

RCNP2次ビームラインENコースと  
AVFサイクロトロン  
の重イオンビーム  
を用いた $\gamma$ 線核分光

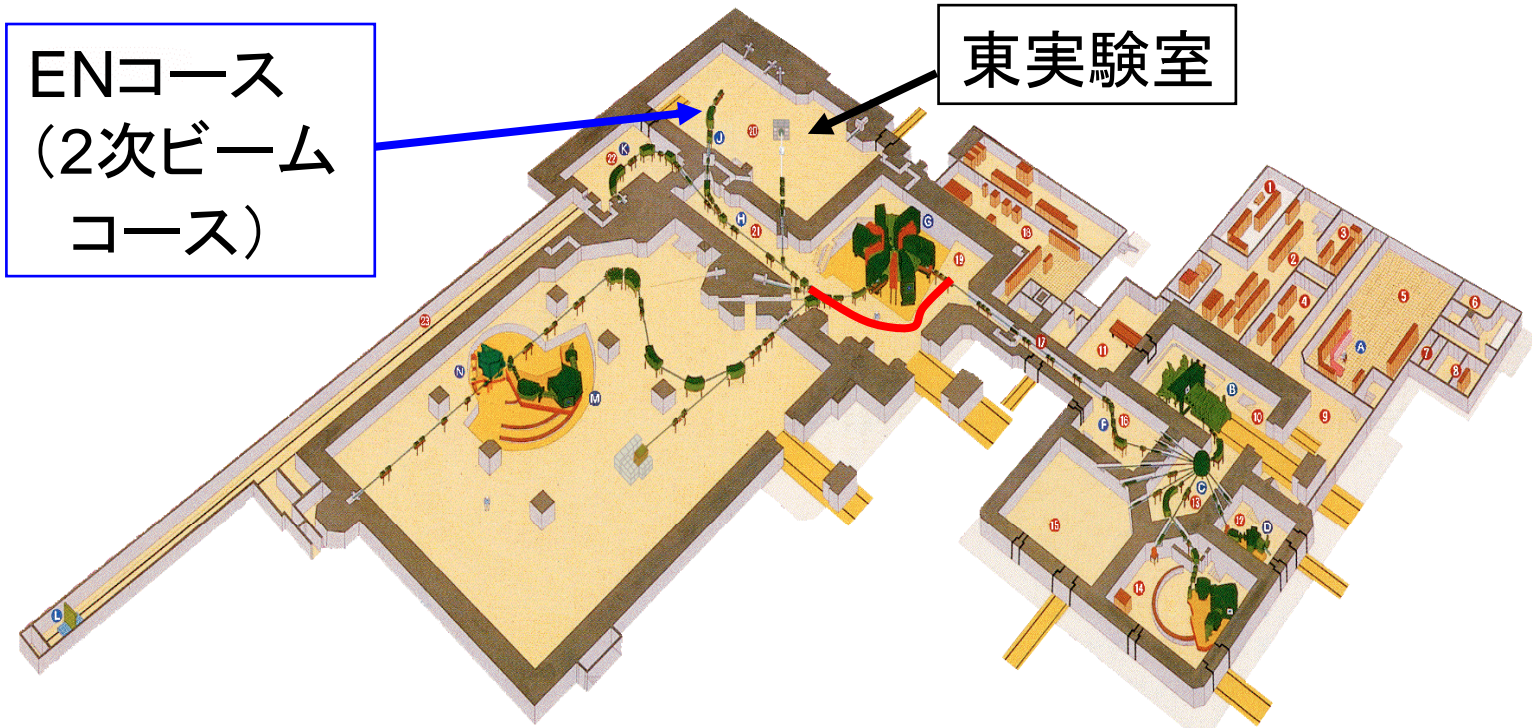
阪大理

小田原厚子、下田正、福地知則、  
佐藤昭彦、堀稔一、増江俊之、  
田尻邦彦、倉健一郎

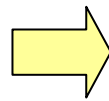
阪大RCNPの皆様

1. RCNP2次ビームラインENコース
2. 高スピンシェイプアイソマー
3. RCNPでのガンマ線核分光実験
4. 将来計画

# RCNPでのガンマ線核分光実験



1. AVFサイクロからの直接ビームライン
2. 重イオンビームのための新しいECRイオン源



重イオンビームを用いた核融合反応によるイン・ビームガンマ線核分光実験が可能となった。

# RCNPのビームとENコースを使う利点

1. ビームが非常に安定

2. 低バックグラウンド

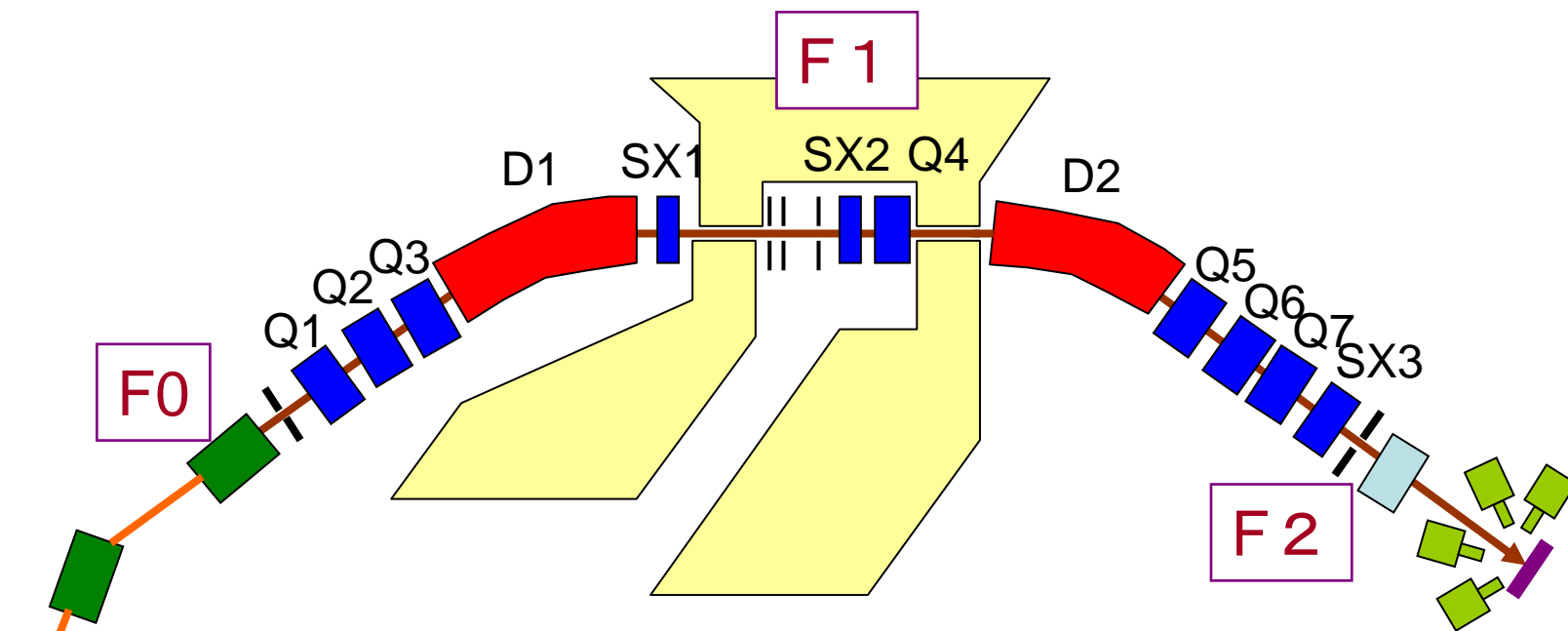
(1) ENコースでは、1次ビームを止める部屋と測定の部屋が別

(2) 計測用電源にノイズがのっていない

3. ENコースをホームコースとして自由に使える

# EN コース

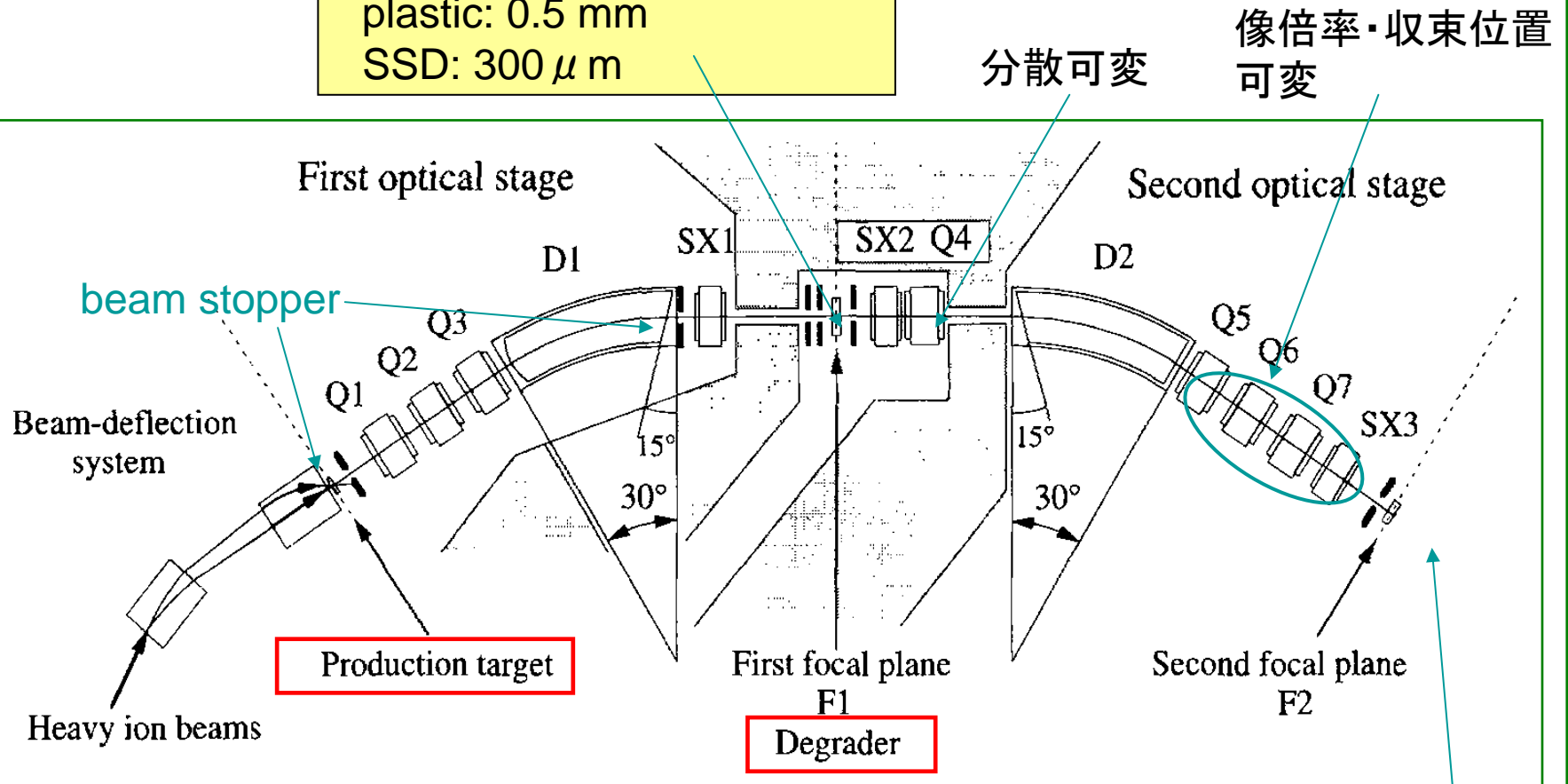
# RCNP 2次ビームコース



|                    |  |
|--------------------|--|
| Maximum rigidity   | 3.2 Tm   |
| Energy acceptance  | $\Delta E/E = 16 \%$   |
| Angular Acceptance | $\Delta\theta = 40 \text{ mrad}$<br>$\Delta\phi = 28 \text{ mrad}$ |
| Path length        | 14.8 m   |

|        |    |
|--------|----|
| 阪大理    | 下田 |
| KEK    | 宮武 |
| JAEA   | 光岡 |
| 阪大RCNP | 森信 |

PPAC: 150mmL x 40mmH  
plastic: 0.5 mm  
SSD: 300  $\mu$ m



ENコース  
モニター系、スリット系

PPAC x 2: 50mmL x 50mmH  
plastic: 0.5 mm  
SSD: 300  $\mu$ m

# 平板ディグレーダーの使用

エネルギー・ディグレーダーの効果をイオン光学的に扱えば、もっと性能の良いセパレーターが出来るのでは？

(森信俊平先生のアイデア: 1987年頃)

$$\delta = \frac{E - E_0}{E_0}$$

中心軌道とのエネルギーの相対的ずれ  
fractional energy deviation

粒子のエネルギーに無関係に収束する条件: **アクロマティック収束条件**

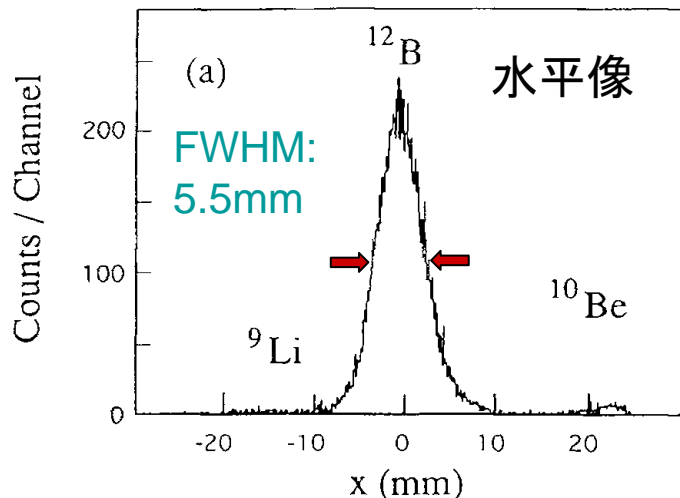
$$D_1 M_{x2} + D_2 [D_1 (\delta|x)_d + (\delta|\delta)_d] = 0$$

$D_1$ : 前半系のエネルギー分散  
 $D_2$ : 後半系のエネルギー分散  
 $M_{x2}$ : 後半系横像倍率

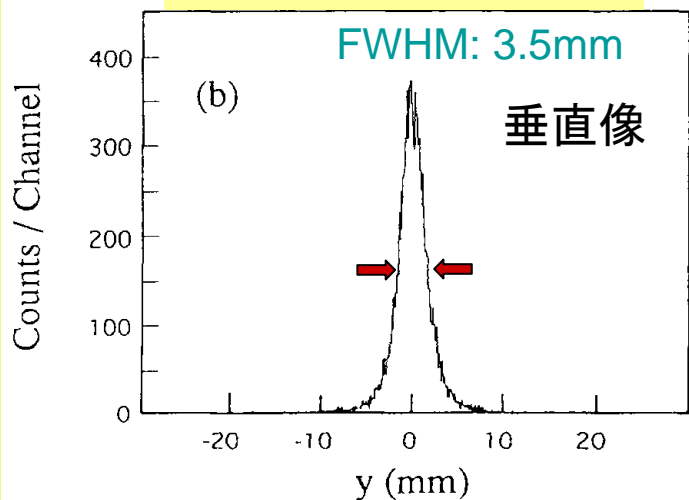
$(\delta|x)_d$   $(\delta|\delta)_d$  : ディグレーダーの効果を表す輸送行列要素

# 平板ディグレーダーを使用した結果

40 MeV/u  $^{14}\text{N} + ^9\text{Be}$



小さなビームサイズ



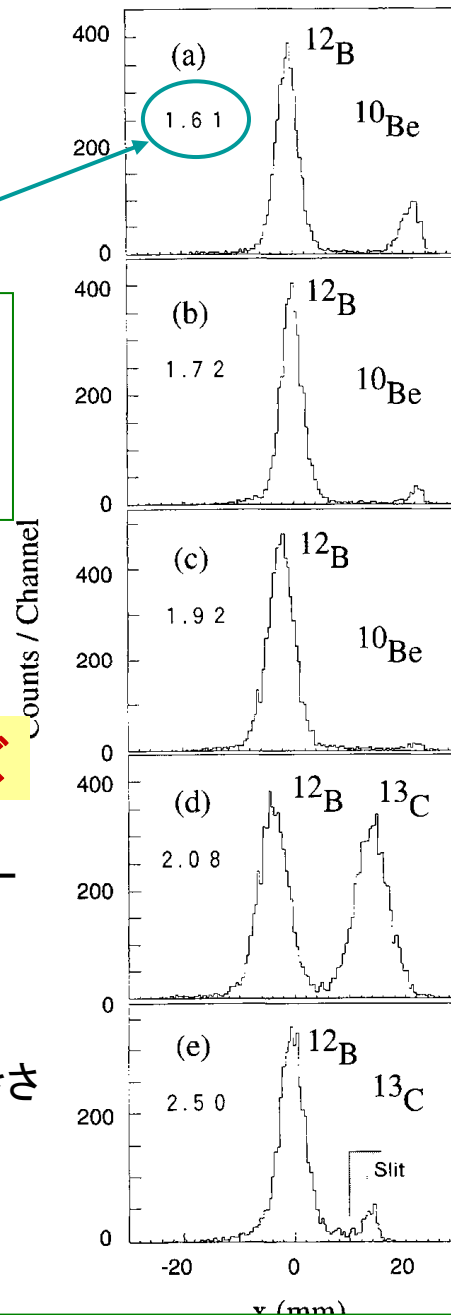
$(\delta|\delta)_d$  の値

粒子のエネルギーの低い側を選ぶとディグレーダーの厚さが厚く見える

安定したビームサイズ

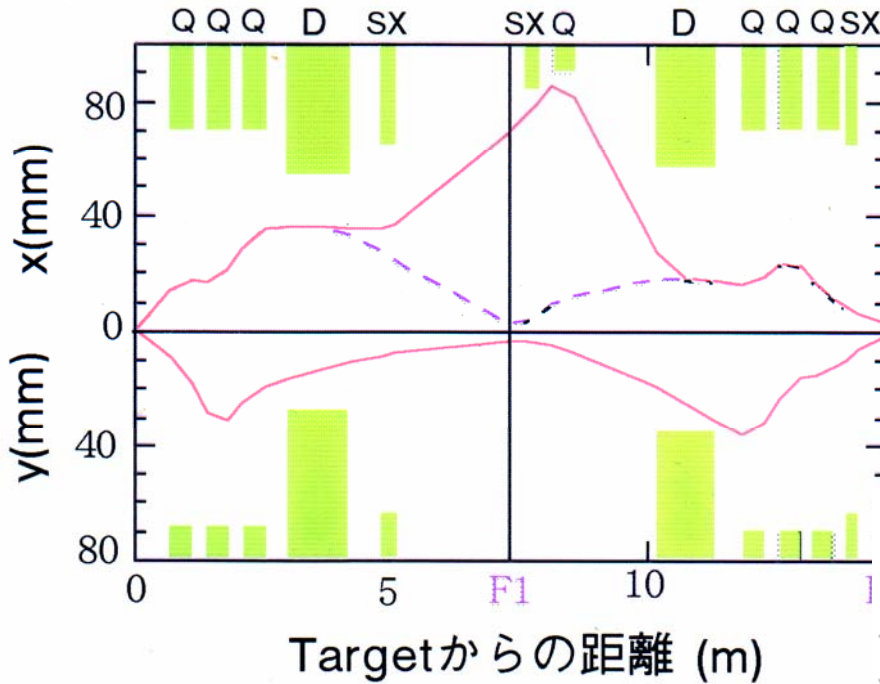
くさび形ディグレーダーでは

$(\delta|\delta)_d = 1.6 \rightarrow 2.5$   
の場合、ビームの大きさが2倍に大きくなる





# ビームの拡がり



$(\delta|\delta)_d = 0.0$  の場合

$(\delta|\delta)_d = 2.0$  ( $d_0/R=0.5$ ) の場合

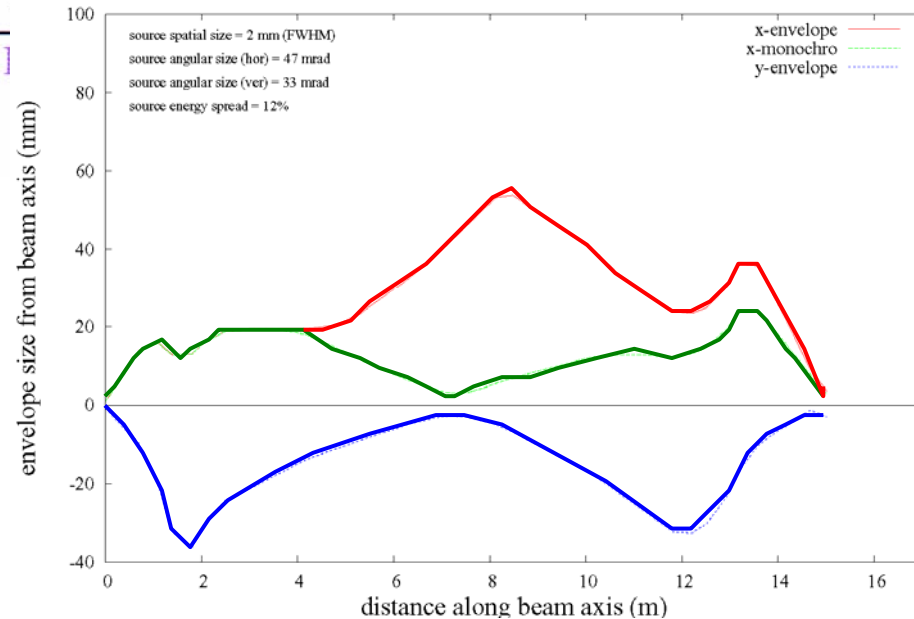
ビームの初期条件

$x = \pm 1.0\text{mm}$     $\theta = \pm 40\text{mrad}$

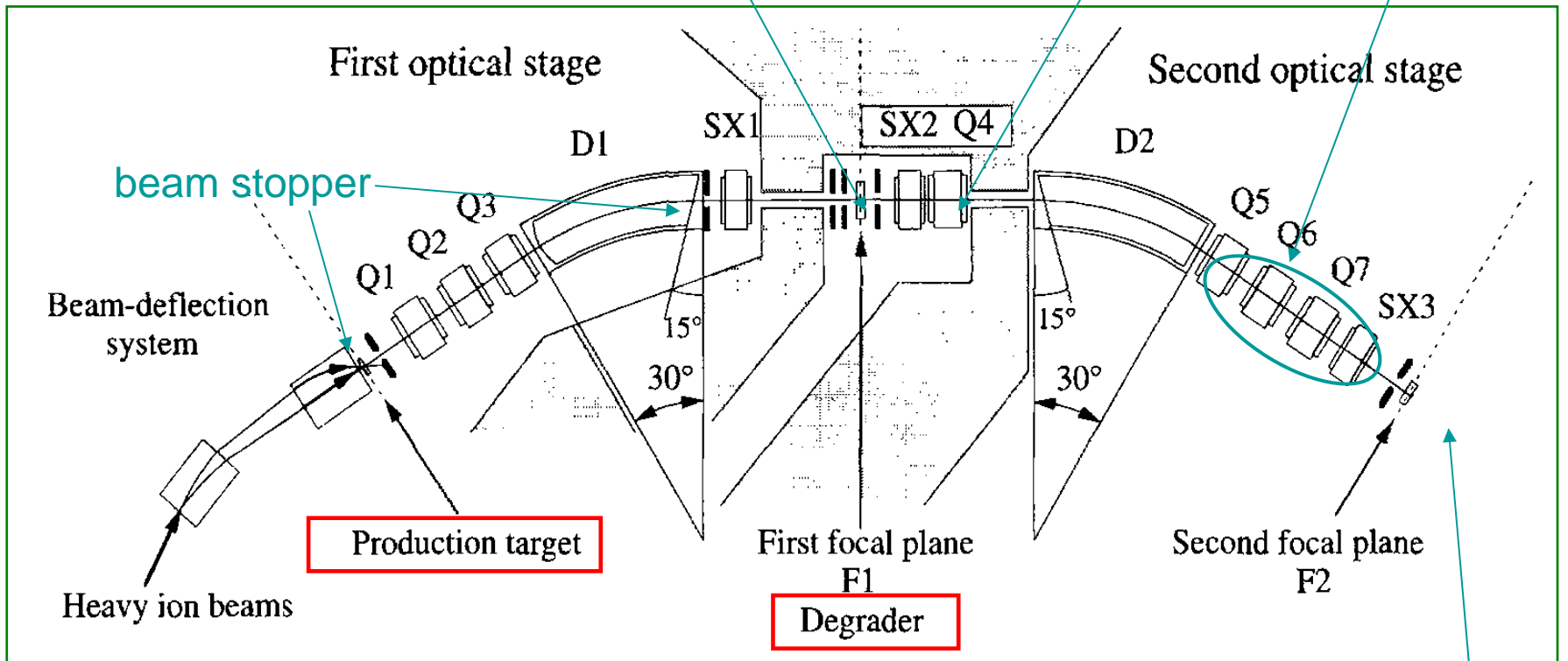
$y = \pm 1.0\text{mm}$     $\phi = \pm 28\text{mrad}$

エネルギー分散    $\delta = \pm 8\%$

beam envelopes of the first order optics: orbit052.dat



PPAC: 150mmL x 40mmH  
plastic: 0.5 mm  
SSD: 300  $\mu$ m



ENコース  
モニター系、スリット系

PPAC x 2: 50mmL x 50mmH  
plastic: 0.5 mm  
SSD: 300  $\mu$ m

# スピン偏極した不安定核



-35% の偏極を達成

*direct reaction*

Mitsuoka et al.

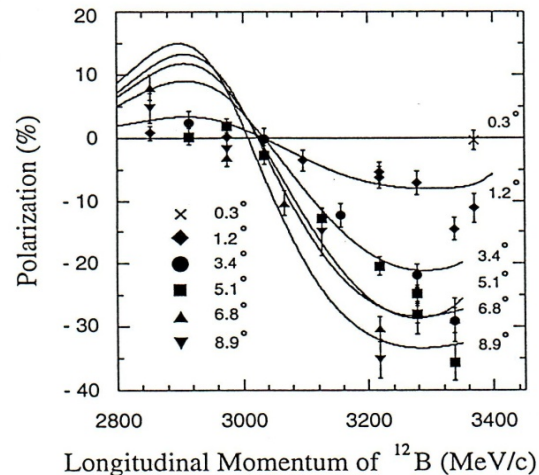
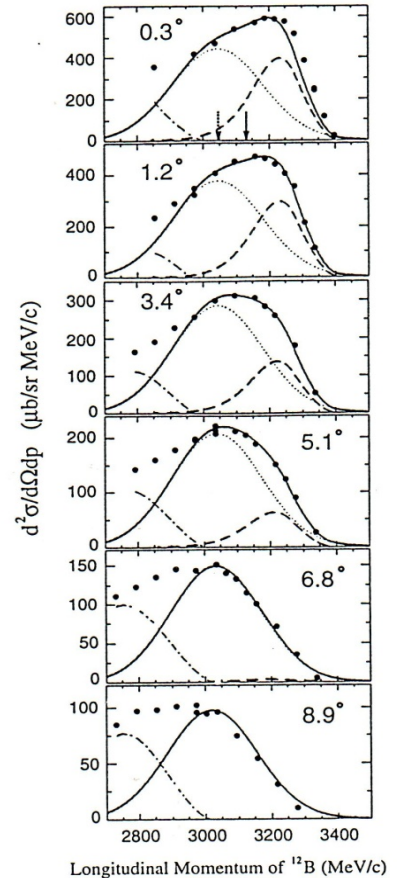
near-side と far-side の  
打ち消し合いを避ける

一次ビームを9度まで偏向可能

Large negative polarization up to  $\approx -35\%$  was observed at  $\theta_L \geq 3^\circ$ .

CHARACTERISTIC FEATURES which can not be explained by the projectile fragmentation mechanism;

- The peak momenta in the yield distribution are rather higher at forward angles ( $\theta_L \leq 6^\circ$ ) than the prediction by projectile fragmentation model.
- The peak momentum strongly depends on  $\theta_L$ .
- Large polarization at the momentum of yield peak: high figure of merit.



1. RCNP2次ビームラインENコース
2. 高スピンシェイプアイソマー
3. RCNPでのガンマ線核分光実験
4. 将来計画

# アイソマー探査実験

アイソマー : ある程度の寿命をもった状態  
(～ナノ秒)

効率よく、原子核の特異な構造を  
みつけることができる。

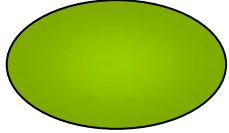
## 高スピンシェイプアイソマーの研究

シェイプアイソマー : 大きな変形の違いが  
原因のアイソマー

みかん型 (オブレート型) の原子核

オブレート変形  
 $\beta \sim -0.19$

|  |  |   |  |   |  |  |                              |
|--|--|---|--|---|--|--|------------------------------|
| $\frac{49/2^+}{35\text{ns}} \quad 8.989$ | $\frac{(27^+)}{8.597} > 2 \mu\text{s}$ | $\frac{(49/2^+)}{0.96 \mu\text{s}} \quad 8.786$ | $\frac{(27^+)}{10\text{ns}} \quad 8.649$ | $\frac{49/2^+}{510\text{ns}} \quad 8.588$ | $\frac{(27^+)}{1.310 \mu\text{s}} \quad 8.620$ | $\frac{(49/2^+)}{28\text{ns}} \quad 8.523$ | $\frac{8.533}{751\text{ns}}$ |
|--|--|---|--|---|--|--|------------------------------|



中性子数83同調体の  
 高スピンスェイプアイソマー

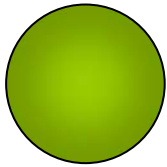
odd nuclei  
 $[\nu (f_{7/2} h_{9/2} i_{13/2}) \pi h_{11/2}^2]_{49/2^+}$   
 odd-odd nuclei  
 $[\nu (f_{7/2} h_{9/2} i_{13/2}) \pi (h_{11/2}^2 d_{5/2})]_{27^+}$

$^{146}\text{Gd}$   
 準二重閉核  
 準魔法数 64  
 魔法数 82

$\frac{27/2^-}{3.582} \quad 27\text{ns}$

$\frac{21/2^+}{2.760} \quad 4.4\text{ns}$

$\frac{27/2^-}{2.661} \quad 0.5\text{s}$   
 $\frac{(17^+)}{3.125} \quad 84\text{ns}$



[球形]

$\frac{13/2^+}{1.228} \quad 5.750\text{ns}$

$\frac{9^+}{0.841} \quad 0.71 \mu\text{s}$   
 $\frac{13/2^+}{1.105} \quad 14\text{ns}$

$\frac{11^-}{1.769} \quad 4.5\text{ns}$

$\frac{9^+}{0.666} \quad 235 \mu\text{s}$   
 $\frac{13/2^+}{0.997} \quad 22\text{ns}$   
 $\frac{11^-}{1.096} \quad 22\text{ns}$   
 $\frac{13/2^+}{1.073} \quad 12.5\text{ns}$

$\frac{(11^-)}{1.596} \quad 18\text{ns}$

$\frac{7/2^-}{\text{stable}} \quad 0$

$\frac{5^-}{0} \quad 363\text{d}$   
 $\frac{7/2^-}{0} \quad 340\text{d}$

$\frac{4^-}{0} \quad 4.59\text{d}$   
 $\frac{7/2^-}{0} \quad 38.1\text{h}$   
 $\frac{2^-}{0} \quad 60\text{m}$   
 $\frac{7/2^-}{0} \quad 4.23\text{m}$

$\frac{9^+}{0.50} \quad 24.0\text{s}$   
 $\frac{2^-}{0} \quad 78\text{s}$

$\frac{143}{60}\text{Nd}$

$\frac{144}{61}\text{Pm}$

$\frac{145}{62}\text{Sm}$

$\frac{146}{63}\text{Eu}$

$\frac{147}{64}\text{Gd}$

$\frac{148}{65}\text{Tb}$

$\frac{149}{66}\text{Dy}$

$\frac{150}{67}\text{Ho}$

## 中性子数83同調体の高スピンアイソマーの 系統的な研究から得られた結果

- ① 高スピンシェイプアイソマー
- ② 陽子の準魔法数64の  
シェルギャップの変化
- ③ 高スピン状態で実験的に得られた  
対相関ギャップエネルギー

# 実験による対相関エネルギーギャップ $2\Delta$ の求め方

## 奇偶質量差 $\Delta(Z)$ (odd-even mass difference) [3点法]

W. Satula et al., Phys. Rev. Lett. 81 (1998) 3599

A. Bohr and B.R. Mottelson, Nuclear Structure, Vol. 1, 171.

基底状態

$$\Delta(Z) = \frac{\pi_Z}{2} [B(Z-1) + B(Z+1) - 2B(Z)]$$

$$\pi_Z = (-1)^Z$$

$B(Z)$  : 束縛エネルギー (符号マイナス)

高スピン  
アイソマー

$$\Delta(Z) = \frac{\pi_Z}{2} [\{B(Z-1) + E(Z-1)\} + \{B(Z+1) + E(Z+1)\} - 2\{B(Z) + E(Z)\}]$$

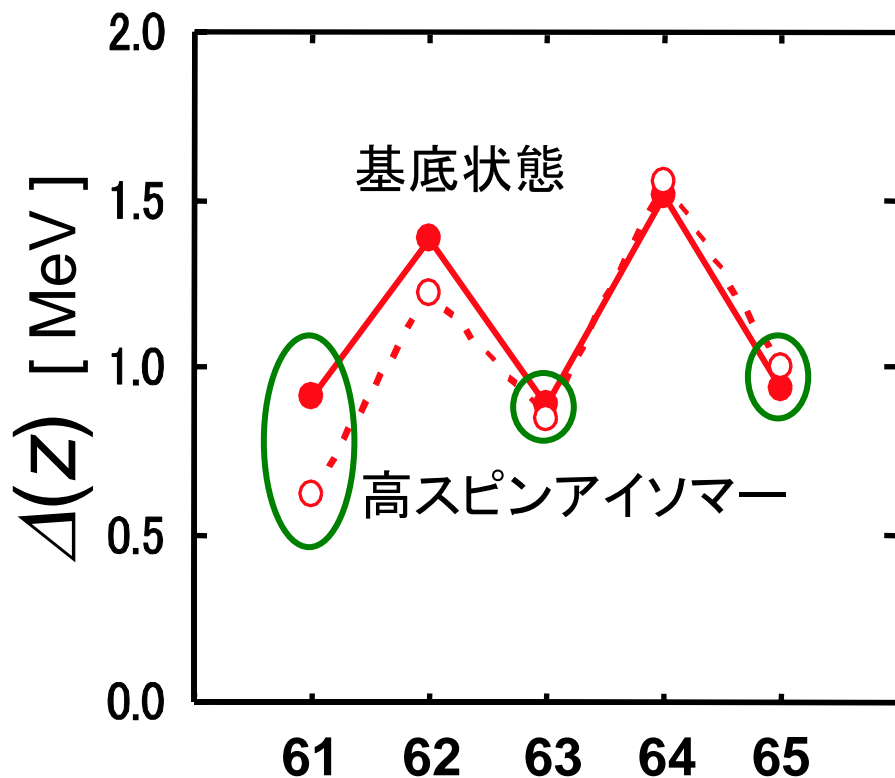
$E(Z)$  : 高スピンアイソマーの励起エネルギー

高スピンアイソマーは 同じ配位  
同じ変形パラメータ $\beta$  (オブレート型)



# 実験的に得られた対相関ギャップエネルギー $2\Delta(Z)$

実験的に得られた  
奇偶質量差



陽子数が奇数のとき  
奇偶質量差の2倍は  
対相関ギャップエネルギーに対応



$\Delta(Z=\text{奇数})$   
基底状態 0.9 MeV  
高スピンアイソマー  
0.6~1.0 MeV

$$\Delta(Z) = \frac{12}{\sqrt{A}} \sim 1.0 \text{ MeV}$$

高スピンアイソマーの  
対相関の大きさは  
基底状態とほとんど同じ

# なぜ中性子数51同調体なのか？

## 中性子数83同調体

高スピンアイソマー

奇核

$$[\nu (f_{7/2} h_{9/2} i_{13/2}) \pi h_{11/2}^2]_{49/2+}$$

奇奇核

$$[\nu (f_{7/2} h_{9/2} i_{13/2}) \pi (h_{11/2}^2 d_{5/2})]_{27+}$$

## 中性子数51同調体

期待される高スピンアイソマー

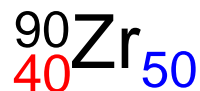
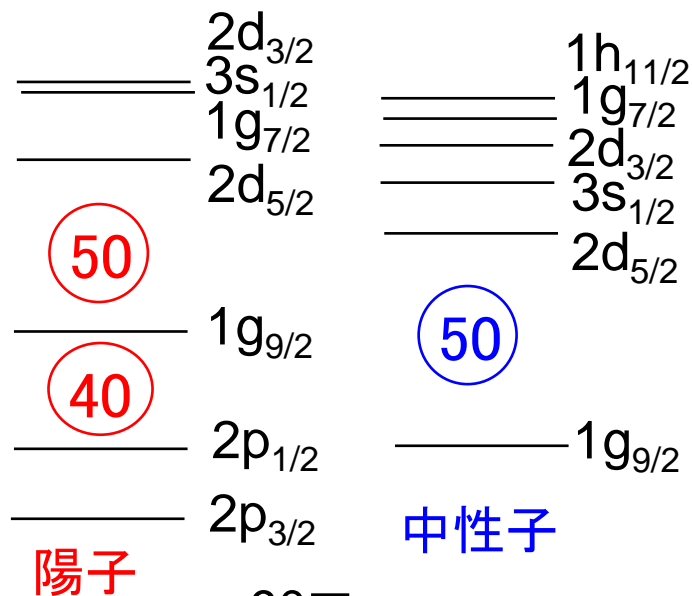
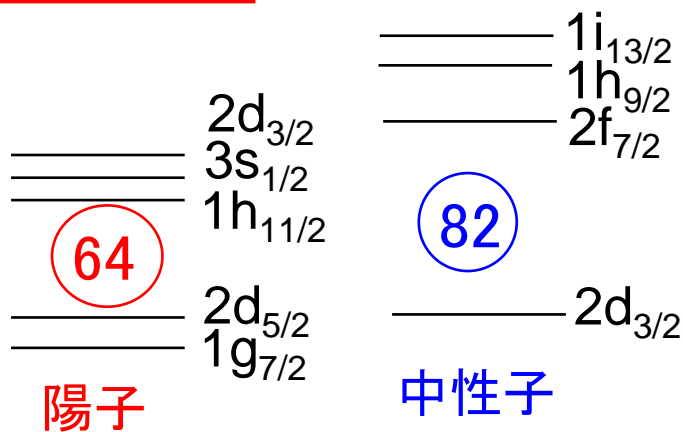
奇核

$$[\nu (d_{5/2} g_{7/2} h_{11/2}) \pi g_{9/2}^2]_{39/2-} \quad {}^{89}\text{Sr}_{38}$$

奇奇核

$$[\nu (d_{5/2} g_{7/2} h_{11/2}) \pi (g_{9/2}^2 p_{1/2})]_{20+} \quad {}^{90}\text{Y}_{39}$$

### 準二重閉核



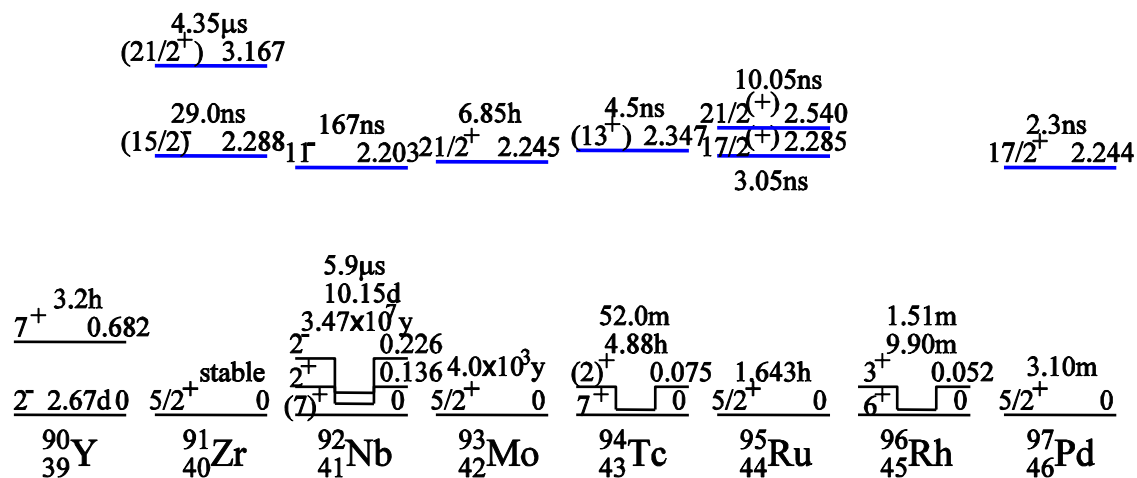
# 中性子数51同調体の 高スピンアイソマー

$1.1\mu\text{s}$   
 $(39/Z) 9.470+x$

$^{93}\text{Mo}$  高スピンアイソマー

T. Fukuchi et al.,

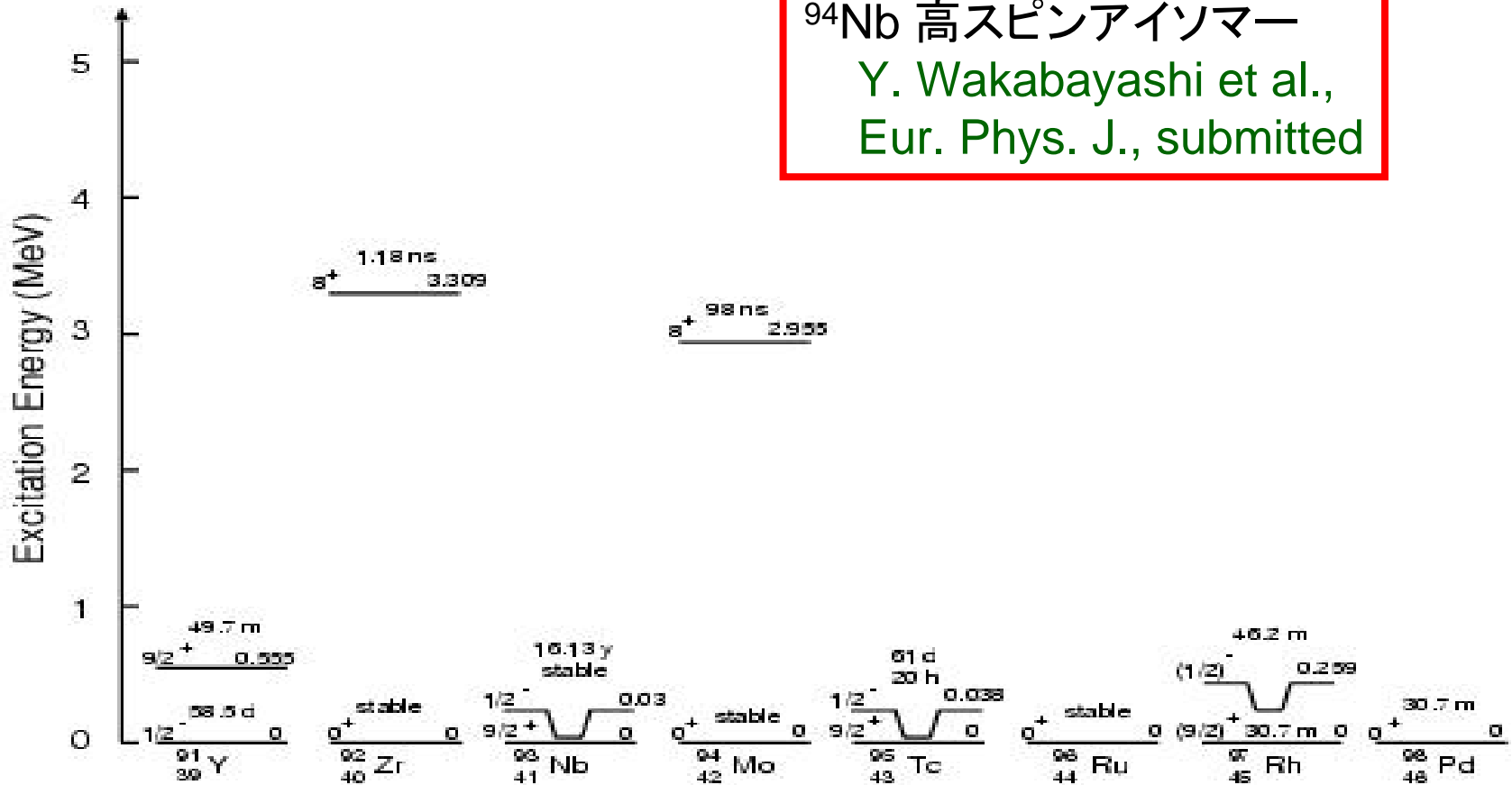
Eur. Phys. J. A24 (2005)249



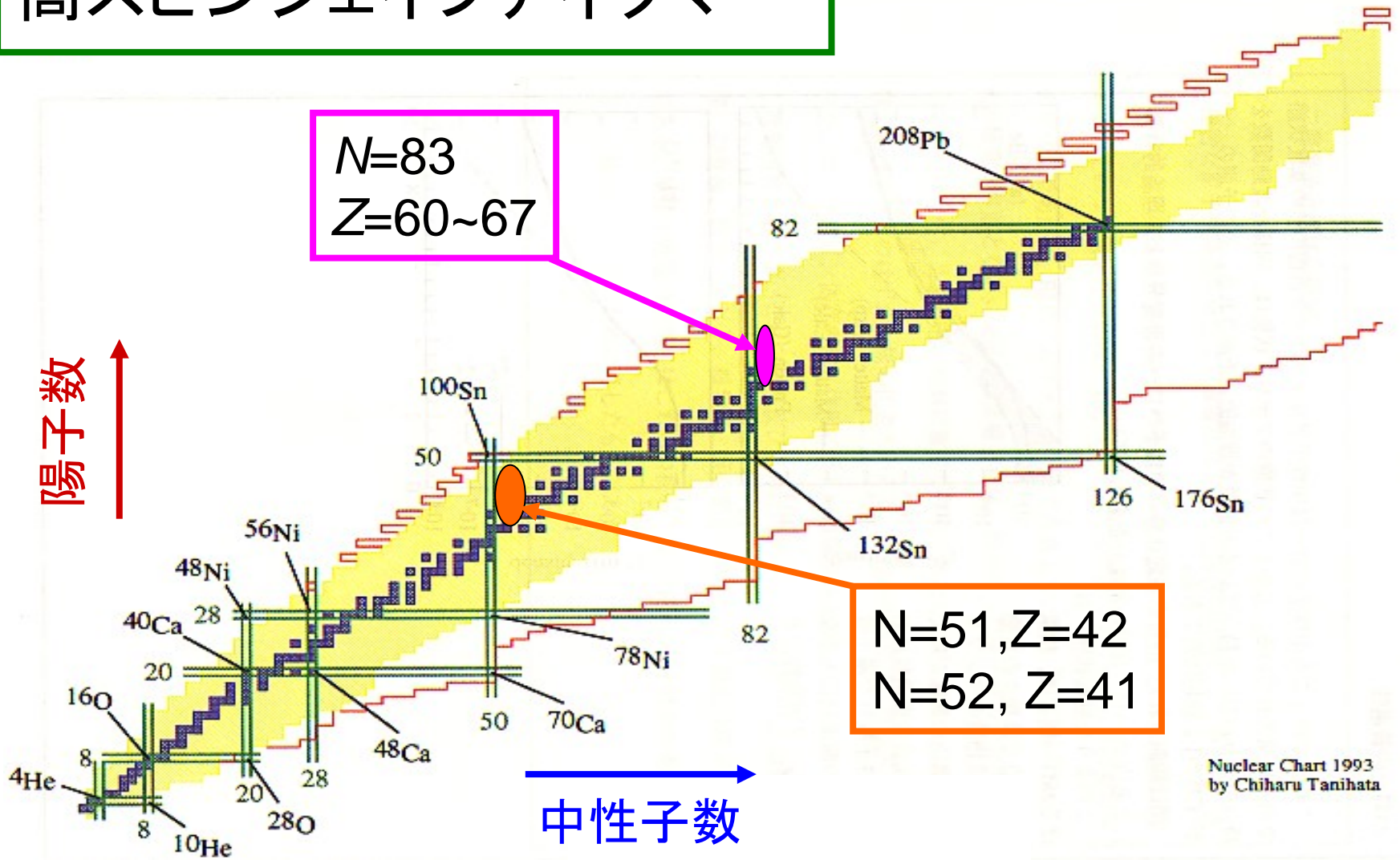
$37/2(-)$   $\uparrow$   $1.5\mu\text{s}$   
7.436

# N=52 同調体の 高スピンアイソマー

$^{94}\text{Nb}$  高スピンアイソマー  
Y. Wakabayashi et al.,  
Eur. Phys. J., submitted



# 高スピンシェイプアイソマー



1. RCNP2次ビームラインENコース
2. 高スピンシェイプアイソマー
3. RCNPでのガンマ線核分光実験
4. 将来計画

# RCNP実験

(1) 1次ビーム $^{40}\text{Ar}$ を用いた実験

2005年12月 E277

2006年 1月 4年生実験

# 大阪大学核物理研究センター(RCNP)における ガンマ線核分光実験

高スピンアイソマー探査実験

prompt and delayed  $\gamma\gamma$  coincidence  
ガンマ線角相関  
ガンマ線直線偏光

1次ビームを用いた実験 [  $^{40}\text{Ar}$  ビーム ]

2005年12月  
(6日間)

中性子数83同調体の高スピンアイソマー

$^{151}_{68}\text{Er}_{83}$  の高スピンアイソマーの研究

$^{116}\text{Sn}(^{40}\text{Ar}, 5n)^{151}\text{Er}$

$^{40}\text{Ar}$  ビーム 200MeV (8+) 3pnA

2006年 1月  
(2日間)

中性子数51同調体の高スピンアイソマー探査

$^{\text{nat}}\text{Zn} + ^{40}\text{Ar}$

4年生の卒業研究実験

$^{40}\text{Ar}$  ビーム 197MeV (8+) 0.2pnA



# $^{151}\text{Er}$ の高スピンアイソマー研究

反応  
ビーム  
ターゲット



$^{40}\text{Ar}$  200 MeV [ 3 pA ]

$^{116}\text{Sn}$  1 mg/cm<sup>2</sup>

+ <sup>nat</sup>Pb backing 10 mg/cm<sup>2</sup>

検出器

HP Ge detectors × 5台

( 45%Ge, 40%Ge, LEPS,  
25 segment Ge, Clover Ge)



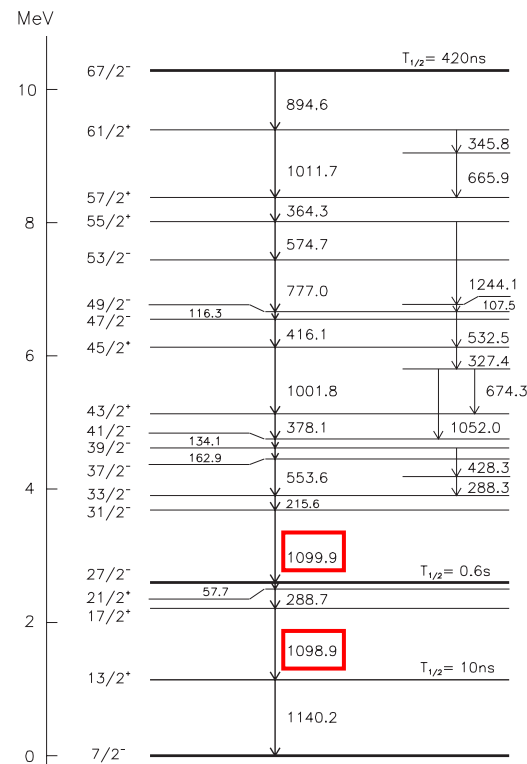
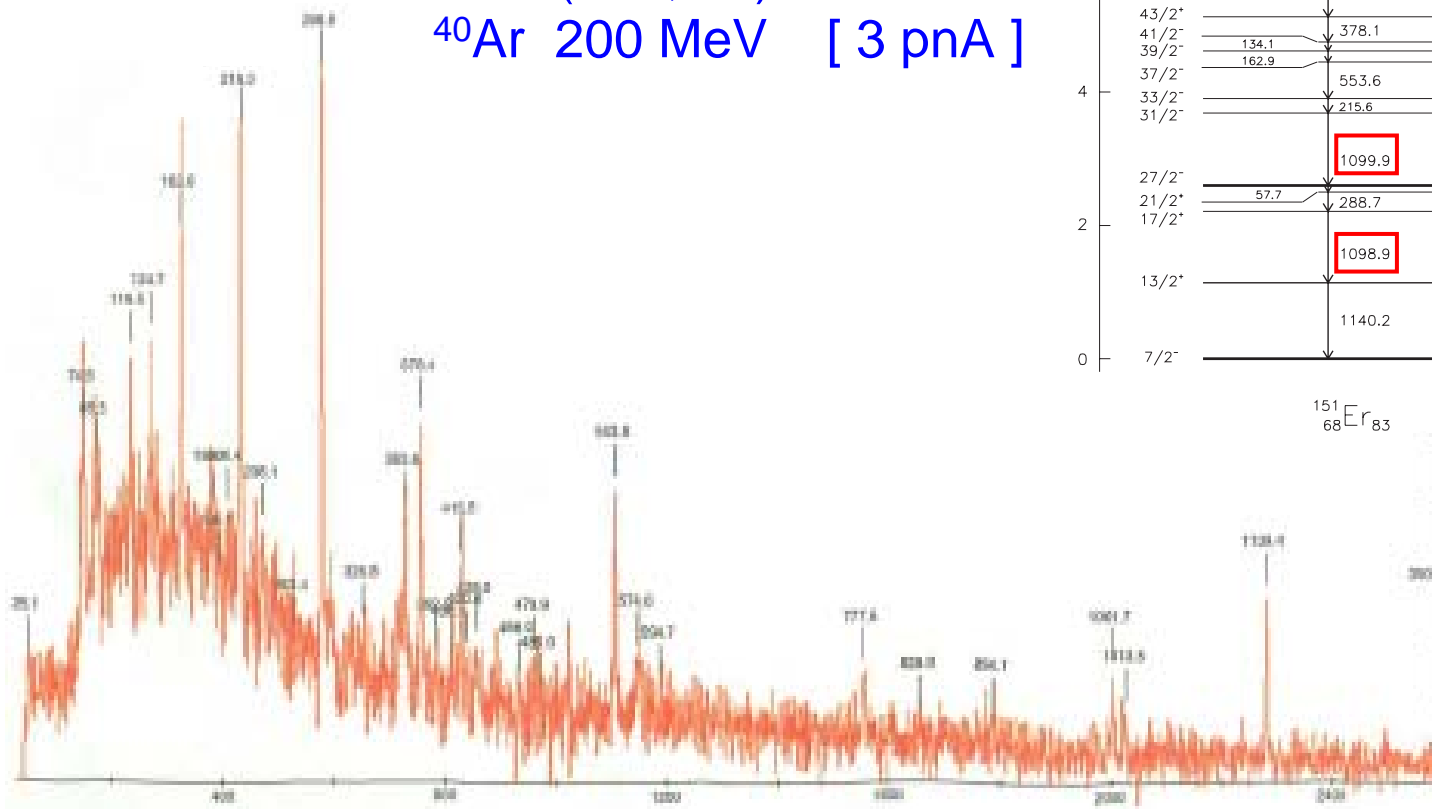
prompt- and delayed-  
 $\gamma\gamma$  coincidence

ガンマ線角相関

ガンマ線直線偏光

# gamma-ray spectrum gated by the 1100 keV in $^{151}\text{Er}$

$^{116}\text{Sn}(^{40}\text{Ar}, 5n)^{151}\text{Er}$   
 $^{40}\text{Ar}$  200 MeV [ 3 pA ]



$^{151}\text{Er}_{83}$

# 中性子数51同調体 高スピンシェイプアイソマー探査実験

堀、増江、田尻、  
小紫、長澤、西村

反応  $\text{natZn} + {}^{40}\text{Ar}$   
ビーム  ${}^{40}\text{Ar}$  197 MeV [ 0.2 pA ]  
ターゲット  $\text{natZn}$  1.8 mg/cm<sup>2</sup>  
+ Pb backing 8.8 mg/cm<sup>2</sup>  
検出器 HP Ge detectors × 5台  
( 45%Ge, 40%Ge, LEPS,  
25 segment Ge, 10 segment Ge)

prompt and delayed  $\gamma\gamma$  coincidence

ガンマ線角相関

ガンマ線直線偏光

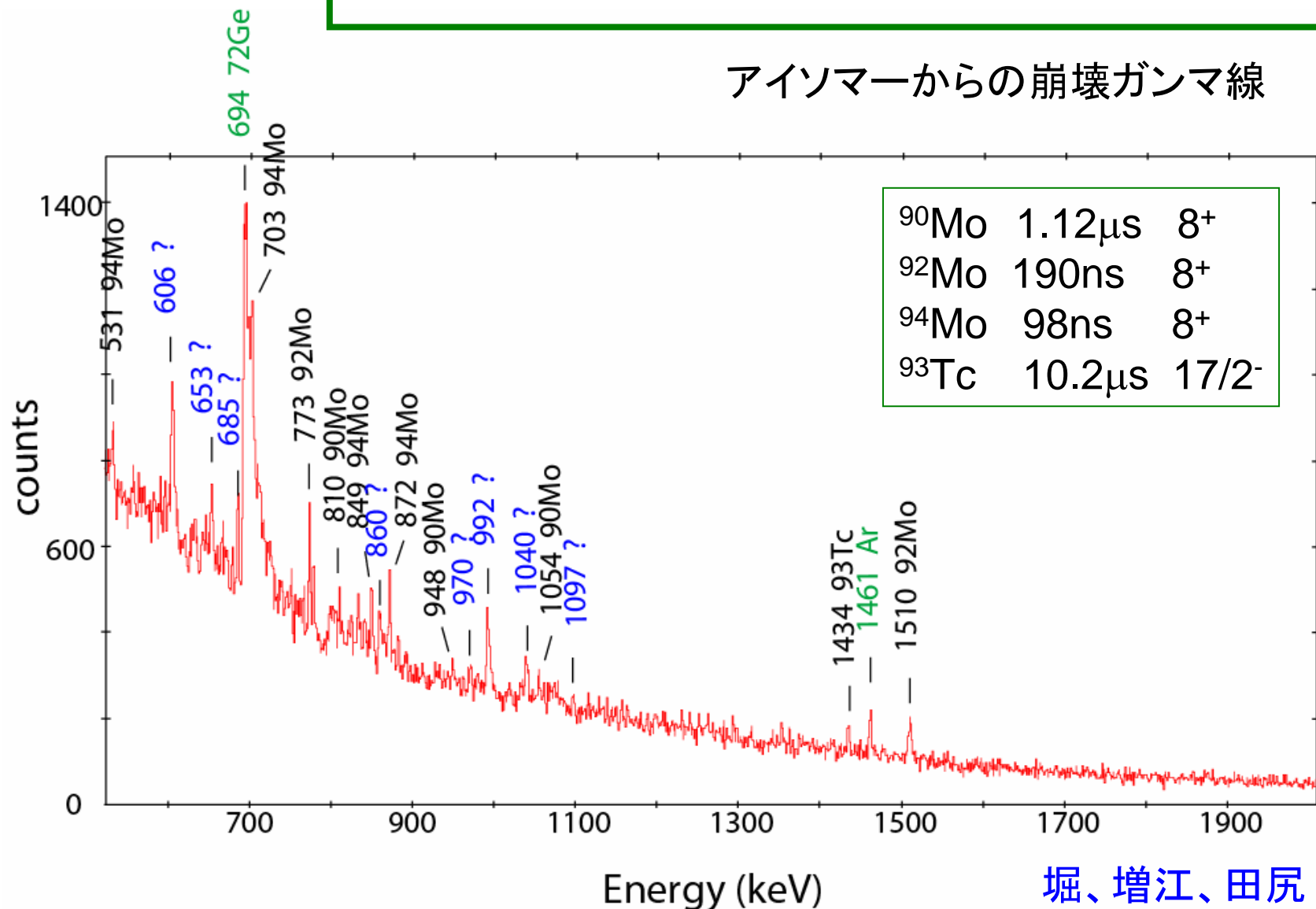
この反応で期待される中性子数51同調体の生成核種

${}_{42}^{93}\text{Mo}$ ,  ${}_{43}^{94}\text{Tc}$ ,  ${}_{44}^{95}\text{Ru}$ ,  ${}_{45}^{96}\text{Rh}$

natZn + Ar

240~600ns遅れてコインシデンスしたガンマ線

アイソマーからの崩壊ガンマ線



# RCNP実験

(2)  $^{86}\text{Kr}$ ビームを用いた反跳核捕獲法

2007年 1月 E287 ビームテスト実験  
1月 下田研4年生実験

# RCNPでのガンマ線核分光実験

EN コース ( RCNP2次ビームコース)を  
recoil mass separator として使用する実験

## 1. 高スピンシェイプアイソマー探査実験

中性子数51同調体 反跳核捕獲法

$^{13}\text{C} + ^{86}\text{Kr}$   $^{86}\text{Kr}$  ビーム  $23^+$  8.5 MeV/u, ~2pnA

2007年 1月22日9時 から 24日9時

ビームテスト実験

## 2. 下田研究室4年生実験

$^{24}\text{Mg} + ^{86}\text{Kr}$ の反応による生成核からの  $\beta$  線の測定と  
GEANTによるシミュレーションとの比較

$^{86}\text{Kr}$  ビーム  $23^+$  8.5 MeV/u, ~8pnA

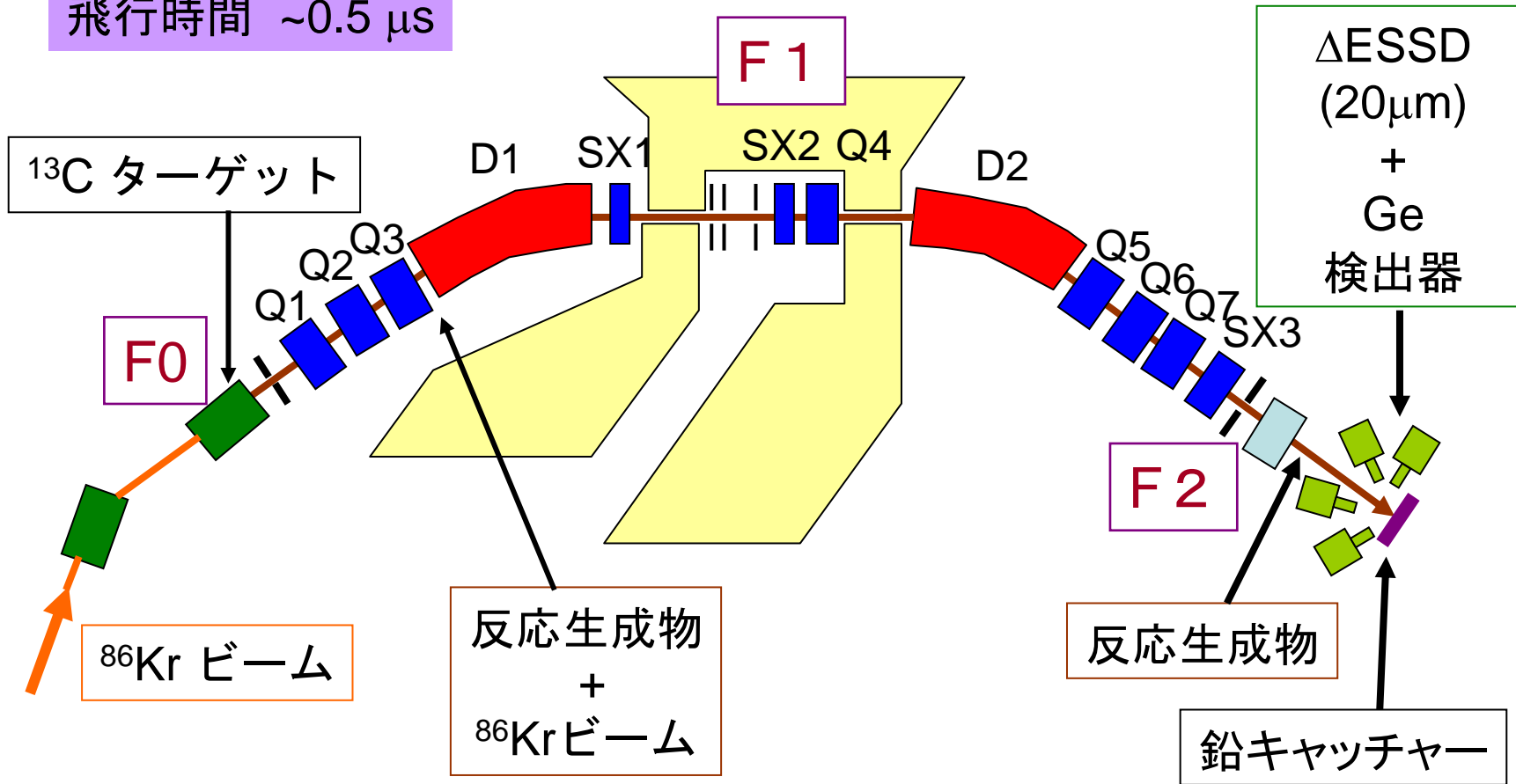
2007年 1月24日21時 から 25日21時

# 反跳核捕獲法を用いた 中性子数51同調体の高スピンアイソマー探査

16 m ( F0からF3まで)

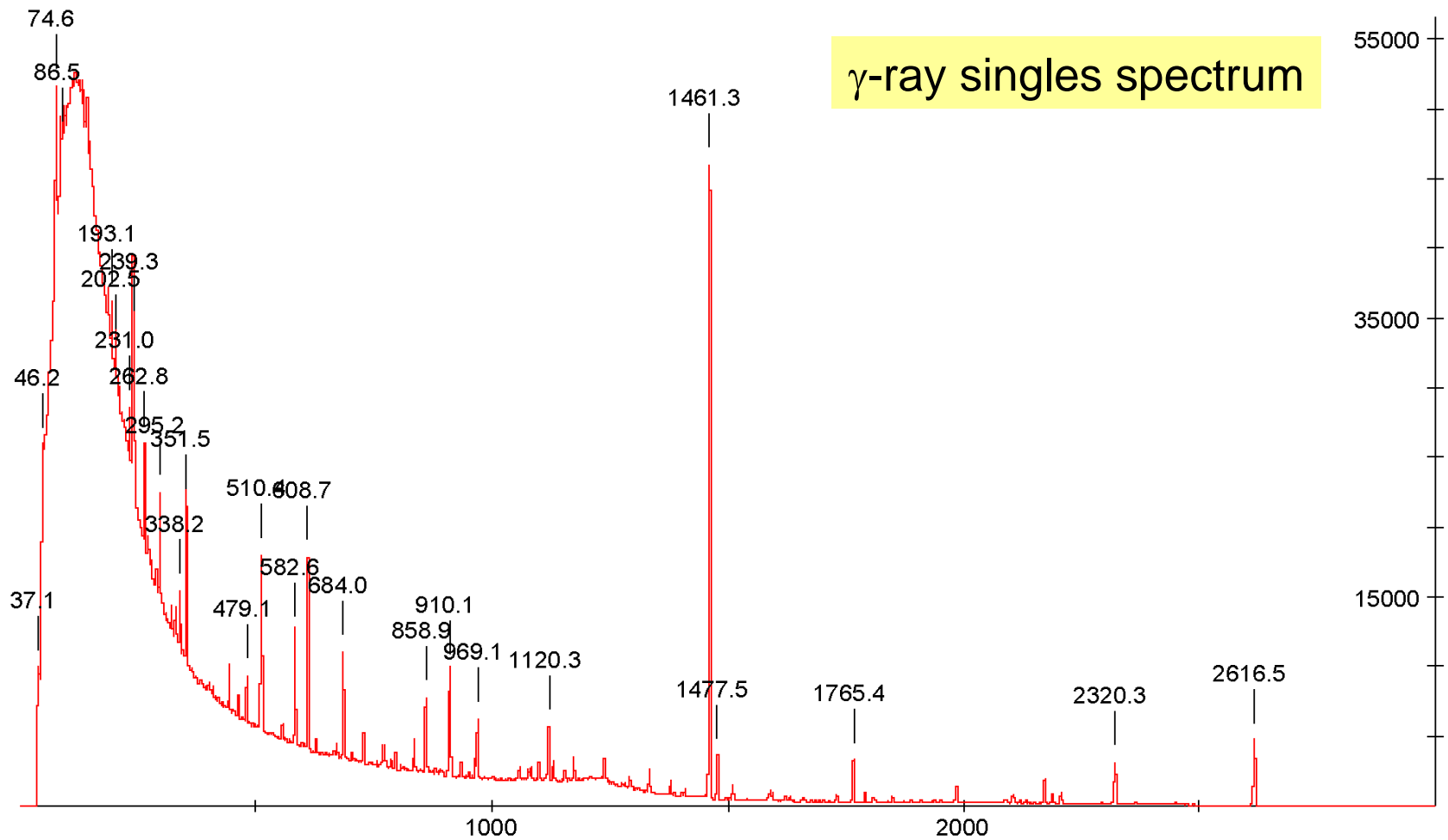
飛行時間  $\sim 0.5 \mu\text{s}$

$^{13}\text{C} + ^{86}\text{Kr}$  8.65 MeV/u



# F2でのガンマ線スペクトル

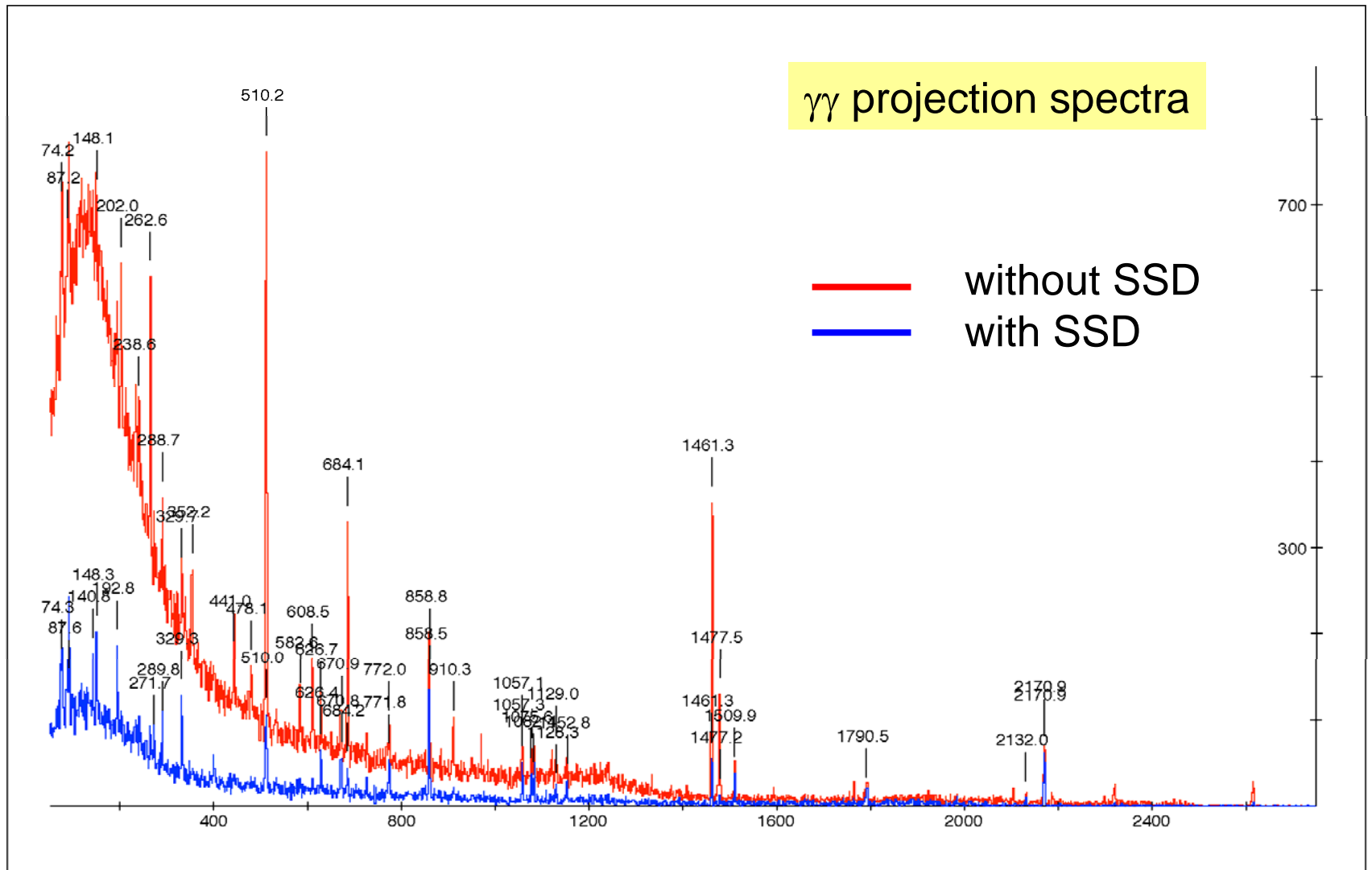
$^{13}\text{C} + ^{86}\text{Kr}$





# F2でのガンマ線スペクトル

$^{13}\text{C} + ^{86}\text{Kr}$



# RCNP実験

(3)  $^{86}\text{Kr}$ ビームを用いた反跳核捕獲法

2007年 3月 E287 本実験 予定

# 反跳核捕獲法によるアイソマー探査実験

E287      本実験の予定      2007年3月16日9時から  
24日9時まで

$^{86}\text{Kr}$      $21^+$     7.3 MeV/u

$^{13}\text{C} + ^{86}\text{Kr}$ 反応

阪大理 下田研究室  
阪大RCNPの皆様

理研  
東大CNS  
東北大CYRIC  
JAEA

古川武  
若林泰生  
鈴木智和  
静岡俊行

高純度ゲルマニウム検出器  
(15台使用予定)

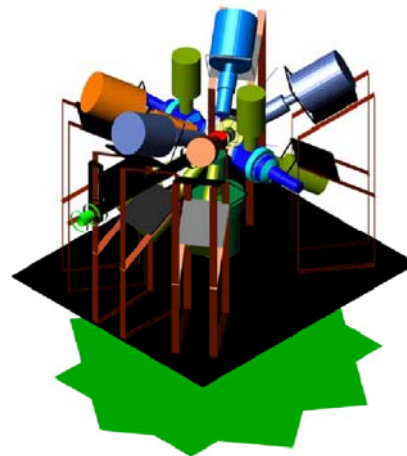
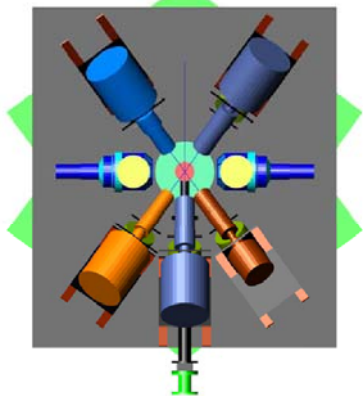
阪大、九大、理研

ストーニーブルック  
(東北大理 田村、小池)

# 本実験でのセットアップ

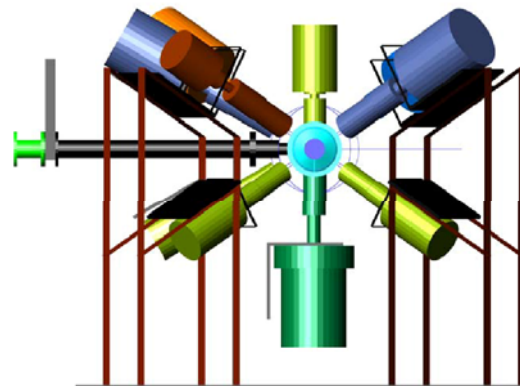
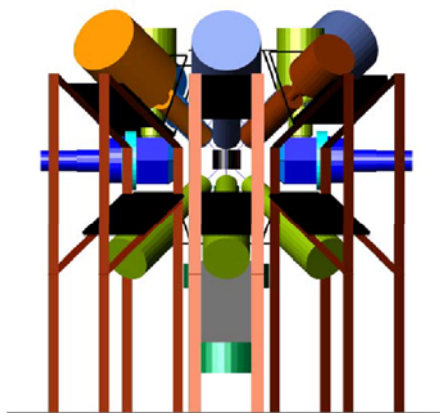
15台のHPGe検出器

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT



PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

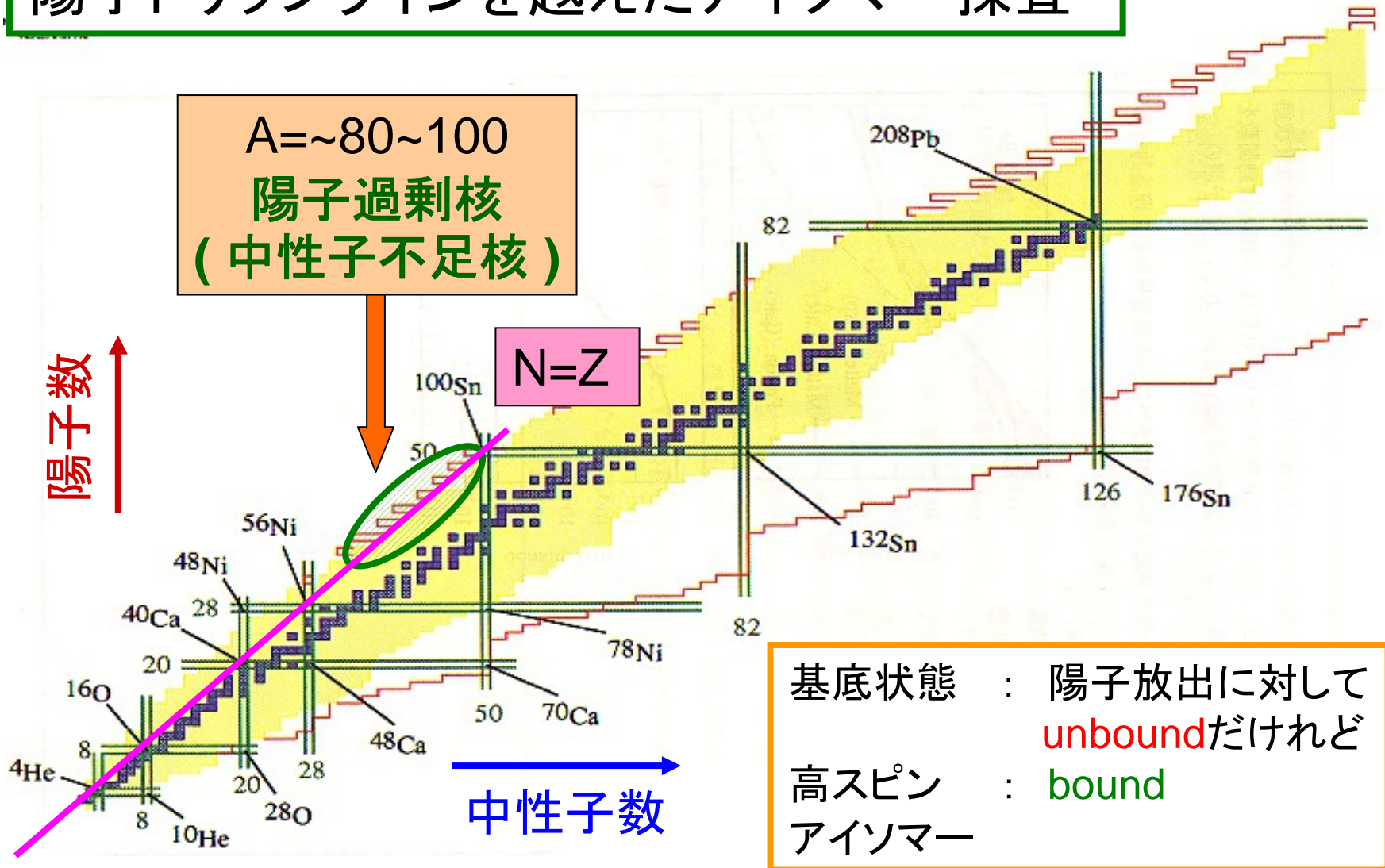
PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT



PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

1. RCNP2次ビームラインENコース
2. 高スピンシェイプアイソマー
3. RCNPでのガンマ線核分光実験
4. 将来計画

# 陽子ドリップライン近傍、または、 陽子ドリップラインを越えたアイソマー探査



# スピングャップアイソマー

陽子ドリップラインを越えた  
高スピンアイソマーの候補

陽子ドリップライン内で観測されている  
スピングャップアイソマーの例

$^{95m}\text{Pd}$

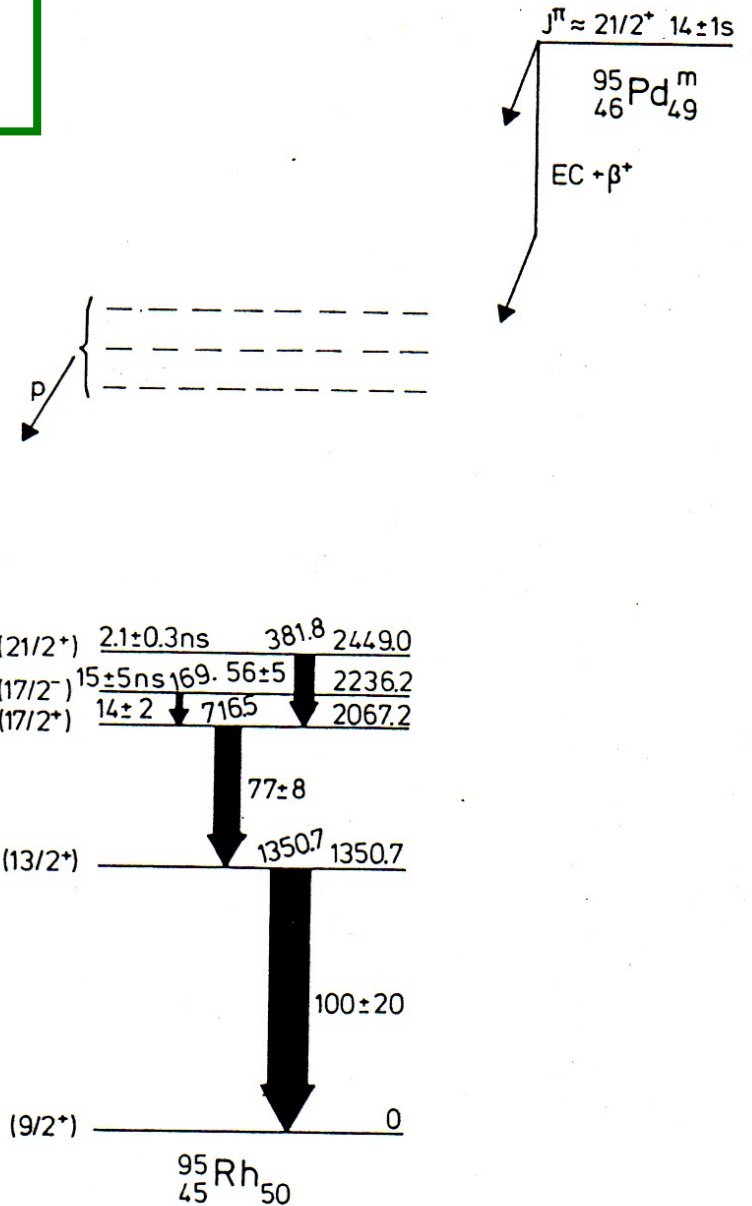
$I = (21/2^+)$ ,  $E_x = \sim 2\text{MeV}$

$T_{1/2} = 13.3\text{s}$

EC +  $\beta^+$  decay

$\beta$  delayed proton decay

E. Nolte et al.,  
Phys. Lett. 97B ( 1980 ) 55

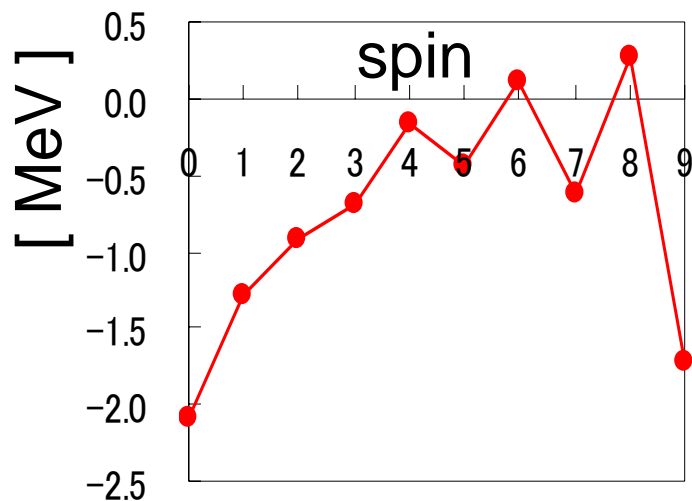


# スピン・ギャップアイソマー

shell model 計算

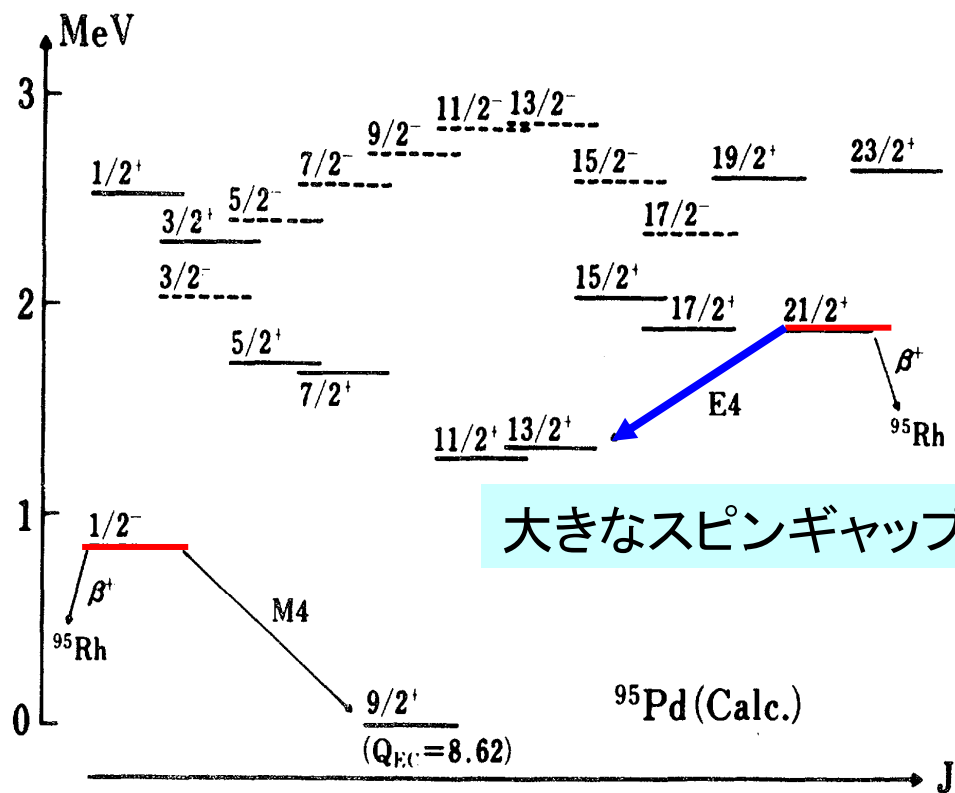
p-n 相互作用の  
2体の行列要素

$$\langle 1g_{9/2}^2 | V | 1g_{9/2}^2 \rangle_J$$



The p-n 相互作用は stretched couplingを好む

$^{95}\text{Pd}$   
スピンギャップアイソマー



大きなスピンギャップ

K. Ogawa  
Phys. Rev. C28 (1983) 958



# decay mode

in case of the  $(21^+)$  isomer in  $^{94}\text{Ag}$

1.  $\beta$ -delayed  $\gamma$  ray

C. Plettner et al., Nucl. Phys. A733 ( 2004 ) 20

2.  $\beta$ -delayed proton

I. Mukha et al., Phys. Rev. C70 ( 2004 ) 044311

3.  $\beta$ -delayed two proton

I. Mukha et al., Eur. Phys. A25, s01 ( 2005 ) 131

4. direct proton

I. Mukha et al., Phys. Rev. Lett. 95 ( 2005 ) 022501

5. direct two proton

I. Mukha et al., Nature 439 ( 2006 ) 298

## まとめ

1. RCNP2次ビームラインENコースと  
AVFサイクロトロン<sup>1</sup>の重イオンビームを用いた $\gamma$ 線核分光
2. 高スピンシェイプアイソマー探査実験  
(N=83, N=51領域)  
2005年 1次ビーム実験( $^{40}\text{Ar}$ ビーム) E277  
2007年 反跳核捕獲法 ( $^{86}\text{Kr}$ ビーム) E287  
ビームテスト実験  
+ 下田研究室4年生実験(2005年度、2006年度)
3. 2007年 3月実験予定 8日間  
反跳核捕獲法 ( $^{86}\text{Kr}$ ビーム) E287
4. 将来計画  
陽子ドリップライン近傍、または、  
陽子ドリップラインを越えた高スピンアイソマー探査