

# RCNPにおける不安定核ビームによる 核融合反応を用いた高スピン状態の研究

大阪大学大学院理学研究科

鈴木智和、壽賀正城、高島杏奈、風戸正行、倉健一郎、  
田尻邦彦、増江俊行、堀稔一、小田原厚子、下田正

東京大学 CNS

若林泰生、井手口栄治

理研

郷農靖之

March 23, 2007 近畿大学

# 原子核における自発的対称性の破れ

$$[Q, H] = 0$$

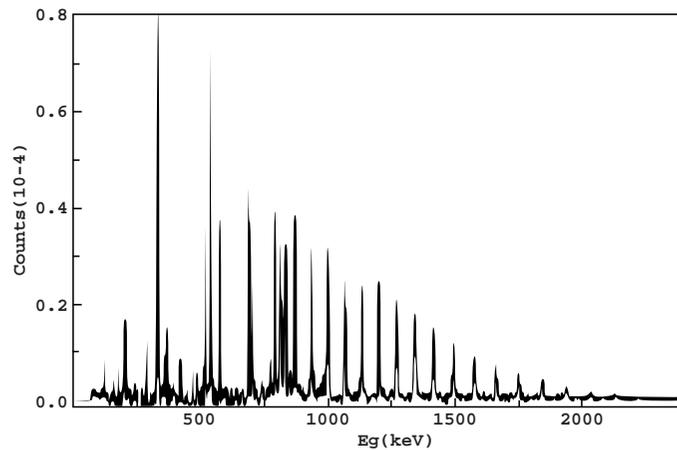
$$H |n\rangle = E_n |n\rangle$$

$$H (Q |n\rangle) = QH |n\rangle = E_n (Q |n\rangle)$$

原子核の自発的対称性の破れは  
ガンマ線スペクトルにあらわれる

- 回転バンド

⇒ 回転対称性の破れ (4 重極変形)



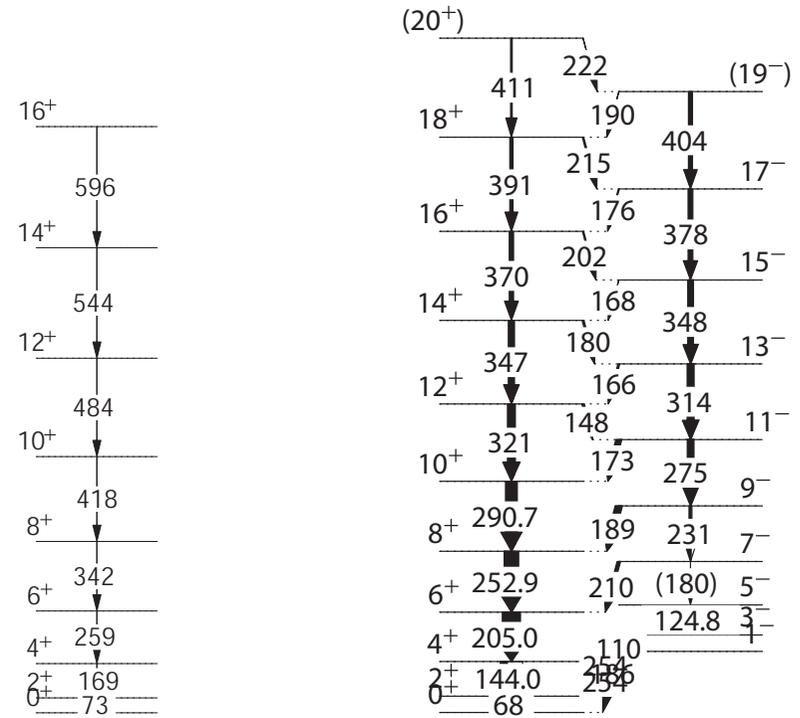
(<sup>132</sup>Ce の回転スペクトル、Liverpool 大学 Web サイトより)

- パリティ二重項

⇒ パリティ対称性の破れ (8 重極変形)

- カイラル二重項

⇒ カイラル対称性の破れ? (3 軸非対称変形)



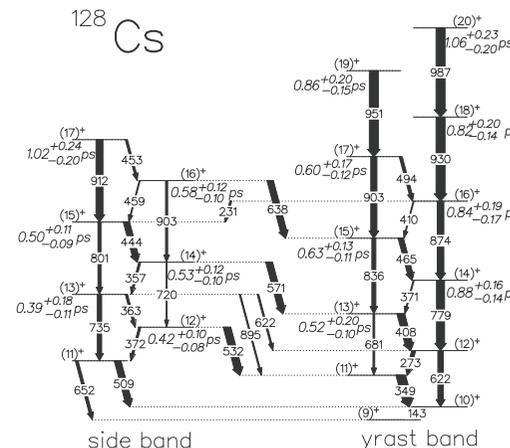
回転バンド

<sup>164</sup>Dy

パリティ二重項

<sup>226</sup>Ra

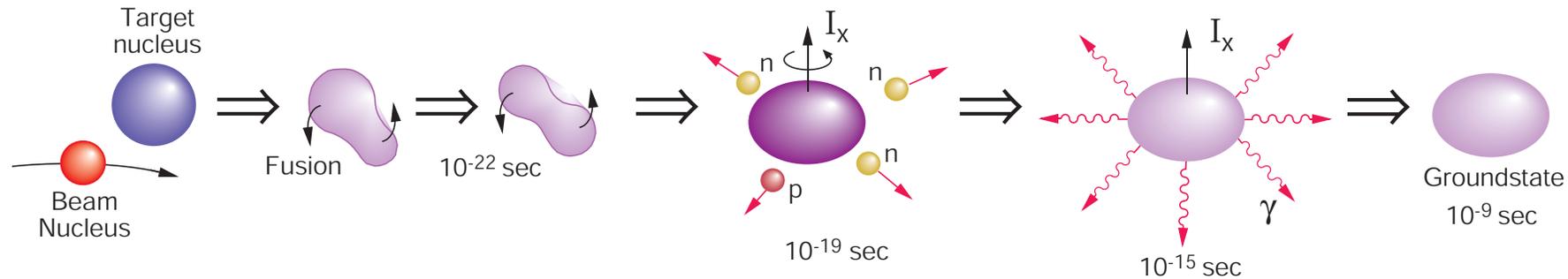
From <http://radware.phy.ornl.gov/>



カイラル二重項?

From E. Grodner et. al. Phys. Rev. Lett. 97 172501 (2006)

# 高スピン状態の生成



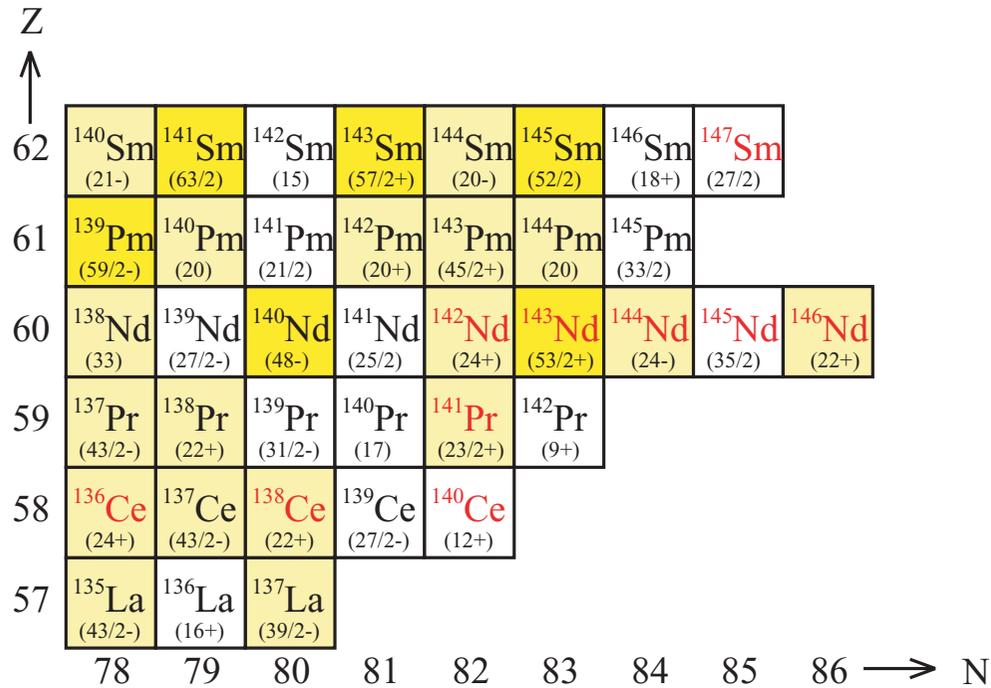
- 一般的には重イオン核融合反応が用いられる
  - 角運動量を持ち込みやすい
- 安定核ビームを使った高スピン状態の生成
  - 安定線より陽子過剰側の原子核しか生成できない。
  - 陽子過剰な安定核ビームとターゲットを用いて陽子過剰な不安定領域を生成できる。
  - 陽子過剰側では反跳核を分析することで  $\sim \mu\text{b}$  オーダーの断面積でも観測が可能。
  - 安定線より中性子過剰な核は生成が不可能

Nd137 38.5 m 1/2+ *	Nd138 5.04 h 0+ *	Nd139 29.7 m 3/2+ *	Nd140 3.37 d 0+ *	Nd141 2.49 h 3/2+ *	Nd142 0+ 27.13	Nd143 7/2- 12.18	Nd144 2.29E+15 y 0+ $\alpha$ 23.80	Nd145 7/2- 8.30	Nd146 0+ 17.19	Nd147 10.98 d 5/2- $\beta$	Nd148 0+ 5.76	Nd149 1.728 h 5/2- $\beta$	Nd150 1.1E19 y 0+ $\beta$ 5.64	Nd151 12.44 m 3/2+ $\beta$
Pr136 13.1 m 2+ *	Pr137 1.28 h 5/2+ *	Pr138 1.45 m 1+ *	Pr139 4.41 h 5/2+ *	Pr140 3.39 m 1+ *	Pr141 5/2+ 100	Pr142 19.12 h 2- *	Pr143 13.57 d 7/2+ $\beta$	Pr144 17.28 m 0- $\beta$	Pr145 5.984 h 7/2+ $\beta$	Pr146 24.15 m (2)- $\beta$	Pr147 13.4 m (3/2)- $\beta$	Pr148 2.27 m 1- *	Pr149 2.26 m (5/2+) $\beta$	Pr150 6.19 s (1)- $\beta$
Ce135 17.7 h 1/2(+) *	Ce136 0+ 0.19	Ce137 9.0 h 3/2+ *	Ce138 0+ 0.25	Ce139 137.640 d 3/2+ *	Ce140 0+ 88.48	Ce141 32.501 d 7/2- $\beta$	Ce142 5E+16 y 0+ $\beta$ 11.08	Ce143 33.039 h 7/2- $\beta$	Ce144 284.893 d 0+ $\beta$	Ce145 3.91 m (3/2)- $\beta$	Ce146 13.52 m 0+ $\beta$	Ce147 56.4 s (5/2)- $\beta$	Ce148 56 s 0+ $\beta$	Ce149 5.3 s (3/2)- $\beta$
La134 6.45 m 1+ *	La135 19.5 h 5/2+ *	La136 9.87 m 1+ *	La137 6E4 y 7/2+ *	La138 1.05E+11 y 5+ EC, $\beta$ 0.0902	La139 7/2+ 99.9098	La140 1.6781 d 3- $\beta$	La141 3.52 h (7/2+) $\beta$	La142 91.1 m 2- $\beta$	La143 24.2 m (7/2)- $\beta$	La144 40.8 s (3)- $\beta$	La145 24.8 s (5/2+) $\beta$	La146 6.27 s 2- *	La147 4.015 s (5/2+) $\beta$	La148 1.05 s (2)- $\beta$
Ba133 10.51 y 1/2+ *	Ba134 0+ 2.417	Ba135 3/2+ 6.592	Ba136 0+ 7.854	Ba137 3/2+ 11.23	Ba138 0+ 71.76	Ba139 89.06 m 7/2- $\beta$	Ba140 12.752 d 0+ $\beta$	Ba141 18.27 m 3/2- $\beta$	Ba142 10.6 m 0+ $\beta$	Ba143 14.33 s 5/2- $\beta$	Ba144 11.5 s 0+ $\beta$	Ba145 4.31 s 5/2- $\beta$	Ba146 2.22 s 0+ $\beta$	Ba147 0.893 s (3/2+) $\beta$
Cs132 6.479 d 2+ *	Cs133 7/2+ 100	Cs134 2.0648 y 4+ *	Cs135 2.3E+6 y 7/2+ *	Cs136 13.16 d 5+ *	Cs137 30.07 y 3- *	Cs138 33.41 m 3- *	Cs139 9.27 m 7/2+ $\beta$	Cs140 63.7 s 1- $\beta$	Cs141 24.94 s 7/2+ $\beta$	Cs142 1.70 s 0- $\beta$	Cs143 1.78 s 3/2+ $\beta$	Cs144 1.01 s 1- *	Cs145 0.594 s 3/2+ $\beta$	Cs146 0.321 s 1- $\beta$
Xe131 3/2+ 21.2	Xe132 0+ 26.9	Xe133 5.243 d 3/2+ $\beta$	Xe134 0+ 10.4	Xe135 9.14 h 3/2+ $\beta$	Xe136 2.36E21 y 0+ $\beta$	Xe137 3.818 m 7/2- $\beta$	Xe138 14.08 m 0+ $\beta$	Xe139 39.68 s 3/2- $\beta$	Xe140 13.60 s 0+ $\beta$	Xe141 1.73 s 5/2(-) $\beta$	Xe142 1.22 s 0+ $\beta$	Xe143 0.30 s 5/2- $\beta$	Xe144 1.15 s 0+ $\beta$	Xe145 0.9 s $\beta$
I130 12.36 h 5+ *	I131 8.02070 d 7/2+ *	I132 2.295 h 4+ *	I133 20.8 h 7/2+ *	I134 32.5 m (4)+ $\beta$	I135 6.57 h 7/2+ $\beta$	I136 83.4 s (1)- $\beta$	I137 24.5 s (7/2+) $\beta$	I138 6.49 s (2)- $\beta$	I139 2.29 s (7/2+) $\beta$	I140 0.86 s (4) $\beta$	I141 0.43 s $\beta$	I142 $\beta$	I143 $\beta$	I144 $\beta$
Te129 69.6 m 3/2+ $\beta$	Te130 7.9E20 y 0+ $\beta$ 33.80	Te131 25.0 m 3/2+ $\beta$	Te132 3.204 d 0+ $\beta$	Te133 12.5 m (3/2+) $\beta$	Te134 41.8 m 0+ $\beta$	Te135 19.0 s (7/2-) $\beta$	Te136 17.5 s 0+ $\beta$	Te137 2.49 s (7/2-) $\beta$	Te138 1.4 s 0+ $\beta$	Te139 2.29 s $\beta$	Te140 0+ $\beta$	Te141 0+ $\beta$	Te142 0+ $\beta$	

# 中性子過剰核の高スピン状態へのアプローチ

- 中性子過剰になると殻構造が変化する？
  - cf. 低スピン領域でも "Island of Inversion"
    - ⇒  $^{28,29}\text{Mg}$  の殻構造の研究
    - 24aZF1 K. Kura, 24aZF2 K. Tajiri
- $A \sim 140$  領域で知られている高スピン状態

- 中性子過剰な不安定核ビームを用いる
  - ビーム量が少ない (安定核:  $\sim 10^9$  個、不安定核:  $\sim 10^4$  個)
  - 粒子識別 (装置、方法)
  - ビームの広がり (エネルギー幅、光学)



RCNP E287

N=83同調体に見られる高スピンアイソマー

$$\frac{(67/2, 71/2)}{10.286+x} \\ 420\text{ns}$$



$$\frac{49/2^+}{35\text{ns}} \frac{8.989}{(27^+)} \frac{(49/2^+)}{8.597} \frac{8.786}{0.96\infty\text{s}} \frac{(27^+)}{8.649} \frac{49/2^+}{10\text{ns}} \frac{8.588}{510\text{ns}} \frac{(27^+)}{8.620} \frac{49/2^+}{1.310\infty\text{s}} \frac{8.523}{28\text{ns}} \\ \frac{8.033+y}{751\text{ns}}$$

シェイプアイソマー  
球形からオブレートへ急激に  
変化するため生じる

安定核同士での  
高スピン状態の  
生成が困難

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

$$\frac{21/2^+}{2.760} \frac{4.4\text{ns}}{(27/2^-)} \frac{0.5\text{s}}{2.661} \frac{84\text{ns}}{(17^+)} \frac{2.625+y}{27/2^-} \frac{0.6\text{s}}{2.586}$$

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

$$\frac{13/2^+}{1.228} \frac{5.750\text{ns}}{9^+} \frac{0.71\infty\text{s}}{0.841} \frac{13/2^+}{1.105} \frac{14\text{ns}}{235\infty\text{s}} \frac{9^+}{0.666} \frac{13/2^+}{0.997} \frac{22\text{ns}}{7^+} \frac{11^-}{1.096} \frac{22\text{ns}}{13/2^+} \frac{12.5\text{ns}}{1.073} \frac{18\text{ns}}{(11^-)} \frac{1.096+y}{13/2^+} \frac{10\text{ns}}{1.140}$$

$$\frac{7/2^-}{\text{stable}} \frac{0}{7/2^-} \frac{363\text{d}}{0} \frac{340\text{d}}{0} \frac{4^-}{4.59\text{d}} \frac{7/2^-}{0} \frac{38.1\text{h}}{0} \frac{9^+}{0} \frac{4.5\text{ns}}{0.328} \frac{4^-}{0} \frac{80\text{ns}}{0.110} \frac{7/2^-}{0} \frac{4.23\text{m}}{0} \frac{9^+}{(2,3)} \frac{23.3\text{s}}{72\text{h}} \frac{y}{x} \frac{7/2^-}{23.5\text{s}} \frac{0}{0}$$



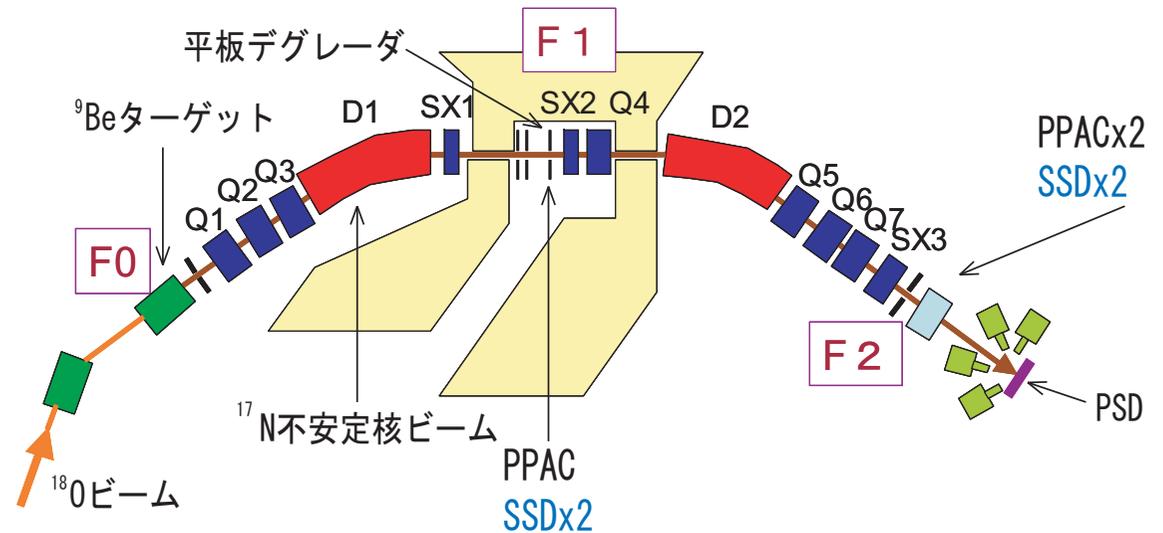
← 中性子過剰側



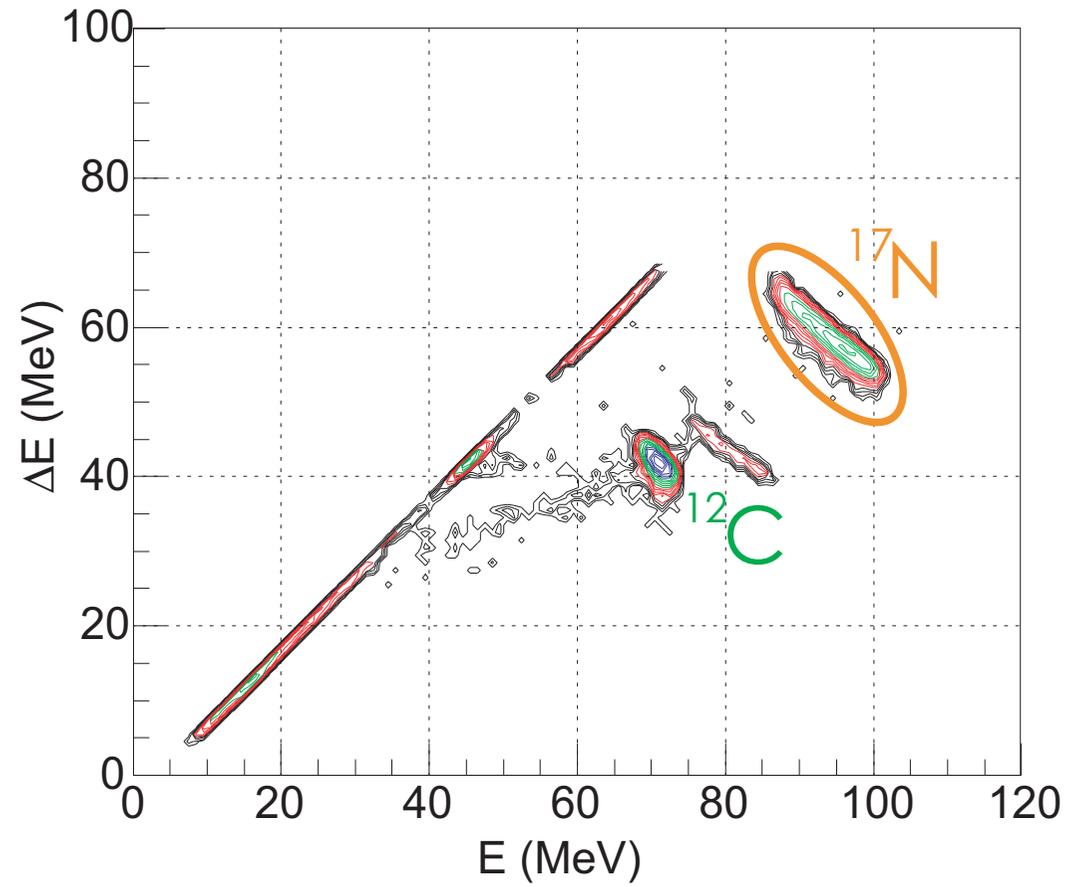
陽子過剰側 →

## E287 実験へのビーム開発

- 核物理センターの重イオン用 ECR イオン源と EN コースを用いることで重イオン不安定核ビームの生成が可能
- $^{142}\text{Pr}$  を目標に不安定核ビームの開発を行う
  - 一次反応  $^9\text{Be}(^{18}\text{O}, ^{17}\text{N})^{10}\text{B}$   
 $\implies ^{17}\text{N}$  不安定核ビームを直接反応で生成 ( $E_{^{18}\text{O}} = 9.0 \text{ MeV/u}$ )
  - 二次反応  $^{130}\text{Te}(^{17}\text{N}, 5n)^{142}\text{Pr} \implies$   
 核融合反応で  $^{142}\text{Pr}$  の高スピン状態を生成
- 粒子識別 (質量分析) に **核物理センター-EN コース** を用いる
  - 高エネルギーの重イオンの二次粒子分析から低エネルギーの二次粒子分析。
  - AVF サイクロトロンからの低エネルギービームを直接反応に用いる。  
 $\iff$  生成核が低エネルギーなので減速の必要がない。

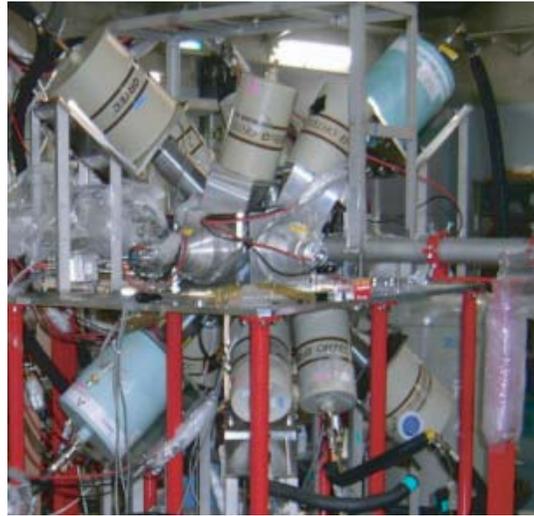
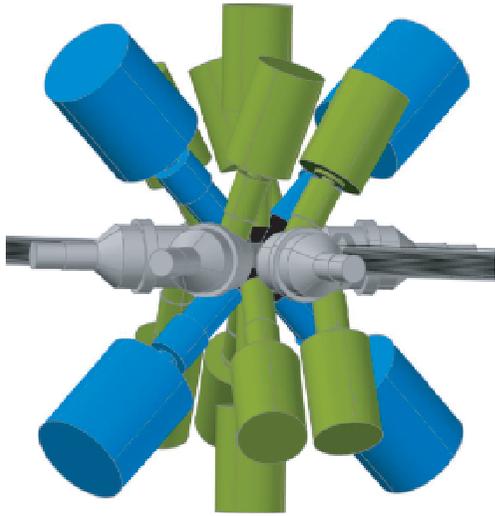


- F0、F1、F2 が分離されているためバックグラウンドが小さい
- F1、F2 に  $E - \Delta E$  SSD 検出器を導入  
 $\implies E - \Delta E$  による粒子識別
- F2 の 2 枚の PPAC を用いたトラッキング
- 二次ターゲット位置に PSD の導入 (ビームスポットの確認)

$^{17}\text{N}$  ビーム

- F2 SSD  $E - \Delta E$

## Ge 検出器アレイ



- 14 台の Ge 検出器
  - 前方散乱を抑えられる BGO-ACS 6 台
  - クロストークを防ぐために Ge 検出器を鉛シールドで囲んだ

共同研究  
大阪大理・RCNP・東北大理  
SUNY at Stonybrook

- ターゲット位置にキャッチャーを置き、 $^{17}\text{N}$  の  $\beta$  崩壊に伴う  $\gamma$  線を測定し、不安定核ビーム量を導出  
 $\implies 4 \times 10^4$  個/sec  
 (ビームを抑えているので  $\sim 10^5$  個/sec も可能)
- ターゲットとして  $^{\text{nat}}\text{Te}$  を置き、テスト測定を行った。 $\iff$  バックグラウンド ( $\beta$  崩壊など) が多い

ビームまたは反跳粒子と同期した  $\gamma$  線測定が必要

- 今後の改善策
  - PPAC の信号と同期する (高速化が必要、現在の PPAC は  $10^4$  個/sec が限界)
  - バッキングに SSD を用いて生成核と同期する。(ストリップ Si を用いてセグメントあたりの計数率を下げる)

## まとめ

- $\gamma$ 線測定による高スピンの研究
  - 自発的対称性の破れ
  - 安定核による高スピン状態生成の限界
  - 不安定核ビームを用いた中性子過剰核の高スピン状態への挑戦
- 大阪大学核物理研究センター EN コース
  - AVFサイクロトロンからのビームをそのまま利用
  - 低エネルギーのビームを輸送
  - SSD検出器 ( $E - \Delta E$ ) による粒子識別
  - Ge検出器アレイ
  - $4 \times 10^4$  個/sec の  $^{17}\text{N}$  不安定核ビームの生成に成功
- 今後の開発
  - PPACの高速化
  - ストリップSi検出器の導入