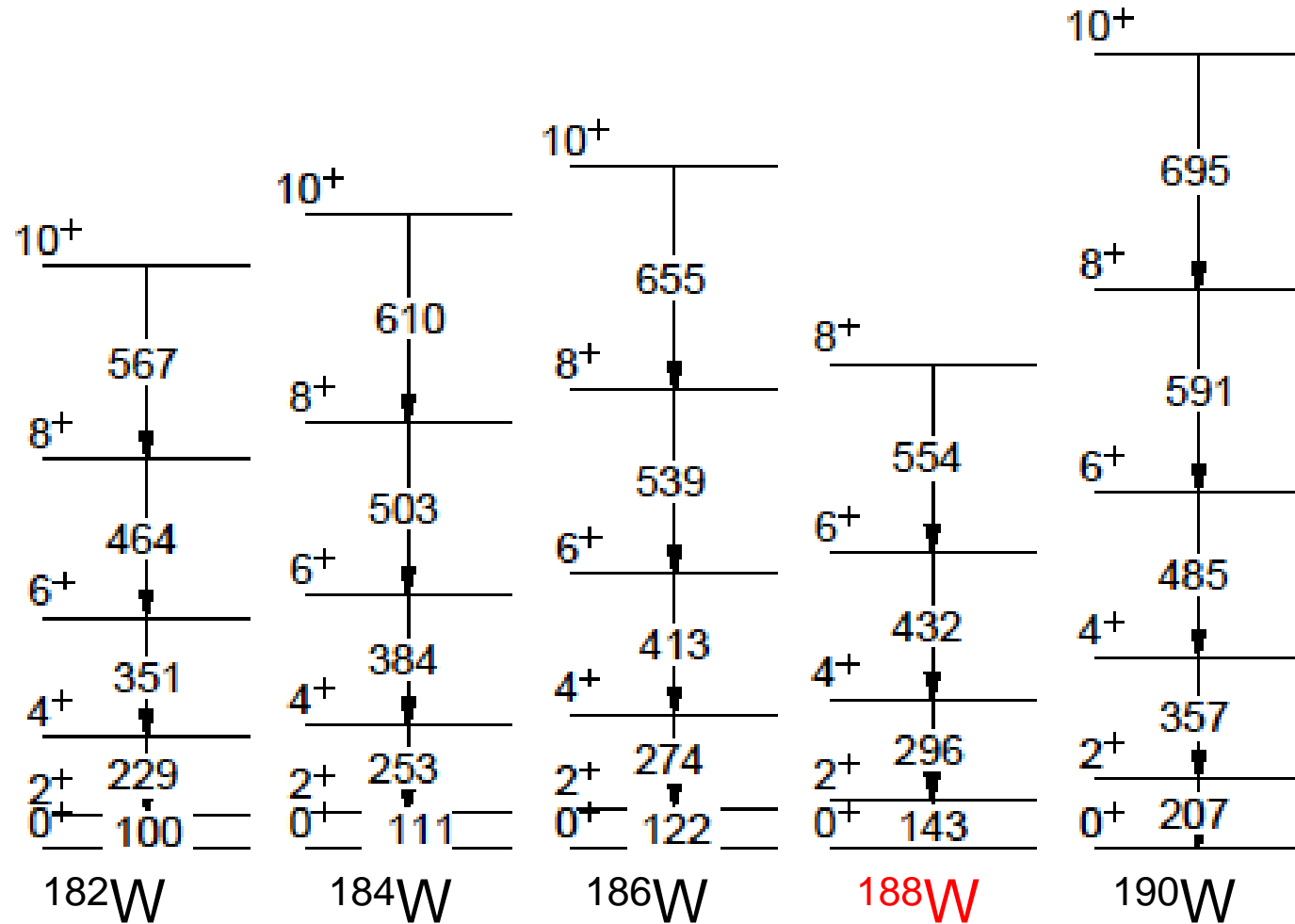
# $^{188}\text{W}$ の準位様式



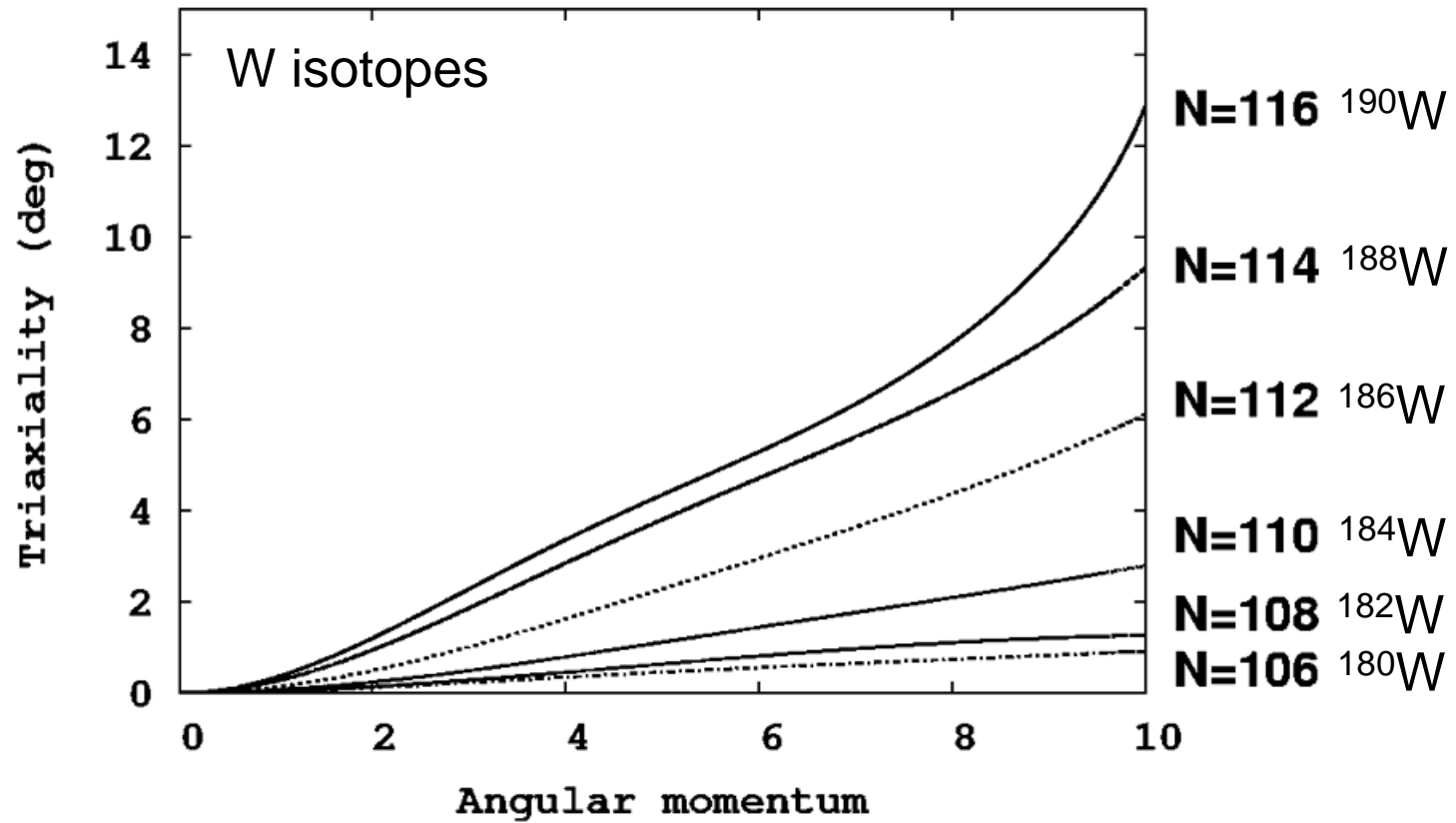
基底状態回転バンドを $8^+$ 準位まで観測

新たに、ガンマ振動バンド、8重極振動バンド、2準粒子準位を観測

# W同位体の基底状態回転バンドの比較



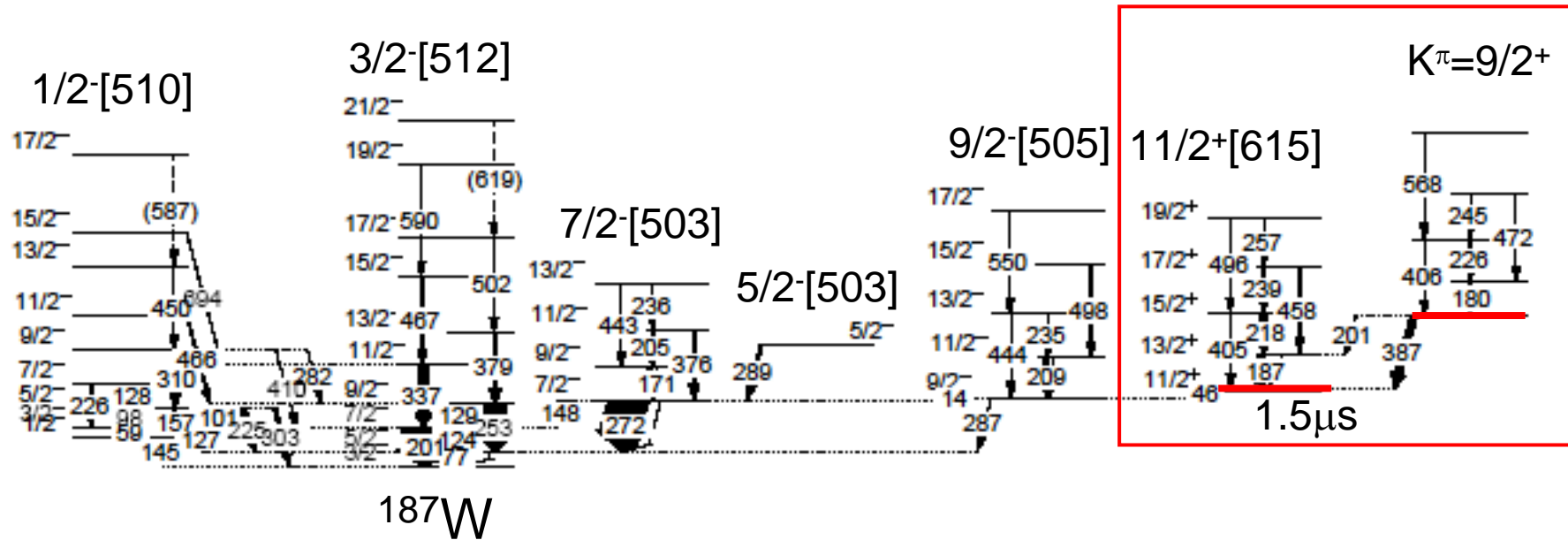
# 非軸対称性の度合い



Calculated by M.Oi

# $^{187}\text{W}$ の準位様式

$^{186}\text{W}(^{18}\text{O}, ^{17}\text{O}), ^{186}\text{W}(^{18}\text{O}, ^{16}\text{O}+n)$



1.5 $\mu$ 秒アイソマー:  $I^\pi = 11/2^+$ ,  $E_x = 411\ \text{keV}$  T.Shizuma et al., PRC71(2005)067301.

$I^\pi = 9/2^+$ ,  $E_x = 798\ \text{keV}$  準粒子配位:  $9/2^+ [624]$

$^{187}\text{W}$ 、近傍核 ( $^{186}\text{W}, ^{188}\text{W}$ ) の多準粒子配位を決定する上で重要

# Blocked BCS模型を用いた準粒子配位計算

多準粒子配位の理論計算

Woods-Saxon potential

Lipkin-Nogami treatment

一粒子準位、対エネルギー

$K^\pi$	Configuration <sup>(a)</sup>	$E_{mqp}$ (keV)	$E_{res}^{(b)}$ (keV)	$E_{cal}^{(c)}$ (keV)	観測値
$3^+$	$\pi : 1/2^+, 5/2^+$	1871	-150	1721	
$5^+$	$\nu : 1/2^-, 9/2^-$	1768	-150	1618	1538 keV
$5^-$	$\nu : -1/2^{-(d)}, 11/2^+$	1907	-150	1757	
$6^+$	$\nu : 3/2^-, 9/2^-$	1531	+150	1681	1733 keV
$7^-$	$\nu : 3/2^-, 11/2^+$	1694	-150	1544	
$8^+$	$\nu : 7/2^-, 9/2^-$	1932	-150	1782	
$8^-$	$\pi : 7/2^+, 9/2^-$	2606	-120	2486	
$9^-$	$\nu : 7/2^-, 11/2^+$	2062	+184	2246	
$10^-$	$\nu : 9/2^-, 11/2^+$	2075	-150	1925	

(a) Neutrons ( $\nu$ ):  $1/2^-$  [510],  $3/2^-$  [512],  $7/2^-$  [503],  $9/2^-$  [505],  $11/2^+$  [615]; protons ( $\pi$ ):  $1/2^+$  [411],  $5/2^+$  [402],  $7/2^+$  [404],  $9/2^-$  [514].

## 予想されるHigh-K イラストアイソマー

$I^\pi=7^-, E_x=1544$  keV

$^{186}\text{W}$ :  $I^\pi=7^-, E_x=1517$  keV,  $T_{1/2}=18\mu\text{s}$

$I^\pi=10^-, E_x=1925$  keV

$^{190}\text{Os}$ :  $I^\pi=10^-, E_x=1705$  keV,  $T_{1/2}=9.9\text{m}$

$^{192}\text{Os}$ :  $I^\pi=10^-, E_x=2015$  keV,  $T_{1/2}=5.9\text{s}$

$I^\pi=10^+, E_x=2614$  keV,  $(\nu i_{13/2})^2 ; 9/2^+ [624] \otimes 11/2^+ [615]$

# 10-アイソマー

$v2/9^- [505], 11/2^+ [615]$

$10^+ \quad 2092 ?$   
 $10^- \quad 1987 ?$   
 $8^+ \quad 1425$

10m  
 $10^- \quad 1705$   
 $8^+ \quad 1666$

?  $10^- \quad 1633$

$10^- \quad 2015$  6s  
 $8^+ \quad 1708$

$0^+ \quad 0$   
 $188W$

N=114

$0^+ \quad 0$   
 $190Os$

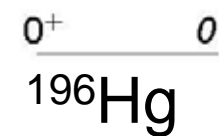
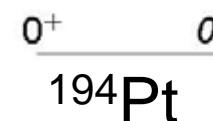
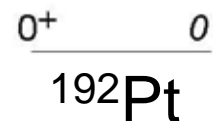
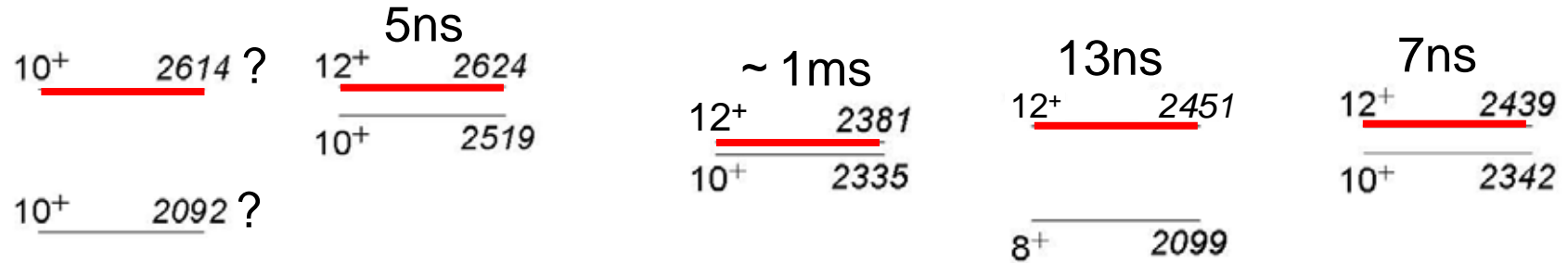
$0^+ \quad 0$   
 $190W$

N=116

$0^+ \quad 0$   
 $192Os$

# $(\nu i_{13/2})^2$ アイソマー

$10^+ : 9/2^+ [624] \otimes 11/2^+ [615]$ ,  $12^+ : 11/2^+ [615] \otimes 13/2^+ [606]$

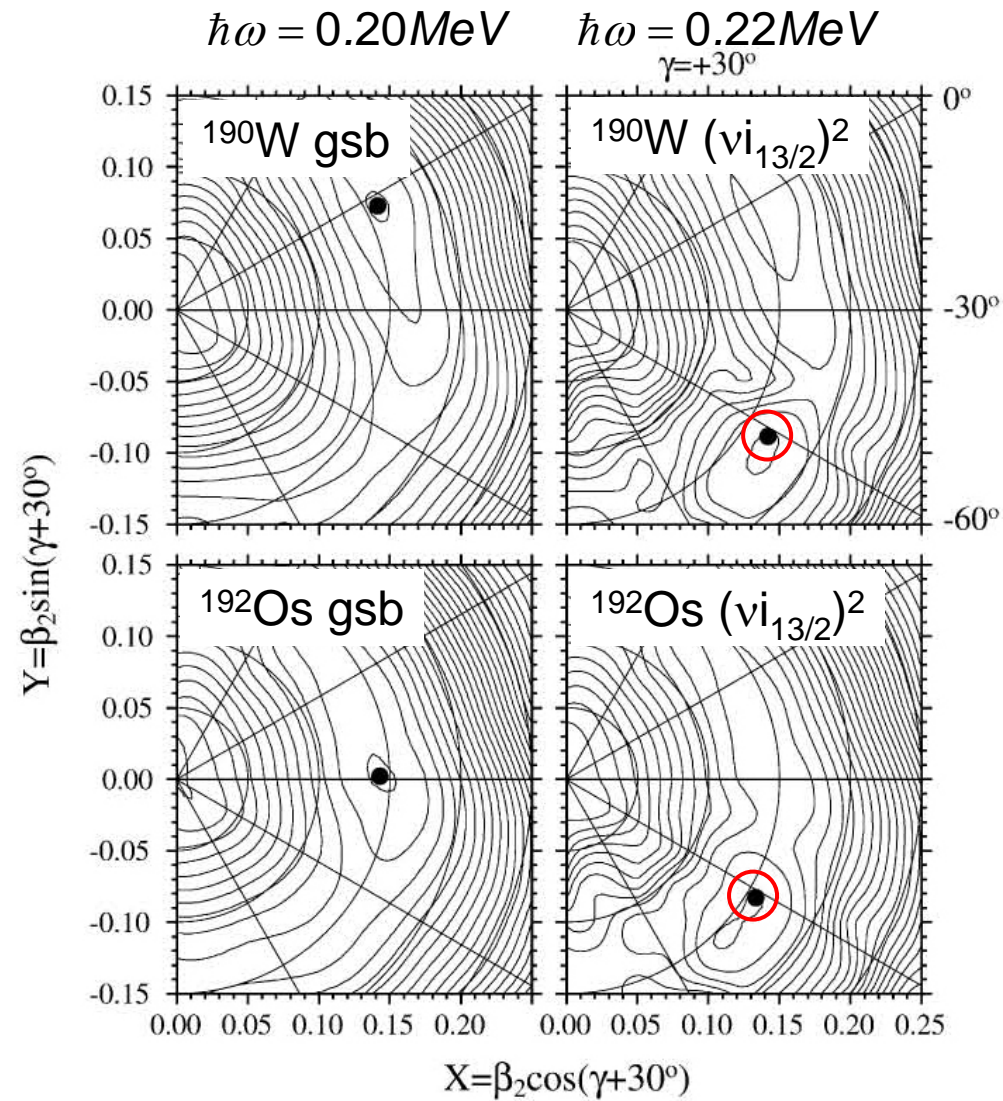


N=114

N=116

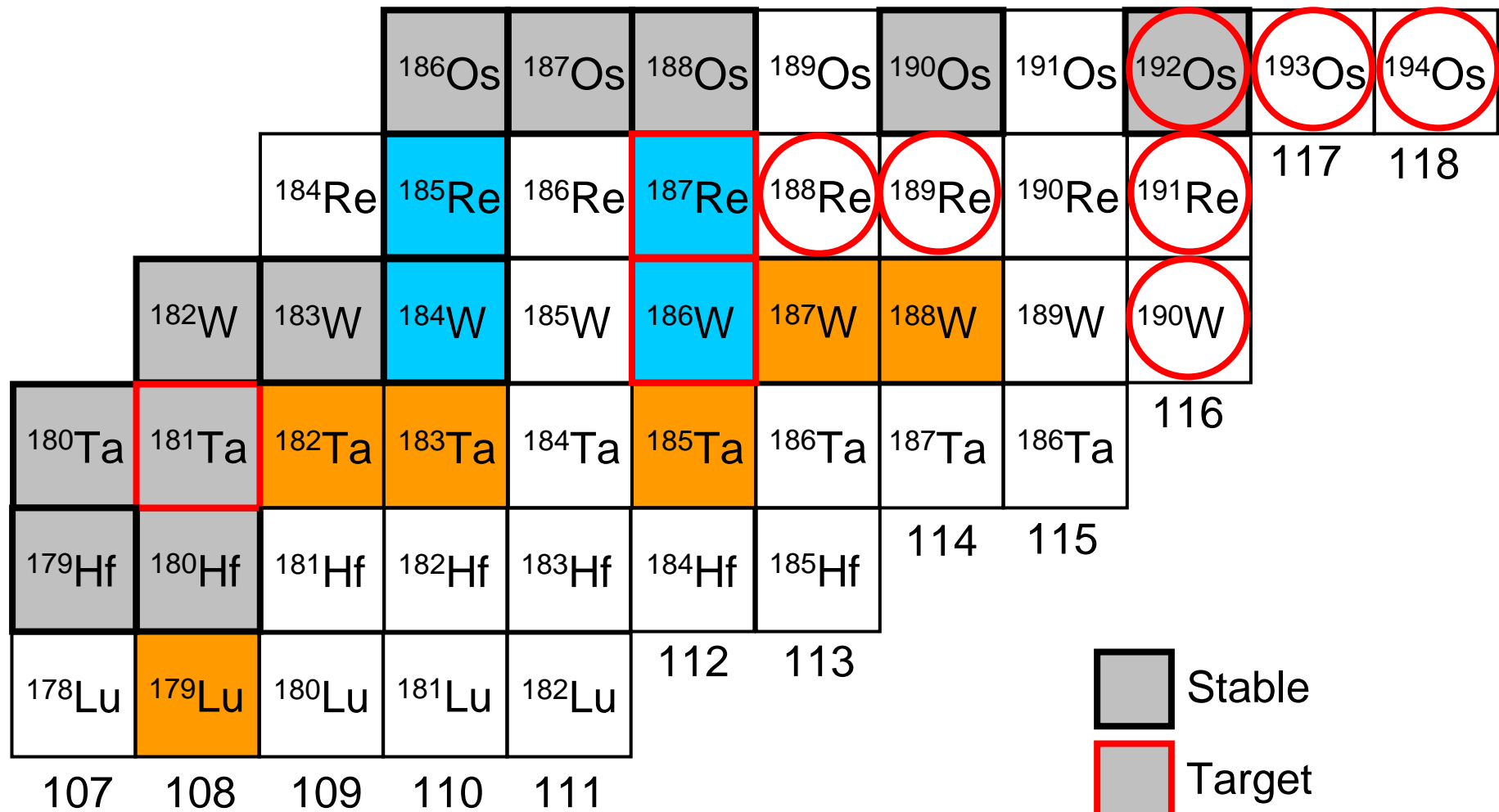
*<sup>190</sup>W: Zs.Podolyak et al., PLB491(2000)225*

# Collective oblate isomers



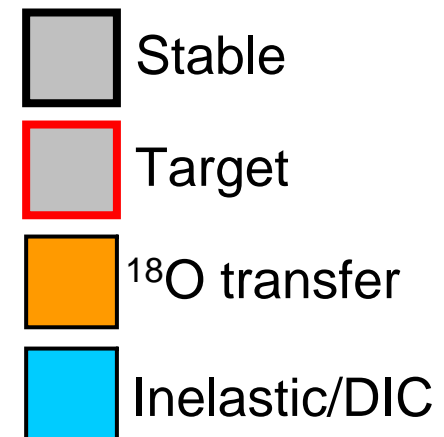


# Higher spins, more neutron-rich nuclei



深部非弾性散乱反応

$^{136}\text{Xe}$  ビームなど



# まとめ

## 核子移行反応を用いた中性子過剰核のガンマ線分光実験

原子力機構 タンデム + ブースター加速器

深部非弾性散乱、 $^{18}\text{O}$ 核移行反応、(非弾性散乱反応)

$^{187}\text{W}$ 、 $^{188}\text{W}$ 、 $^{182}\text{Ta}$ 、 $^{183}\text{Ta}$ 、 $^{179}\text{Lu}$ 、( $^{186}\text{W}$ 、 $^{187}\text{Re}$ )など

## 質量数 180 領域中性子過剰核のアイソマー

**N=104 ~ 106**、Z=66 ~ 70

$^{170}_{66}\text{Dy}_{104}$  近傍でトンネリング確率が最大となる

**Double mid-shell 核** 高スピン核異性体の存在の可能性？

**N=114 ~ 116**、Z=74 ~ 80

$\nu 9/2^+[624]$ 、 $11/2^+[615]$ 、 $13/2^+[606]$ 、 $9/2^-[505]$

$^{190}\text{W}$ 、 $^{192}\text{Os}$   **$12^+:\nu 11/2^+[615] \otimes 13/2^+[606]$**

オプレートアイソマー、非軸対称変形

---

$^{170}\text{Er}(^{18}\text{O},^{20}\text{Ne})^{168}\text{Dy}$ 、 $^{176}\text{Yb}(^{18}\text{O},^{20}\text{Ne})^{174}\text{Er}$ 、 $^{192}\text{Os}(^{18}\text{O},^{20}\text{Ne})^{190}\text{W}$

より重いビーム ( $^{136}\text{Xe}$ など)を用いた深部非弾性散乱、非弾性散乱反応実験

核破砕反応、 $^{208}\text{Pb}$  1GeV/A、 $^{208}\text{Pb}(^9\text{Be},4p)^{204}\text{Pt}$  (N=126)