

# 酸素・炭素原子核の巨大共鳴からの $\gamma$ 線測定 と ニュートリノ中性カレント反応検出

王 岩：岡山大学 @ 新学術「地下素核研究」第一回超新星ニュートリノ研究会

for the RCNP E398 Collaboration:

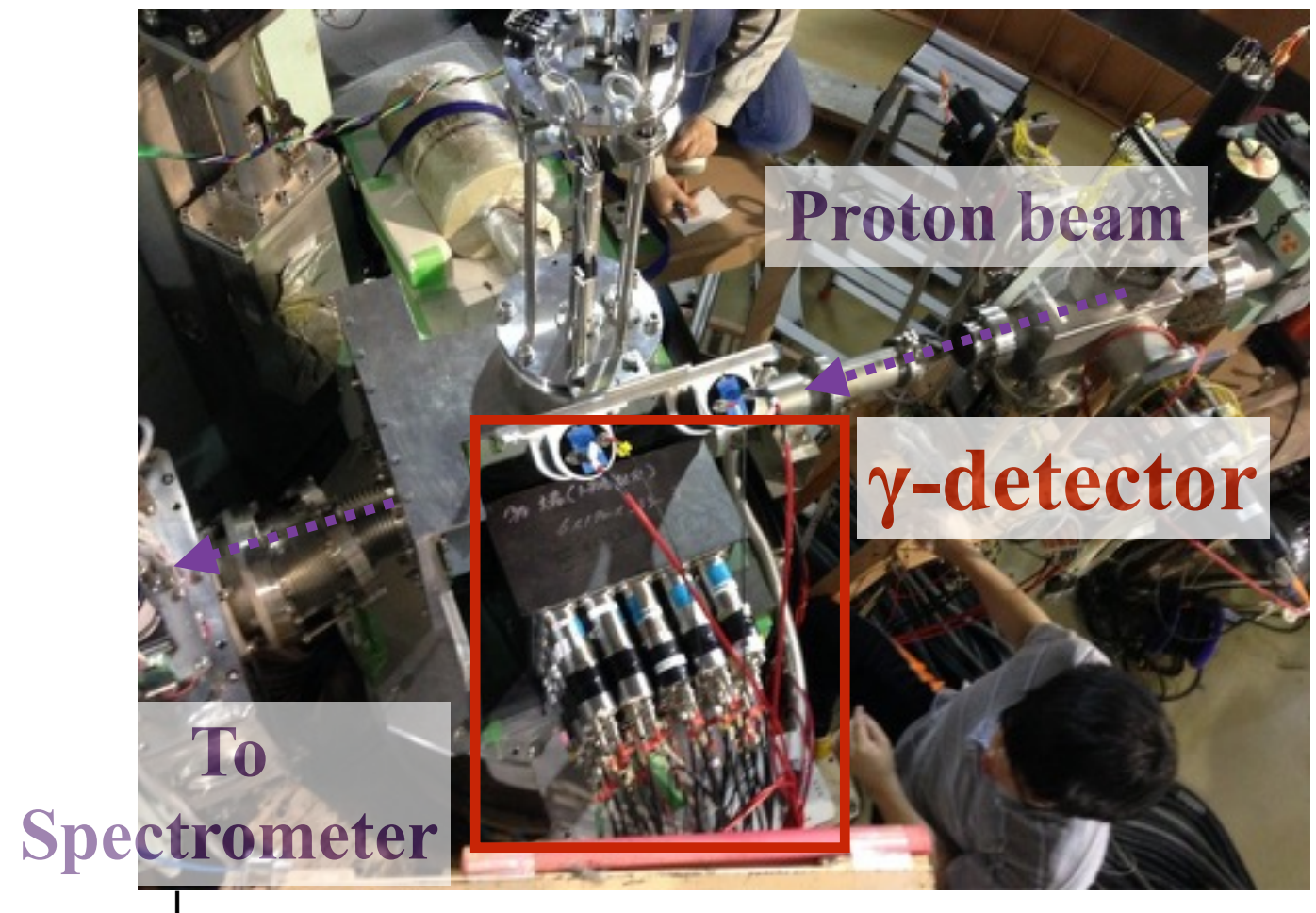
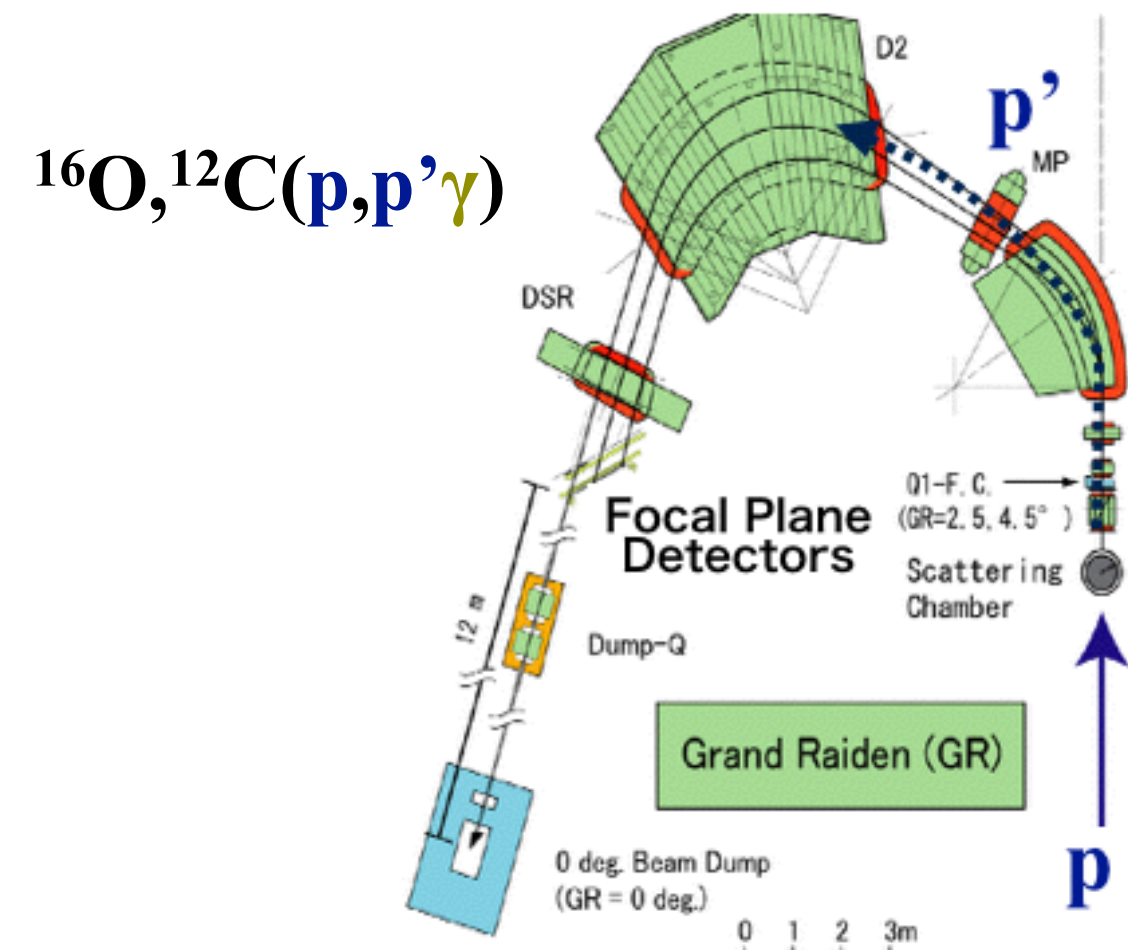
M. Sakuda, Y. Yamada, T. Shirahige, D. Fukuda, Y. Koshio, T. Yano, T. Mori (Okayama )

A. Tamii, N. Aoi, M. Yosoi, E. Ideguchi, T. Suzuki, C. Iwamoto, T. Ito,

M. Miura, T. Yamamoto (Research Center for Nuclear Physics)

T. Kawabata, S. Adachi, T. Furuno, M. Tsumura, M. Murata (Kyoto)

T. Hashimoto (IBS) , K. Miki, H. Akimune (Konan), H. Nakada (Chiba)



# Outline

## 1. イントロ

- 1) 超新星ニュートリノの検出
- 2) 中性カレント(NC)反応で検出する重要性
- 3) 原子核の巨大共鳴状態
- 4)  $^{16}\text{O}(\nu, \nu')$  と  $^{16}\text{O}(p, p')$  反応

## 2. E398 $^{16}\text{O}, ^{12}\text{C}(p, p'\gamma)$ 実験

- 1) 実験概要
- 2) 磁気スペクトロメータ “Grand Raiden” 解析
- 3)  $\gamma$ 線検出器解析 (*in-situ*  $\gamma$ -線較正)
- 4) 巨大共鳴状態から放出される $\gamma$ 線

## 3. まとめ

# 1. (1) 超新星ニュートリノ検出: CC反応 & NC反応

＊ 地球から10kpcの距離で超新星爆発が  
起きた際に地上で予想されるイベント数

- Super Kamiokande (H<sub>2</sub>O)

Ref. Beacom-Vogel, PRD58,053010,'98

$$CC: \bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n \quad \sim 8000 \text{ ev.}$$

$$NC: \nu_x + {}^{16}\text{O} \rightarrow \nu_x + X + \gamma (\nu_x = \nu_\mu, \nu_\tau) \quad \sim 700 \text{ ev.}$$

- KamLAND (CH)

Ref. A. Suzuki, Nucl. Phys. B(Proc. Suppl.) 77(1999) 171-176

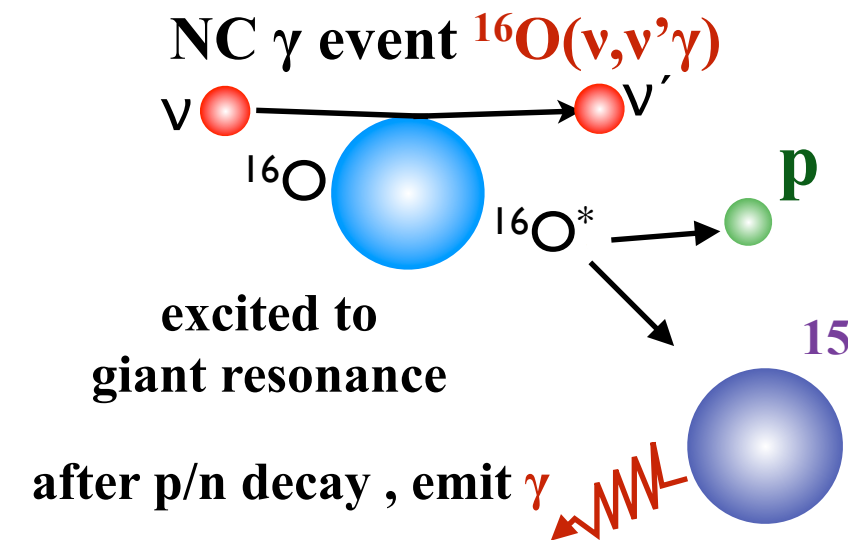
$$CC: \bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n \quad \sim 300 \text{ ev.}$$

$$NC: \nu_x + {}^{12}\text{C} \rightarrow \nu_x + X + \gamma (15.1 \text{ MeV}) \quad \sim 60 \text{ ev.}$$

$$NC: \nu_x + {}^{12}\text{C} \rightarrow \nu_x + X + \gamma (E_X > 16 \text{ MeV}) \quad \sim 60 \text{ ev.}$$

巨大共鳴からのγ線

＊ SN 1987A



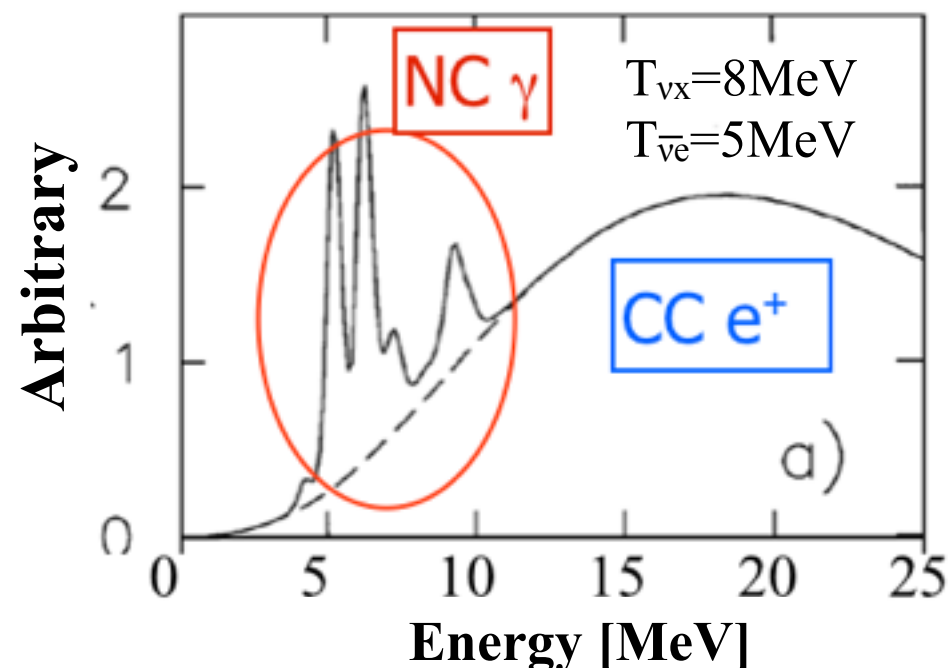
**NC事象：原子核の巨大共鳴状態から放出されるγ線が信号**



# 1. (2)中世カレント(NC)反応で検出する重要性

- 2番目に多い事象
  - $\mu, \tau$ 型(反)ニュートリノの信号
- $T_{\nu\mu}, T_{\nu\tau}$  (平衡温度)に関する情報

SKで検出した際に予想される信号



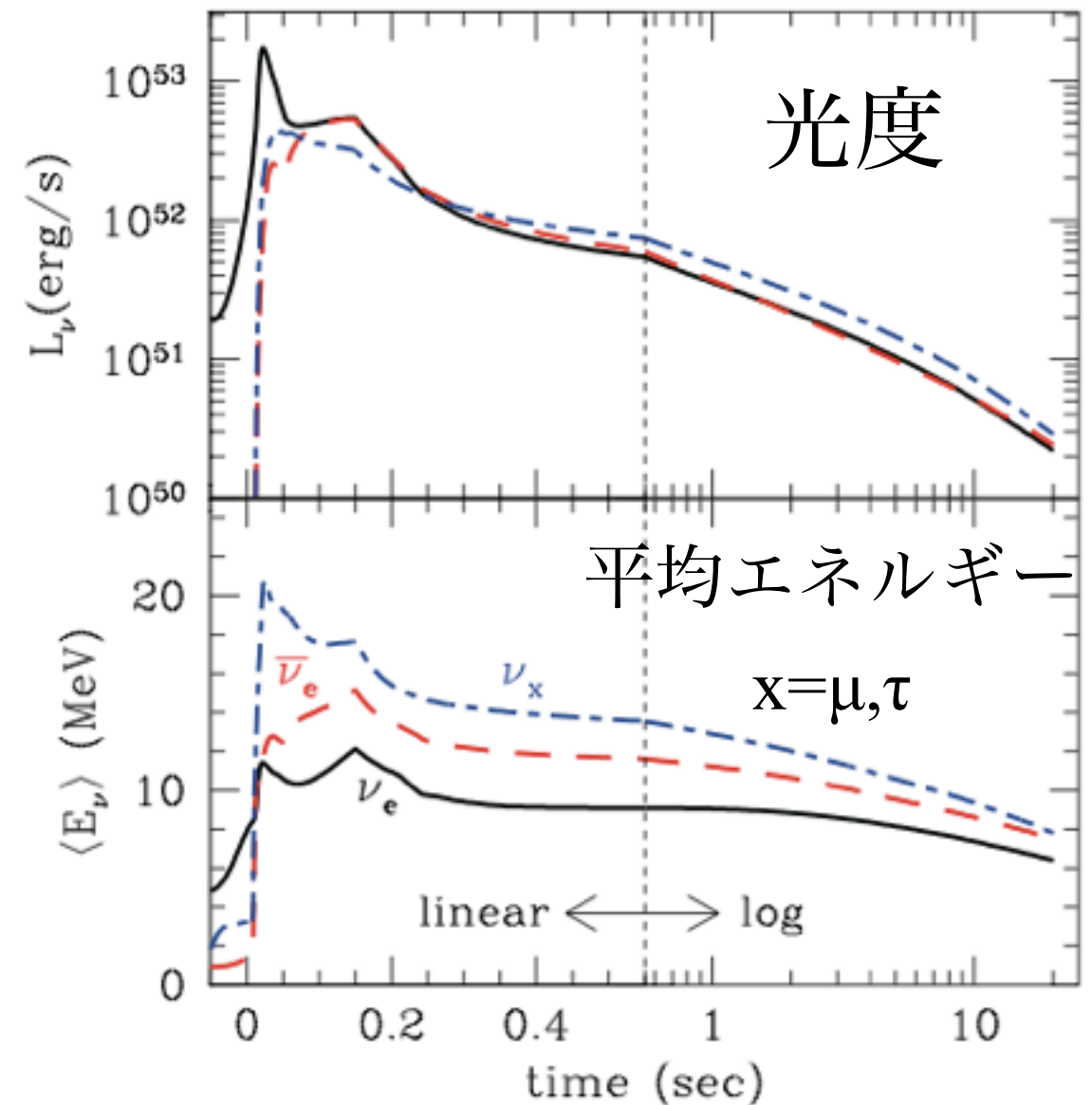
Ref. K. Langanke et al., Phys.Rev.Lett.76(1996).

\*統計崩壊モデルを使った理論計算

$^{16}\text{O}^*(\text{巨大共鳴}) \rightarrow ^{15}\text{N}/^{15}\text{O} + p/n + \gamma(5\sim 10\text{MeV}) \sim 30\%$

巨大共鳴状態から放出される $\gamma$ 線を定量的に測定したデータが存在しない。

超新星爆発シミュレーション



K. Nakazato et al., ASTROPHYS. J. S.205:2 (2013)

# 1. (3)原子核の巨大共鳴状態

- 核子(陽子、中性子)による**集団的運動(振動)**による励起状態
- エネルギー幅が大きい
- 量子数：スピン・パリティ $J^P$ 、アイソスピン $T$

## 巨大共鳴の分類例

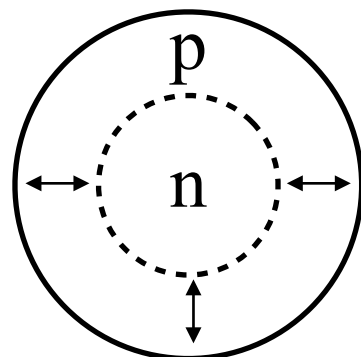
$\Delta L$ : 角運動量の変化

$\Delta T$ : アイソスピンの変化

$\Delta S$ : スピンの変化

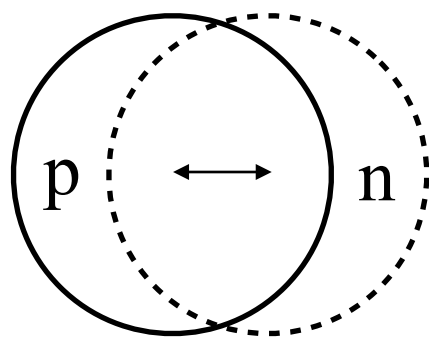
$$\Delta L=0, \Delta T=1, \Delta S=0$$

**GMR**



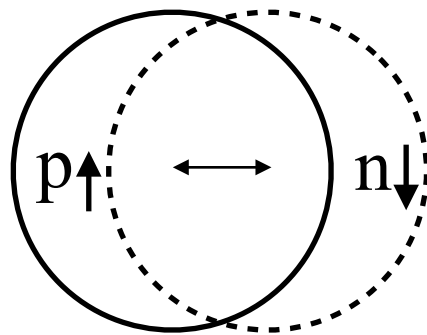
$$\Delta L=1, \Delta T=1, \Delta S=0$$

**Giant Dipole Resonance**



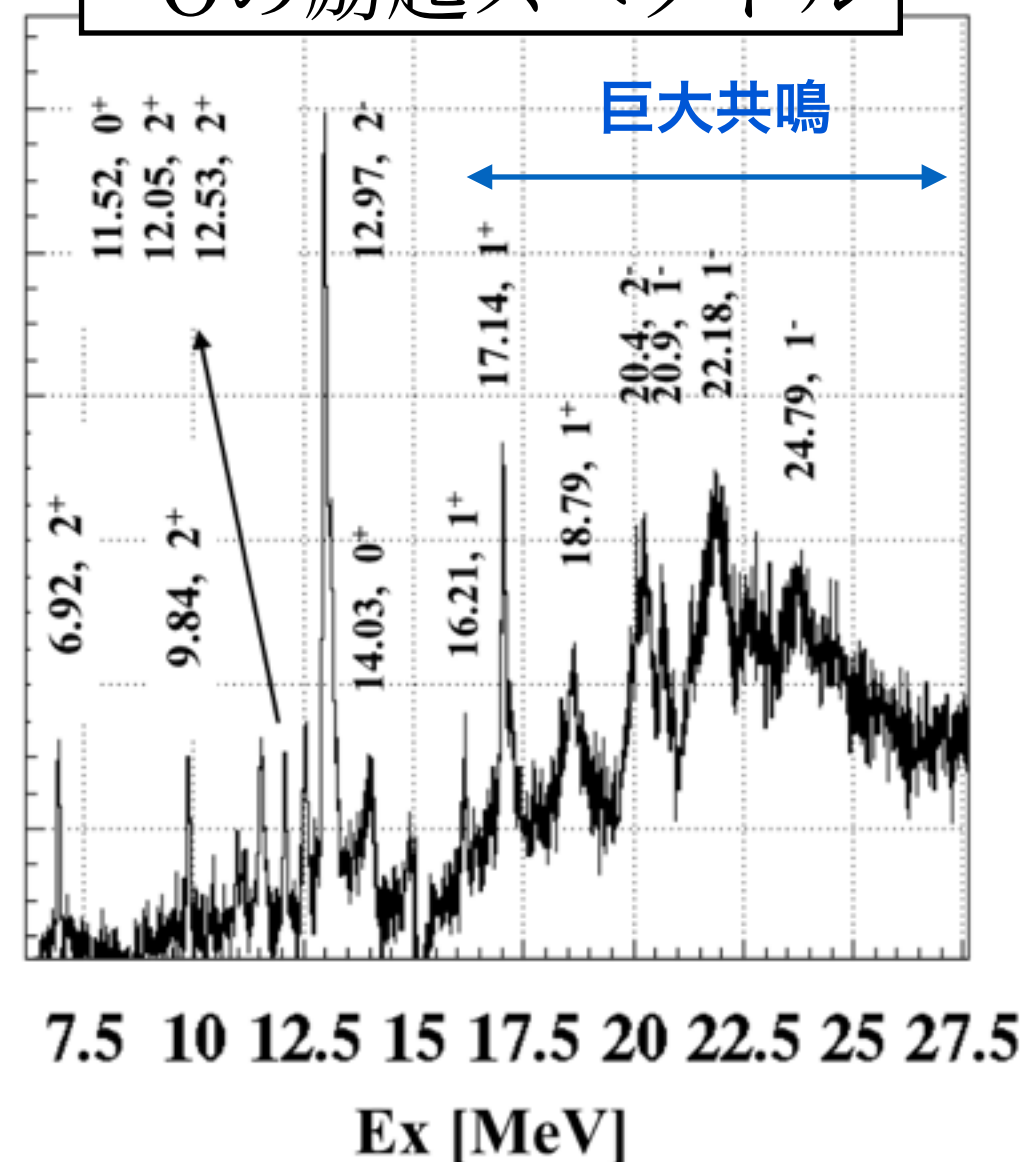
$$\Delta L=1, \Delta T=1, \Delta S=1$$

**Spin Dipole Resonance**



Counts [/10 keV]

## $^{16}\text{O}$ の励起スペクトル



# 1. (4) $^{16}\text{O}(\nu, \nu')$ 反応による巨大共鳴状態への励起

- NC  $\nu + A \rightarrow \nu + A'$

低エネルギー領域の原子核遷移行列は

Axial-Vector Current  $\gg$  Vector Current

- 特に  $J^P = 2^-(T=1), 1^-(T=1)$  の寄与が大きい。

→ 巨大共鳴の中でも、

**Spin-Dipole Resonance への励起が支配的**

( $^{12}\text{C}$  の場合は  $J^P = 1^+ (T=1)$  も → Karmen 実験で測定)

- 巨大共鳴状態の分類

GDR ( $J^P = 1^-, \Delta T = 1, \Delta S = 0, \Delta L = 1$ ):  $f_1(r) Y_1^m \tau_3$

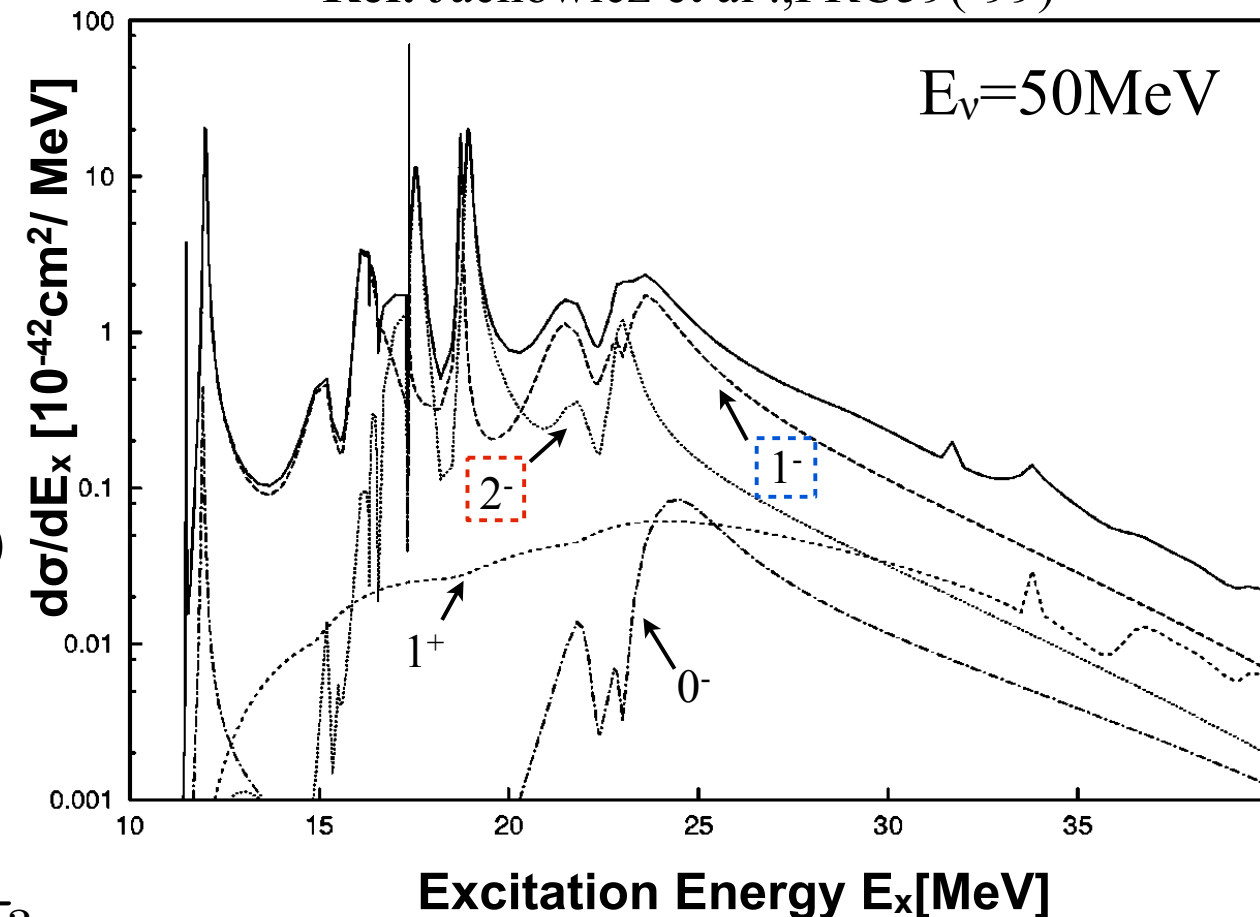
SDR ( $J^P = 0^-, 1^-, 2^-, \Delta T = 1, \Delta S = 1, \Delta L = 1$ ):  $\vec{\sigma} f_1(r) Y_1^m \tau_3$

Spin-M1 Resonance ( $J^P = 1^+, \Delta T = 1, \Delta S = 1, \Delta L = 0$ ):  $\vec{\sigma} f_0(r) \tau_3$

Spin Dipole Resonance:  $J^P = 2^-(T=1), 1^-(T=1)$  への励起が支配的  
( $^{12}\text{C}$  の場合は Spin-M1 Resonance  $J^P = 1^+, 15.1\text{MeV}$  も)

$^{16}\text{O}(\nu, \nu')$  Cross Section (CRPA Calculation)

Ref. Jachowicz et al., PRC59('99)

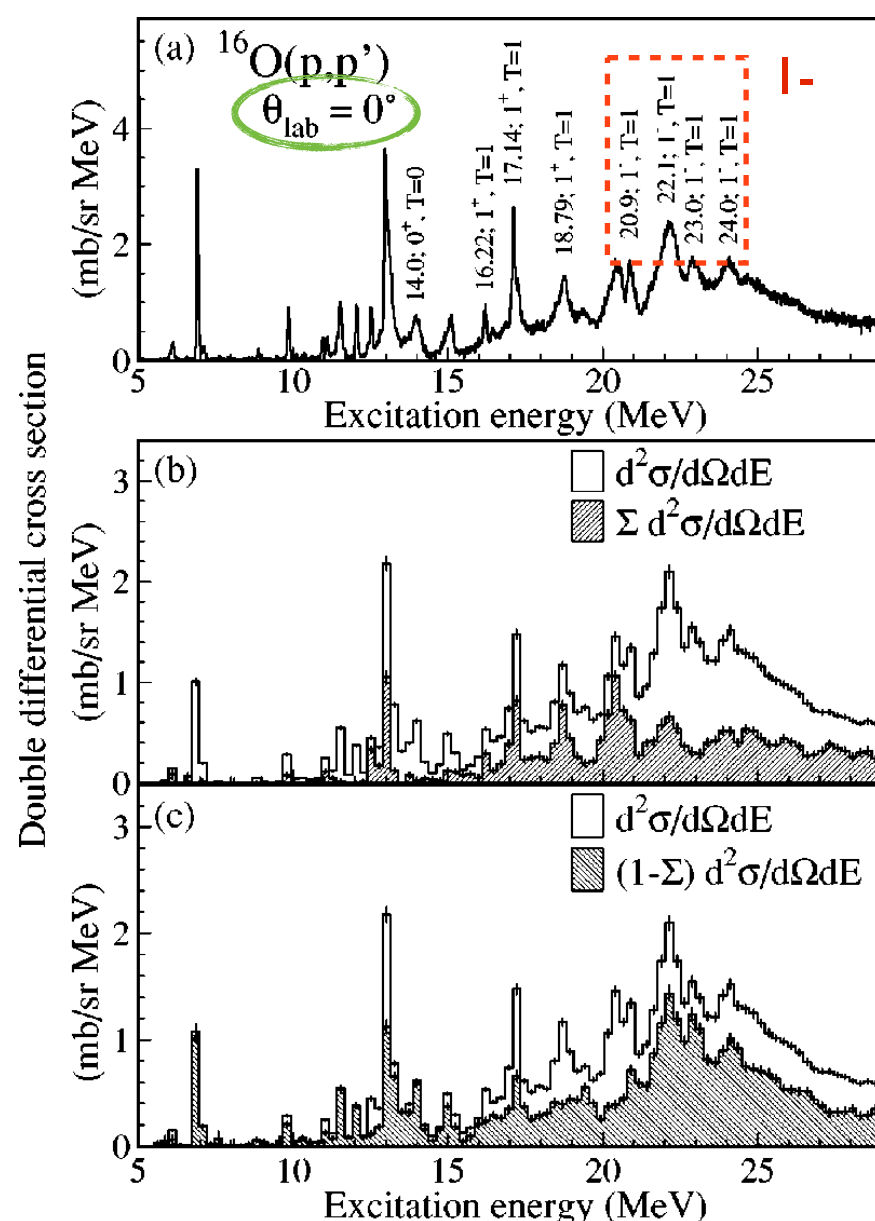


# 1. (4) $^{16}\text{O}(\text{p},\text{p}')$ 反応による巨大共鳴状態への励起

◆  $\text{O}(\nu,\nu')$ : SDR( $2^-,1^-$ )が支配的.  $\text{C}(\nu,\nu')$ : SDR &  $1^+(15.11\text{MeV})$ が支配的

◆  **$\text{O},\text{C}(\text{p},\text{p}')$ :  $E_p=392\text{MeV}$ ,  $\theta=3^\circ\sim5^\circ$ でSDR( $1^-,2^-$ )が支配的となる**

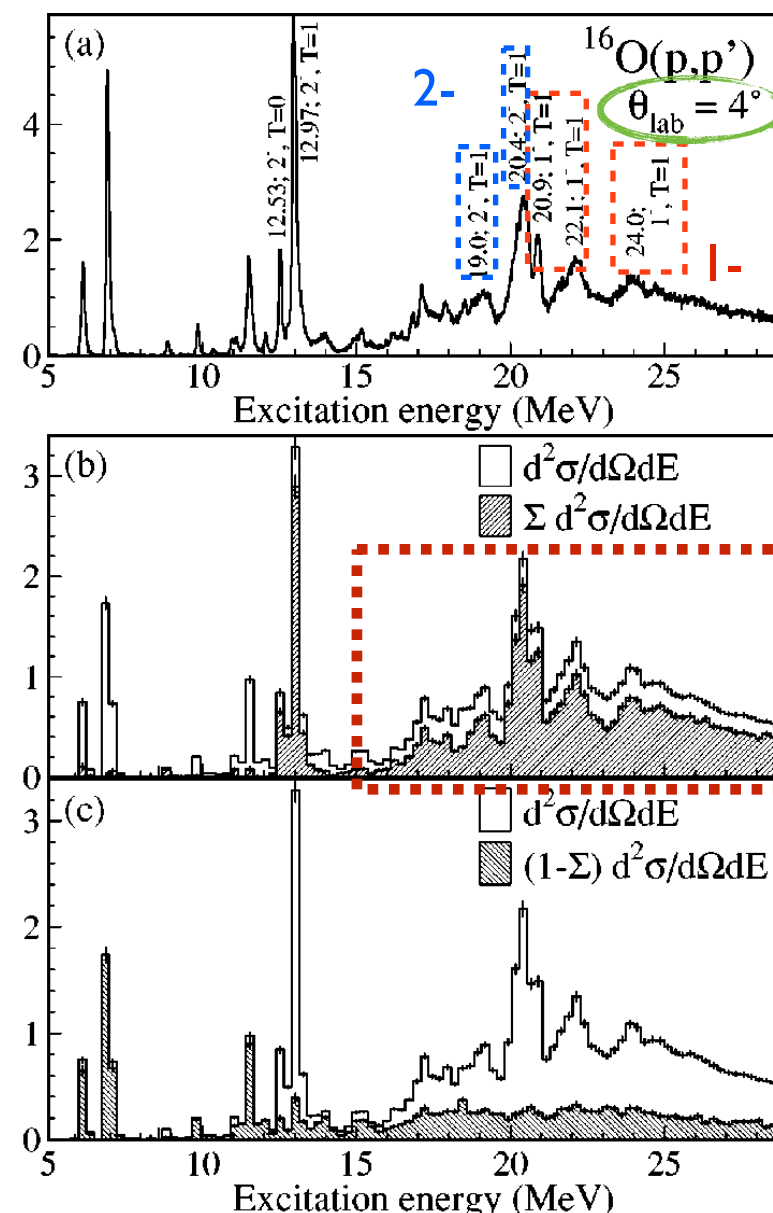
Cross Section of  $^{16}\text{O}(\text{p},\text{p}')$  ( $E_p=392\text{MeV}$ ) Ref.Kawabata et al.,PRC65('02)064316



Total

$\Delta S=1$

$\Delta S=0$



**$0^\circ$ : GDR dominant ( $\Delta L=1, \Delta S=0, \Delta T=1$ )**

**$4^\circ$ : SDR dominant ( $\Delta L=1, \Delta S=1, \Delta T=1$ )**

→(p,p')反応を使って原子核をGDR, SDRへ励起させて $\gamma$ 線を測定!



## 2. (1) E398 experiment: $^{16}\text{O}, ^{12}\text{C}(p, p'\gamma)$ 実験概要

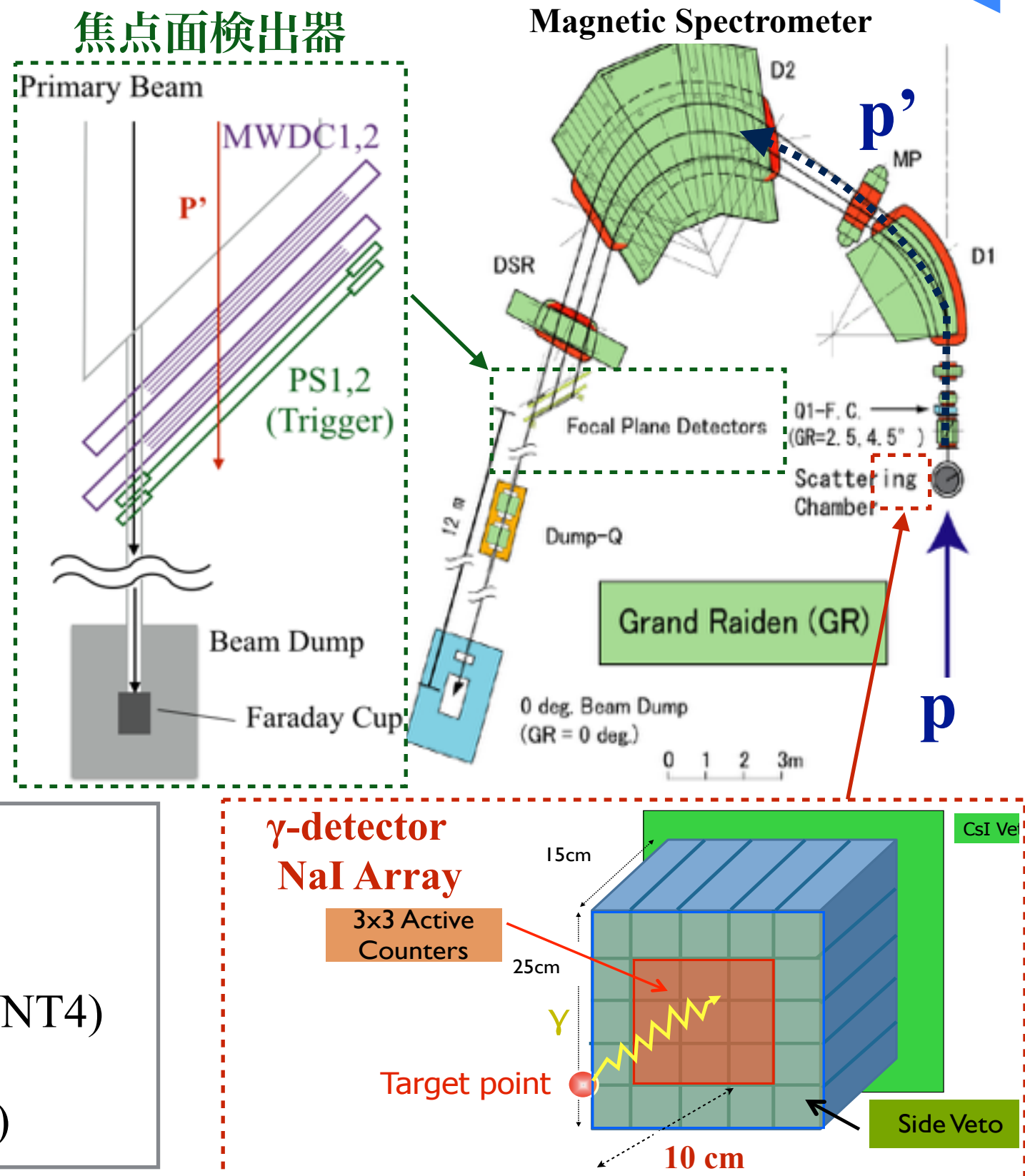
at RCNP (Osaka Univ.), 2014年5月19日~28日

### 励起エネルギー( $E_x$ )の測定

- \* 陽子ビーム: 392MeV, 0.5~1.5nA
- \* 標的:  $^{12}\text{C}$  (36.3 mg/cm<sup>2</sup>)  
 $\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$  (Cellulose, 28.2mg/cm<sup>2</sup>)
- \* Magnetic Spectrometer “**Grand Raiden**”
  - $\theta_{\text{scat}} = 0^\circ$  (covers  $0^\circ \sim 3^\circ$ )
  - Solid Angle = 5.6 msr
  - $\Delta E_x \sim 100$  keV

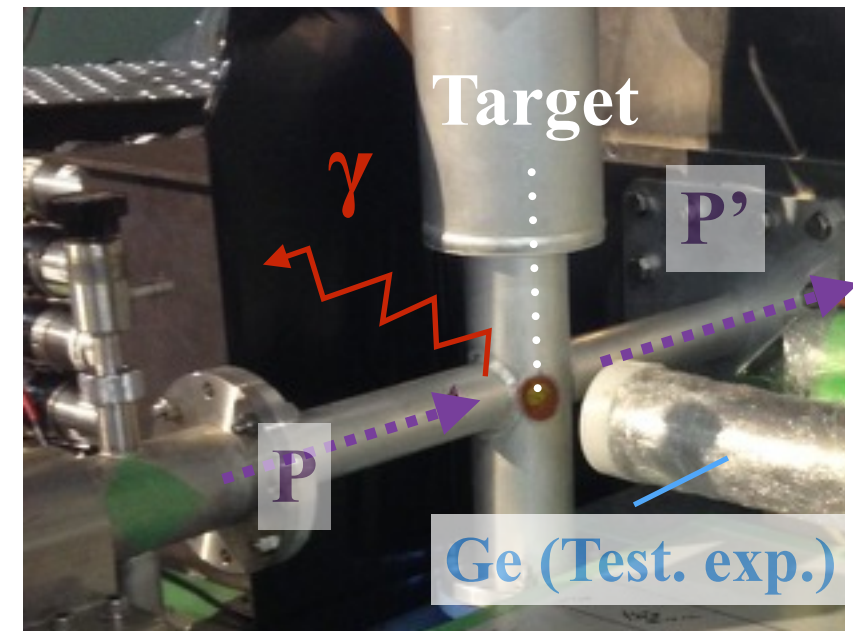
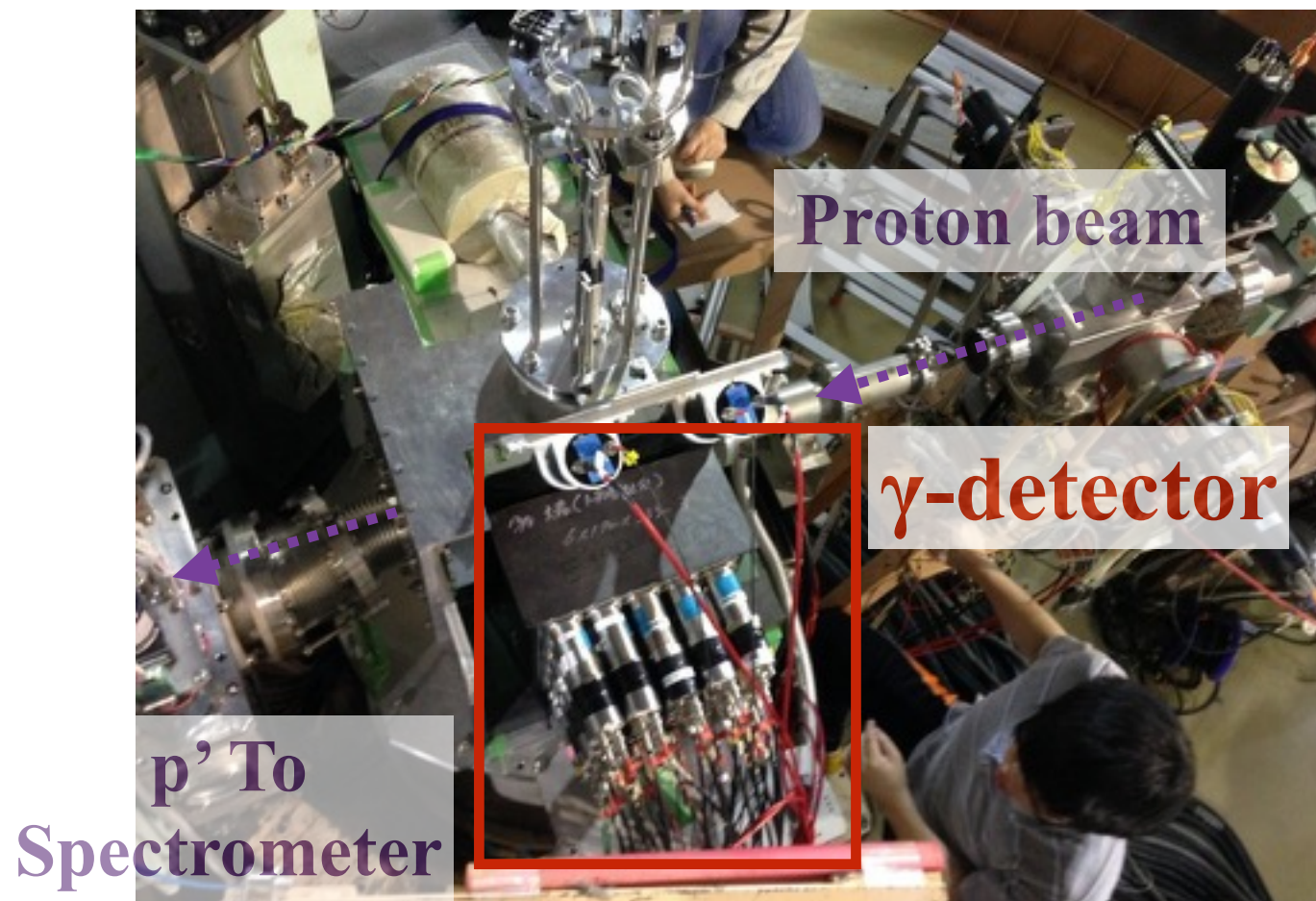
### $\gamma$ 線のエネルギー( $E_\gamma$ )の測定

- \*  $\gamma$ 線検出器: NaI(Tl)  $\times 25$  Array
  - Solid Angle  $\times$  Detection Efficiency  
 $\sim 2\%$  @6MeV (GEANT4)
  - NaI:  $5 \times 5 \times 15$  cm,  $\Delta E/E \sim 5\%$  @1.33MeV
  - 前面: Plastic Scintillator Veto (3mm厚)





## 2. (1) E398 experiment: $^{16}\text{O}, ^{12}\text{C}(p, p'\gamma)$ 実験概要

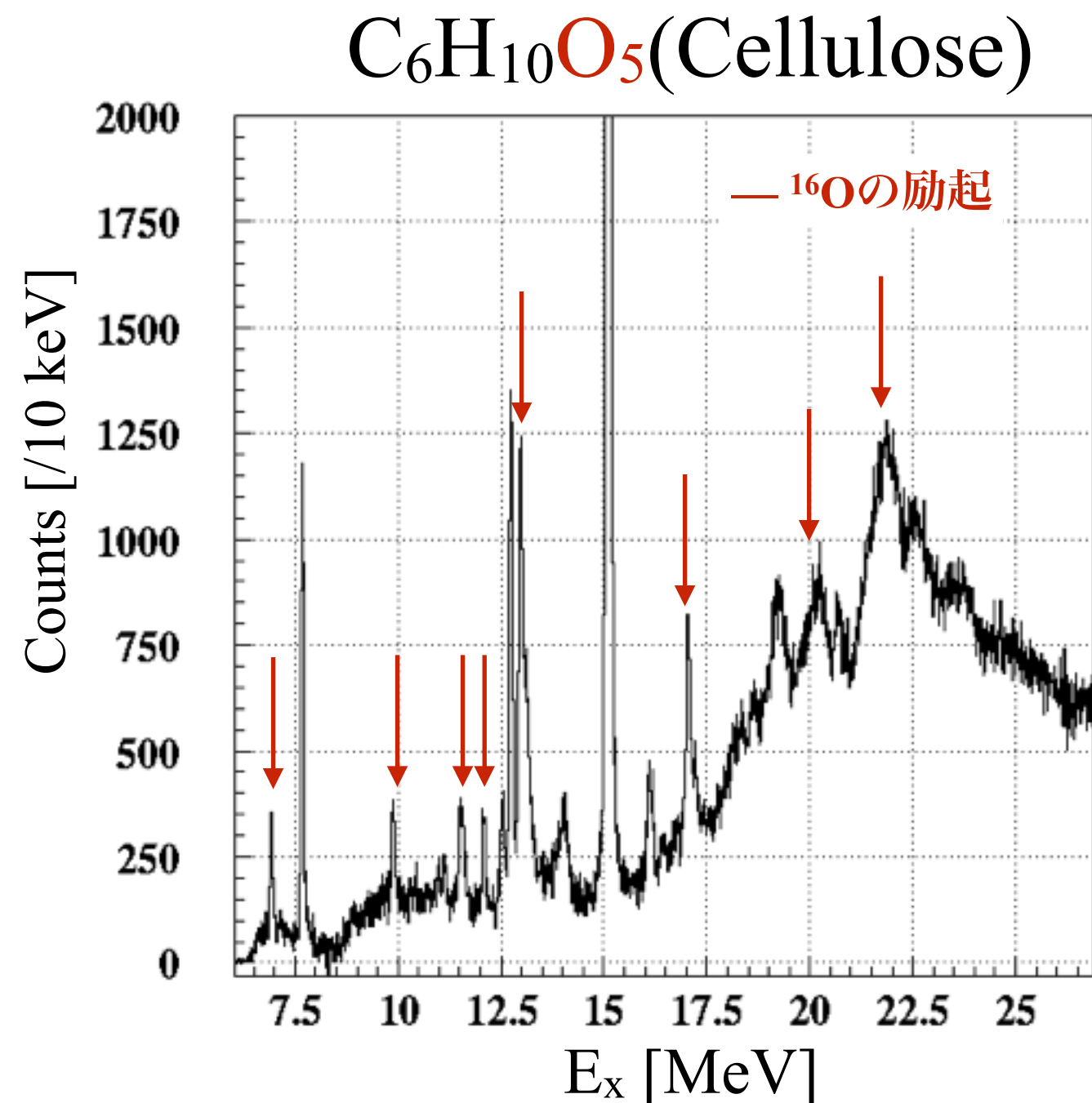
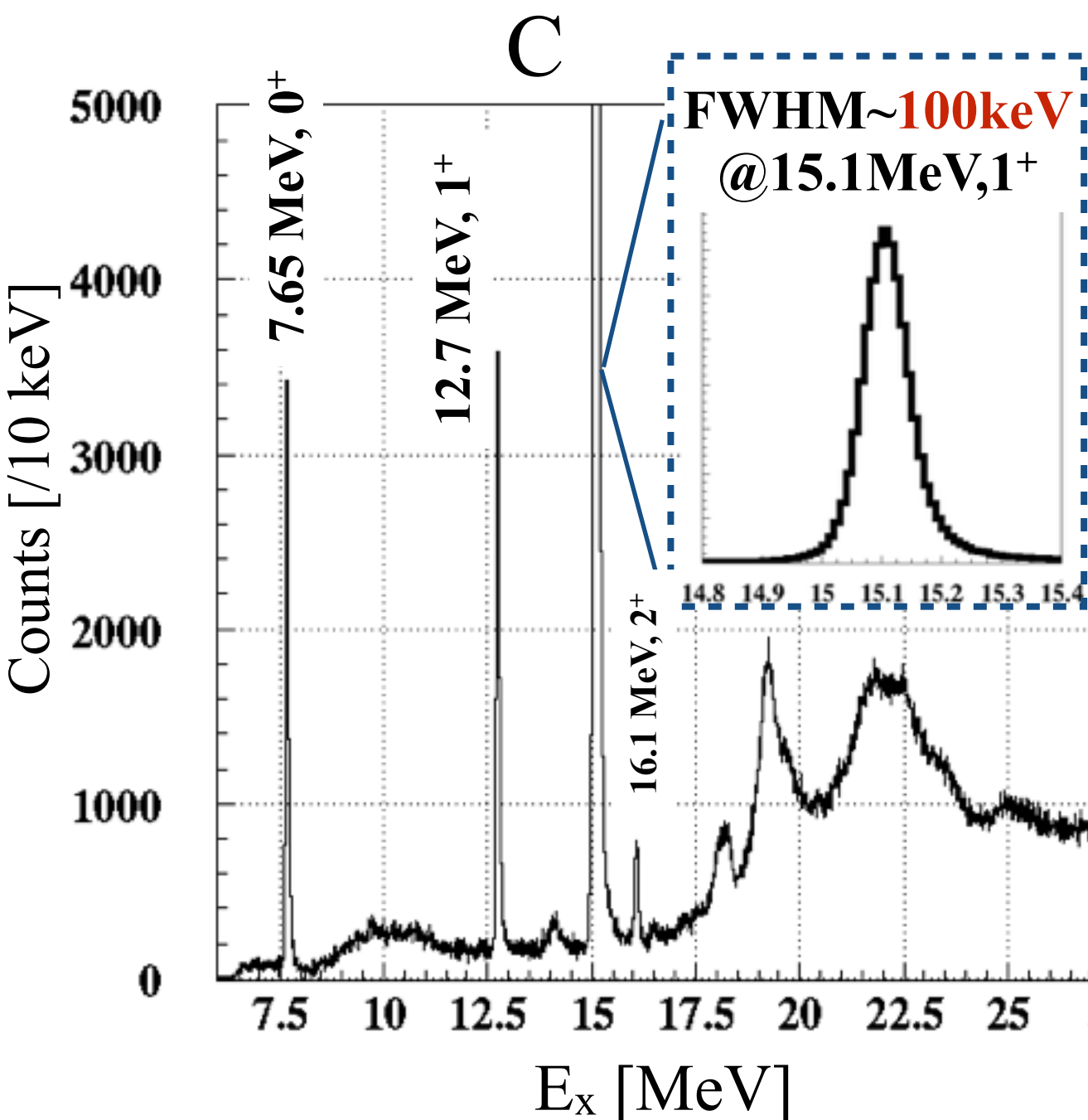


### Gamma DAQ

- \* トリガー条件： Grand Raidenのトリガーで1 $\mu\text{sec}$ のゲートを作成し、この間にNaIが1つでも光ると $\gamma$ 線DAQをスタート
- \* 各NaIのThreshold： 500~600keV
- \* 保存されるデータ：
  - TDC $\times$ 25ch [Grand Raidenとの同期]
  - ADC $\times$ 25ch [ $\gamma$ 線のエネルギー]

## 2. (2) “Grand Raiden”で取得した励起スペクトル

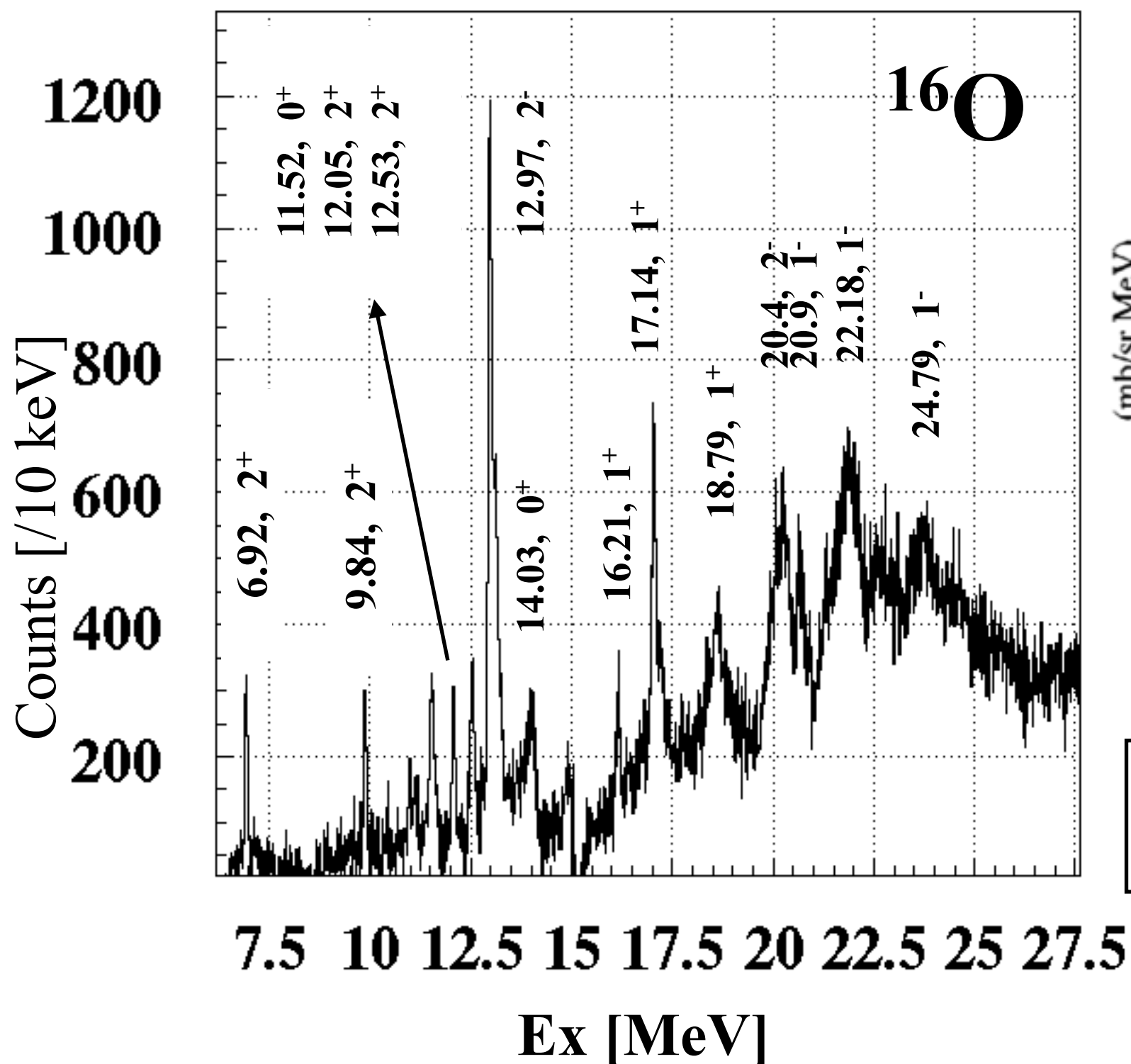
解析したデータ: C target, 0.5nA, 2hrs & C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub> target, 0.5nA, 2hrs



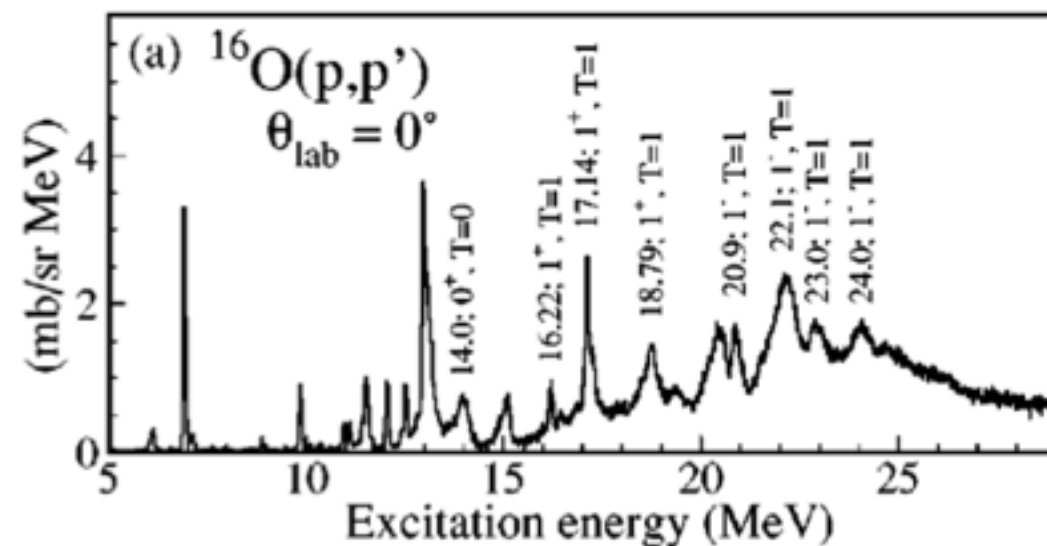
各ピークのエネルギー値は文献値と一致した

## 2. (2) $C_6H_{10}O_5$ から $^{12}C$ を引いて得た $^{16}O$ の励起スペクトル

\*Subtraction Normalized by 15.1MeV,  $1^+(^{12}C)$



氷標的に測定された  
 $^{16}O$  の励起スペクトルと比較



Taken from **Ref. T. Kawabata**  
PHYSICAL REVIEW C, VOLUME 65, 064316  
(2002)

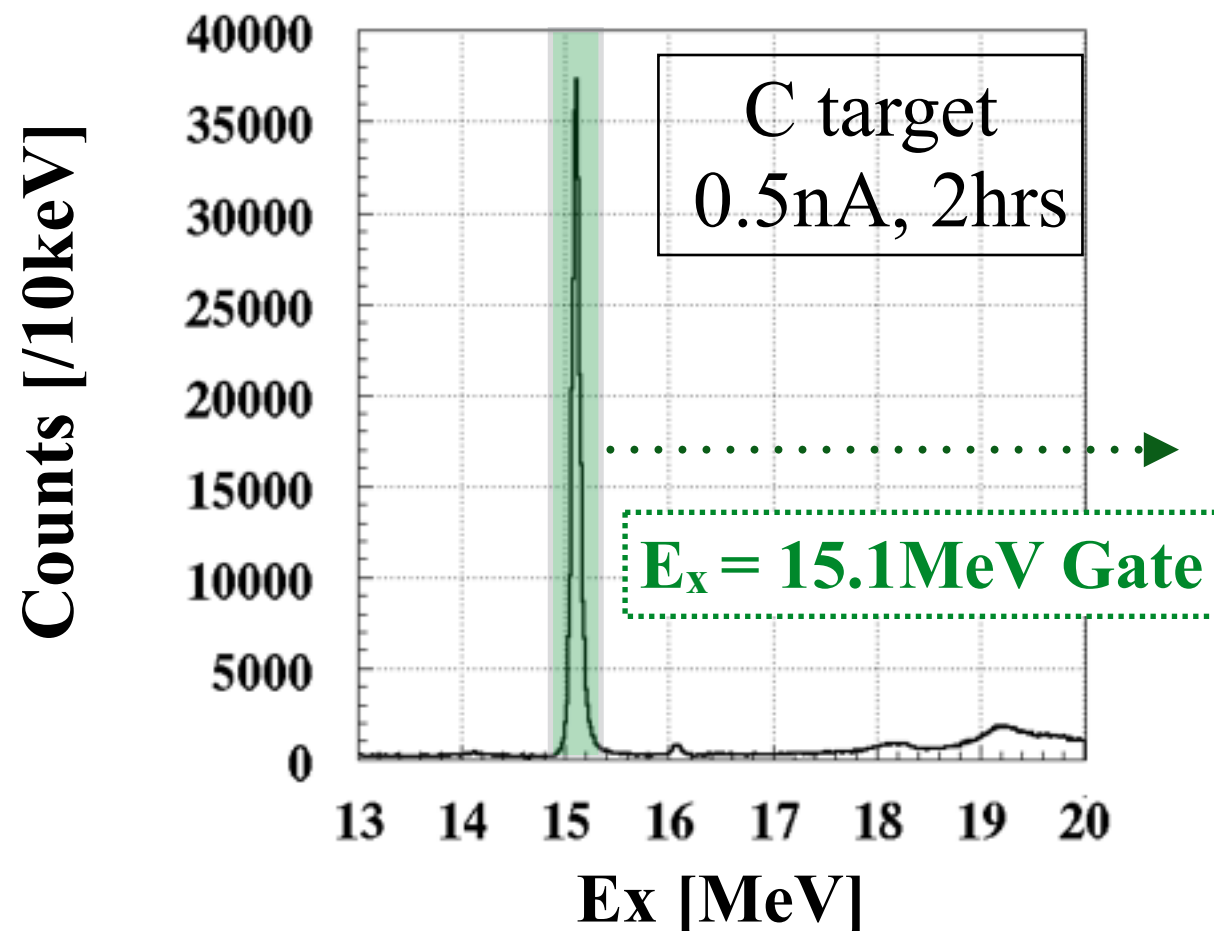
- 正しく引き算が行えている
- 巨大共鳴状態への励起を確認



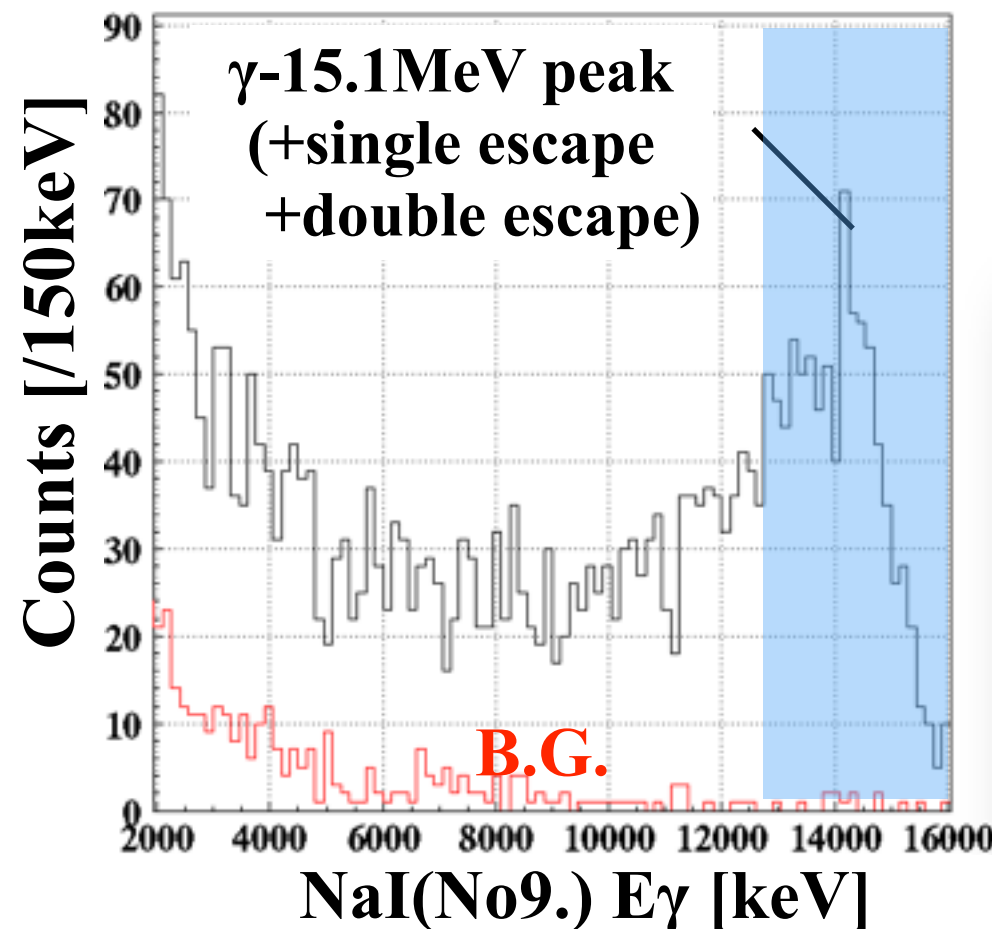
## 2. (3) $\gamma$ 線検出器解析：in-situ 15.1MeV $\gamma$ 線較正

- $^{12}\text{C}$ の $J^P=1^+$ , 15.1MeVの励起状態は $88\%\pm 3\%$ の確率で15.1MeVの $\gamma$ 線を放出する。
- これを用いて、各NaIのエネルギー較正・ $\gamma$ 線検出器の検出効率の較正を行う。

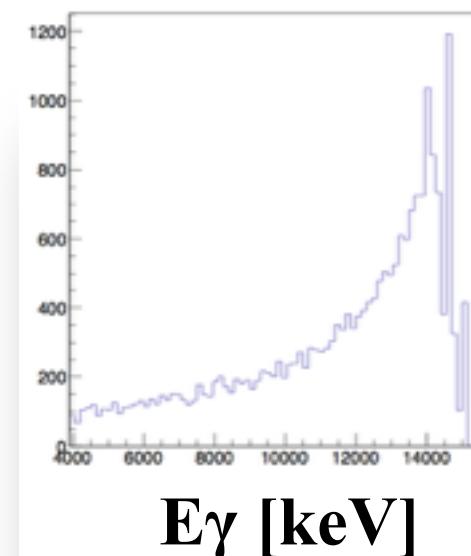
励起エネルギースペクトル



NaI 1つで検出された  
エネルギー-スペクトル



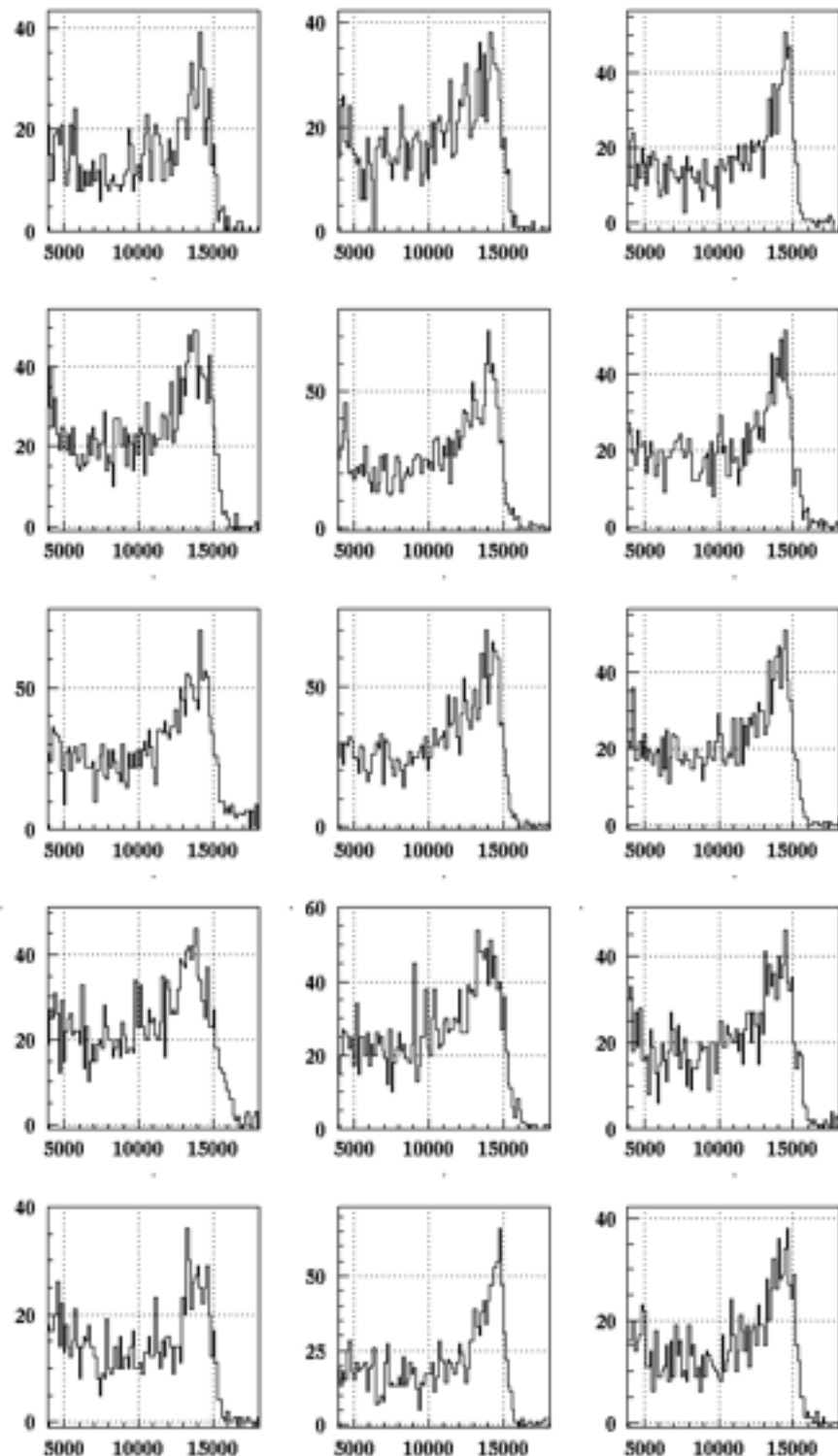
Ref. MC(GEANT4)



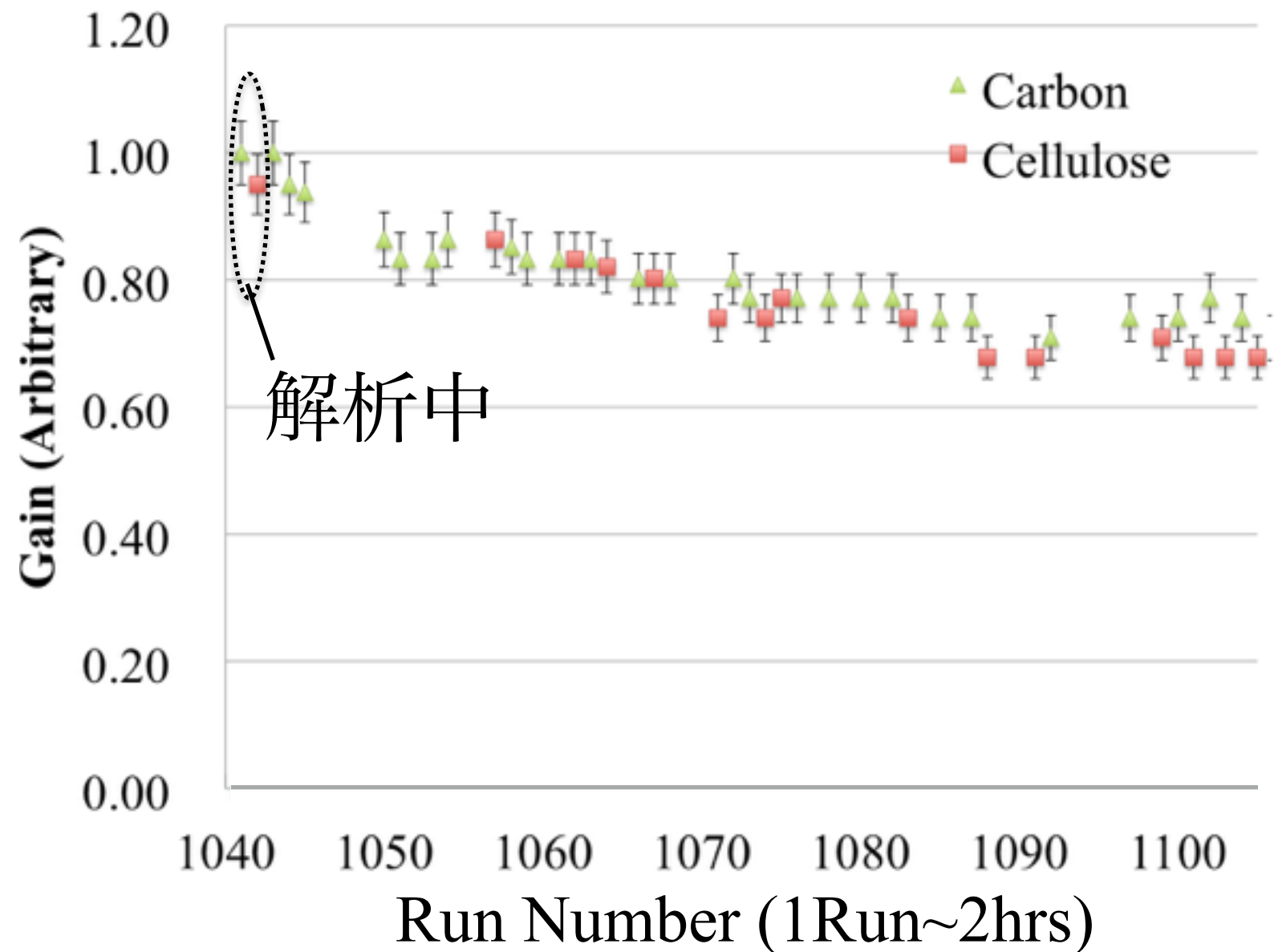
→巨大共鳴状態から放出される $\gamma$ 線の放出率を精度良く測定できる

## 2. (3) $\gamma$ 線検出器解析 : エネルギー較正

### 各NaIのエネルギー較正



### Gain Shift of a NaI Detector



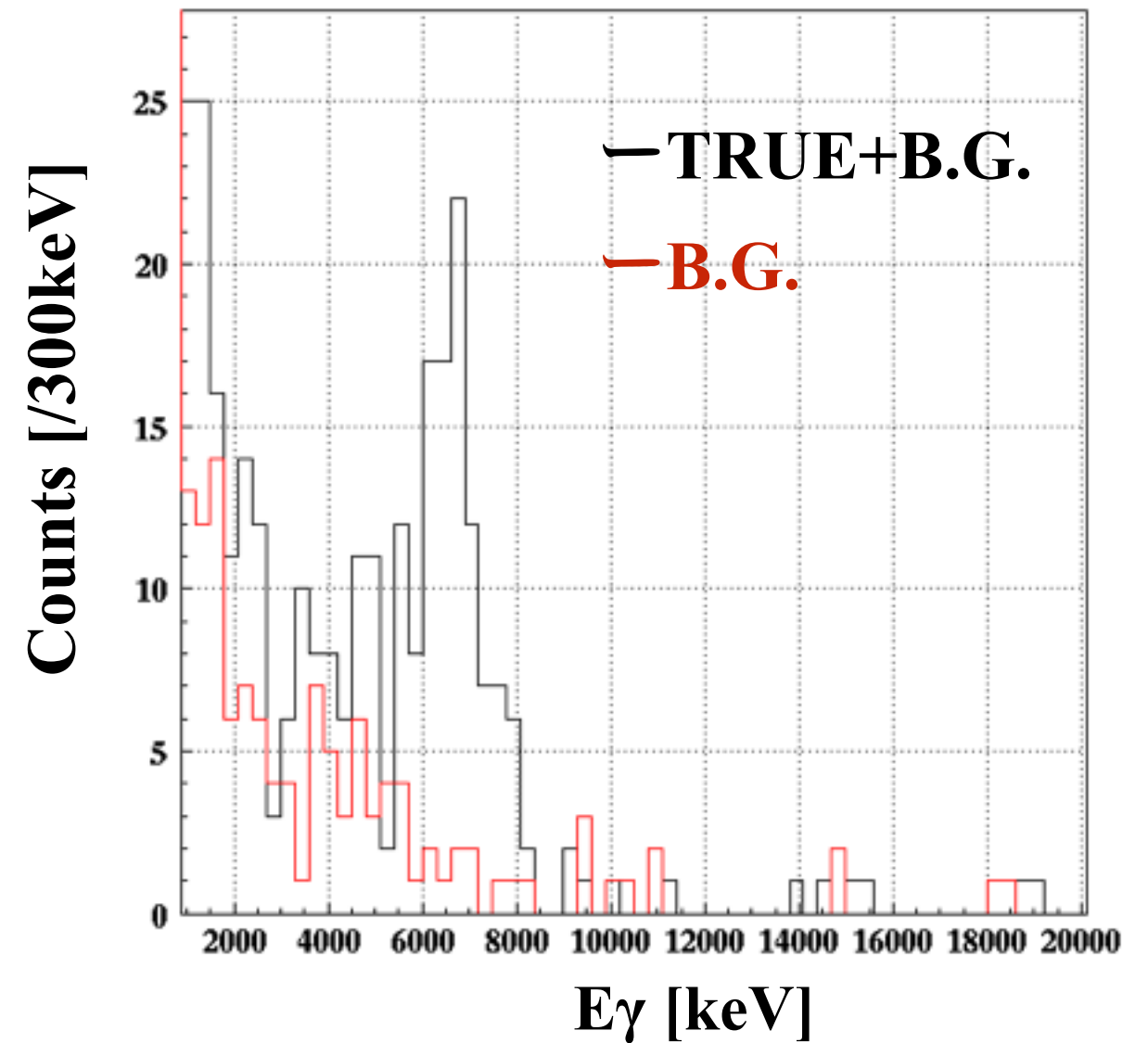
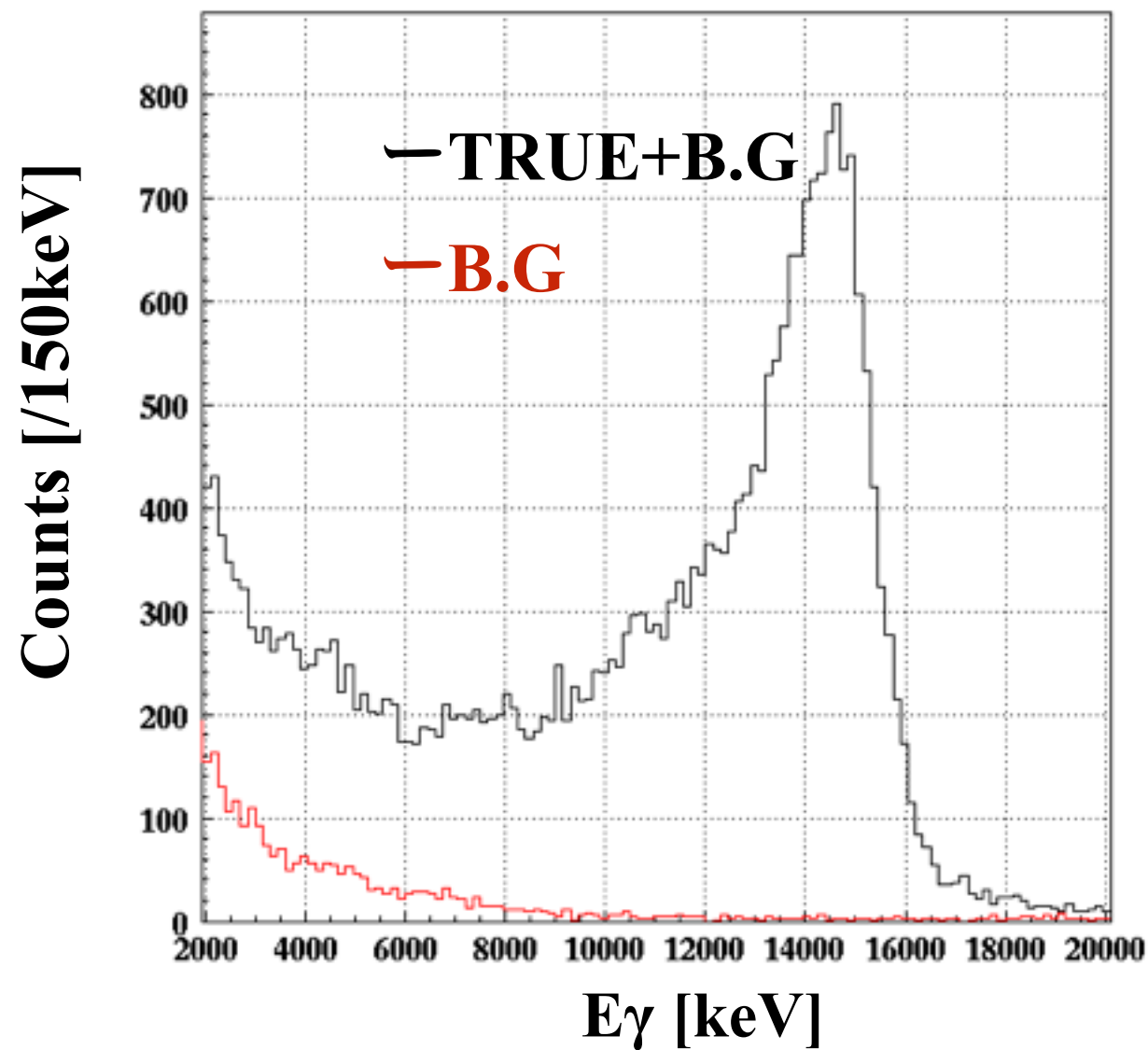
**in-situ** 15.1MeV- $\gamma$ を用いて  
各Runで較正を行う (Gain変動補正)

## 2. (3) $\gamma$ 線検出器解析 : アレイ化

NaI 15個のエネルギーを足し合わせたスペクトル

$^{12}\text{C}:\text{E}_\text{x}=15.1\text{MeV}, 1^+, \text{Pr}_{\gamma-15.1}=88\%\pm3\%$

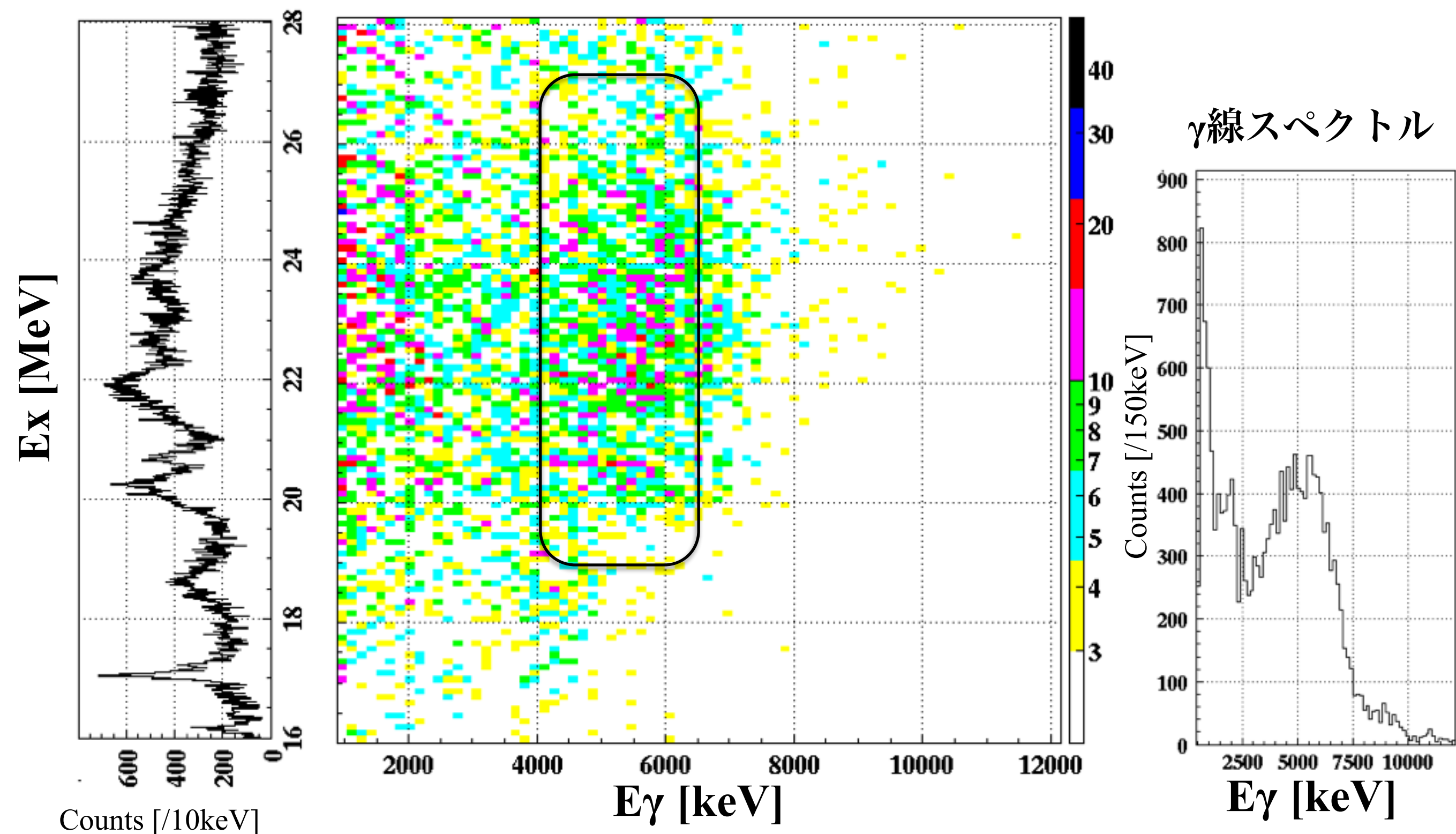
$^{16}\text{O}:\text{E}_\text{x}=6.9\text{ MeV}, 2^+, \text{Pr}_{\gamma-6.9}\sim 100\%$



→ $\gamma$ 線検出器の検出効率の校正

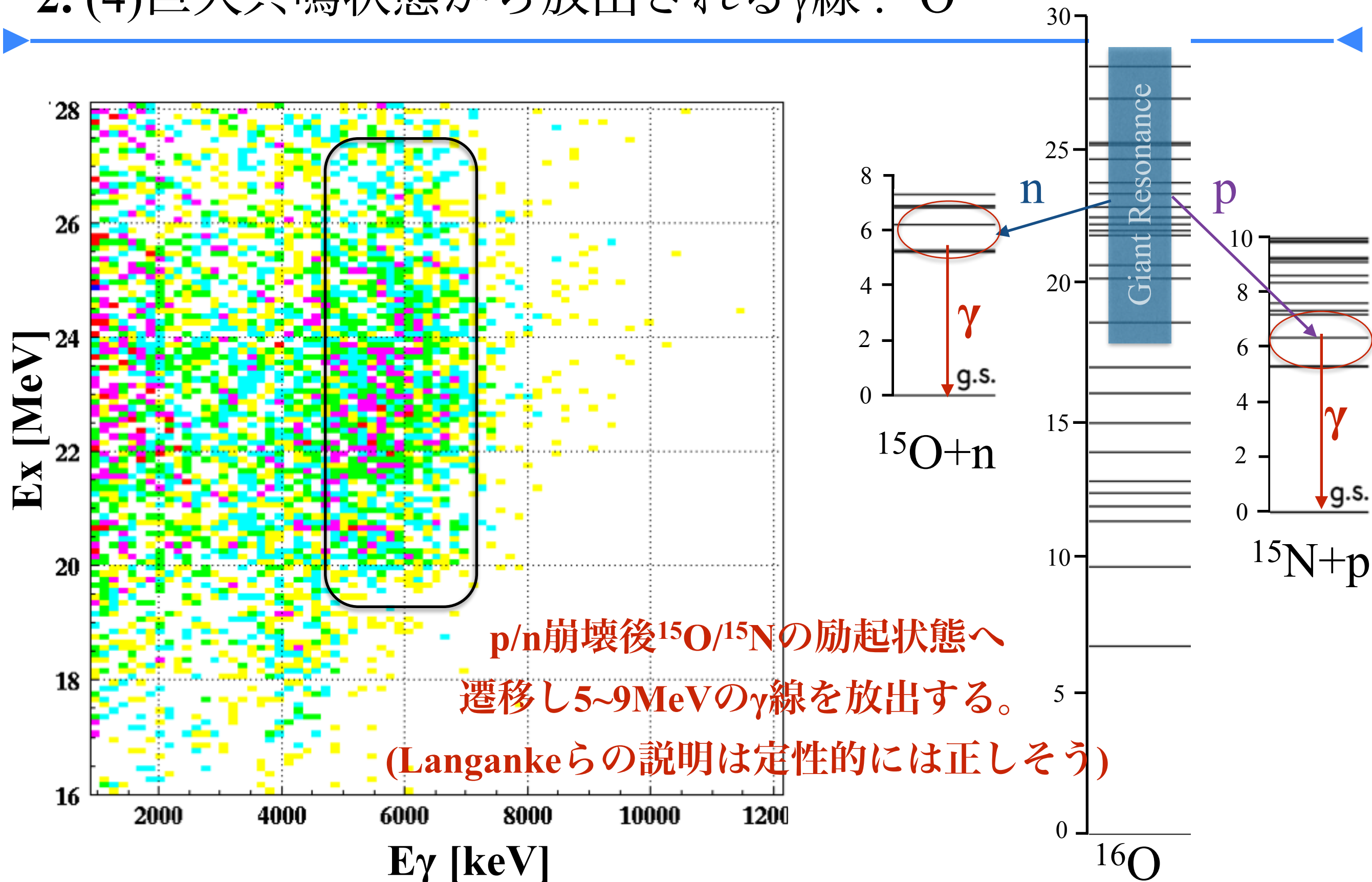


## 2. (4) 巨大共鳴状態から放出される $\gamma$ 線： $^{16}\text{O}$

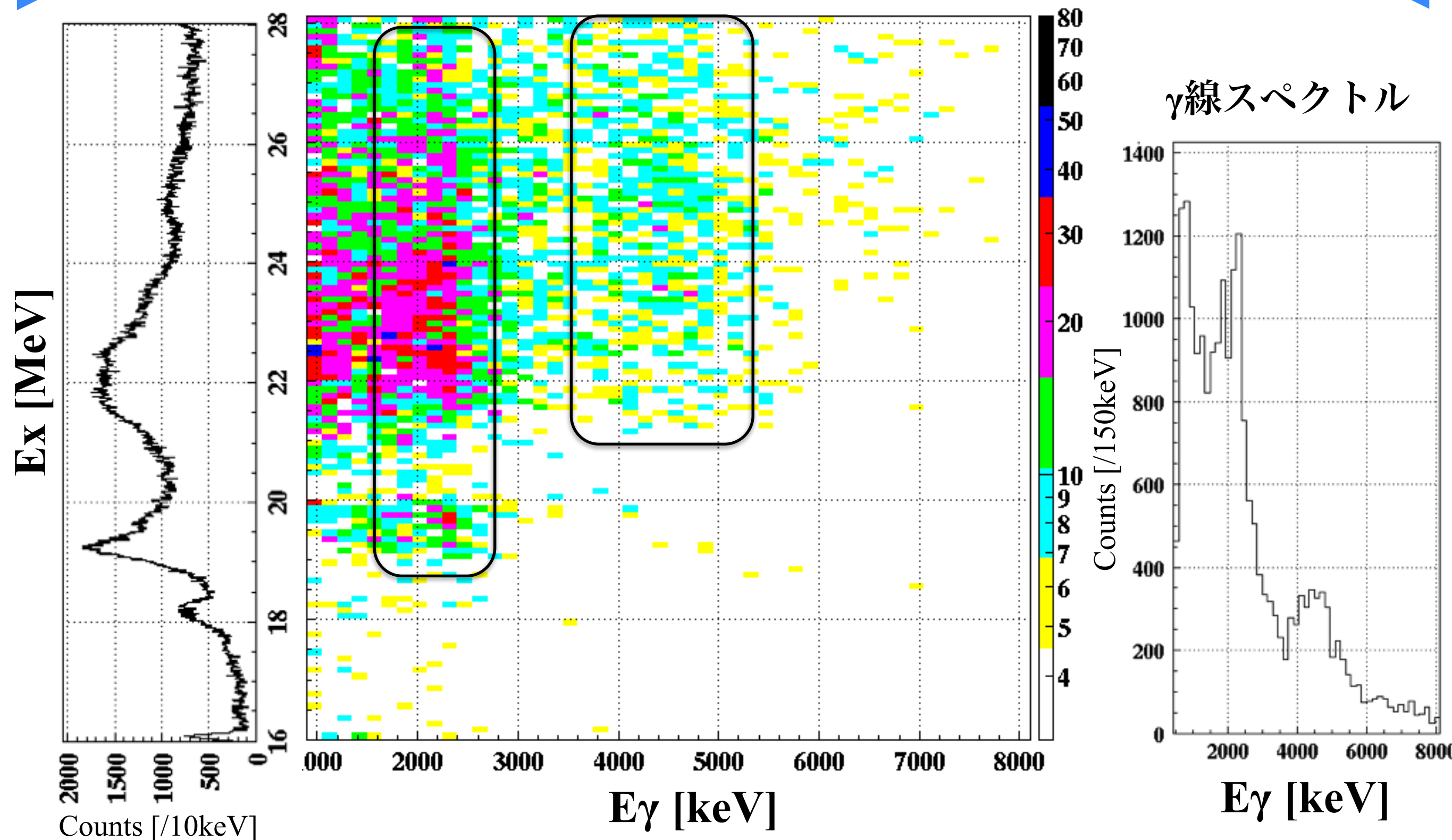


巨大共鳴状態から放出される $\gamma$ 線が測定された

## 2. (4) 巨大共鳴状態から放出される $\gamma$ 線： $^{16}\text{O}$



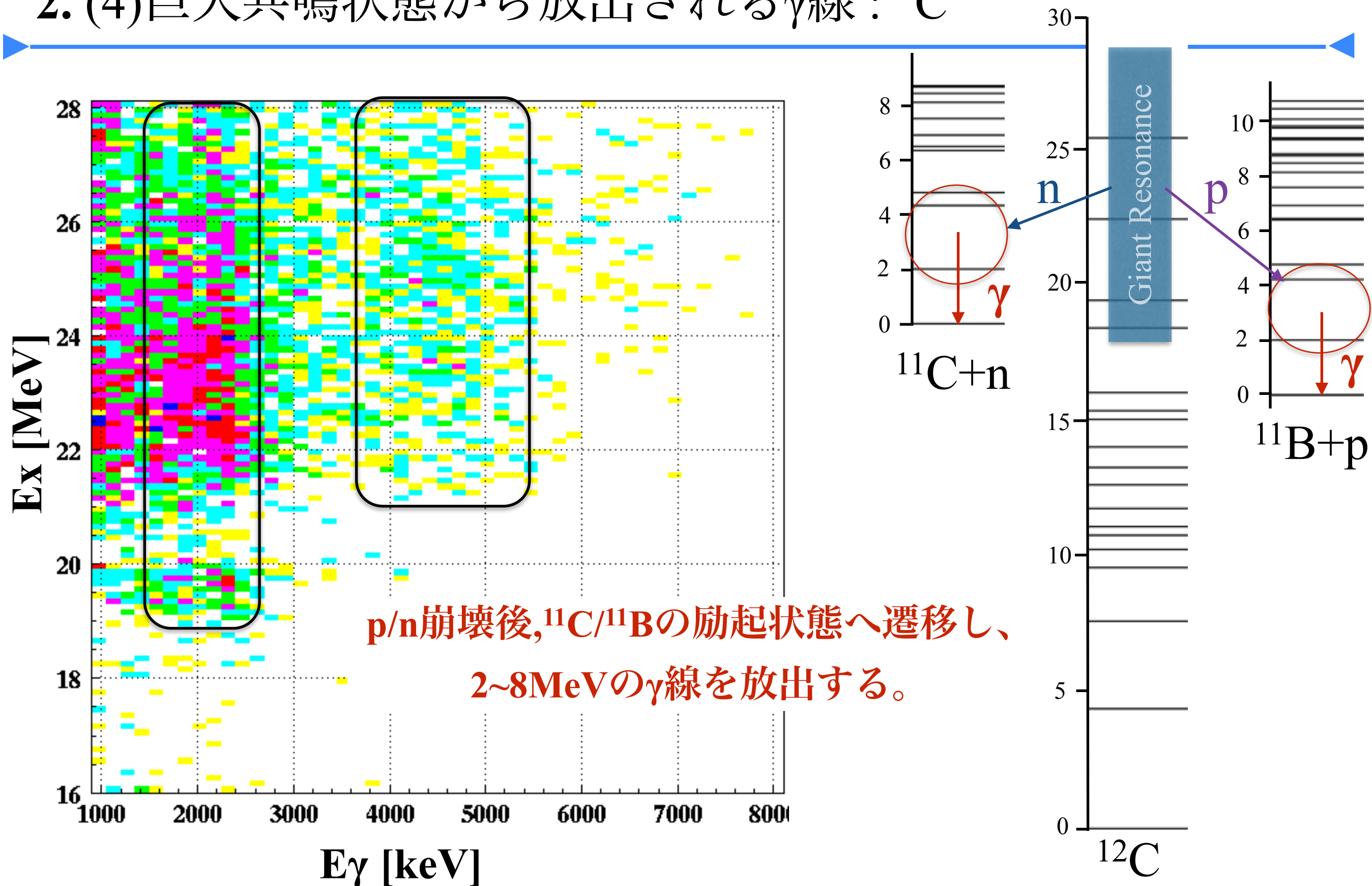
## 2. (4) 巨大共鳴状態から放出される $\gamma$ 線： $^{12}\text{C}$



巨大共鳴状態から放出される $\gamma$ 線が測定された



## 2. (4) 巨大共鳴状態から放出される $\gamma$ 線： $^{12}\text{C}$



## 2. (4) イベント数の見積もり & 放出率の算出方法

- 解析した2時間のデータで得た巨大共鳴( $E_x=16\sim 28\text{MeV}$ )の $\gamma$ 線イベント数  
 $^{12}\text{C}(1\text{MeV}<E_\gamma<5\text{MeV}) : 2\times 10^4$ 、 $^{16}\text{O}(3\text{MeV}<E_\gamma<7\text{MeV}) : 1\times 10^4$
- 合計測定時間  $^{12}\text{C} : 40\text{時間}$   $^{16}\text{O} : 30\text{時間}$   
→ 予想される $\gamma$ 線イベント数  $^{12}\text{C} : 4\times 10^5$   $^{16}\text{O} : 2\times 10^5$

### \* 放出率(Pr)の算出方法

$N_{Ex}$  : 励起の数、 $N_\gamma$  :  $\gamma$ 線の事象数、 $\varepsilon_\gamma$  :  $\gamma$ 線検出効率、Live : Live time

$$N_\gamma = N_{Ex} \times \text{Pr}(E_x) \times \varepsilon(E_\gamma) \times \text{Live}$$

$\varepsilon_\gamma(E_\gamma) \times \text{Live}$  は 15.1MeV、6.9MeV で校正し MC と比較

$\Delta E_x=1\text{MeV}$  の step で放出率を 10% 内の誤差(stat.+sys.)で求める。

# 3.まとめ

✱超新星ニュートリノによる $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$ とのNC事象の重要性

- $\mu, \tau$ 型ニュートリノによるイベントである。→平衡温度Tに関する情報

✱NC事象は巨大共鳴状態へ励起された原子核から放出される $\gamma$ 線で同定される。

しかし、実際に放出率を測定した定量的なデータがなかった。

→ニュートリノの代わりに陽子を用いて、巨大共鳴状態へ励起させて $\gamma$ 線を測定した

✱ E398実験  $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}(p, p'\gamma)$ 実験：データ解析 ( $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$  2時間ずつのデータ)

- 励起スペクトル→巨大共鳴状態への励起を確認
- in-situ 15.1MeV- $\gamma$ による検出器の較正
- 巨大共鳴状態からの $\gamma$ 線スペクトル

→核子崩壊後の娘核の励起状態から $\gamma$ 線を放出するという予想は定性的には正しそう

～これから～

✱ $\gamma$ 線の放出率を励起エネルギー1MeVごとに10%内の誤差で求める。

- 検出効率をMCと比較 (in-situ 15.1MeV,  $^{60}\text{Co}$ 線源...)
- 残りのデータ解析 (~60時間) : 15.1MeV- $\gamma$ でRunごとに較正

✱データを散乱角=0~1度と2~3度に分けて比較→GDRとSDRでの違いを検証