

# 研究紹介(進学ガイダンス)

原子核科学研究センター

極限原子核構造グループ (NUSPEQ group)

下浦 享

[shimoura@cns.s.u-tokyo.ac.jp](mailto:shimoura@cns.s.u-tokyo.ac.jp)

<http://www.cns.s.u-tokyo.ac.jp/~shimoura/>

<http://www.cns.s.u-tokyo.ac.jp/nuspeq/>

<http://www.cns.s.u-tokyo.ac.jp/sharaq/>

自然とは？

この世の成り立ちは？

原子核

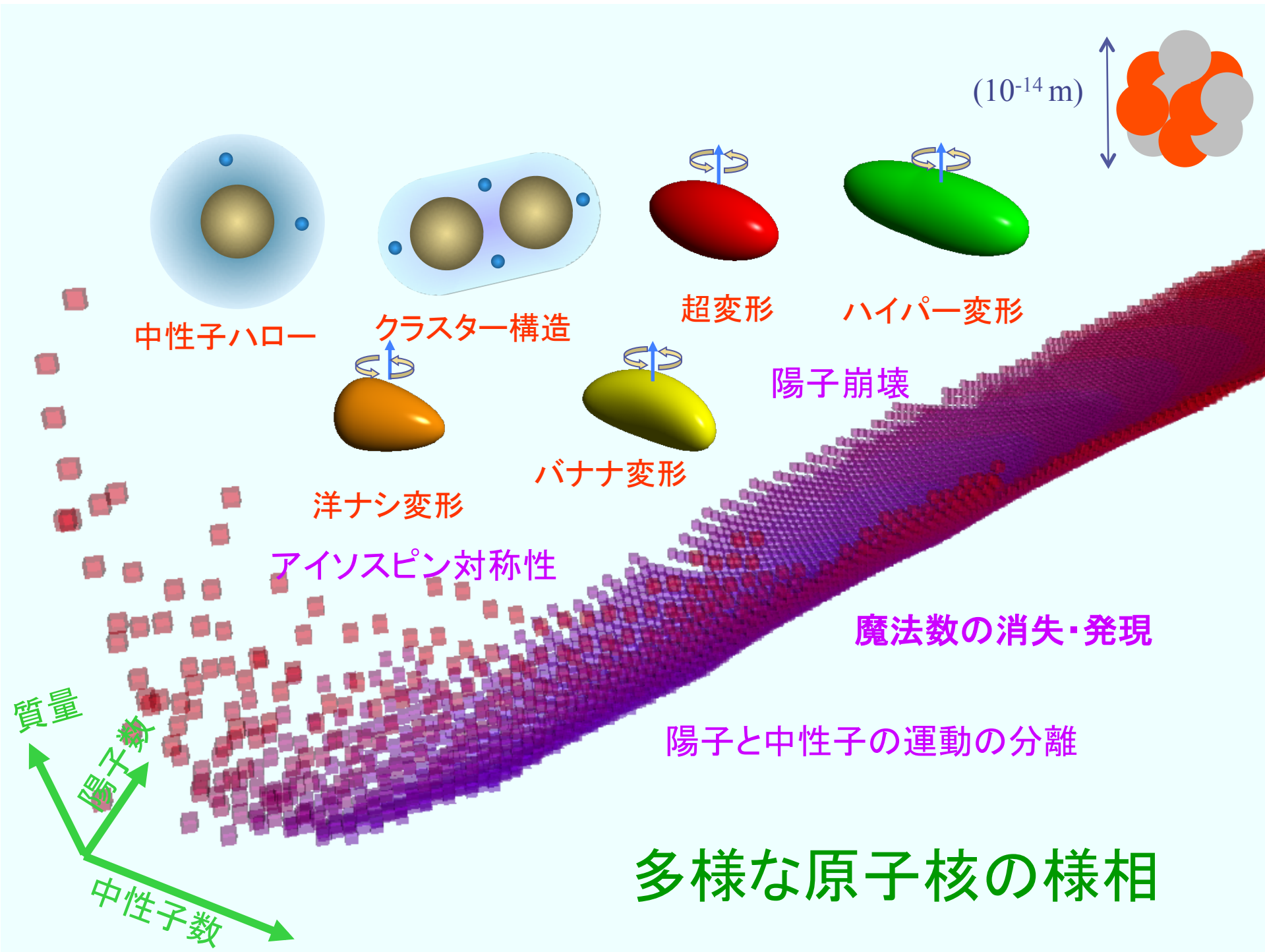
*Center of Atom, Core of Matter*

*Core of Matter, Fuel of Star*

極微世界の景色

量子力学の不思議

ひとつ、ふたつ、たくさん



# 安定領域から離れた極限原子核の研究

- ◆ 原子核物理学: 強い相互作用をする有限量子多体系の物理  
自然界に存在する安定な原子核(最小エネルギー: 極低温):
  - 陽子、中性子のフェルミ面が同じ
  - Self Consistency (自己無撞着)
  - 量子状態の不均一性が同期
    - ◆ 陽子が魔法数近傍なら中性子も魔法数の近傍
  - ...
- ◆ 陽子数と中性子数がアンバランスなエキゾチックな原子核の性質は、高い励起状態は、高速回転させると?
  - 陽子、中性子それぞれの分布の広がり、形は?
  - 硬さは? 応答は?
  - 魔法数は? 一粒子波動関数は? 相関は?
  - 対称性は? その破れは? 回復モードは?
  - ...

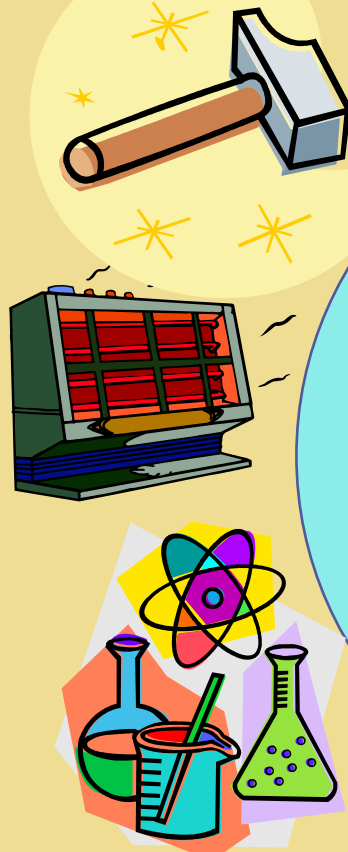
新しい原子核像



# 原子核の研究

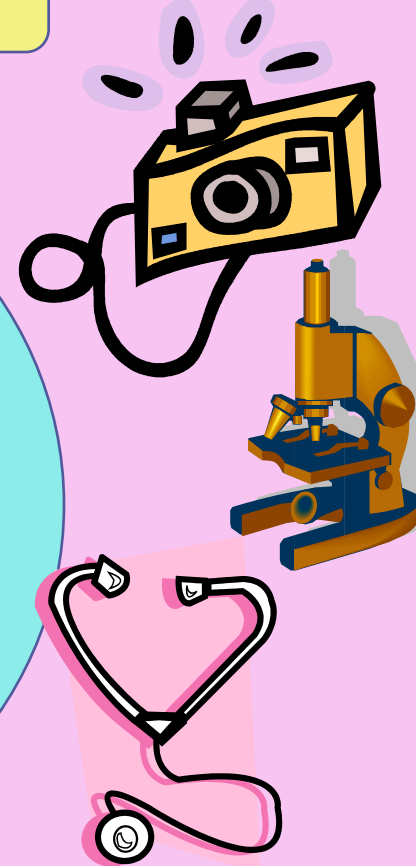
## 原子核

物質質量の大半を担う  
核力が支配  
量子複合系  
自然界では  
凍りついている



### 加速器

さまざまなプローブ  
新物質の生成



### 測定器

粒子、光の  
エネルギー、種類

# 実験手法：インビーム核分光

## ◆ インビーム

- (量子数の選択性が強い)原子核反応を用いて原子核の励起状態を生成
  - ◆ 中間エネルギーの直接反応
  - ◆ 低エネルギーの融合反応、多重クーロン励起

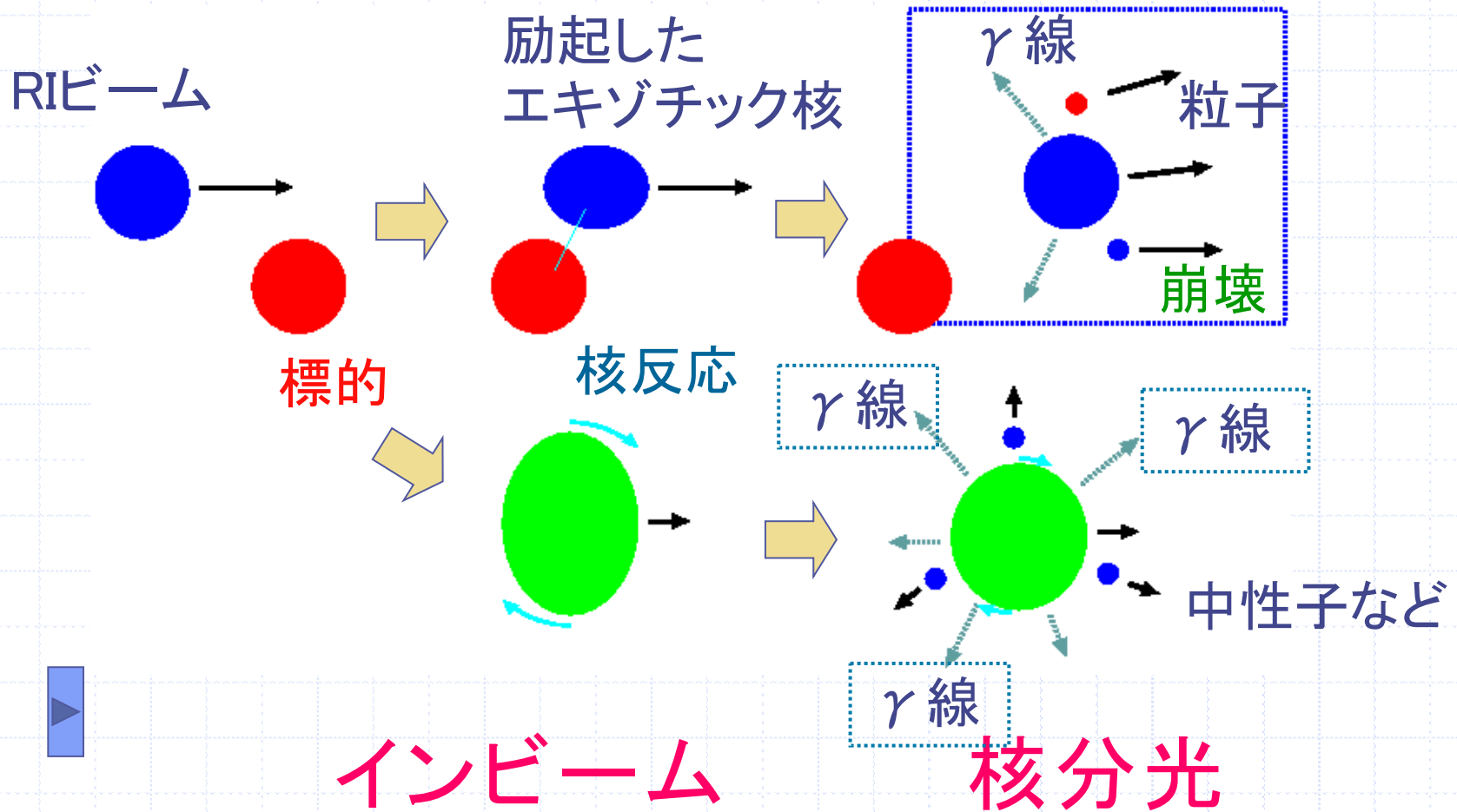
## ◆ 核分光

- 崩壊で放出される $\gamma$ 線、粒子のエネルギーと強度を測定(分光)し、励起状態の量子数(励起エネルギー、スピン・パリティなど)の情報をえる
  - ◆ 殻構造の進化、集団性の消長、アイソスピン依存性...
  - ◆ 高スピン状態と新しい変形、外場に対する応答関数...

## ◆ SHARAQプロジェクト

- 不安定核ビームの核反応の高分解能測定

# 不安定核の二次核反応測定



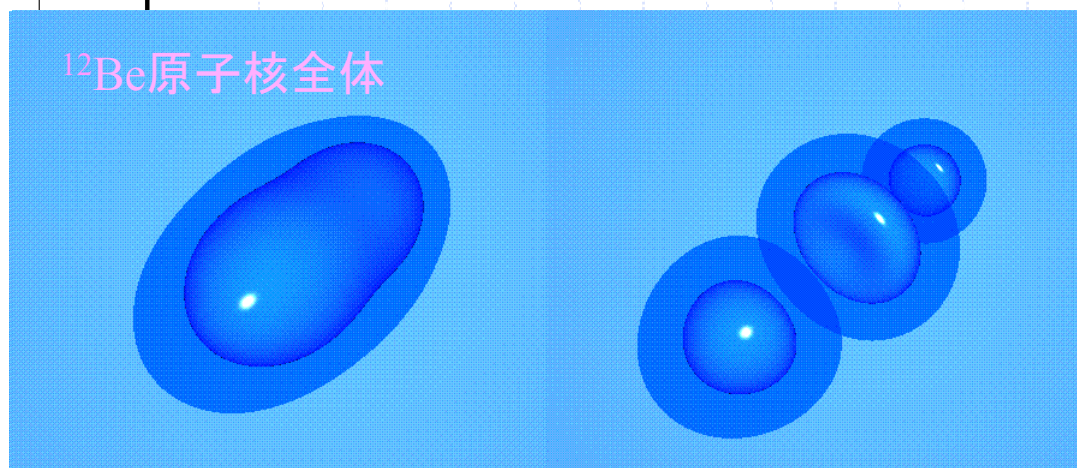
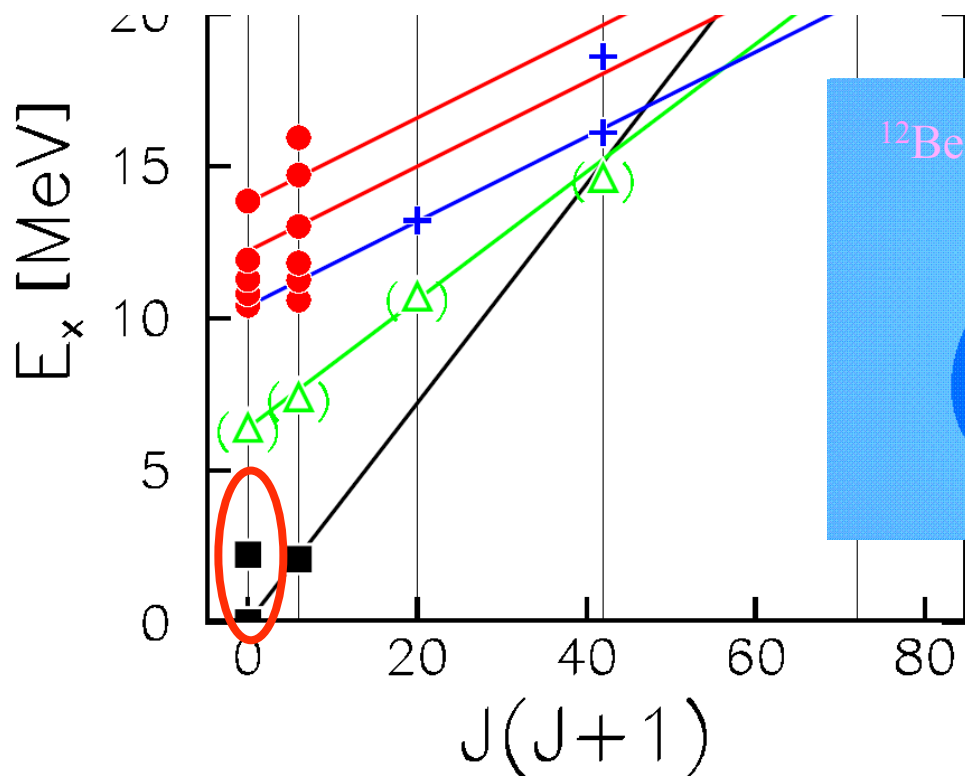
# 研究例

- ◆  $^{12}\text{Be}$  双子の  $0^+$  状態
  - 魔法数なのに大きな変形
  - 大きな遷移強度
    - ◆ 2成分の波動関数
    - ◆ 遷移はベータ振動モードに類似

2中性子波動関数

$$\Phi(1) = \alpha \left| \begin{array}{c} \text{[Diagram: 2 neutrons in a single well]} \end{array} \right\rangle + \beta \left| \begin{array}{c} \text{[Diagram: 2 neutrons in separate wells]} \end{array} \right\rangle$$

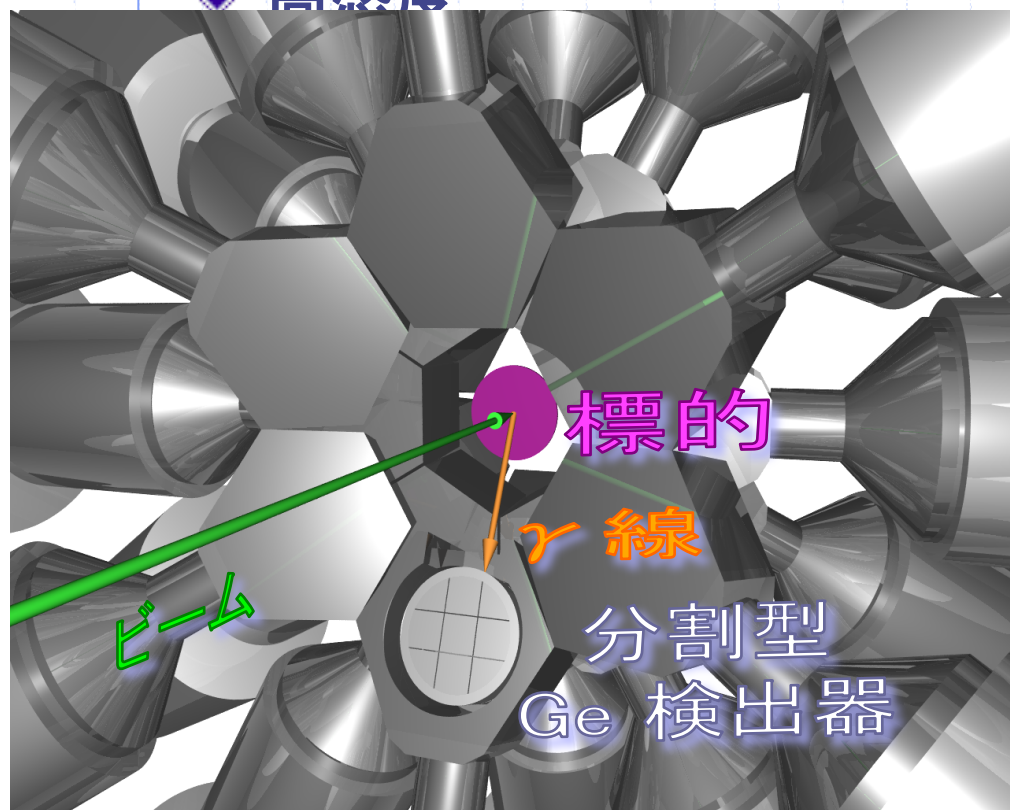
$$\Phi(2) = -\beta \left| \begin{array}{c} \text{[Diagram: 2 neutrons in a single well]} \end{array} \right\rangle + \alpha \left| \begin{array}{c} \text{[Diagram: 2 neutrons in separate wells]} \end{array} \right\rangle$$



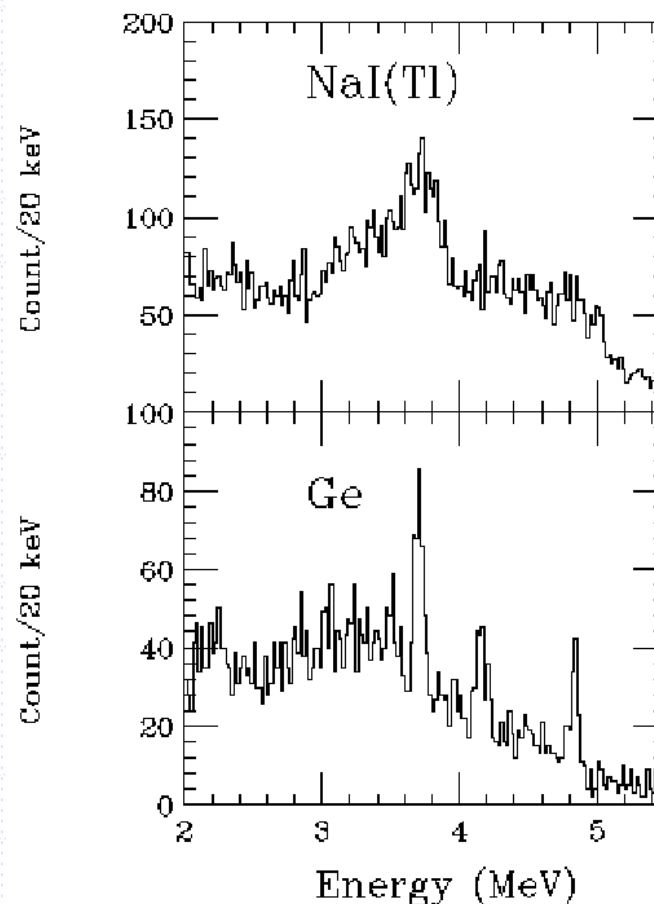
$\Phi(1) \Leftrightarrow \Phi(2)$  ベータ振動

# 検出器開発 CNS-GRAPE ( $\gamma$ 線測定装置 )

- ◆ 高分解能
- ◆ 高感度



$^4\text{He}(^{12}\text{Be}, ^{13}\text{B}\gamma) @ 50 \text{ A MeV}$



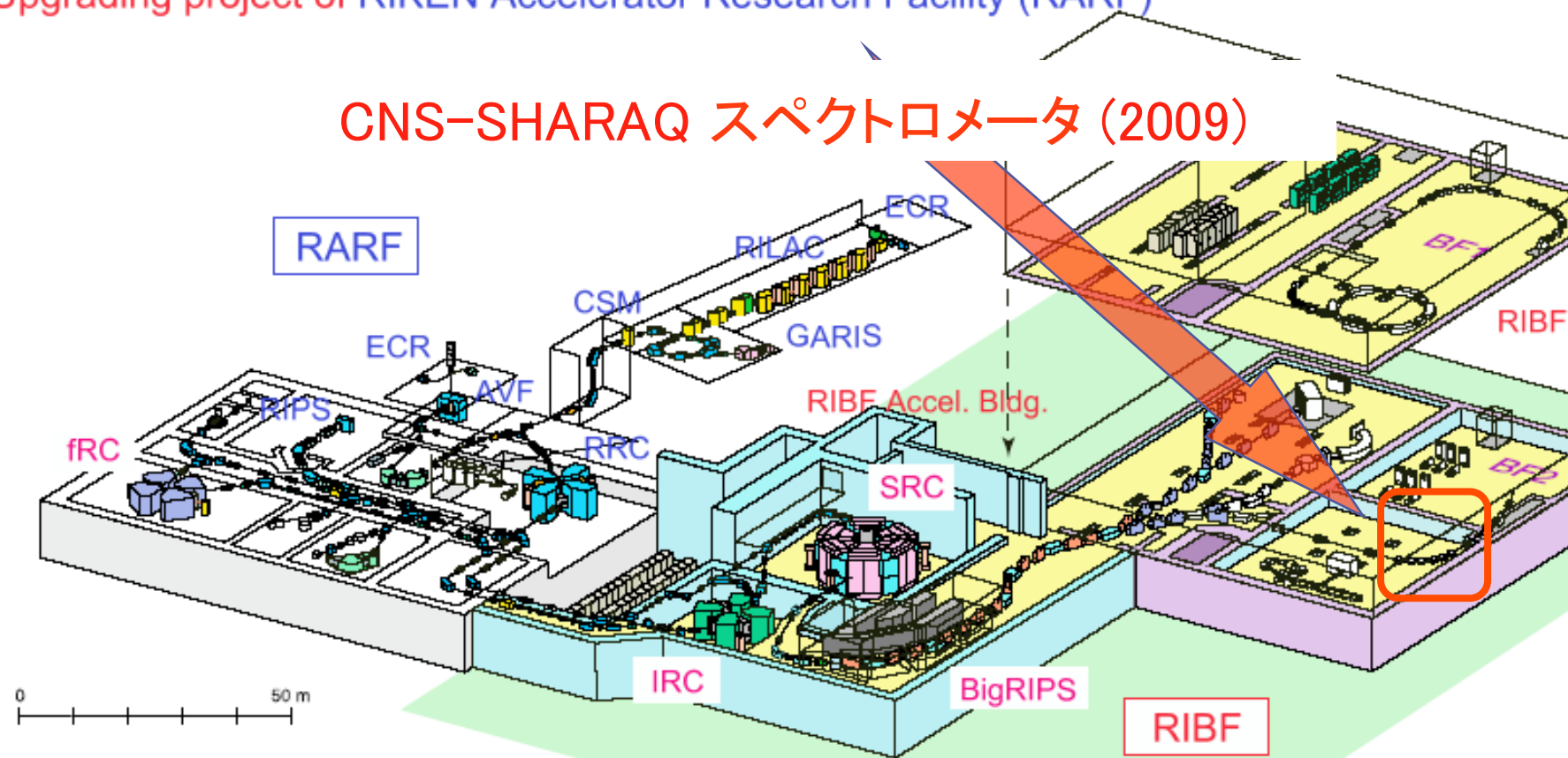
ドップラー効果の補正精度は世界最高性能



# 理研RIビームファクトリー施設(2007年度実験開始)

Upgrading project of RIKEN Accelerator Research Facility (RARF)

## CNS-SHARAQ スペクトロメータ (2009)

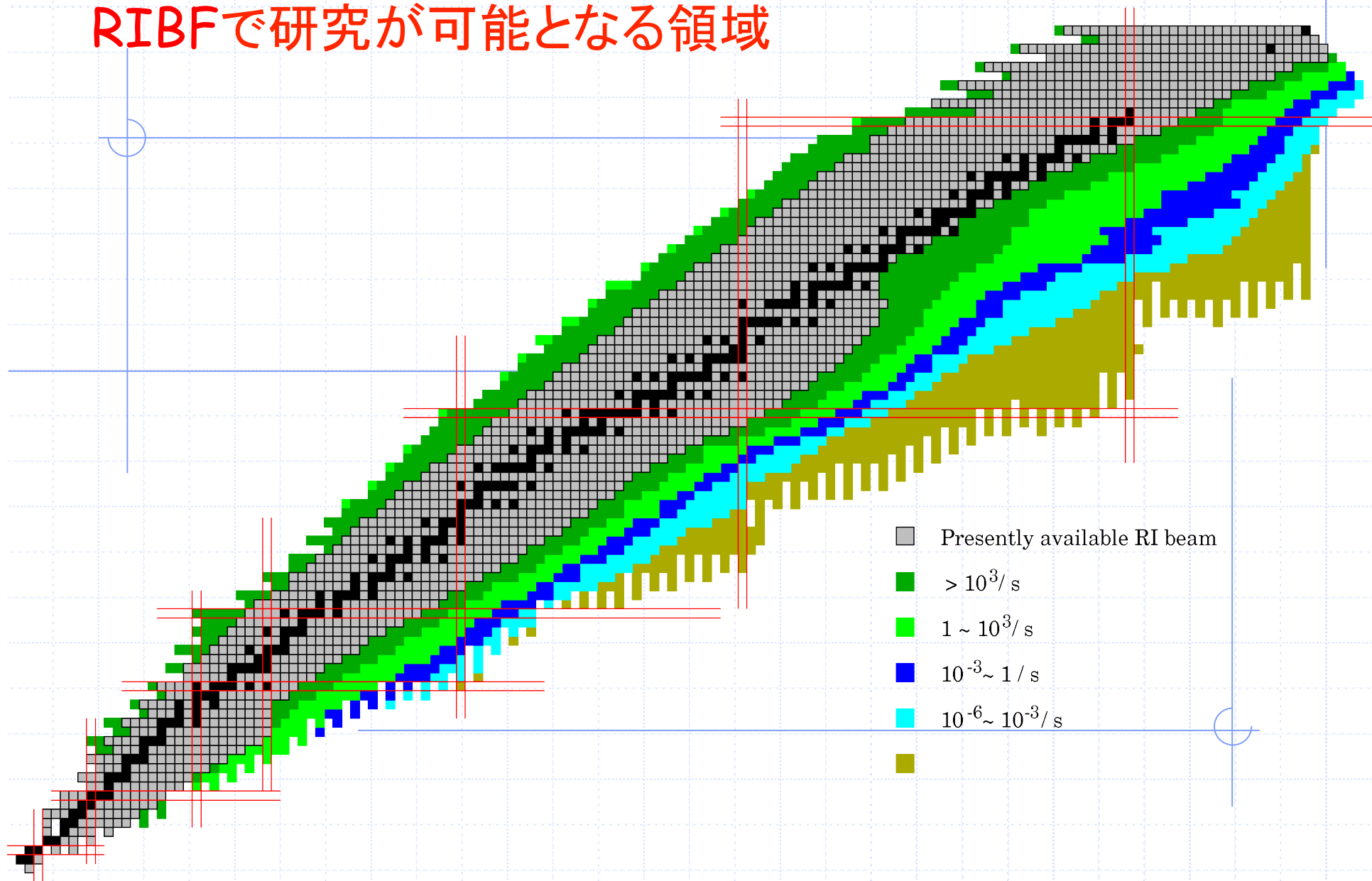


RIBF RI beam generator featuring superconducting ring cyclotron (SRC) and projectile fragment separator (BigRIPS) will be commissioned late in 2006.

RIBF RI beam experiments will be started in 2007, with colored experimental insi



# RIBFで研究が可能となる領域



# H25年度の成果とH26年度の計画

## ■ 核分光実験・データ解析

- 軽い核の高スピン状態( $^{35}\text{S}$ ) [JAEA,東北大CYRIC,ALTO](井手口、郷D論)
- 新アイソマー探査(郷、横山): 論文執筆中
- 発熱型二重荷電交換反応( $^8\text{He}, ^8\text{Be}$ )によるテトラ中性子@RIBF(木佐森)
- 軽い核に対する発熱型荷電交換反応( $^8\text{He}, ^8\text{Li}^*$ )の研究(宮)
- 陽子荷電交換反応 $^8\text{He}(p,n)$ による $^8\text{He}$ のスピンアイソスピン応答(小林M論)
- 二重荷電交換反応( $^{18}\text{O}, ^{18}\text{Ne}$ )による、 $^{12}\text{Be}$ 核の構造研究  
→ ( $^{12}\text{C}, ^{12}\text{Be}^*(0_2^+)$ )を用いた、DGT状態の研究(高木)
- $^{32}\text{Mg}$ 近傍核の直接反応の解析(大田)
- $^{54}\text{Ca}$ 近傍核のガンマ線核分光(RIBF, DALI2)(Steppenbeck)
- Quadrupole collectivity in island-of-inversion nuclei  $^{28,30}\text{Ne}$  and  $^{34,36}\text{Mg}$ (道正; PRC)

## ■ RIBFでの実験および計画

- Various deformations in very neutron-rich Ba-Nd nuclei (EURICA)(横山、井手口)
- Development of Energy Degraded RI beams (RIBF, ZDS)→OEDO project

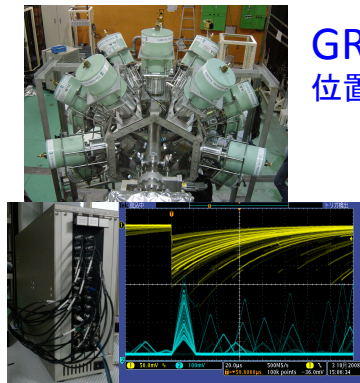
## ■ CAGRA project @ RCNP

- High-spin states (井手口、横山)
- Music

## ■ オルセーでの実験

- 質量数30~40領域の超変形の研究 → 学振2国間交流  
( $^{40}\text{Ar}, ^{36}\text{S}, ^{44}\text{Ti}$ : オルセー-Ge Array+Si-Ball)(井手口、横山)
- $^{21}\text{F}$ の核構造 (D. Suzuki et al.)

# 極限原子核構造研究 (NUSPEQ) Group



## GRAPE開発 位置検知型Ge半導体検出器アレイ

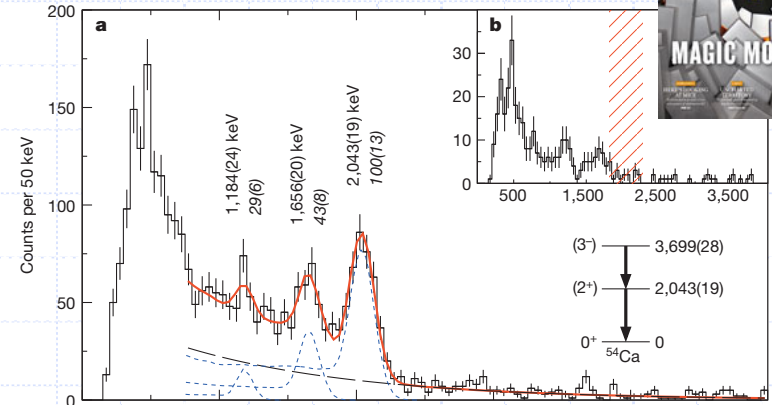
- デジタル波形処理による高度化  
専用回路モジュール開発  
デジタルフィルタリング技術  
データ転送の高速化  
アルゴリズム開発
- RCNPとの共同研究開始

|    |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
|----|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|    | 93                | 94                | 95                | 96                | 97                | 98                | 99                | 100               | 101               | 102               | 103               | 104               |
| 67 | <sup>160</sup> Ho | <sup>161</sup> Ho | <sup>162</sup> Ho | <sup>163</sup> Ho | <sup>164</sup> Ho | <sup>165</sup> Ho | <sup>166</sup> Ho | <sup>167</sup> Ho | <sup>168</sup> Ho | <sup>169</sup> Ho | <sup>170</sup> Ho | <sup>171</sup> Ho |
| 66 | <sup>159</sup> Dy | <sup>160</sup> Dy | <sup>161</sup> Dy | <sup>162</sup> Dy | <sup>163</sup> Dy | <sup>164</sup> Dy | <sup>165</sup> Dy | <sup>166</sup> Dy | <sup>167</sup> Dy | <sup>168</sup> Dy | <sup>169</sup> Dy | <sup>170</sup> Dy |
| 65 | <sup>158</sup> Tb | <sup>159</sup> Tb | <sup>160</sup> Tb | <sup>161</sup> Tb | <sup>162</sup> Tb | <sup>163</sup> Tb | <sup>164</sup> Tb | <sup>165</sup> Tb | <sup>166</sup> Tb | <sup>167</sup> Tb | <sup>168</sup> Tb | <sup>169</sup> Tb |
| 64 | <sup>157</sup> Gd | <sup>158</sup> Gd | <sup>159</sup> Gd | <sup>160</sup> Gd | <sup>161</sup> Gd | <sup>162</sup> Gd | <sup>163</sup> Gd | <sup>164</sup> Gd | <sup>165</sup> Gd | <sup>166</sup> Gd | <sup>167</sup> Gd | <sup>168</sup> Gd |
| 63 | <sup>156</sup> Eu | <sup>157</sup> Eu | <sup>158</sup> Eu | <sup>159</sup> Eu | <sup>160</sup> Eu | <sup>161</sup> Eu | <sup>162</sup> Eu | <sup>163</sup> Eu | <sup>164</sup> Eu | <sup>165</sup> Eu | <sup>166</sup> Eu | <sup>167</sup> Eu |
| 62 | <sup>155</sup> Sm | <sup>156</sup> Sm | <sup>157</sup> Sm | <sup>158</sup> Sm | <sup>159</sup> Sm | <sup>160</sup> Sm | <sup>161</sup> Sm | <sup>162</sup> Sm | <sup>163</sup> Sm | <sup>164</sup> Sm | <sup>165</sup> Sm | <sup>166</sup> Sm |
| 61 | <sup>154</sup> Pm | <sup>155</sup> Pm | <sup>156</sup> Pm | <sup>157</sup> Pm | <sup>158</sup> Pm | <sup>159</sup> Pm | <sup>160</sup> Pm | <sup>161</sup> Pm | <sup>162</sup> Pm | <sup>163</sup> Pm | <sup>164</sup> Pm | <sup>165</sup> Pm |
| 60 | <sup>153</sup> Nd | <sup>154</sup> Nd | <sup>155</sup> Nd | <sup>156</sup> Nd | <sup>157</sup> Nd | <sup>158</sup> Nd | <sup>159</sup> Nd | <sup>160</sup> Nd | <sup>161</sup> Nd | <sup>162</sup> Nd | <sup>163</sup> Nd | <sup>164</sup> Nd |
| 59 | <sup>152</sup> Pr | <sup>153</sup> Pr | <sup>154</sup> Pr | <sup>155</sup> Pr | <sup>156</sup> Pr | <sup>157</sup> Pr | <sup>158</sup> Pr | <sup>159</sup> Pr | <sup>160</sup> Pr | <sup>161</sup> Pr | <sup>162</sup> Pr | <sup>163</sup> Pr |

New  
known (measured)  
known (not measured)

**19種の新しい核異性体**  
 励起スペクトルの構築  
 N~100, Z~60 領域核の構造変化  
 R. Yokoyama et al.

## 新しい魔法数N=34 <sup>53,54</sup>Caのガンマ線核分光

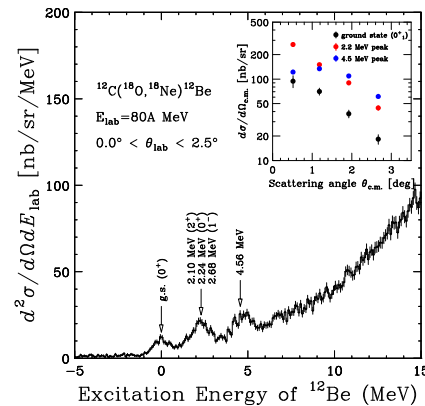


D. Steppenbeck et al., Nature 502 (2013) 207

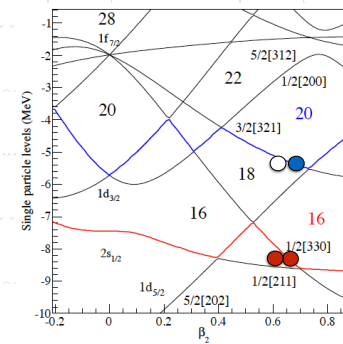
## DCX Exp. at RCNP:

- <sup>12</sup>C(<sup>18</sup>O, <sup>18</sup>Ne)<sup>12</sup>Be\*
- (<sup>12</sup>C, <sup>12</sup>Be\*(0+)) as new probe for DGT

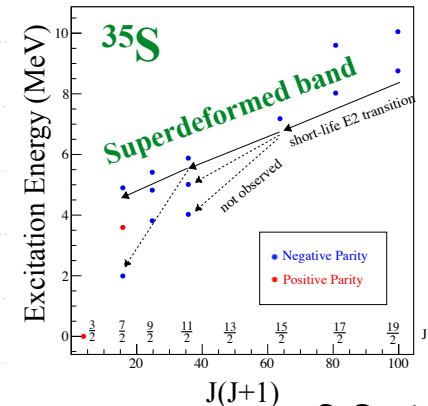
M. Takaki et al.



## <sup>35</sup>S核の超変形状態 Z=16, N=20の超変形魔法数



<sup>26</sup>Mg(<sup>18</sup>O, 2αn)<sup>35</sup>S in Tandem-ALTO facility

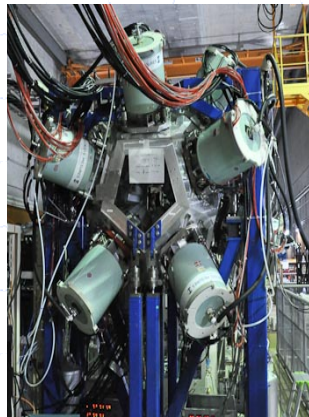


S. Go et al.

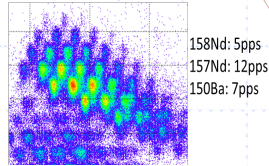
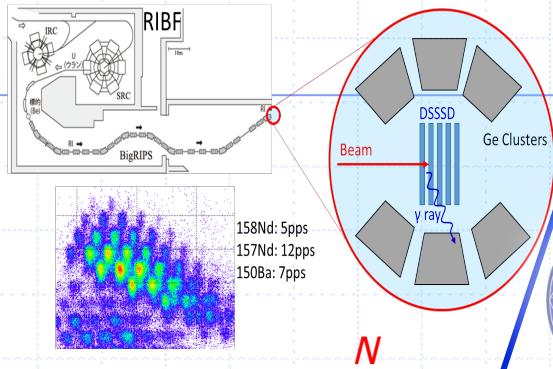
## CX Exps. at SHARAQ:

- <sup>8</sup>He(p,n) for GT strengths of n-rich nuclei, M. Kobayashi et al.
- <sup>4</sup>He(<sup>8</sup>He, <sup>8</sup>Li) for new type of spin-isospin study, H. Miya et al.
- <sup>4</sup>He(<sup>8</sup>He, 2α) for tetra-neutron system, K. Kisamori et al.

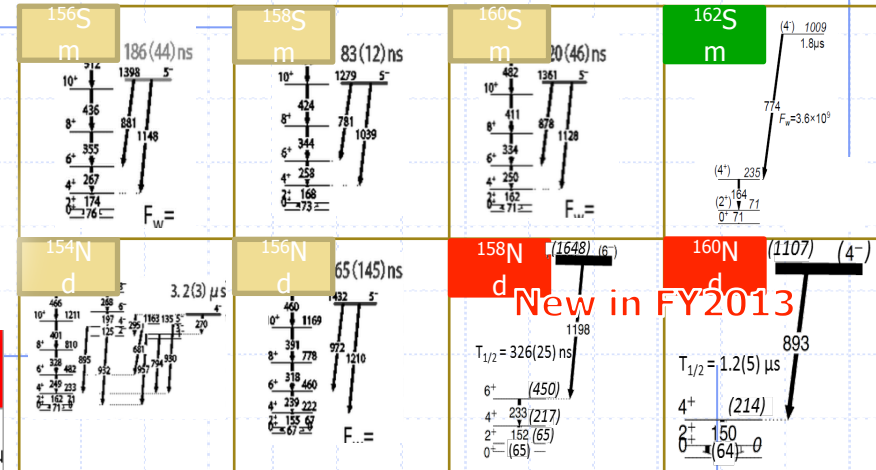
# Study of various deformations in very neutron-rich Ba-Nd nuclei



Experiment at RIBF using EURICA May 15 to 21, 2013



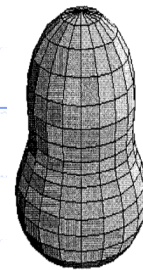
## Prolate deformation, K-isomers



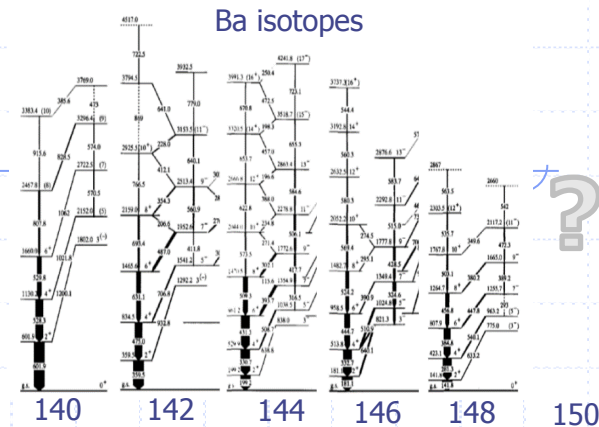
|    | 89    | 90    | 91    | 92    | 93    | 94    | 95    | 96    | 97    | 98    | 99    | 100   | 101   | 102   |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 63 | 152Eu | 153Eu | 154Eu | 155Eu | 156Eu | 157Eu | 158Eu | 159Eu | 160Eu | 161Eu | 162Eu | 163Eu | 164Eu | 165Eu |
| 62 | 151Sm | 152Sm | 153Sm | 154Sm | 155Sm | 156Sm | 157Sm | 158Sm | 159Sm | 160Sm | 161Sm | 162Sm | 163Sm | 164Sm |
| 61 | 150Pm | 151Pm | 152Pm | 153Pm | 154Pm | 155Pm | 156Pm | 157Pm | 158Pm | 159Pm | 160Pm | 161Pm | 162Pm | 163Pm |
| 60 | 149Nd | 150Nd | 151Nd | 152Nd | 153Nd | 154Nd | 155Nd | 156Nd | 157Nd | 158Nd | 159Nd | 160Nd | 161Nd | 162Nd |
| 59 | 148Pr | 149Pr | 150Pr | 151Pr | 152Pr | 153Pr | 154Pr | 155Pr | 156Pr | 157Pr | 158Pr | 159Pr | 160Pr | 161Pr |
| 58 | 147Ce | 148Ce | 149Ce | 150Ce | 151Ce | 152Ce | 153Ce | 154Ce | 155Ce | 156Ce | 157Ce | 158Ce | 159Ce | 160Ce |
| 57 | 146La | 147La | 148La | 149La | 150La | 151La | 152La | 153La | 154La | 155La | 156La | 157La | 158La |       |
| 56 | 145Ba | 146Ba | 147Ba | 148Ba | 149Ba | 150Ba | 151Ba | 152Ba | 153Ba | 154Ba | 155Ba | 156Ba |       |       |
| 55 | 144Cs | 145Cs | 146Cs | 147Cs | 148Cs | 149Cs | 150Cs | 151Cs | 152Cs | 153Cs | 154Cs |       |       |       |

## <sup>150</sup>Ba Octupole deformation?

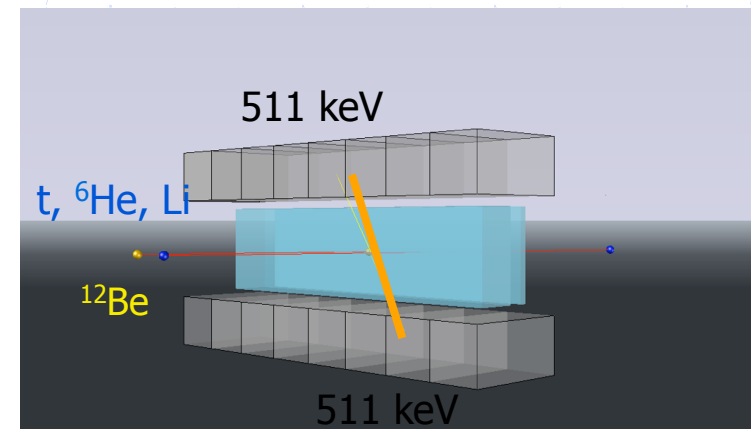
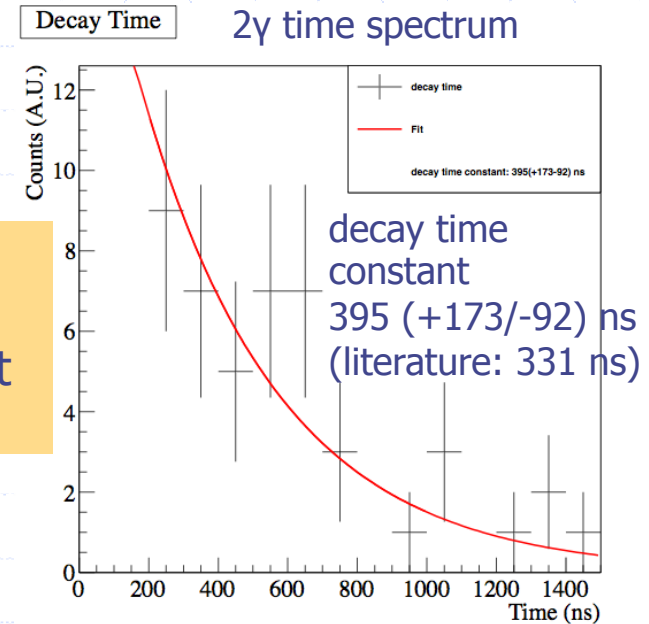
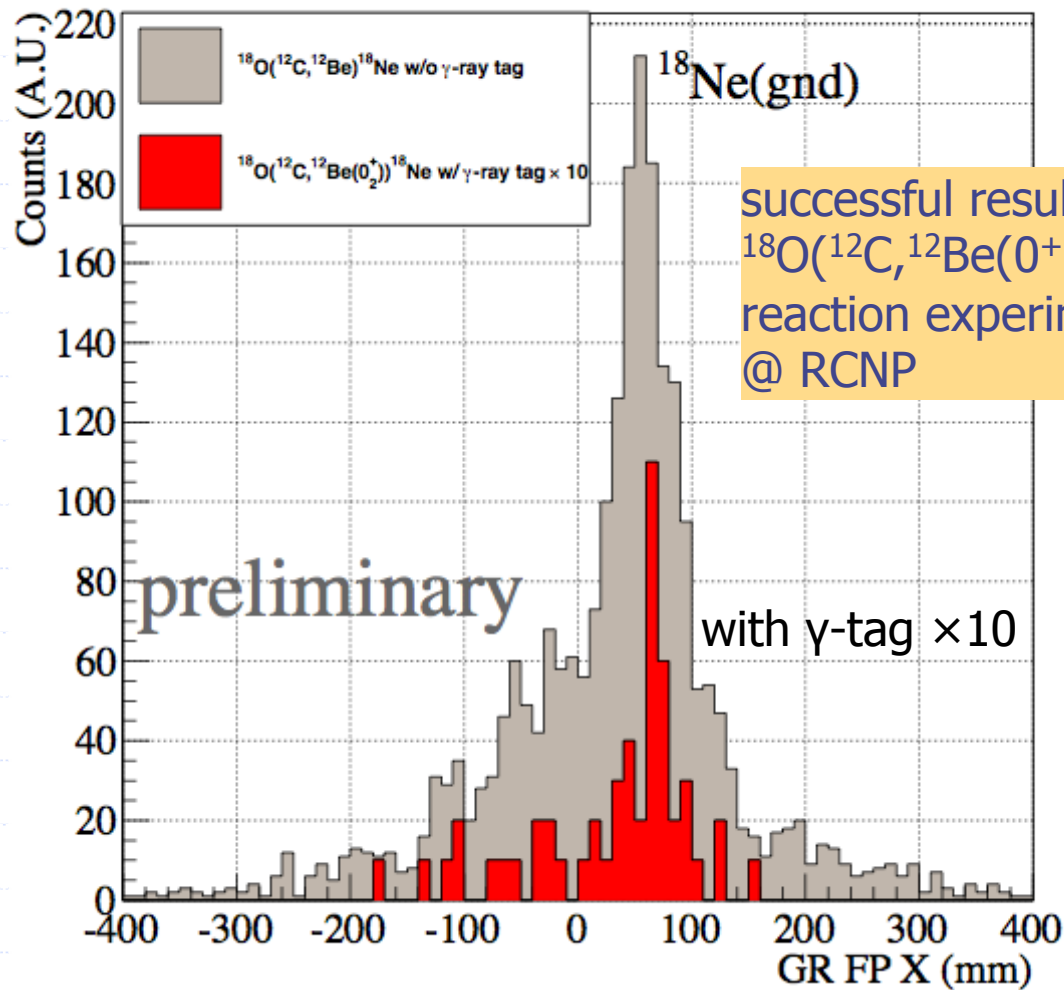
analysis is in progress (FY2014)



Ba isotopes



# Double Gamow-Teller Giant Resonance search via $^{48}\text{Ca}(^{12}\text{C}, ^{12}\text{Be})$ reaction @ RCNP



**In FY2014, we will perform the  $^{48}\text{Ca}(^{12}\text{C}, ^{12}\text{Be})$  reaction experiment to observe the double Gamow-Teller giant resonance in  $^{48}\text{Ti}$**





# SHARAQ プロジェクト

核反応前後でやりとりされるエネルギー・  
運動量を高分解能で測定

新しい魔法数  
様々な変形・振動状態  
中性子物質  
高温原子核の反応  
...

## SHARAQスペクトロメータの仕様

- 運動量分解能  $\Delta p/p < 1/15000$   
どれだけ音程が区別できるか？
- 最大磁気剛性  $B\rho = 6.8\text{Tm}$  ( $\rho=4.8\text{m}$ )  
どれだけ高い音まで測れるか？
- 立体角  $\Delta\Omega = 5\text{msr}$   
どれだけ小さな音まで測れるか？
- 運動量範囲  $\pm 3\%$   
どれだけ音域が広いかわかるか？

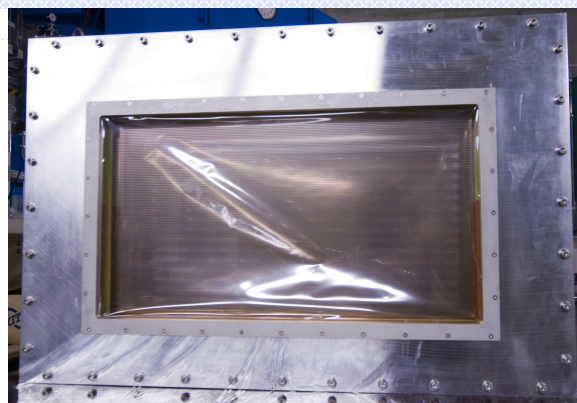
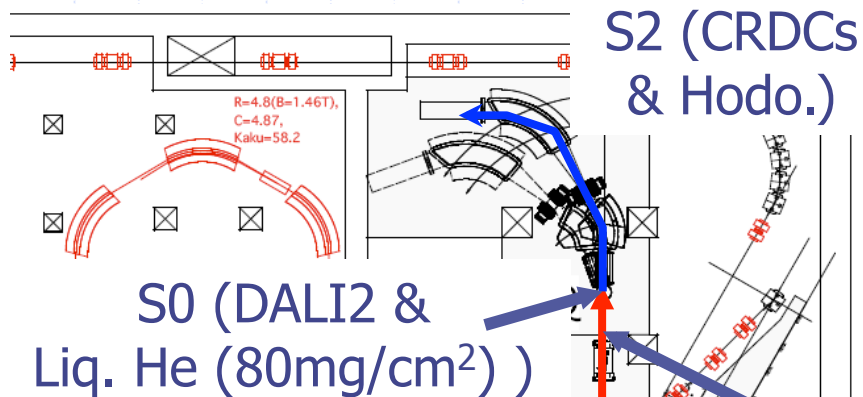
## 高機能 RI ビームライン

- 分散測定  
始めの音の音程を測る
- 分散整合  
始めと終わりの音程差を測る

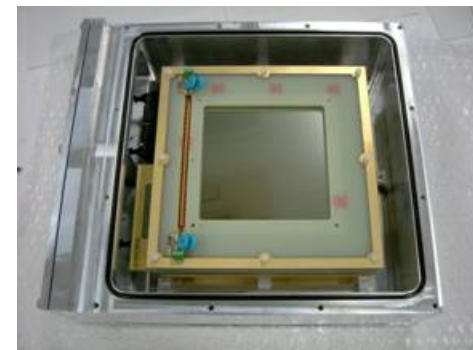
2009年稼働開始



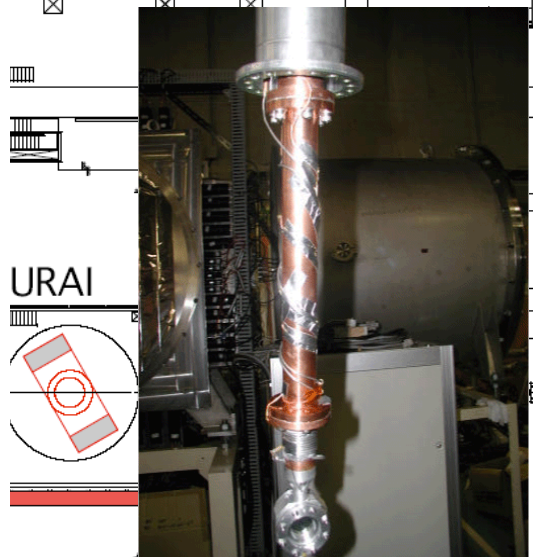




FH10 (MWDCs)



F6 (MWDCs)  
p/Δp ~ 7000



<sup>8</sup>He beam (8.5Tm)  
196 A MeV, 1 MHz

BigRIPS

F3 (tracker)

F0 (Prod. Tgt.)

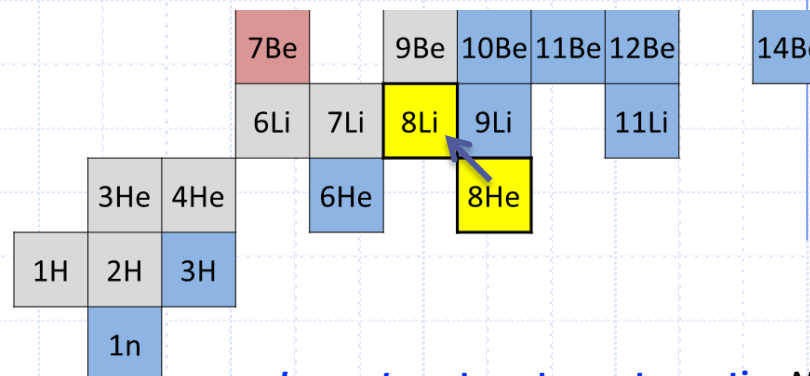
SRC

Experimental setup

# 逆運動学(p,n)反応による 中性子過剰核<sup>8</sup>Heのスピンのアイソスピン応答

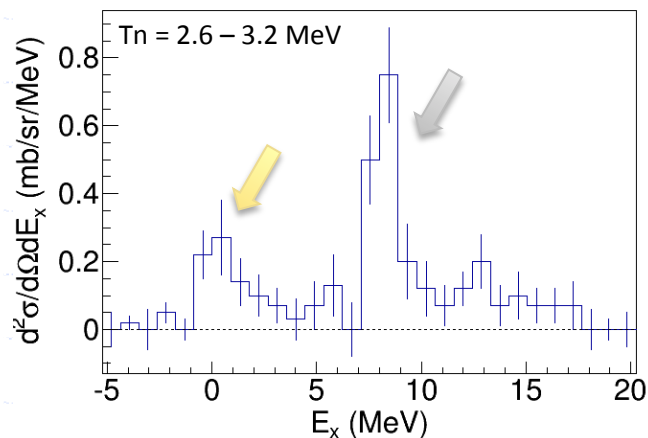
## 逆運動学<sup>8</sup>He(p,n)<sup>8</sup>Li反応測定@190MeV/u

- 2つのピーク
  - **Ex ~ 1 MeV** → B(GT)=0.24 (known)
  - **Ex ~ 8 MeV**
- 微分断面積の導出
- 断面積の角度分布の導出、DWIA計算との比較
- Gamow-Teller遷移強度B(GT)の導出

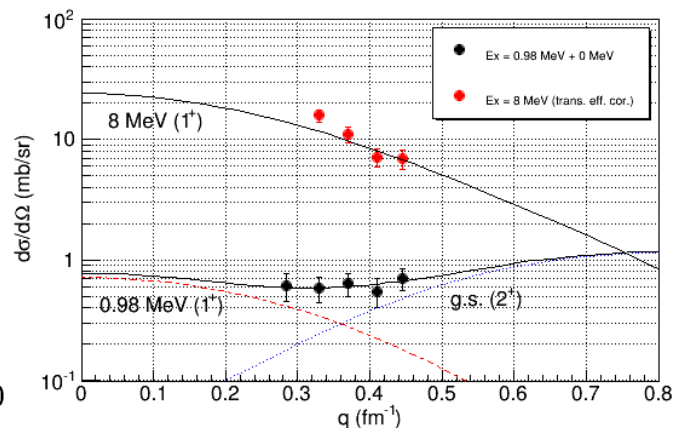


- **Largest neutron-to-proton ratio:**  $N/Z=3$
- Spin-isospin response of very neutron-rich nuclei?

Excitation energy spectrum



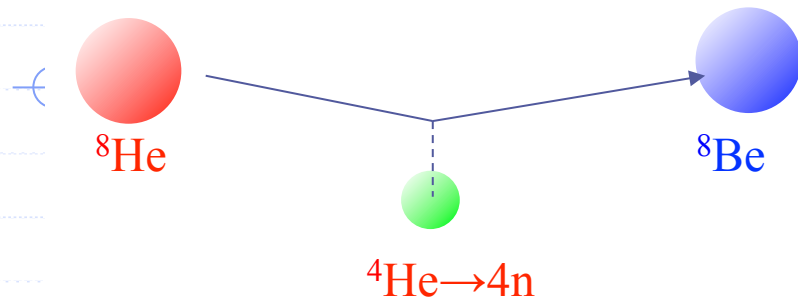
Angular distribution



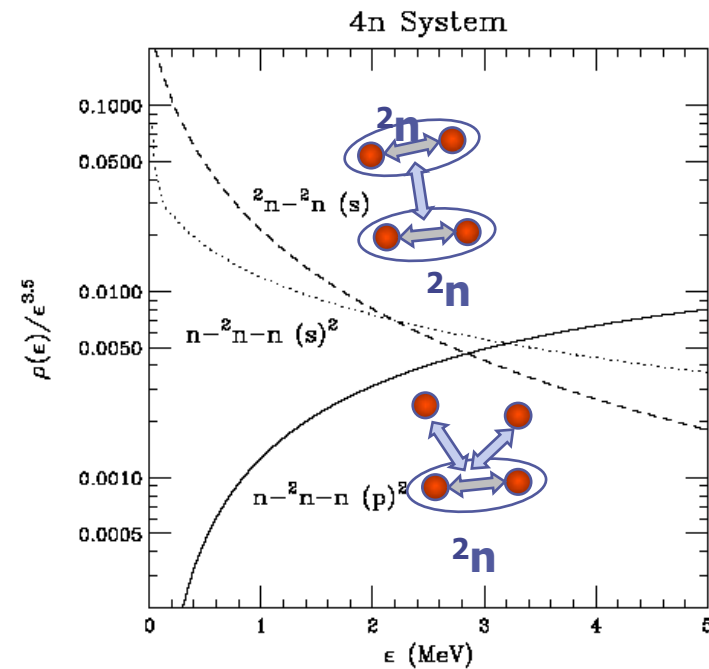
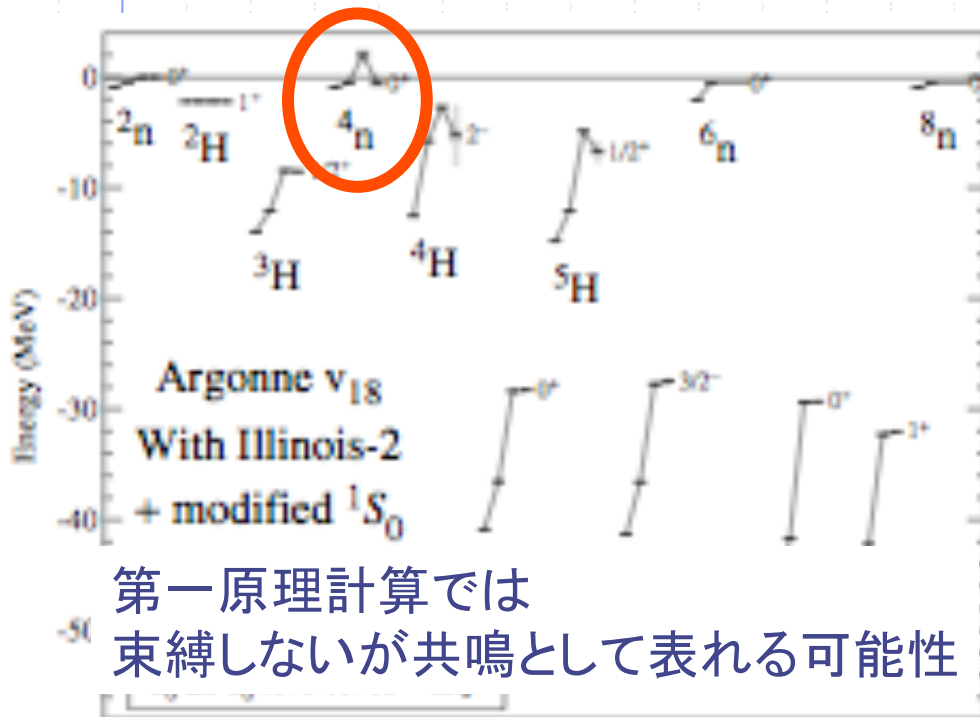
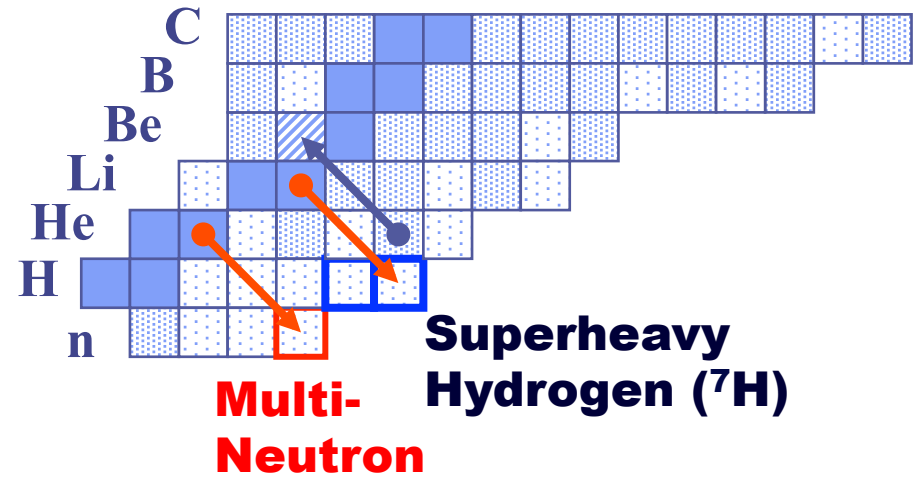
**Ex = 8 MeV に  
Gamow-Teller 巨大共鳴**

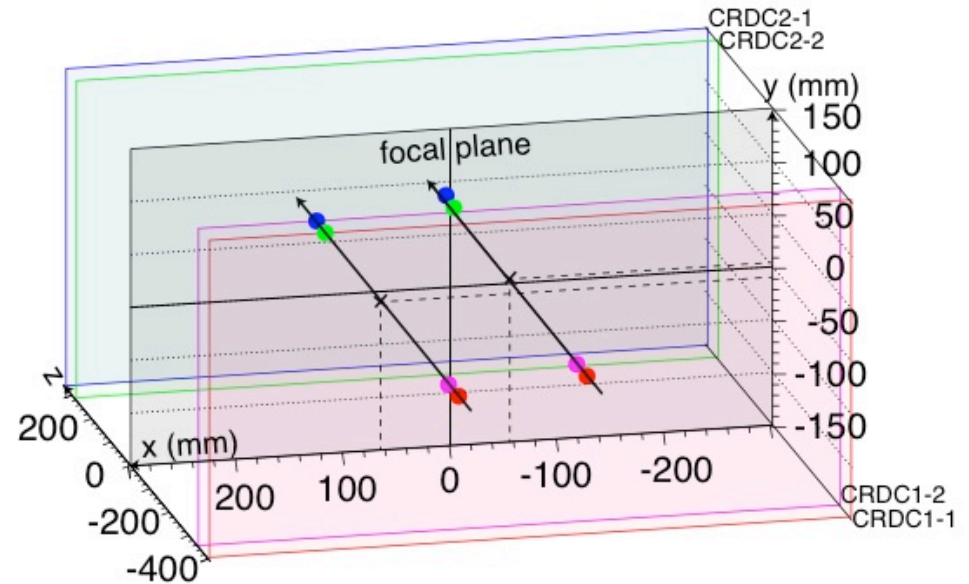
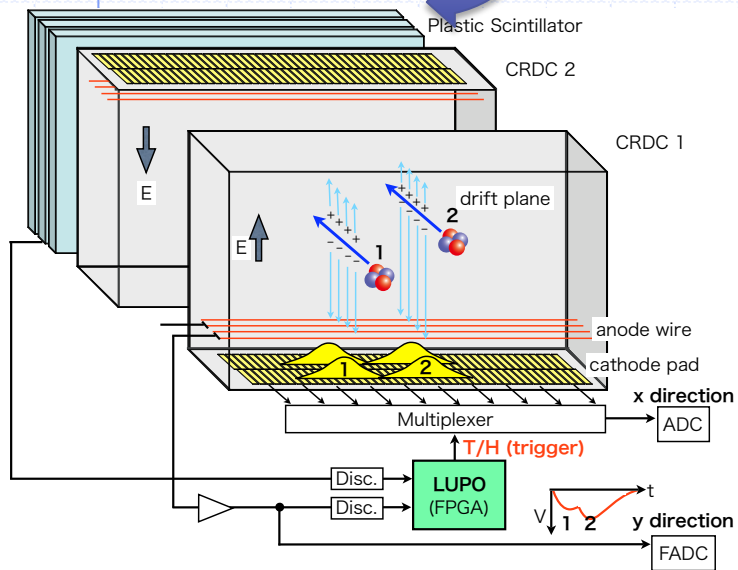
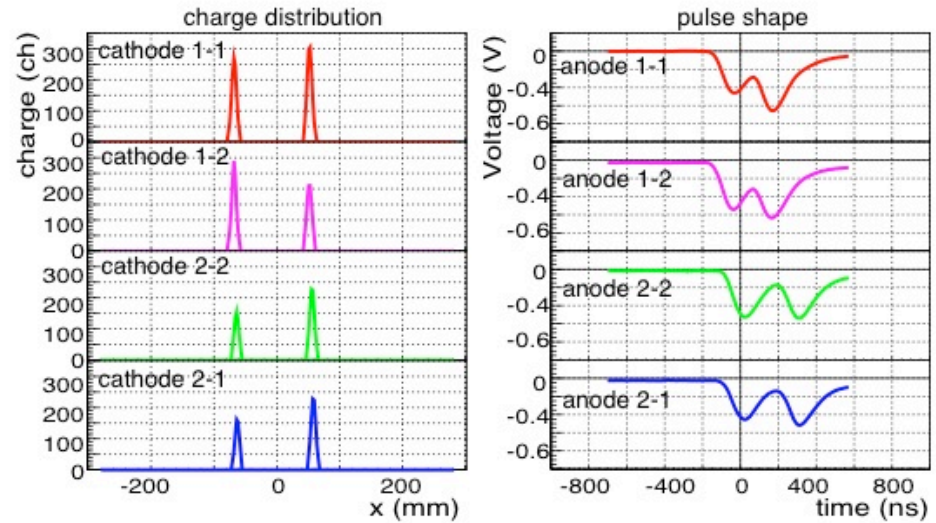
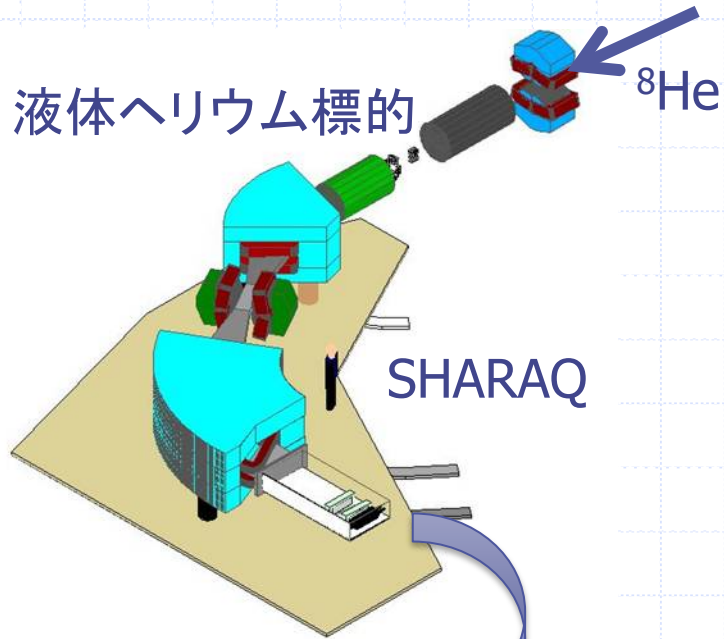
解析は進行中

# 発熱型二重荷電交換反応によるテトラ中性子研究



${}^8\text{He}$ の内部エネルギーを利用し  
衝撃なく4中性子系を生成！





$^4\text{He}(^8\text{He}, ^8\text{Be} \rightarrow 2\alpha)4n$  反応 @ 190 A MeV  
 実際の 2 $\alpha$  イベント (Apr. 2012)



# 検出器・計測システムのR&D

- パルス波形デジタル処理
  - FADC によるデータ収集
    - “デジタルオシロ付”検出器
    - デジタル演算によるパルス波形処理
- 次世代検出器開発
  - トラッキング型高速多中性子検出器
  - 新しいシンチレータ CeBr など
- OEDO (大江戸)プロジェクト
  - 新しい RIビーム減速システム