

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

$$[Q, H] = 0$$

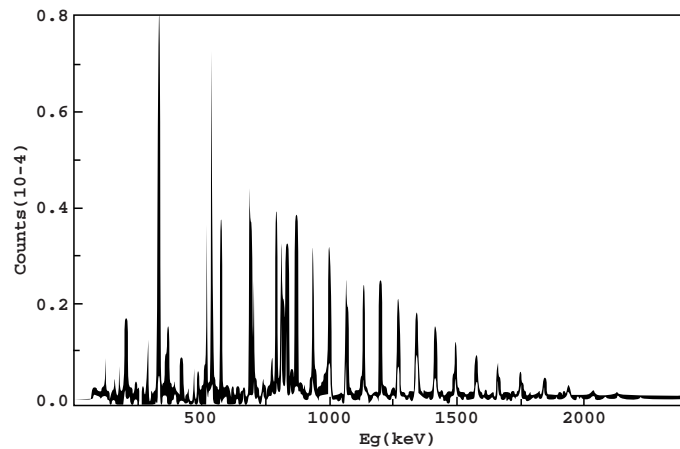
$$H |n\rangle = E_n |n\rangle$$

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

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)



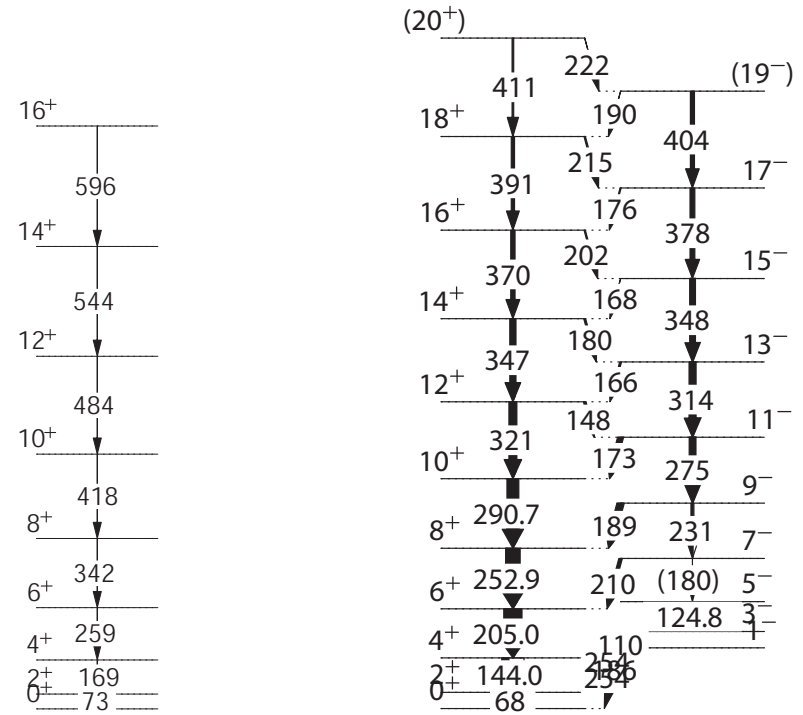
(¹³²Ce の回転スペクトル、Liverpool 大学 Web サイトより)

- 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)



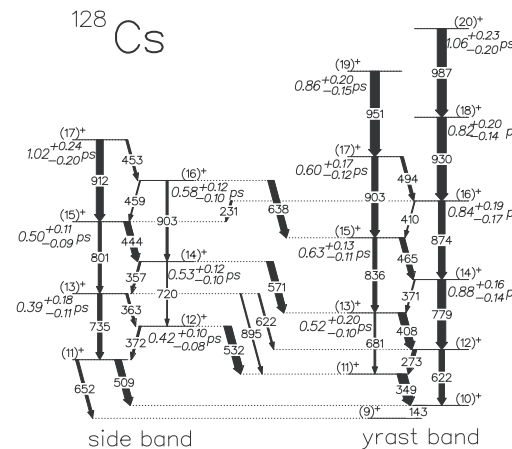
回転バンド

¹⁶⁴Dy

パリティ二重項

²²⁶Ra

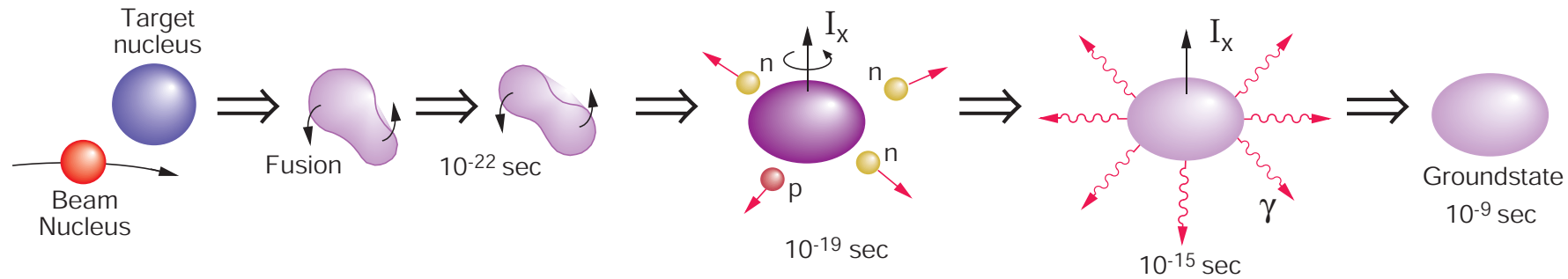
From <http://radware.phy.ornl.gov/>



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+ α 23.80	Nd145 7/2- 8.30	Nd146 0+ 17.19	Nd147 10.98 d 5/2- β	Nd148 0+ 5.76	Nd149 1.728 h 5/2- β	Nd150 1.1E19 y 0+ β _{5.64}	Nd151 12.44 m 3/2+ β
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+ *	Pr144 17.28 m 0- β	Pr145 5.984 h 7/2+ β	Pr146 24.15 m (2)- β	Pr147 13.4 m (3/2)- β	Pr148 2.27 m 1- *	Pr149 2.26 m (5/2+) β	Pr150 6.19 s (1)- β
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- β	Ce142 5E+16 y 0+ β	Ce143 33.039 h 7/2- β	Ce144 284.893 d 0+ β	Ce145 3.91 m (3/2)- β	Ce146 13.52 m 0+ β	Ce147 56.4 s (5/2)- β	Ce148 56 s 0+ β	Ce149 5.3 s (3/2)- β
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,β _{0.0902}	La139 7/2+ 99.9098	La140 1.6781 d 3- β	La141 3.52 h (7/2+) β	La142 91.1 m 2- β	La143 24.2 m (7/2)- β	La144 40.8 s (3)- β	La145 24.8 s (5/2+) β	La146 6.27 s 2- *	La147 4.015 s (5/2+) β _n	La148 1.05 s (2)- β
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- β	Ba140 12.752 d 0+ β	Ba141 18.27 m 3/2- β	Ba142 10.6 m 0+ β	Ba143 14.33 s 5/2- β _n	Ba144 11.5 s 0+ β	Ba145 4.31 s 5/2- β	Ba146 2.22 s 0+ β _n	Ba147 0.893 s (3/2+) β _n
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+ *	Cs140 63.7 s 1- β	Cs141 24.94 s 7/2+ β _n	Cs142 1.70 s 0- β _n	Cs143 1.78 s 3/2+ β _n	Cs144 1.01 s 1- *	Cs145 0.594 s 3/2+ β _n	Cs146 0.321 s 1- β _n
Xe131 3/2+ 21.2	Xe132 0+ 26.9	Xe133 5.243 d 3/2+ β	Xe134 0+ 10.4	Xe135 9.14 h 3/2+ β	Xe136 2.36E21 y 0+ β	Xe137 3.818 m 7/2- β	Xe138 14.08 m 0+ β	Xe139 39.68 s 3/2- β	Xe140 13.60 s 0+ β	Xe141 1.73 s 5/2(-) β _n	Xe142 1.22 s 0+ β _n	Xe143 0.30 s 5/2- β	Xe144 1.15 s 0+ β	Xe145 0.9 s β _n
I130 12.36 h 5+ *	I131 8.02070 d 7/2+ *	I132 2.295 h 4+ *	I133 20.8 h 7/2+ *	I134 52.5 m (4)+ β	I135 6.57 h 7/2+ β	I136 83.4 s (1)- β _n	I137 24.5 s (7/2+) β _n	I138 6.49 s (2)- β _n	I139 2.29 s (7/2+) β _n	I140 0.86 s (4) β _n	I141 0.43 s β _n	I142 β _n	I143 β _n	I144 β _n
Te129 69.6 m 3/2+ *	Te130 7.9E20 y 0+ β _{33.80}	Te131 25.0 m 3/2+ *	Te132 3.204 d 0+ β	Te133 12.5 m (3/2+) *	Te134 41.8 m 0+ β	Te135 19.0 s (7/2-) β	Te136 17.5 s 0+ β _n	Te137 2.49 s (7/2-) β _n	Te138 1.4 s 0+ β _n	Te139 β _n	Te140 0+ β _n	Te141 β _n	Te142 0+ β _n	

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
- $A \sim 140$ 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)

Z
↑

62	^{140}Sm (21-)	^{141}Sm (63/2)	^{142}Sm (15)	^{143}Sm (57/2+)	^{144}Sm (20-)	^{145}Sm (52/2)	^{146}Sm (18+)	^{147}Sm (27/2)	
61	^{139}Pm (59/2-)	^{140}Pm (20)	^{141}Pm (21/2)	^{142}Pm (20+)	^{143}Pm (45/2+)	^{144}Pm (20)	^{145}Pm (33/2)		
60	^{138}Nd (33)	^{139}Nd (27/2-)	^{140}Nd (48-)	^{141}Nd (25/2)	^{142}Nd (24+)	^{143}Nd (53/2+)	^{144}Nd (24-)	^{145}Nd (35/2)	^{146}Nd (22+)
59	^{137}Pr (43/2-)	^{138}Pr (22+)	^{139}Pr (31/2-)	^{140}Pr (17)	^{141}Pr (23/2+)	^{142}Pr (9+)			
58	^{136}Ce (24+)	^{137}Ce (43/2-)	^{138}Ce (22+)	^{139}Ce (27/2-)	^{140}Ce (12+)				
57	^{135}La (43/2-)	^{136}La (16+)	^{137}La (39/2-)						
	78	79	80	81	82	83	84	85	86 → N

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

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

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

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

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

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



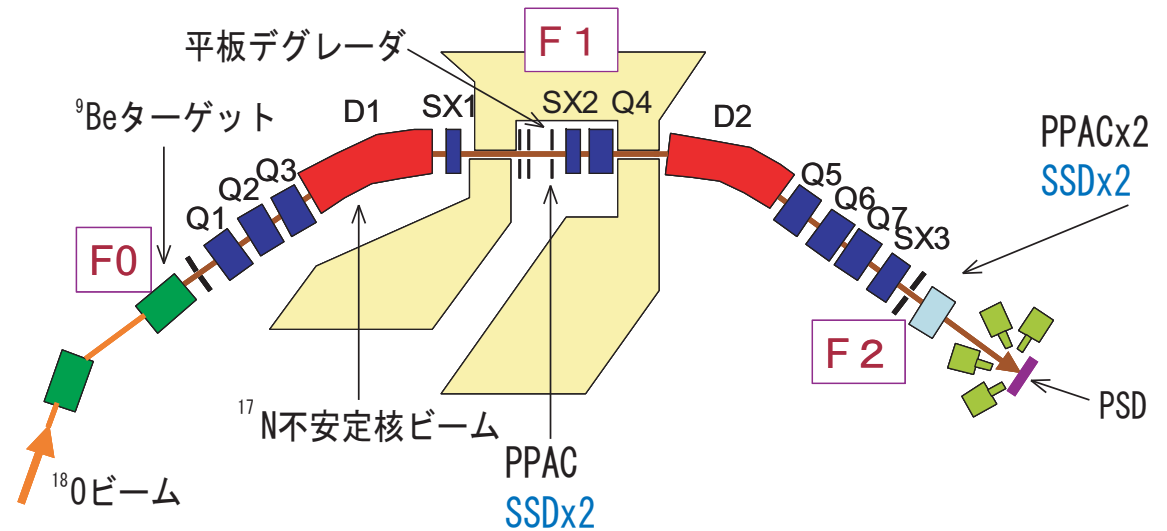
← 中性子過剰側



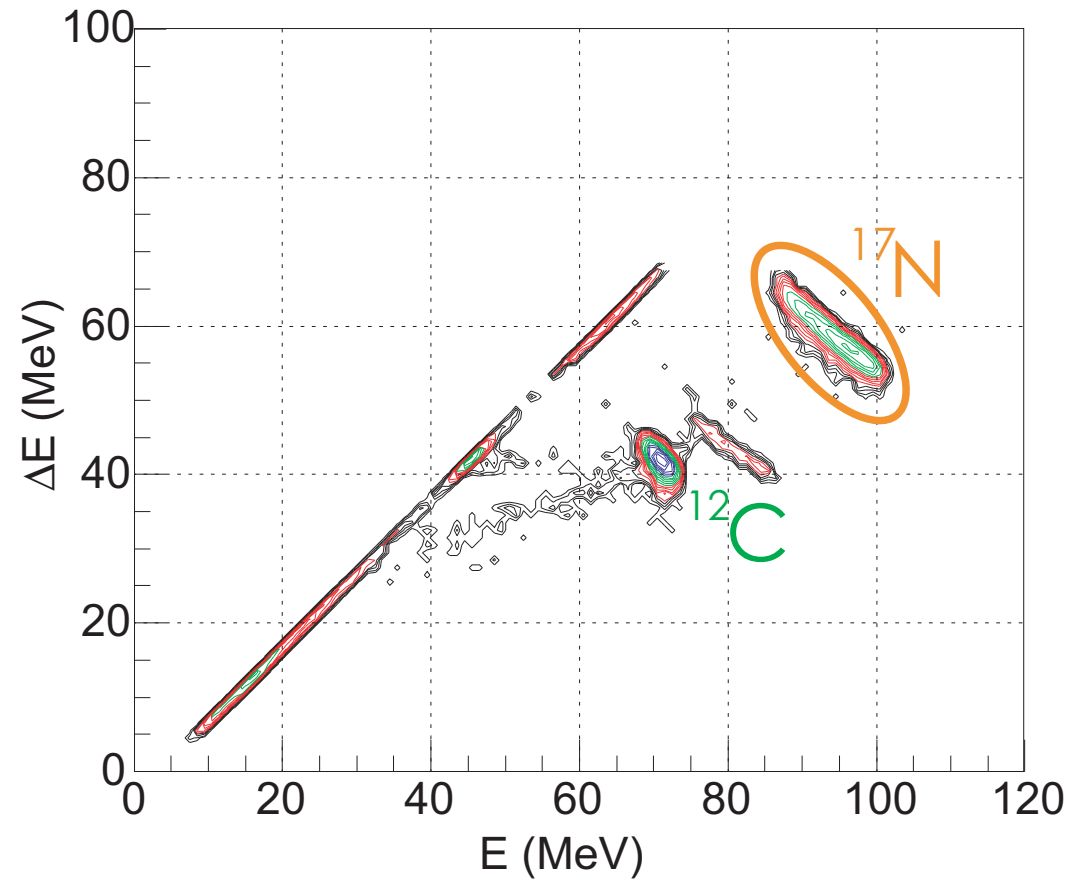
陽子過剰側 →

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}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}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。

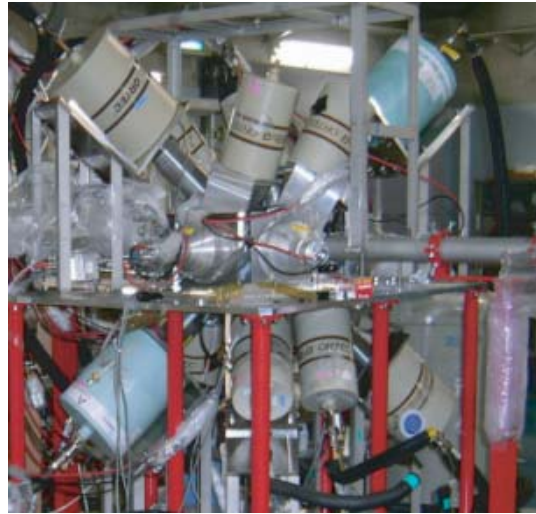
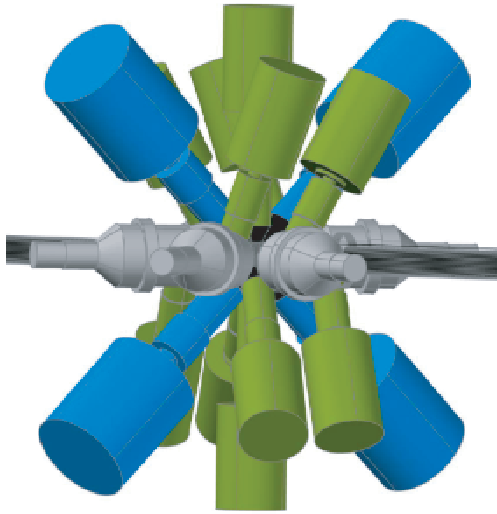


- F0、F1、F2 が分離されているためバックグラウンドが小さい
- F1、F2 に $E - \Delta E$ SSD 検出器を導入
 $\implies E - \Delta E$ による粒子識別
- F2 の 2 枚の PPAC を用いたトラッキング
- 二次ターゲット位置に PSD の導入 (ビームスポットの確認)

^{17}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}N の β 崩壊に伴う γ 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 (β 崩壊など) が多い

ビームまたは反跳粒子と同期した γ 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

- γ 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
 - 4×10^4 個/sec の ^{17}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