

# ストレージリングでのガンマ線核分光

井手口 栄治

東大CNS

Request:

高スピンの実験系で蓄積リングを使った  
面白い実験の話？

Question ?

ストレージリングとガンマ線核分光との  
マッチング？

ガンマ線核分光 ⇔ 高分解能

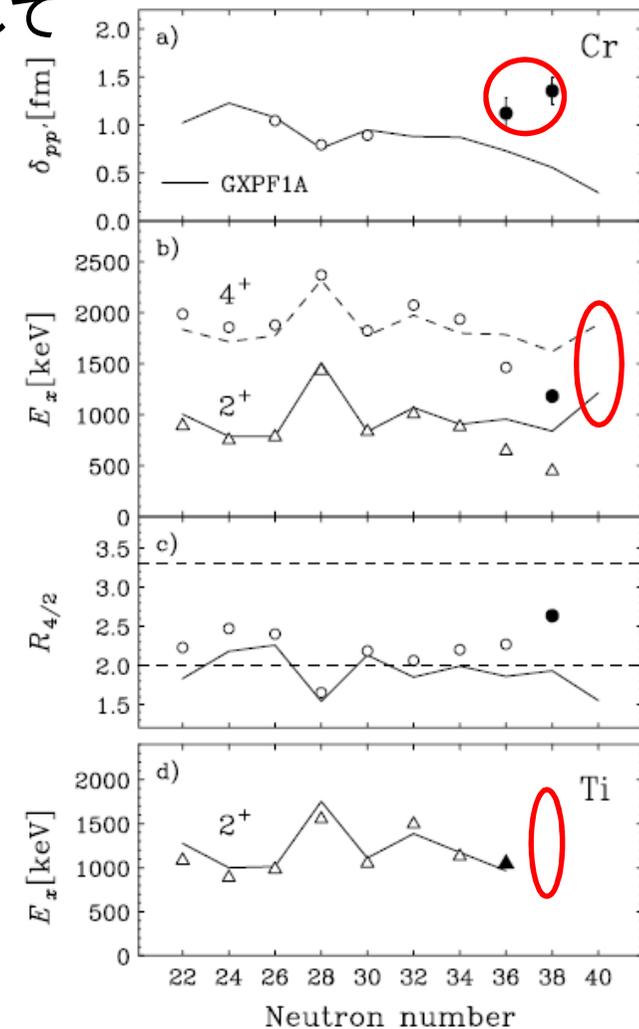
# 核子当り数100MeVの重イオンビーム を用いたガンマ線核分光

- RIビームを(逆運動学で)ターゲットに照射して励起し、不安定核の励起準位を調べる。
- 強度の低いRIビームを厚いターゲットに照射する事で収量を稼ぐ。

- クーロン励起(重い核でatomic B.G.が問題)
- (p,p'), ( $\alpha$ ,  $\alpha'$ ), ( $\alpha$ , t), etc.
- 2次Fragmentation, knockout

## 低励起準位の核分光

- $2^+$ 、 $4^+$ 準位の励起エネルギー
- $Ex(4^+)/Ex(2^+)$
- $B(E2; 2^+ \rightarrow 0^+)$
- 変形長  $\leftarrow$  断面積
- スピン・パリティ  $\leftarrow$  角度分布



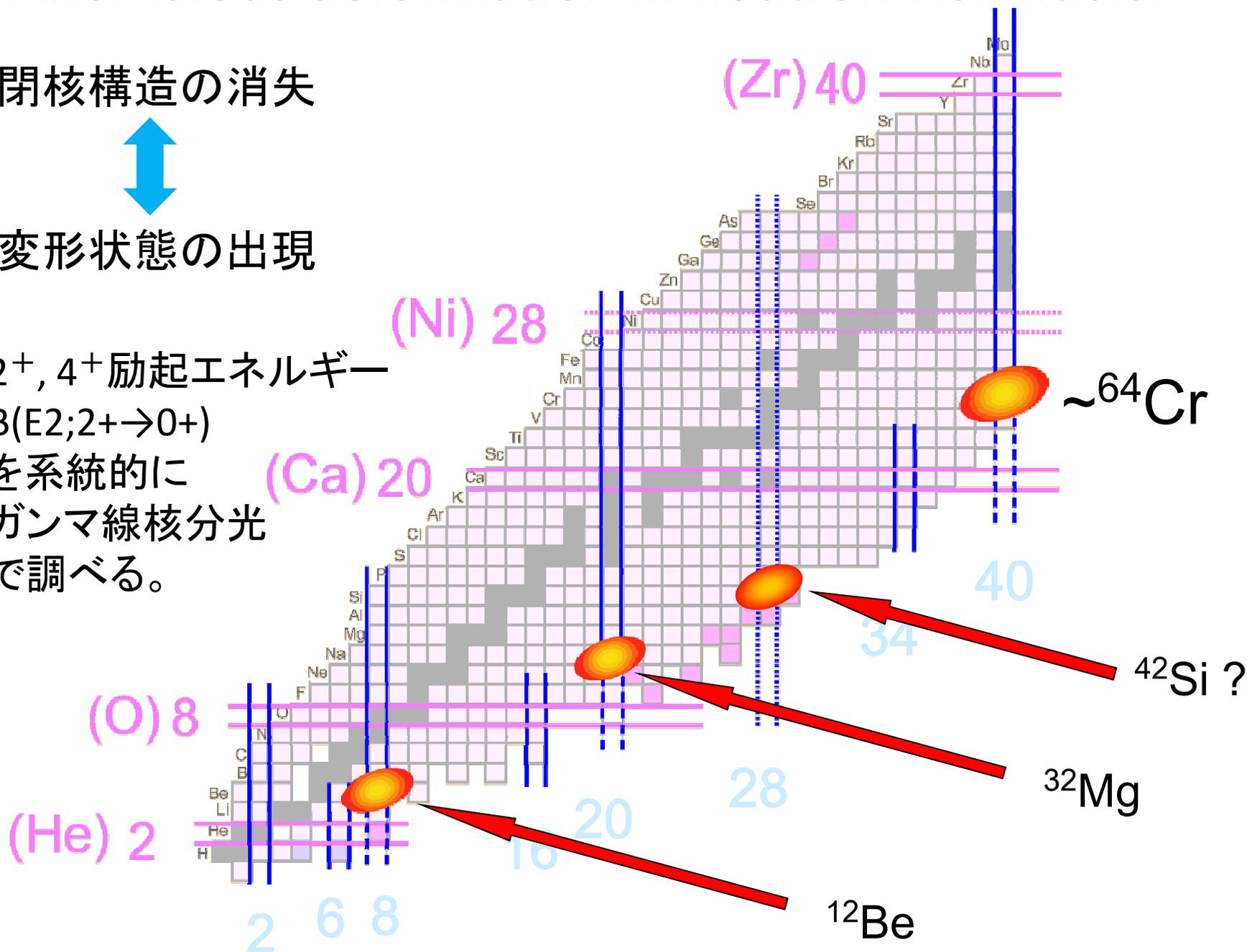
# Anomalous deformation in neutron-rich nuclei

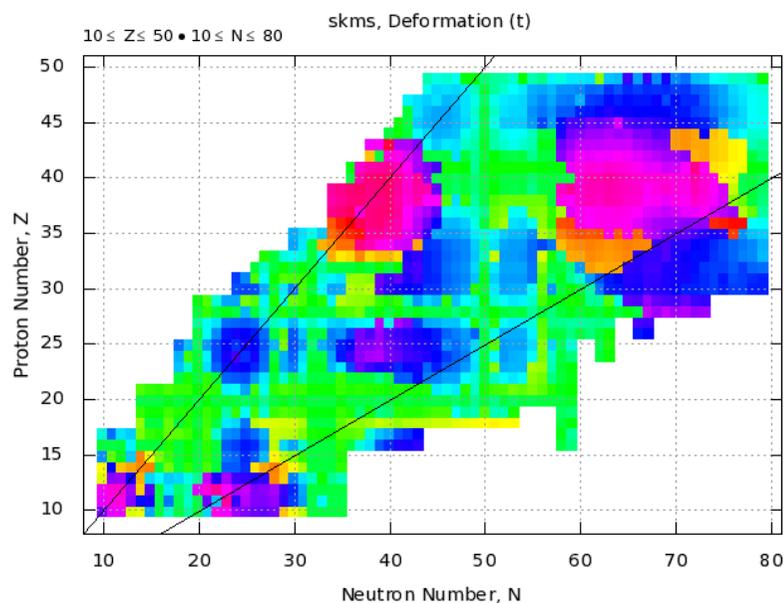
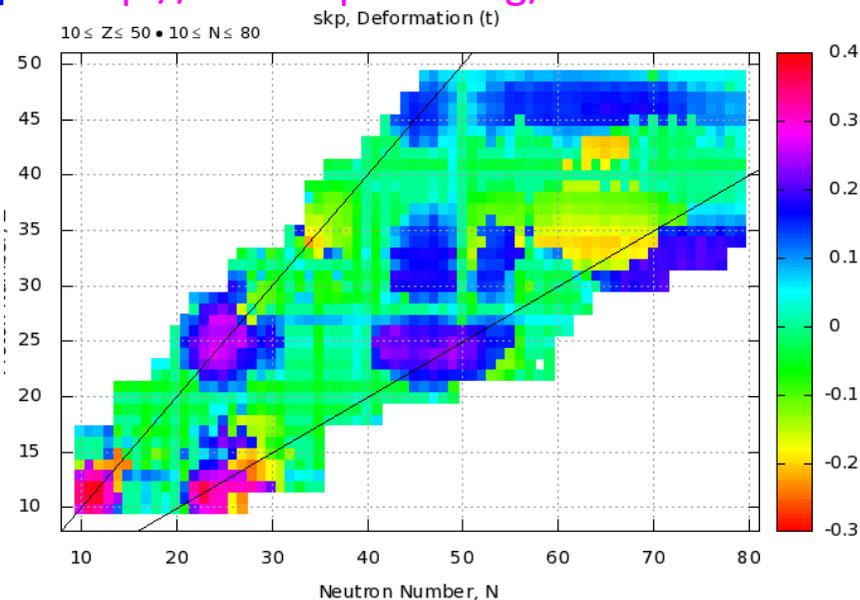
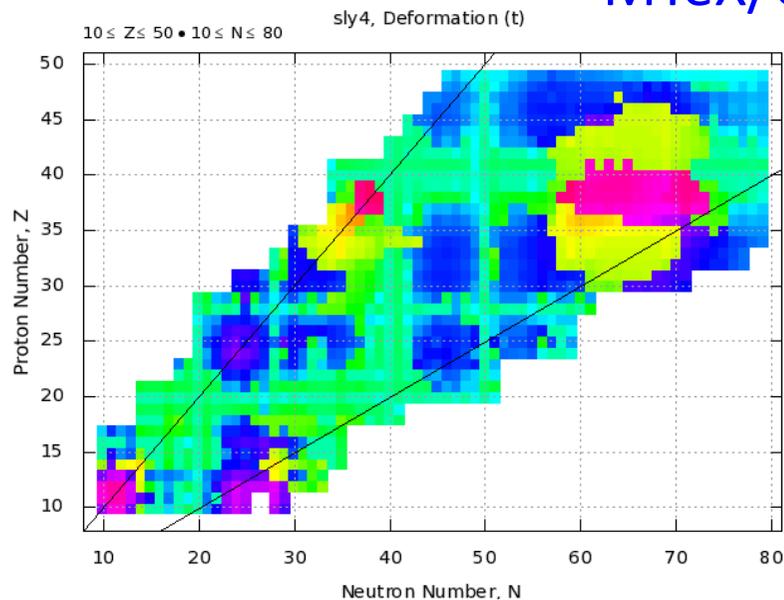
閉核構造の消失



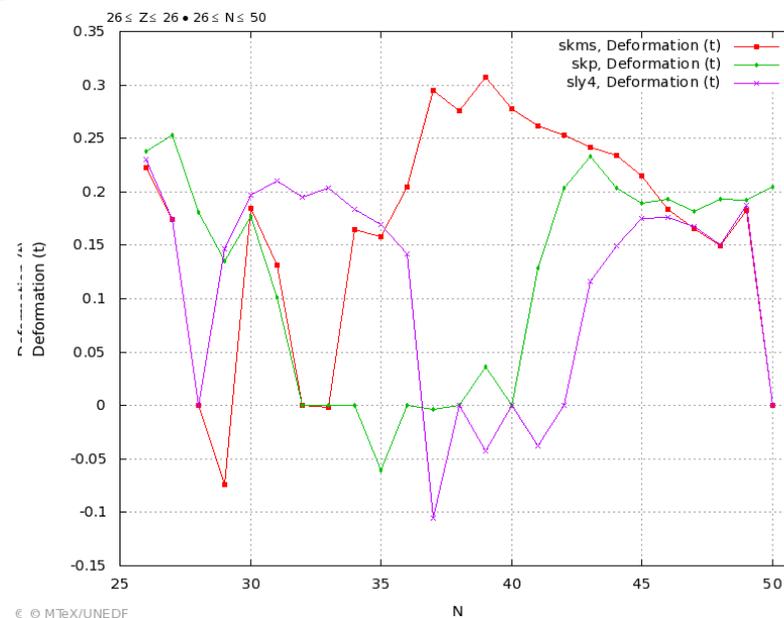
変形状態の出現

$2^+$ ,  $4^+$  励起エネルギー  
 $B(E2; 2^+ \rightarrow 0^+)$   
を系統的に  
ガンマ線核分光  
で調べる。





JEDF



© MTeX/UNEDF

# 中性子過剰A≈110領域でのオブレート変形

F.R. Xu, P.M. Walker, R. Wyss

Phys. Rev. C 65, 021303(R) (2002)

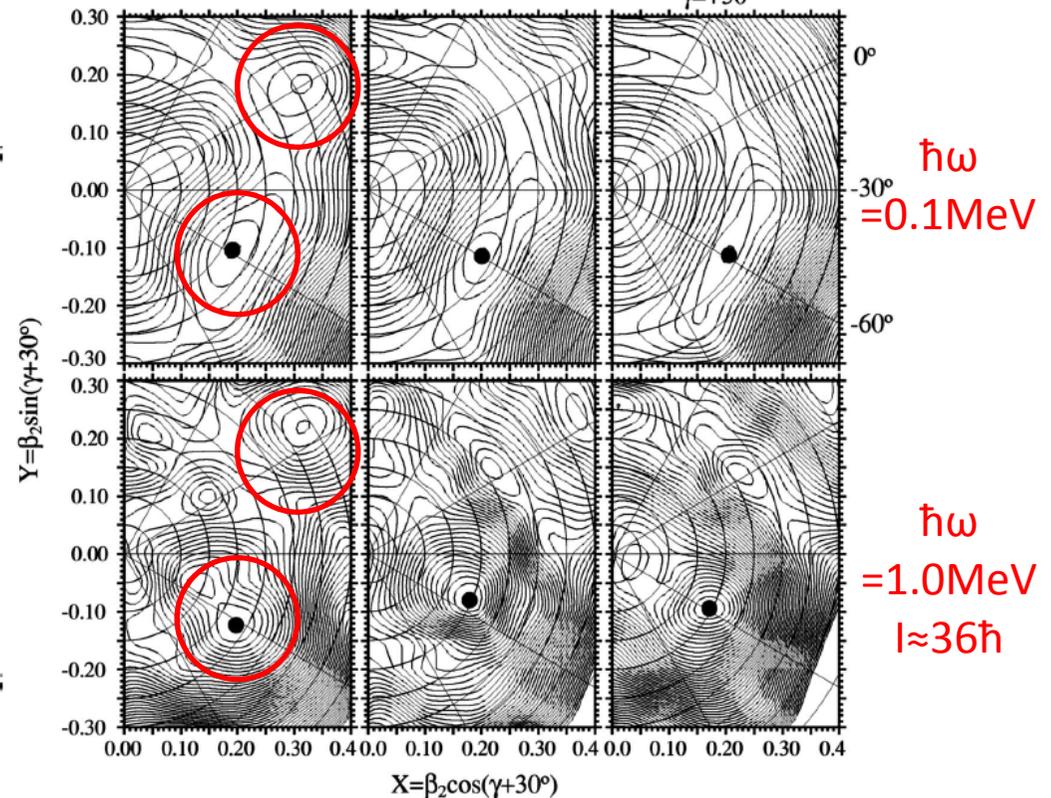
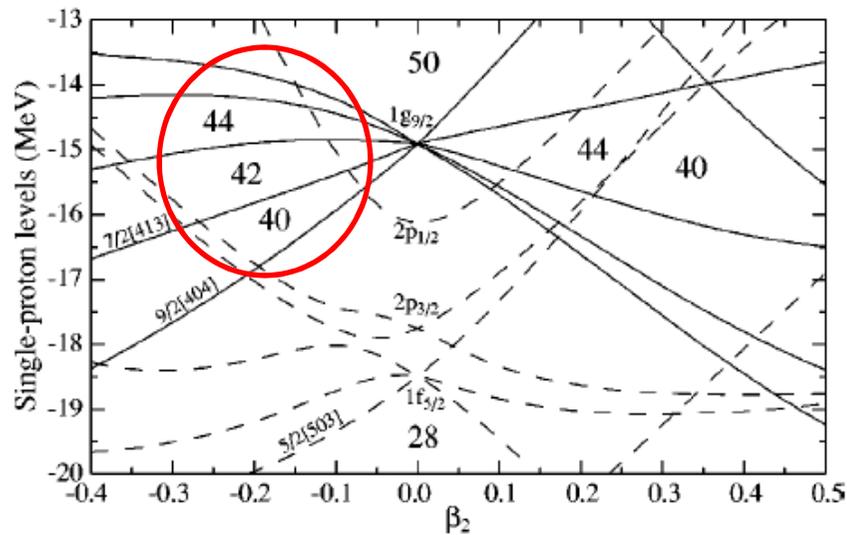
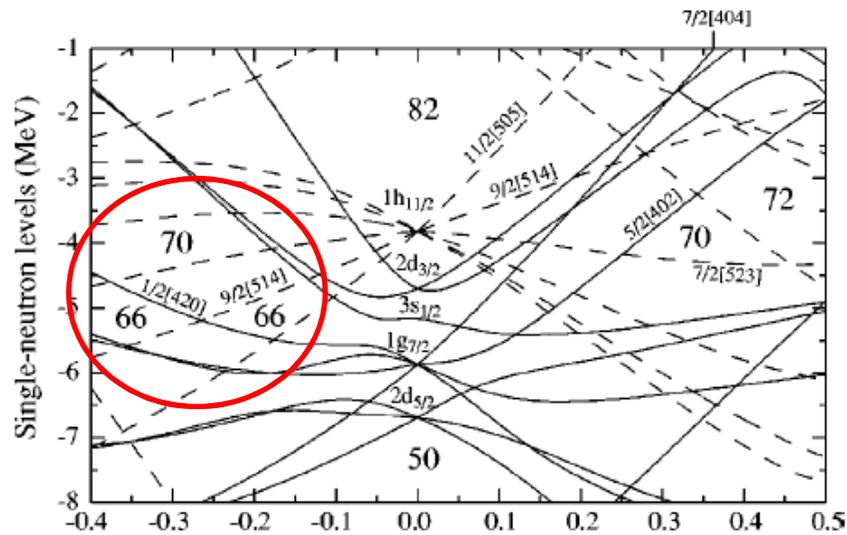
フェルミ面が $40 \leq Z \leq 46$ ,  $66 \leq N \leq 76$

の領域でオブレート変形

TRS計算→プロレート、オブレート変形共存

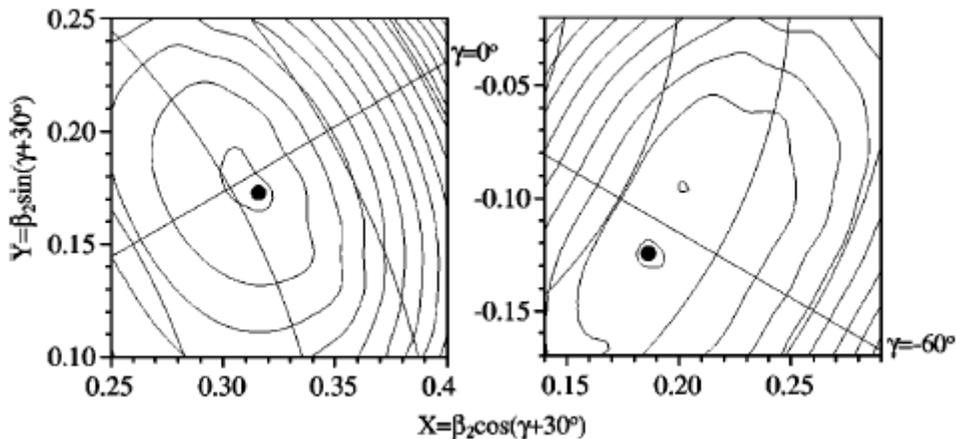
$\beta_2 \approx 0.35$  (プロレート)  $\beta_2 \approx 0.2$  (オブレート)

$^{112}\text{Zr}$        $^{112}\text{Mo}$        $^{114}\text{Ru}$   
 $\gamma = +30^\circ$



F.R. Xu, P.M. Walker, R. Wyss  
 Phys. Rev. C 65, 021303(R) (2002)

A≈110核でのmulti-qp states



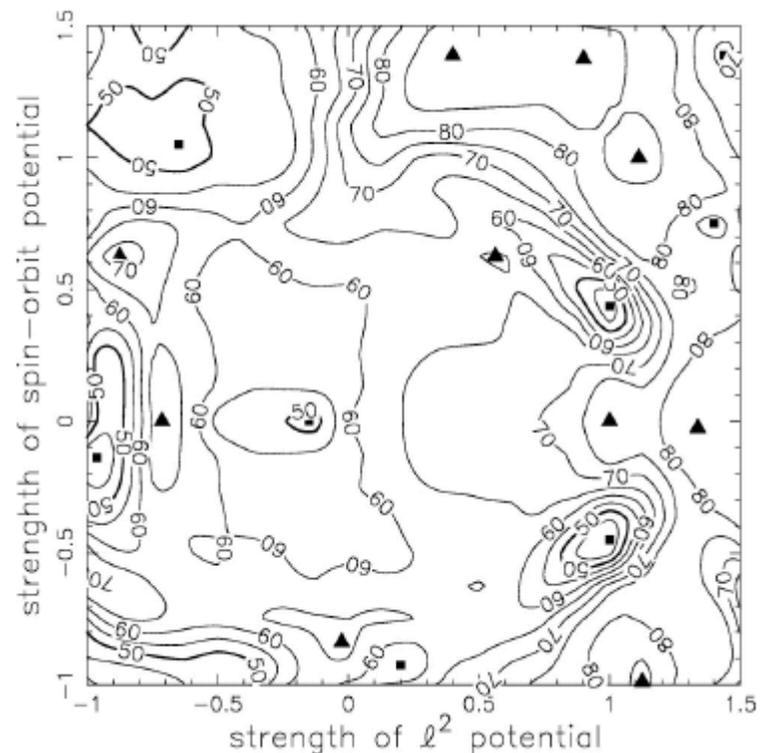
N≤76 Zr (<sup>114</sup>Zr)で  
 prolate minimum  
 $\nu \frac{9}{2} [514] \otimes \frac{5}{2} [402]$   
 K<sup>π</sup> = 7<sup>-</sup>  
 High-Kアイソマー

<sup>106</sup>Zrで  
 oblate minimum  
 $\nu \frac{9}{2} [514] \otimes \frac{1}{2} [420]$   
 K<sup>π</sup> = 5<sup>-</sup>  
 オブレート変形  
 アイソマー

➡ ガンマ線分光で構造変化を明らかに  
 (2<sup>+</sup>、4<sup>+</sup>、変形度)

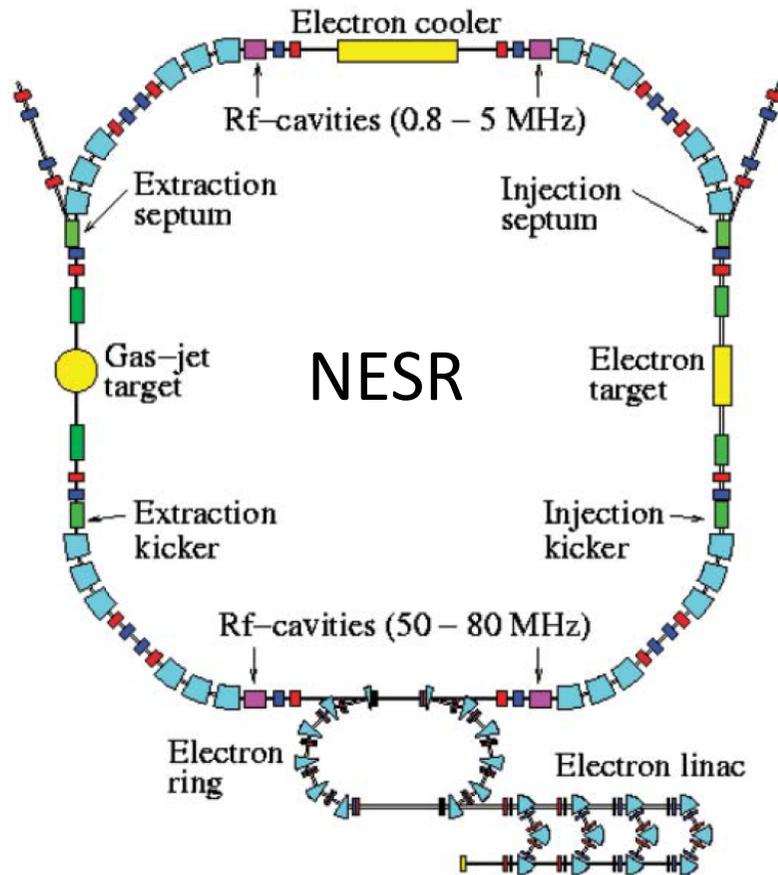
N. Tajima, N. Suzuki  
 Phys. Rev. C 64, 037301 (2001)

変形偶々核でプロレート変形核の数を  
 Nilsson potential のspin-orbitとℓ<sup>2</sup>項の  
 関数としてNilsson-Strutinsky法で計算  
 Rp = Np / (Np + No)  
 standard potential : Rp = 86%  
 spin-orbit項を弱めるとRpが変動



# 参考資料：GSIのストレージリング

B. Franzke et al., Phys. Scr. T104, 124 (2003)



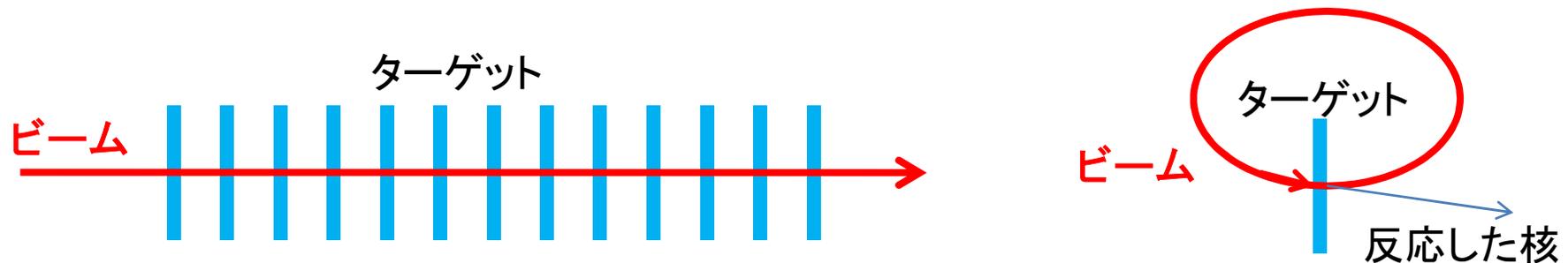
周長： 208.5m  
エネルギー： 200 - 740 MeV/u  
Ions per bunch:  $10^5 - 10^7$

internal H<sub>2</sub>-target  
 $1 \times 10^{14}$  atoms/cm<sup>2</sup>  
→ 液体窒素温度まで冷却すると  
 $1 \times 10^{15}$  atoms/cm<sup>2</sup>

Fig. 3. Preliminary layout of the NESR with major installations for experiments and beam cooling.

# ストレージリングでのガンマ線核分光

- 同一粒子を内部ターゲットで反応させて何度も周回させる訳ではない。
- それなりに多くの粒子を周回させ、統計量を稼ぐ。
- 内部ターゲットで反応しなかった粒子を何度も周回させて、ある確率で反応させる。
- 反応した粒子からの脱励起ガンマ線を測定
- 1000個を1000回周回させれば実効的に $10^6$ 個の粒子をターゲットに照射する事に相当



# NESR相当のストレージリングの場合

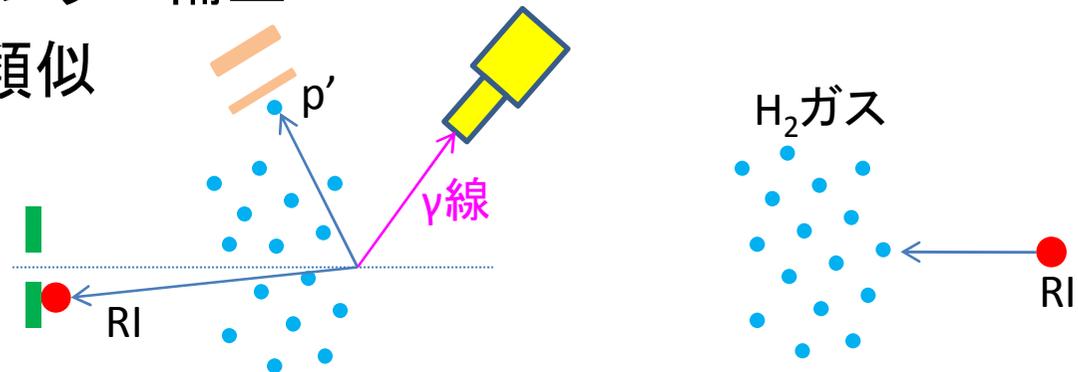
- H<sub>2</sub>内部ターゲット:  $1 \times 10^{14}$  atoms/cm<sup>2</sup>
- 周長 = 208.5m
- エネルギー 200MeV/u → 1周 1.2μs
- 1秒当たり  $8.3 \times 10^5$  周回
- 実効的なターゲット厚 =  $8 \times 10^{19}$  atom/cm<sup>2</sup>  
= 0.13mg/cm<sup>2</sup> /s
- <sup>32</sup>Mg(p,p'), 2<sup>+</sup>準位の場合  $\sigma = 47.6$  mb
- <sup>32</sup>Mgビーム量 =  $10^5$  pps、 $\epsilon_{\gamma(\text{photo})} \sim 10\%$  とすると
- ガンマ線光電ピーク収量 = 3200個/day

# ガンマ線の測定方法

- H<sub>2</sub>ガス内部ターゲットで反応後の反跳陽子を検出し、ベクトル(できればエネルギーも)を決める。
- 散乱ビームを検出(方向とエネルギー)
- 可能なら入射ビームのベクトルを決める。
- 反応点を同定
- 散乱ビームもしくは運動学によりガンマ線放出核のベクトルを決める。
- トラッキング型Ge検出器でガンマ線の出射方向を同定

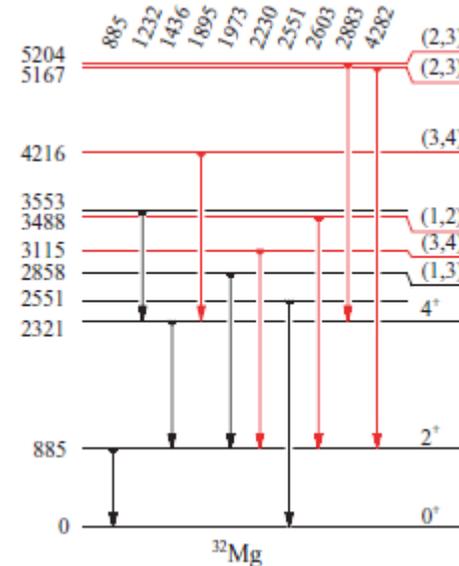
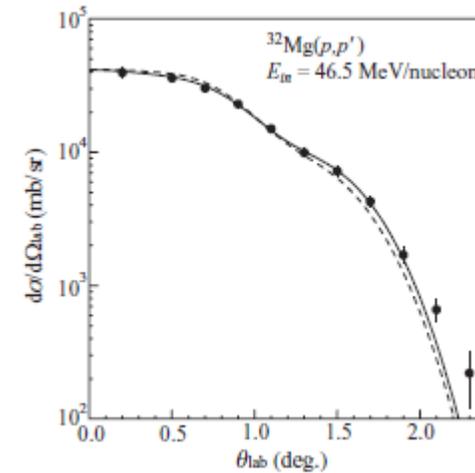
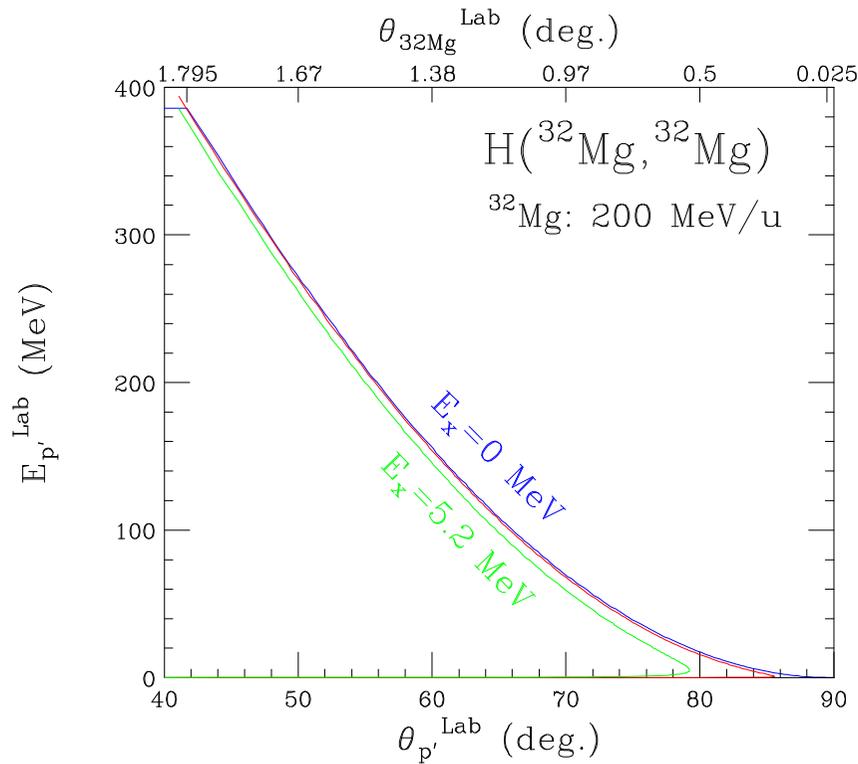
上記の情報をもとにドップラー補正

:アクティブターゲットと類似



# 反跳陽子のエネルギー、角度分布

## $^{32}\text{Mg}(p,p')$ 、 $E(^{32}\text{Mg})=200\text{A MeV}$ の場合



S. Takeuchi et al., PRC79, 054319 (2009)

# ドップラー広がり

$$E_{\gamma}^{cm} = \gamma(1 - \beta \cos \theta_{\gamma}^{lab}) E_{\gamma}^{lab}$$

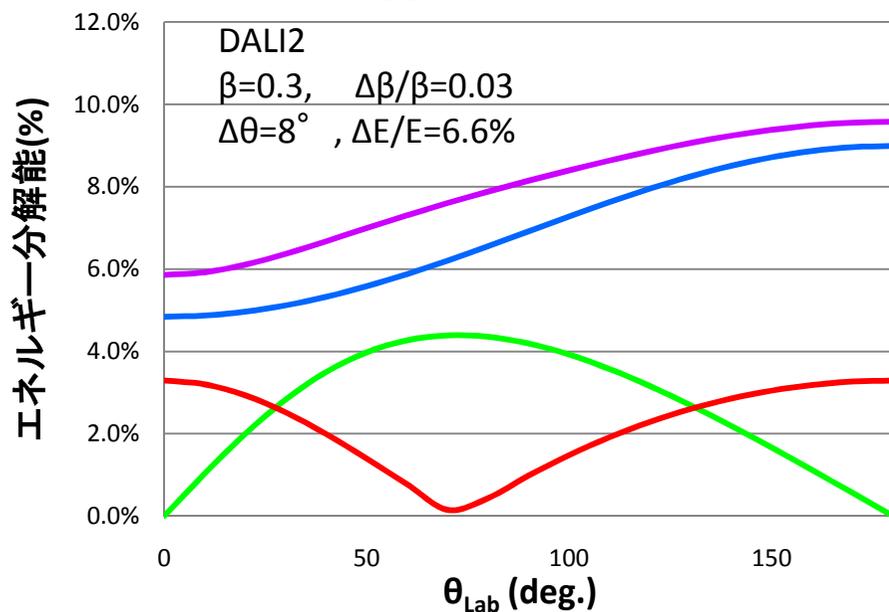
$$\left(\frac{\Delta E_{\gamma}^{cm}}{E_{\gamma}^{cm}}\right)^2 = \left(\frac{\Delta E_{\gamma}^{lab}}{E_{\gamma}^{lab}}\right)^2 + \left(\frac{\beta \gamma^2 (\beta - \cos \theta_{\gamma}^{lab})}{1 - \beta \cos \theta_{\gamma}^{lab}}\right)^2 \left(\frac{\Delta \beta}{\beta}\right)^2 + \left(\frac{\beta \sin \theta_{\gamma}^{lab}}{1 - \beta \cos \theta_{\gamma}^{lab}}\right)^2 (\Delta \theta_{\gamma}^{lab})^2$$

固有分解能

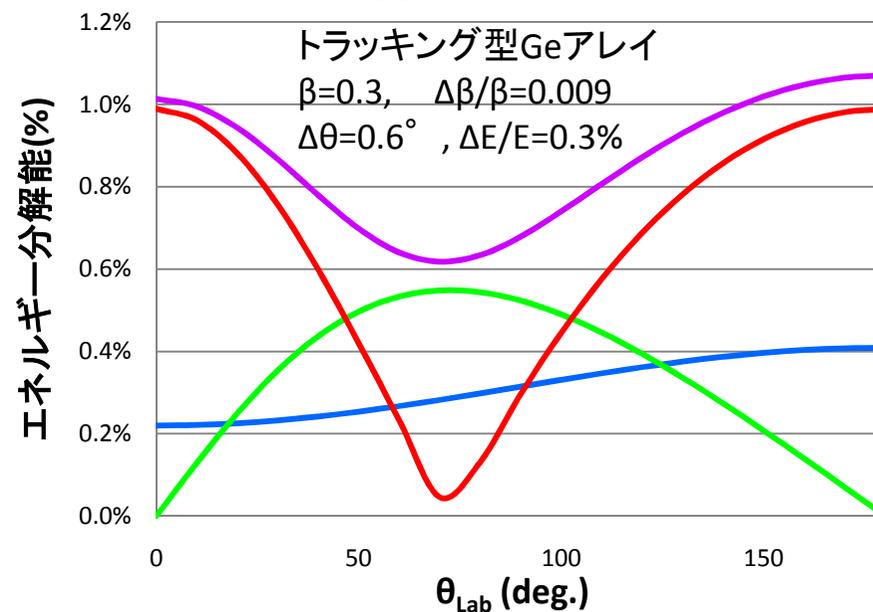
ビーム速度、ターゲット厚

検出器の立体角

Doppler広がり



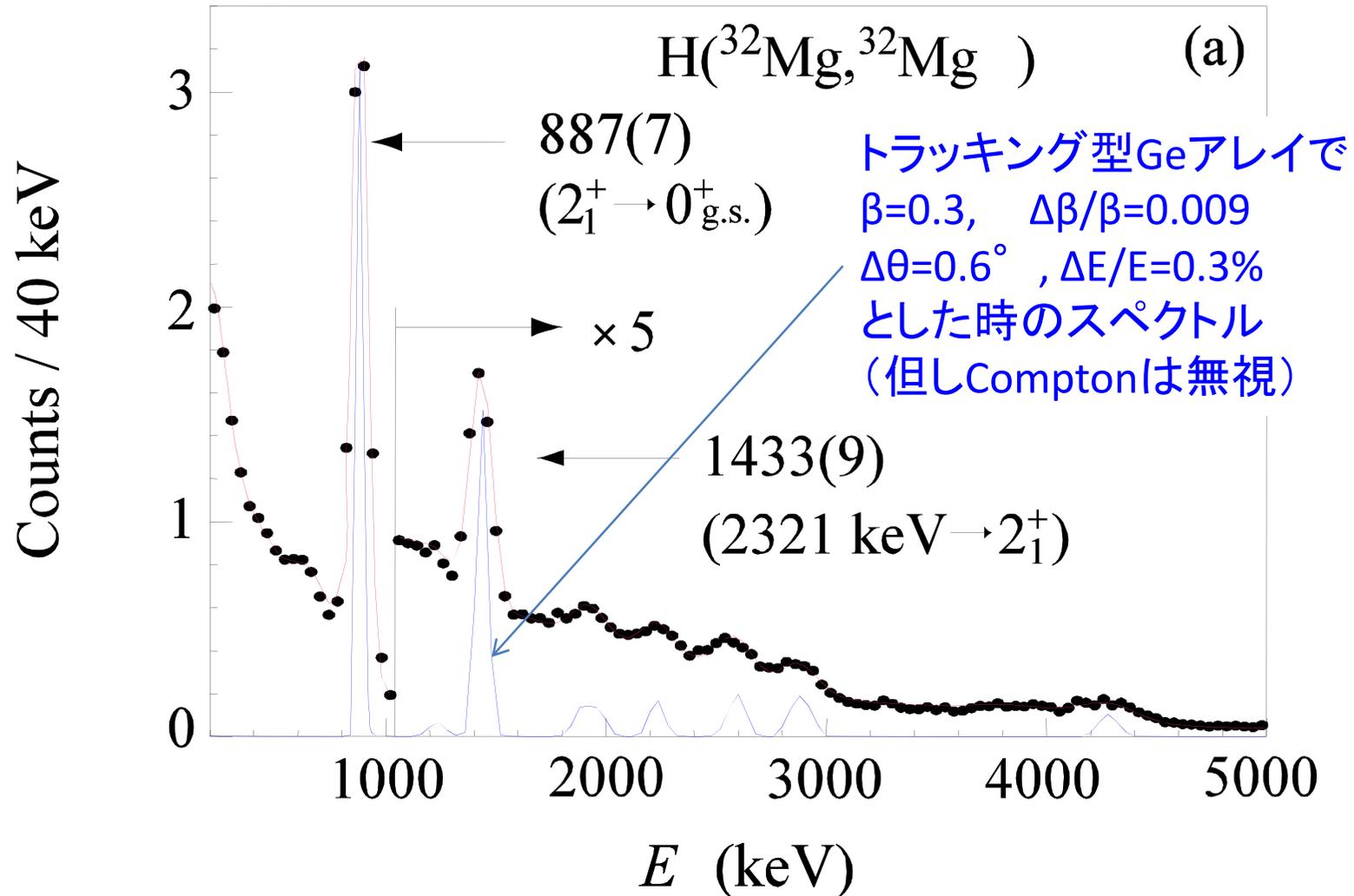
Doppler広がり



# ガンマ線スペクトル

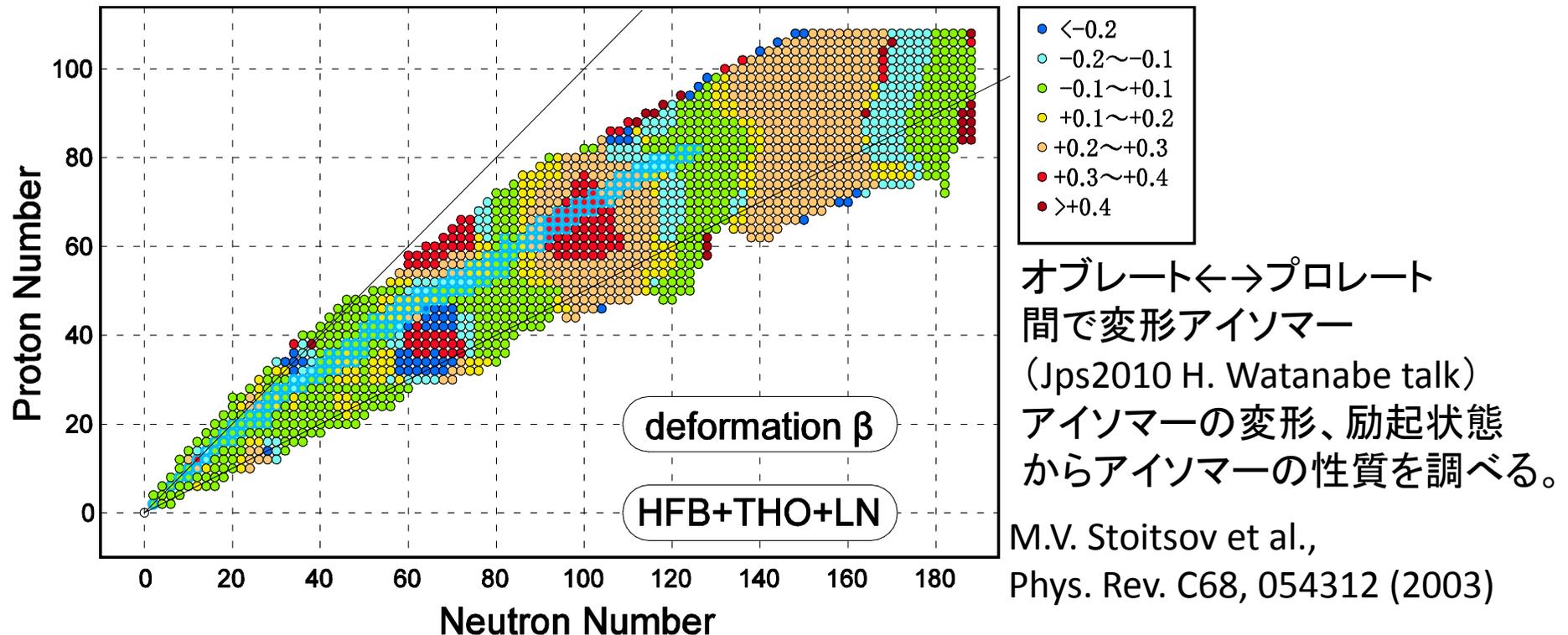
$\times 10^4$

S. TAKEUCHI *et al.* PHYSICAL REVIEW C 79, 054319 (2009)



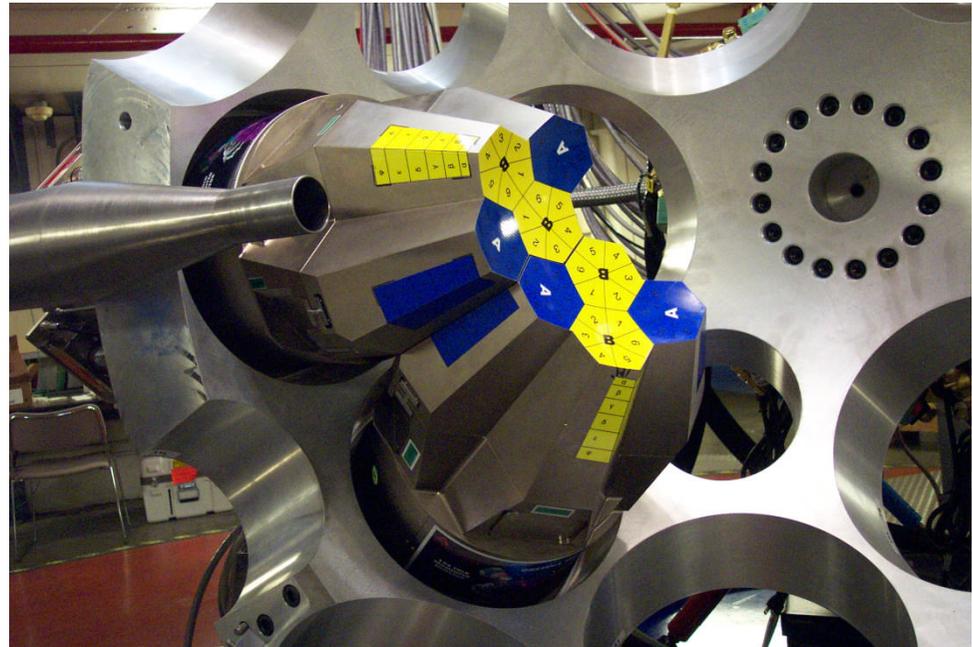
# 思いつき

- 寿命測定(ある程度長い場合)
  - 反応点(粒子検出)とガンマ線(トラッキングGe)の放出点を独立に導出して飛行距離→寿命
- アイソマーの上の励起準位構造、変形長
- 4AMeVのRIビーム+ガス標的で多重クーロン励起？



# ストレージリング以外に必要な装置

- H<sub>2</sub> internal target
- トラッキング型ガンマ線検出器
- 反跳陽子検出器
- 散乱ビーム検出器



# まとめ

- ストレージリングでのinternal H<sub>2</sub>ターゲットを用いて (p,p'γ)により不安定核の励起状態生成
- 反跳粒子検出器とガンマ線のトラッキング検出器を導入する事で従来達成できなかった高分解能ガンマ線核分光が実現出来るかもしれない。
  - 特に重い不安定核には重要
- 今後の更なる詳細な検討が必要
  - Internal target
  - トラッキング型Ge検出器
  - 散乱粒子検出器(ビーム、反跳陽子)