

炭素・酸素巨大共鳴状態 からの γ 線生成実験結果

須藤 高志 岡山大学

新学術 地下素核研究会 第四回超新星ニュートリノ研究会

For RCNP E398 Collaboration

O.Iwa, M.S.Reen, R.Dhir, M.Sakuda, Y.Yamada, T.Shirahige, D.Fukuda, Y.Koshio, 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), T.Yano (Kobe)

Outline

1. イントロダクション
2. 実験方法
3. 磁気スペクトロメータ解析
4. γ 線検出器解析
5. 巨大共鳴から粒子崩壊によって放出される γ 線
6. 巨大共鳴から電磁崩壊によって放出される γ 線
7. まとめ

超新星ニュートリノ検出

超新星ニュートリノと原子核の中性カレント反応によって原子核
巨大共鳴状態から γ 線が放出される

→系統的なデータが存在しないのでE398実験で測定する。

* 重力崩壊型の超新星爆発:

重力エネルギーの99%が ν として放出される
地上の検出器で期待される ν 信号数(@10kpc)

• Super Kamiokande (H₂O)

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

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

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

• KamLAND (CH)

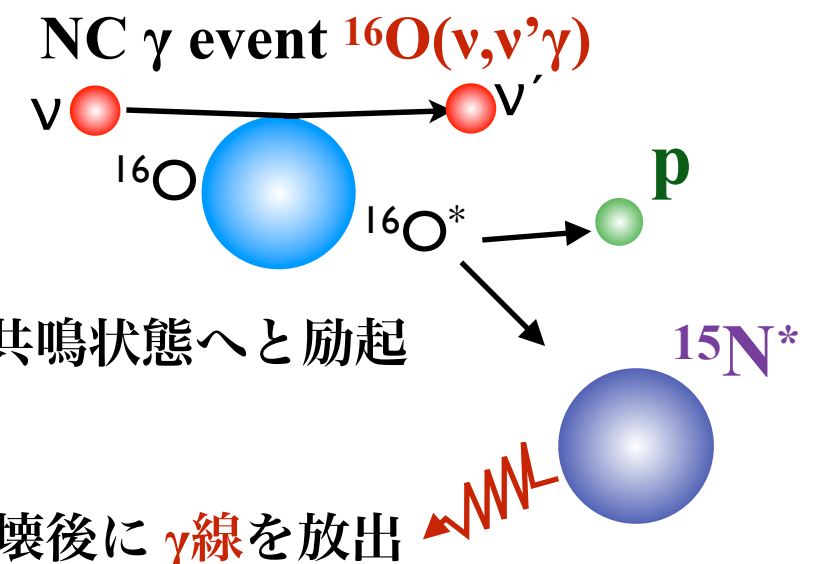
Ref. A. Suzuki, Nucl. Phys. B(Proc. Suppl.) 77(1999) 171-176

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

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

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

* SN 1987A



巨大共鳴状態(Giant Resonance)

- 原子核の集団的運動モード
- エネルギー幅(ΔE)が大きい、反応率が大きい
- 量子数: スピン J 、パリティ π 、軌道角運動量 L 、アイソスピン T

巨大共鳴の分類例

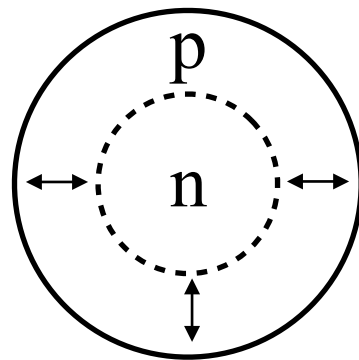
ΔL : 角運動量の変化

ΔT : アイソスピンの変化

ΔS : スピンの変化

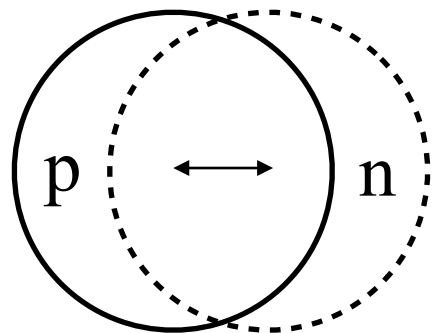
$$\Delta L=0, \Delta T=1, \Delta S=0$$

GMR



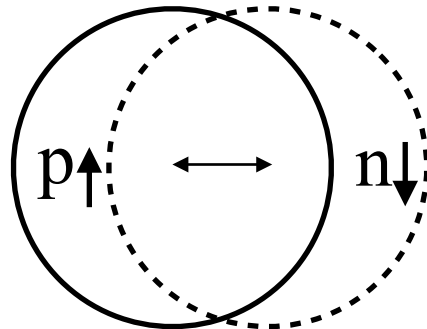
$$\Delta L=1, \Delta T=1, \Delta S=0$$

Giant Dipole Resonance

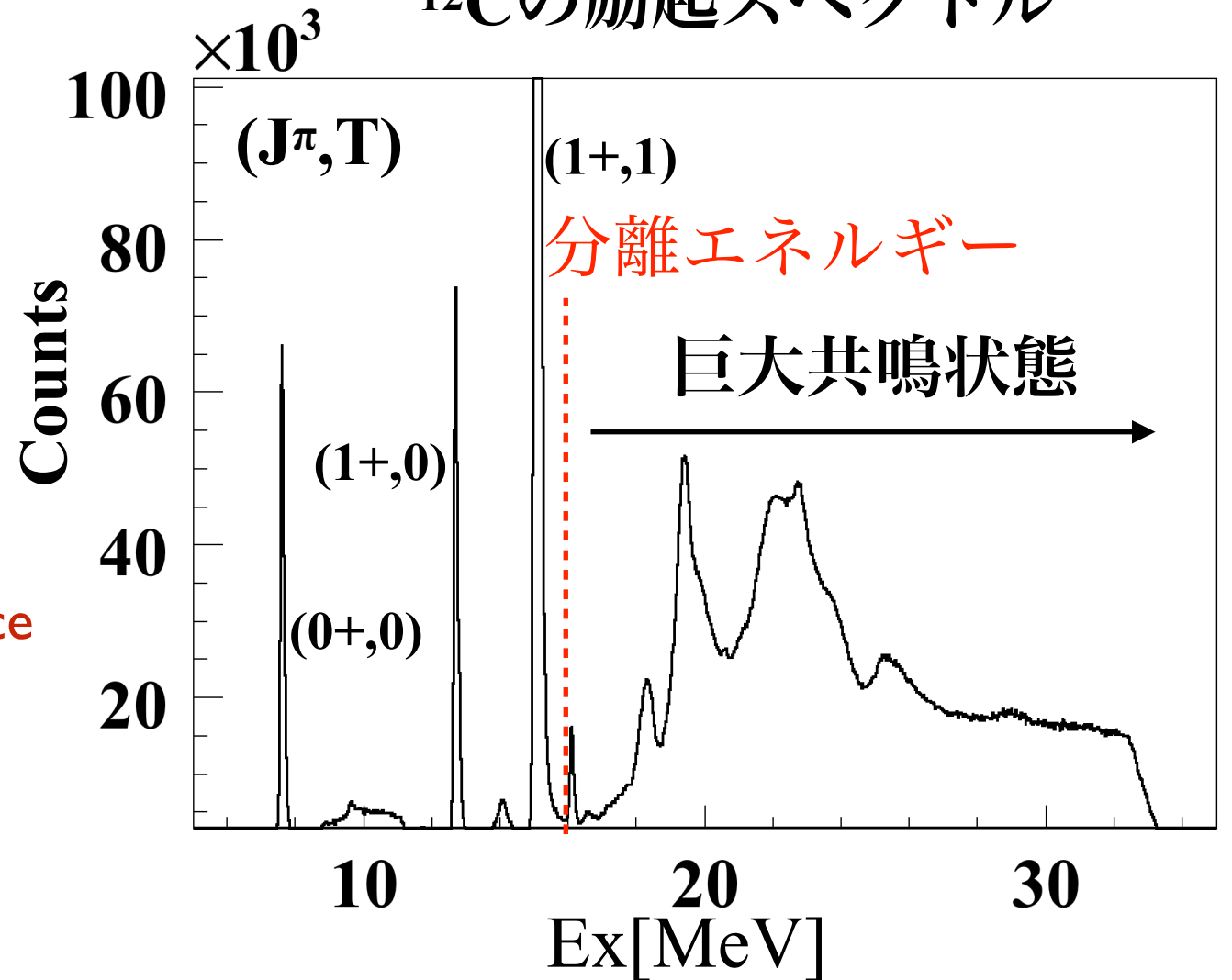


$$\Delta L=1, \Delta T=1, \Delta S=1$$

Spin Dipole Resonance



^{12}C の励起スペクトル

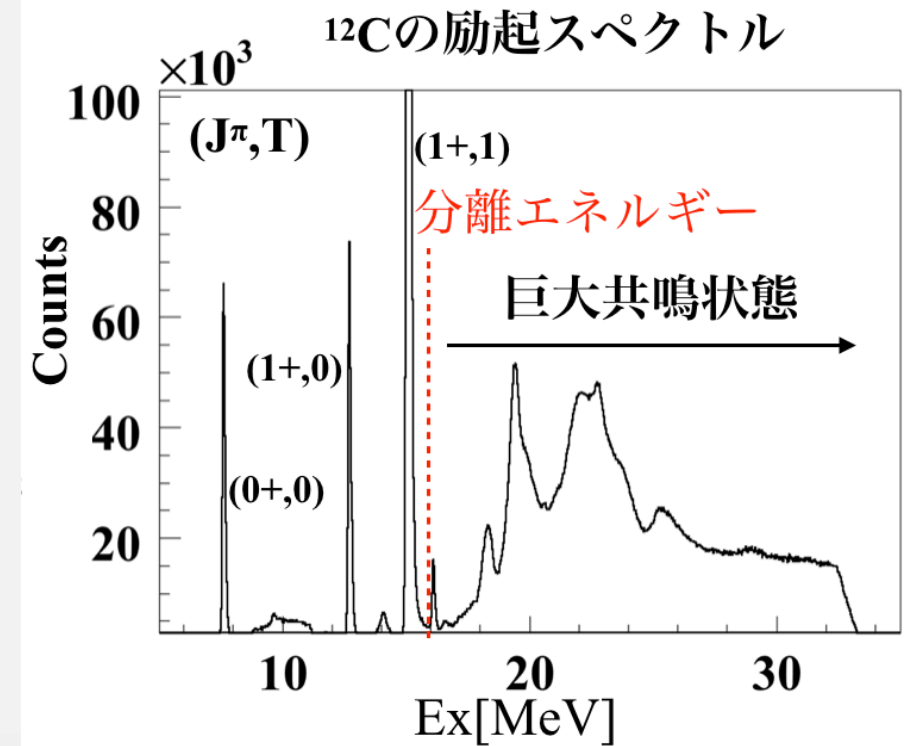
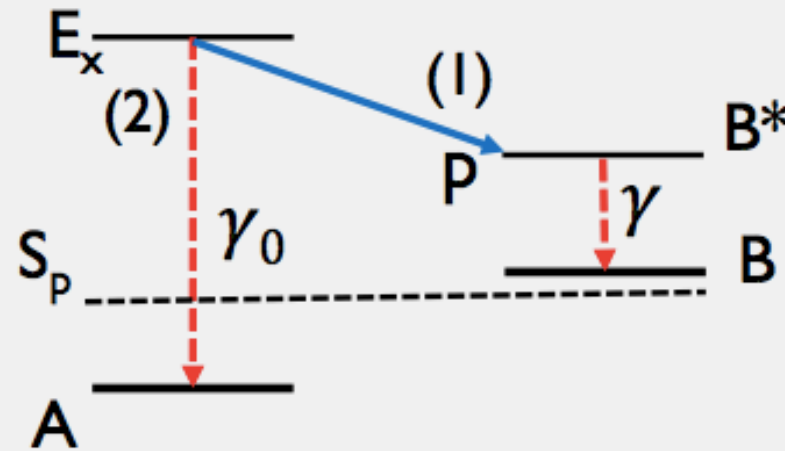


巨大共鳴状態からの γ 線放出

電磁崩壊モード、粒子崩壊モードの γ 線放出率を得た

Nucleus is excited to giant resonances by inelastic scattering.

Inelastic Scattering



Total Decay width is given as: $\Gamma(E_x)_{tot} = \Gamma_{EM} + \Gamma_{had}$

Gamma decay width: $\Gamma_{\gamma tot} = \Gamma_{\gamma EM} + \Gamma_{had}(E_x \rightarrow B^*) \cdot Br(B^* \rightarrow \gamma)$

with $\Gamma_{EM} \approx 10^{-2} - 10^{-4} \Gamma^{tot}$

2. 実験概要

実験場所 : RCNP (Osaka Univ.)

測定期間 : 2014年5月19-28日

励起エネルギー

* 陽子ビーム : $E_p=392\text{MeV}$, $I_p=0.5\sim 1.5\text{nA}$

* 標的 : natC (36.3 mg/cm^2)

$\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$ (Cellulose, 28.2 mg/cm^2)

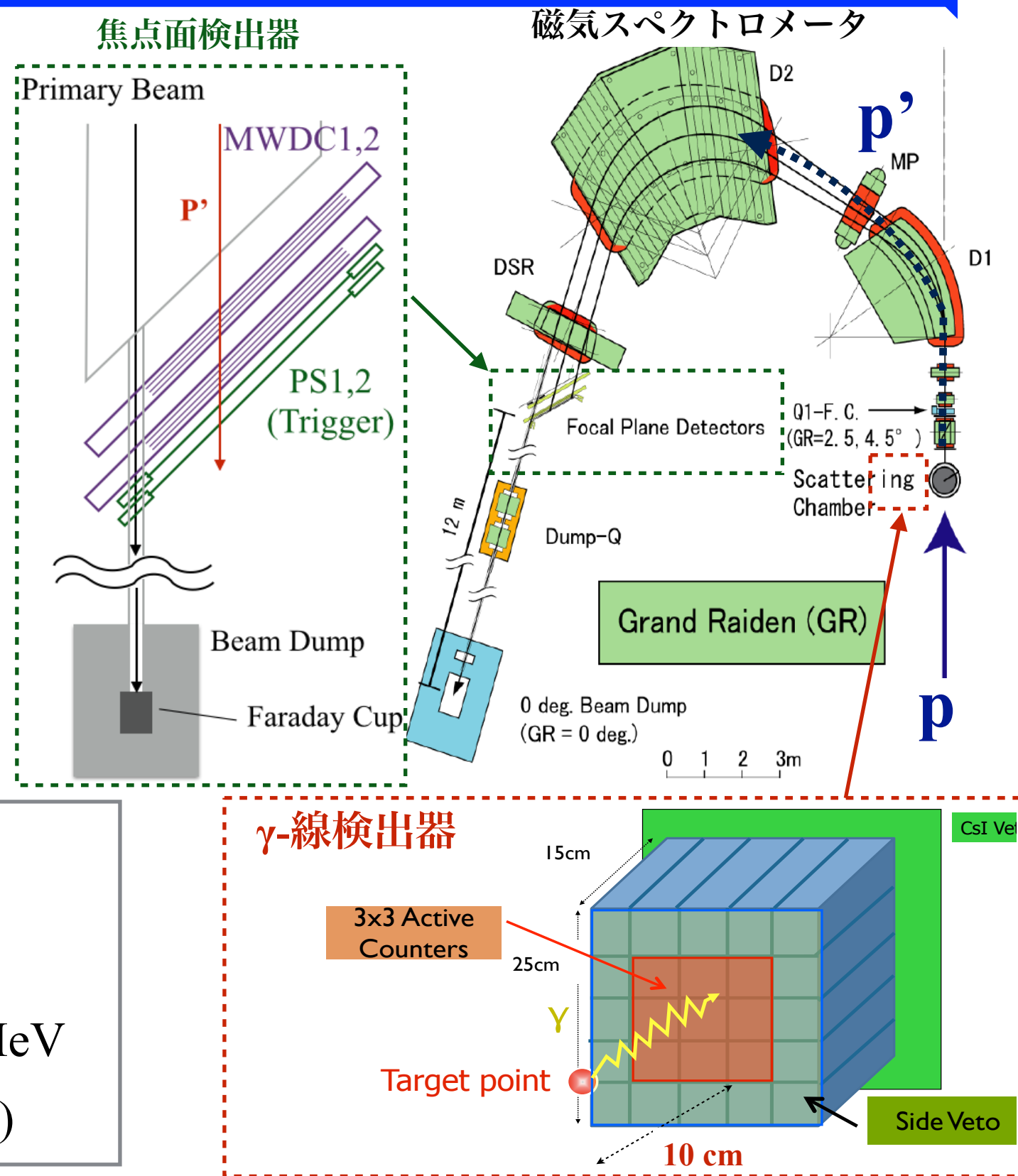
* 磁気スペクトロメータ“Grand Raiden”

- 散乱角 = 0° (covers $0^\circ \sim 3^\circ$)
- 立体角 = 5.6 msr (18.3 deg^2)
- $\Delta E_x = 100\text{-}200\text{ keV}$

γ 線のエネルギー

* γ 線検出器 : $\text{NaI(Tl)} \times 25$

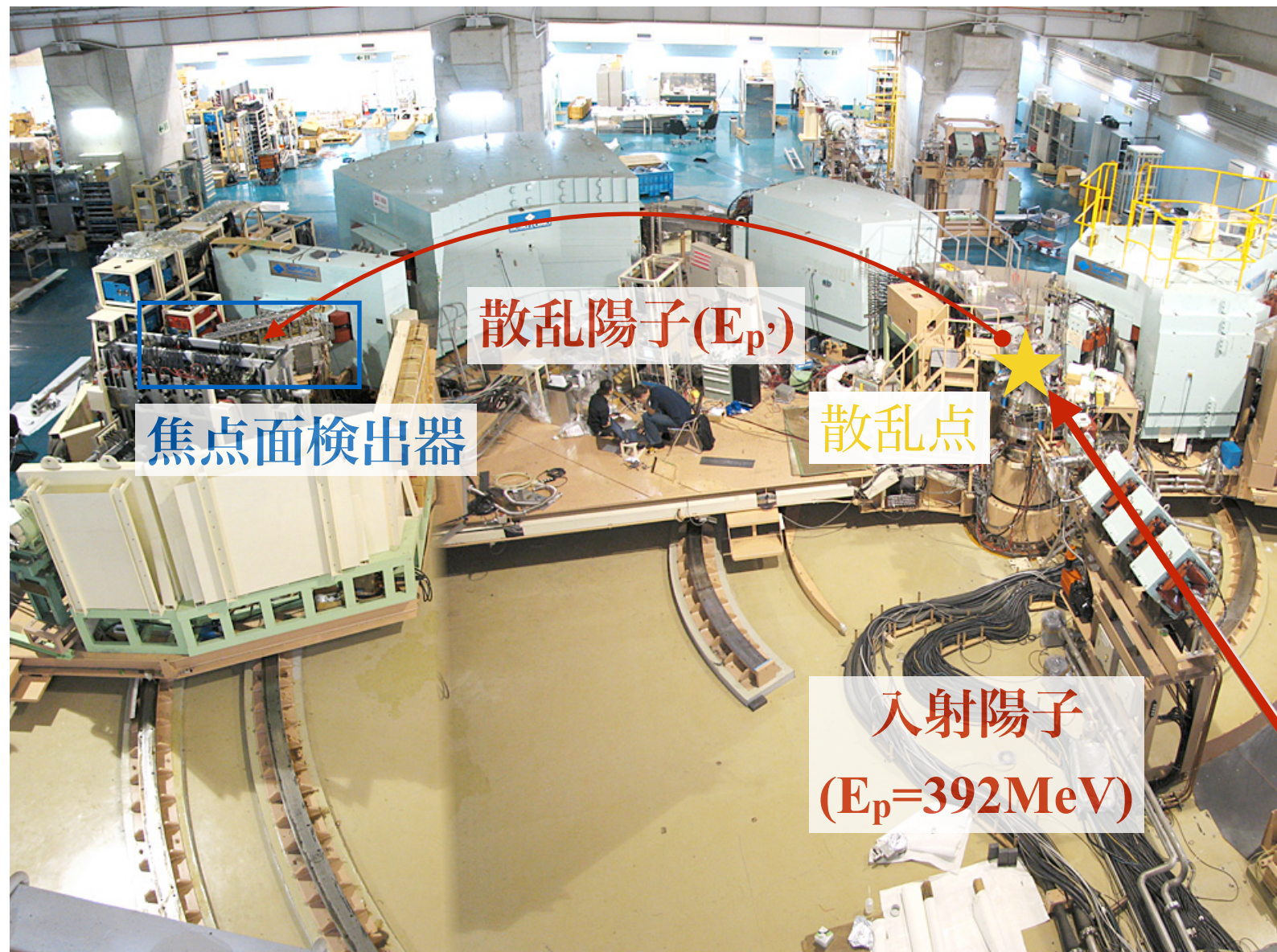
- γ 線 1.5 MeV 以上で測定可能
- エネルギー分解能 $\sim 2.7\%$ @ 15.11 MeV
- 前面: Plastic Scintillator Veto (3mm厚)



2.1.実験方法: 磁気スペクトロメータ

原子核の各励起状態を100keV以下の高精度で測定できる

磁気スペクトロメータ Grand Raiden



相対論的運動方程式を
ローレンツ力の元で解くと

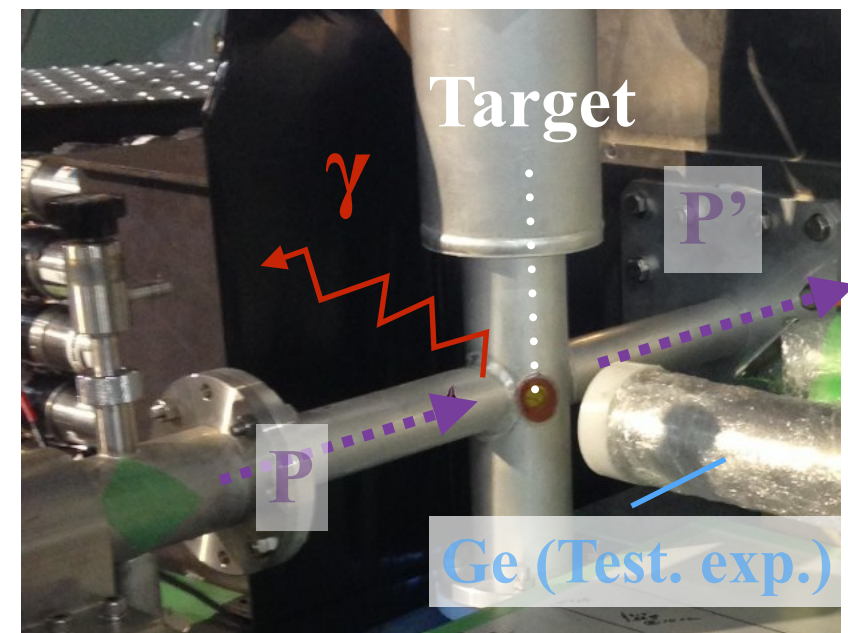
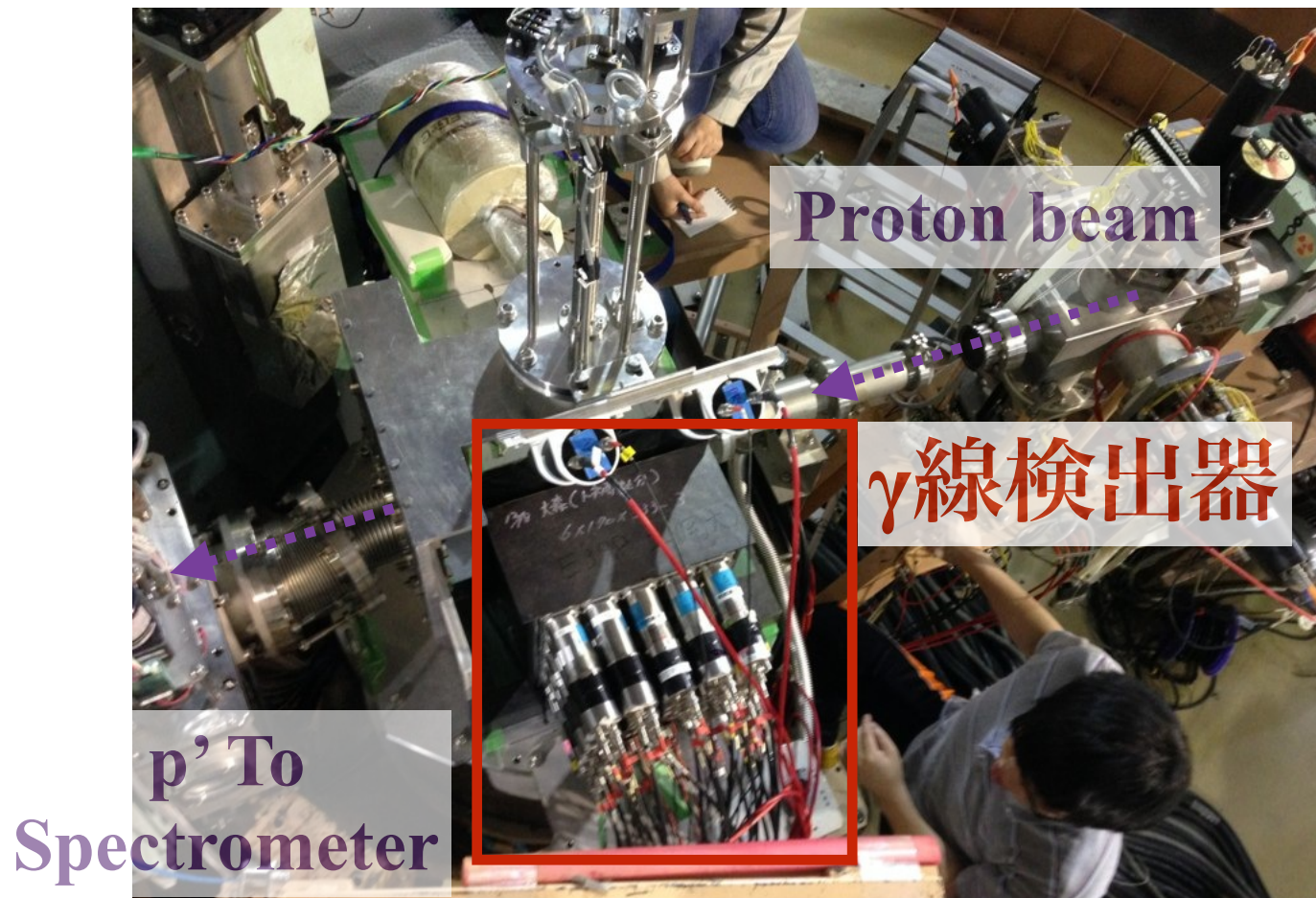
$$P = eBR$$

曲率から散乱陽子の
エネルギー($E_{p'}$)を計算

$$\rightarrow E_x = 392\text{MeV} - E_{p'}$$

2.1.実験方法: γ 線検出器

磁気スペクトロメータと同期した(1 μ sec) γ 線信号をNaIで測定する



γ 線のデータ収集系

- * 各 γ 線検出器のThreshold = 1.5MeV
- * 検出効率~6%@ $^{12}\text{C}15.11\text{MeV}$

3.磁気スペクトロメータ解析

* 焦点面検出器

• Plastic Scintillators (1cm thick) × 2

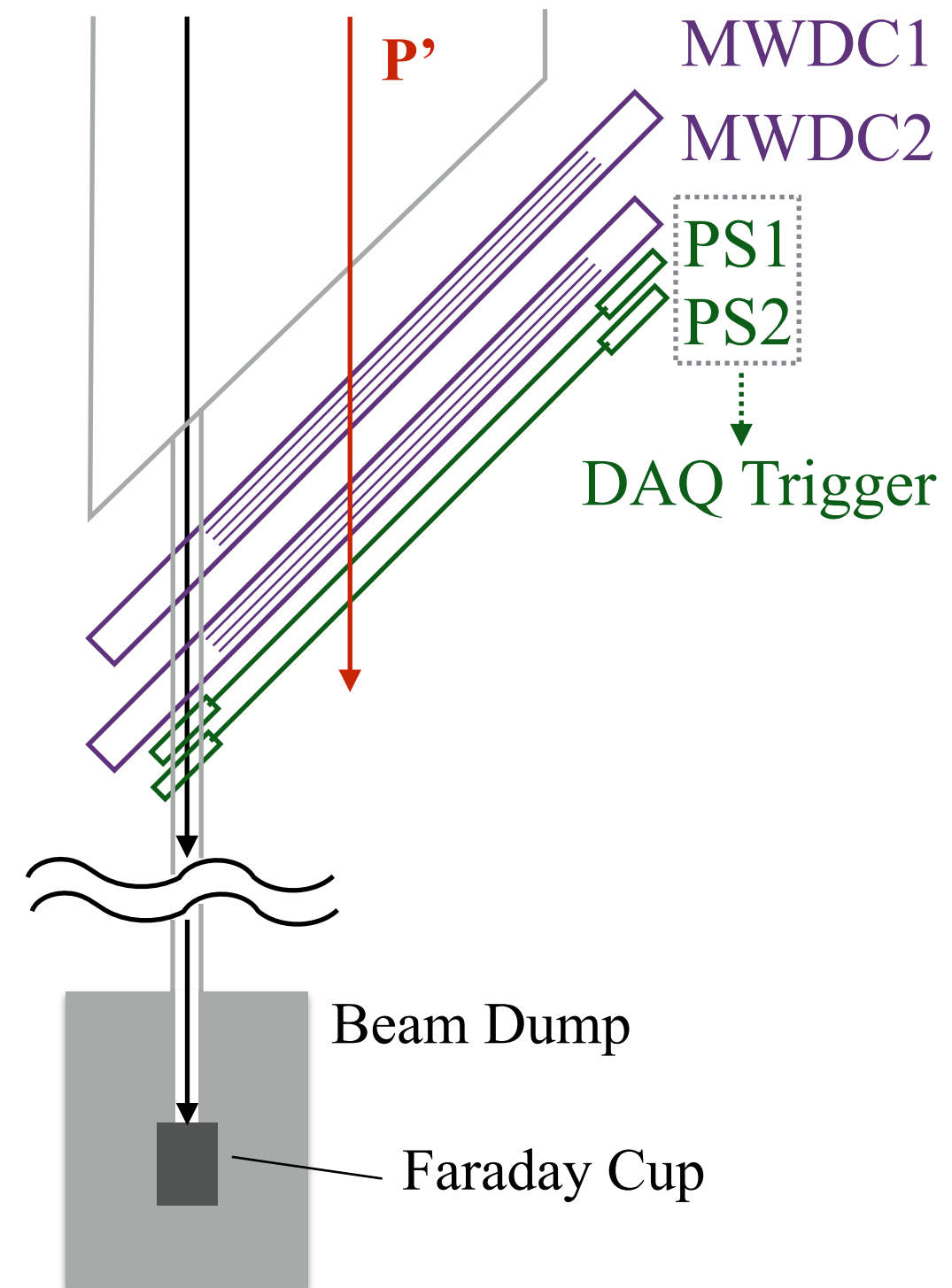
- ◆ 用途: DAQトリガー & 粒子選別
- ◆ 保存情報: 粒子のTime of Flight (TOF)
損失エネルギー
- ◆ トリガーモード: 2面での同時検出

• Multi-wire Drift Chamber × 2

- ◆ 用途: 散乱陽子のトラック再構成
- ◆ 保存情報: ドリフト時間, ヒット情報
→位置(X,Y), 角度(θ, φ)
→ 励起エネルギー (E_x)
& 散乱角 (θ_{scat})

Ref. M. Fujiwara et al., Nucl. Instrum.
Methods Phys. Res. A 422, 484 (1999).

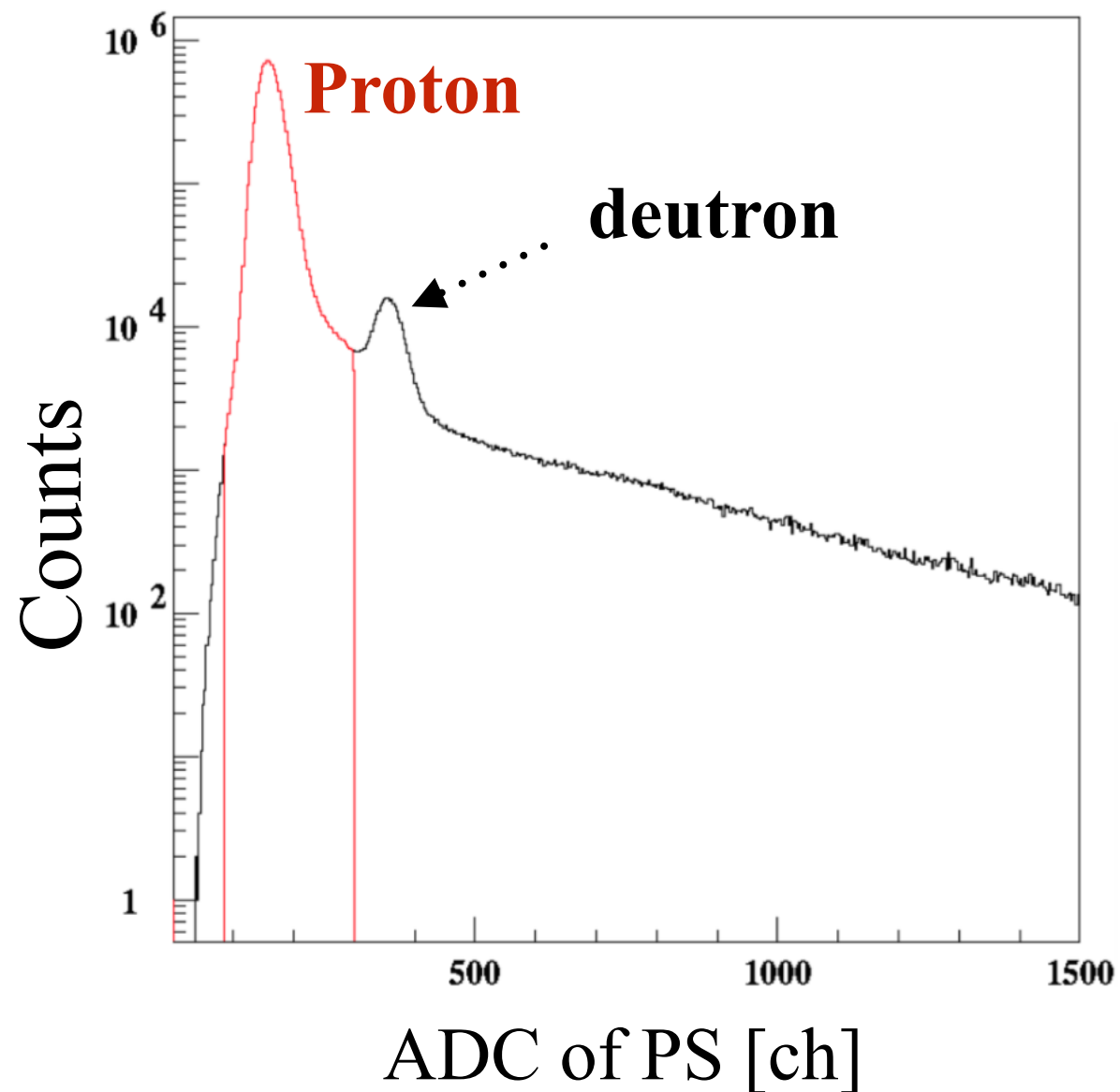
Primary Beam



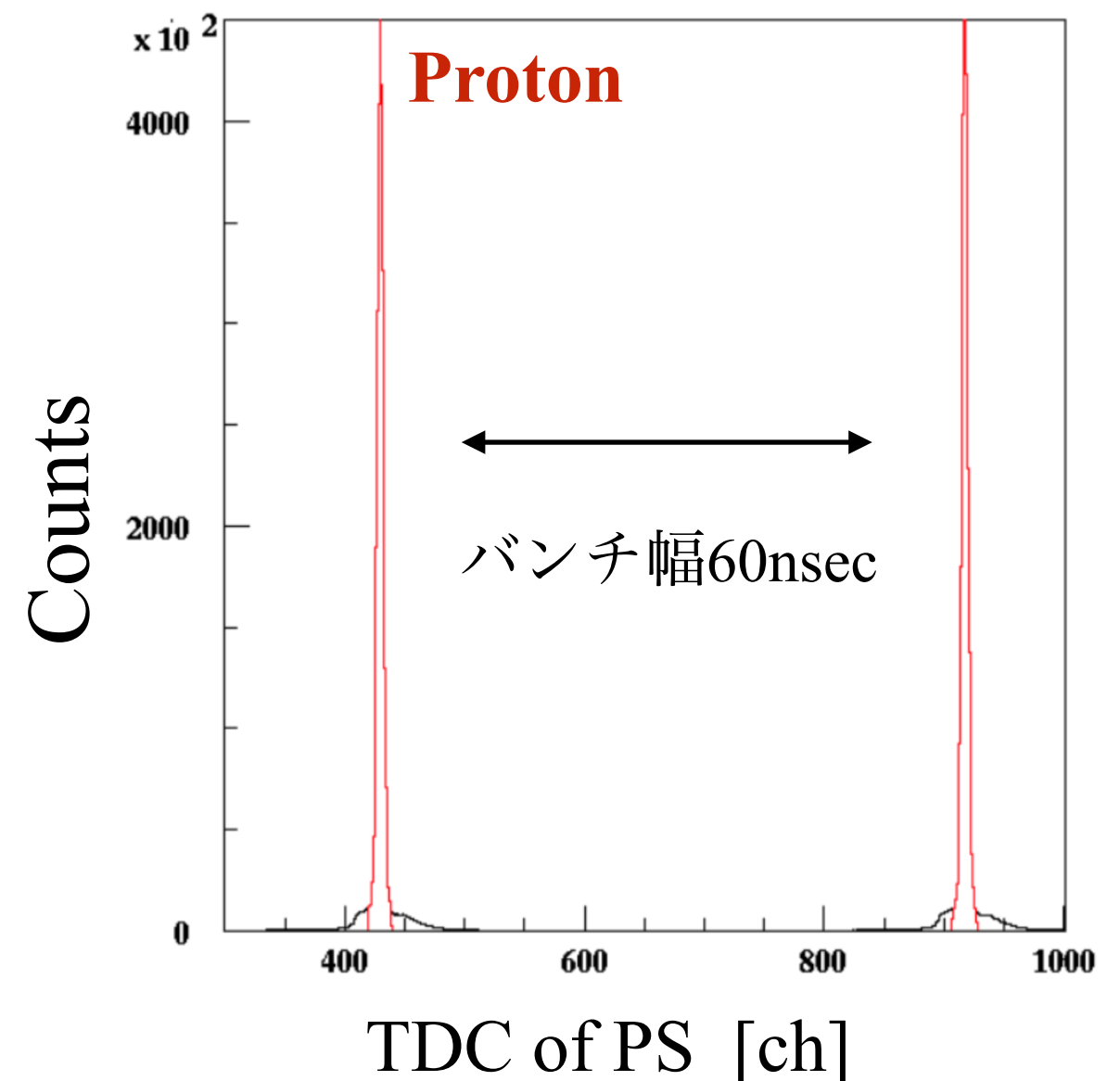
3.1. プラスチックシンチレータ解析：粒子識別

プラスチックシンチレータのエネルギーと時間情報から
散乱陽子だけを選択

エネルギー情報



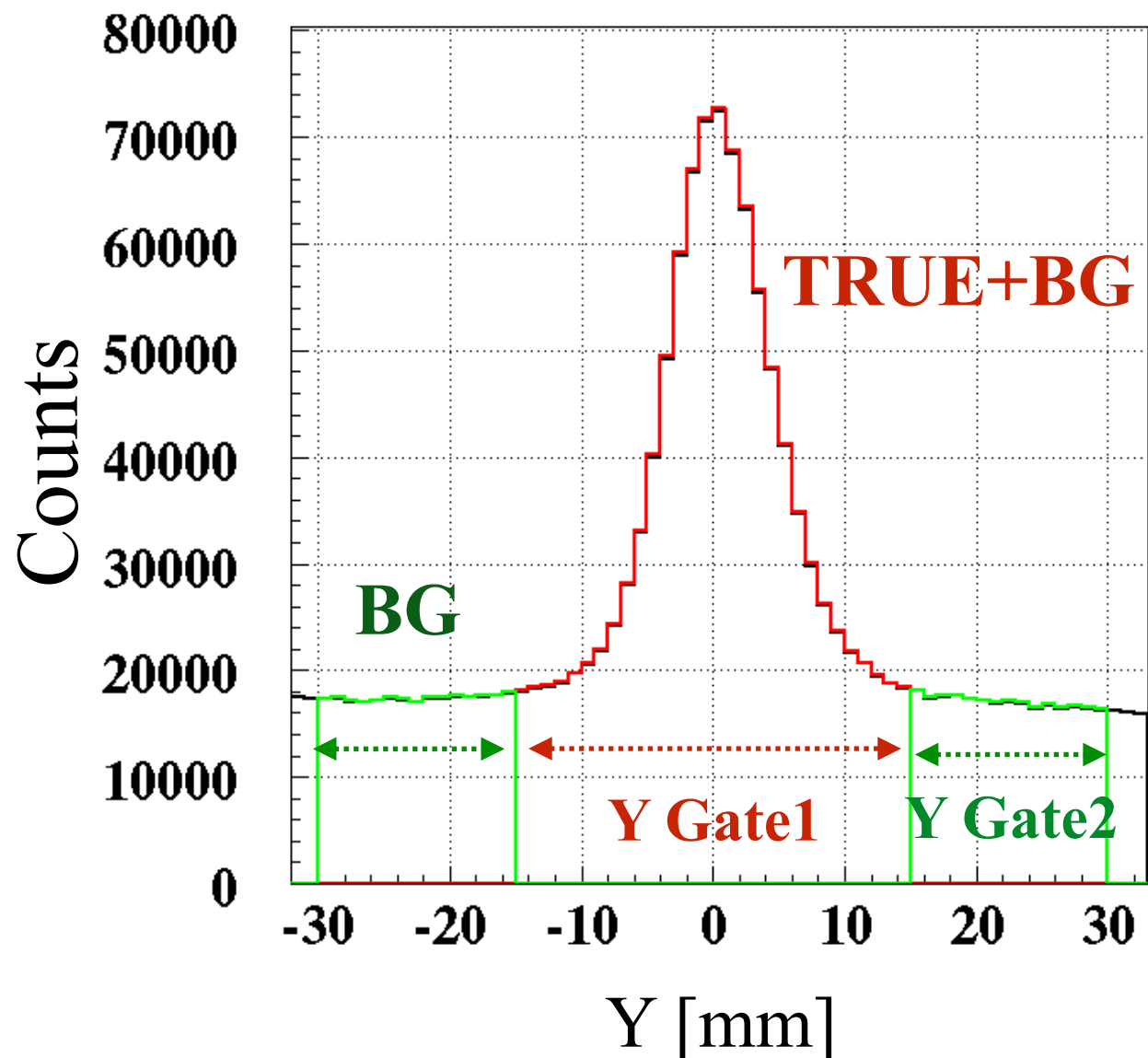
時間情報



3.2.ワイヤーチェンバー解析：トラック再構成

ワイヤーチェンバーのヒットパターンからトラック情報を再構成

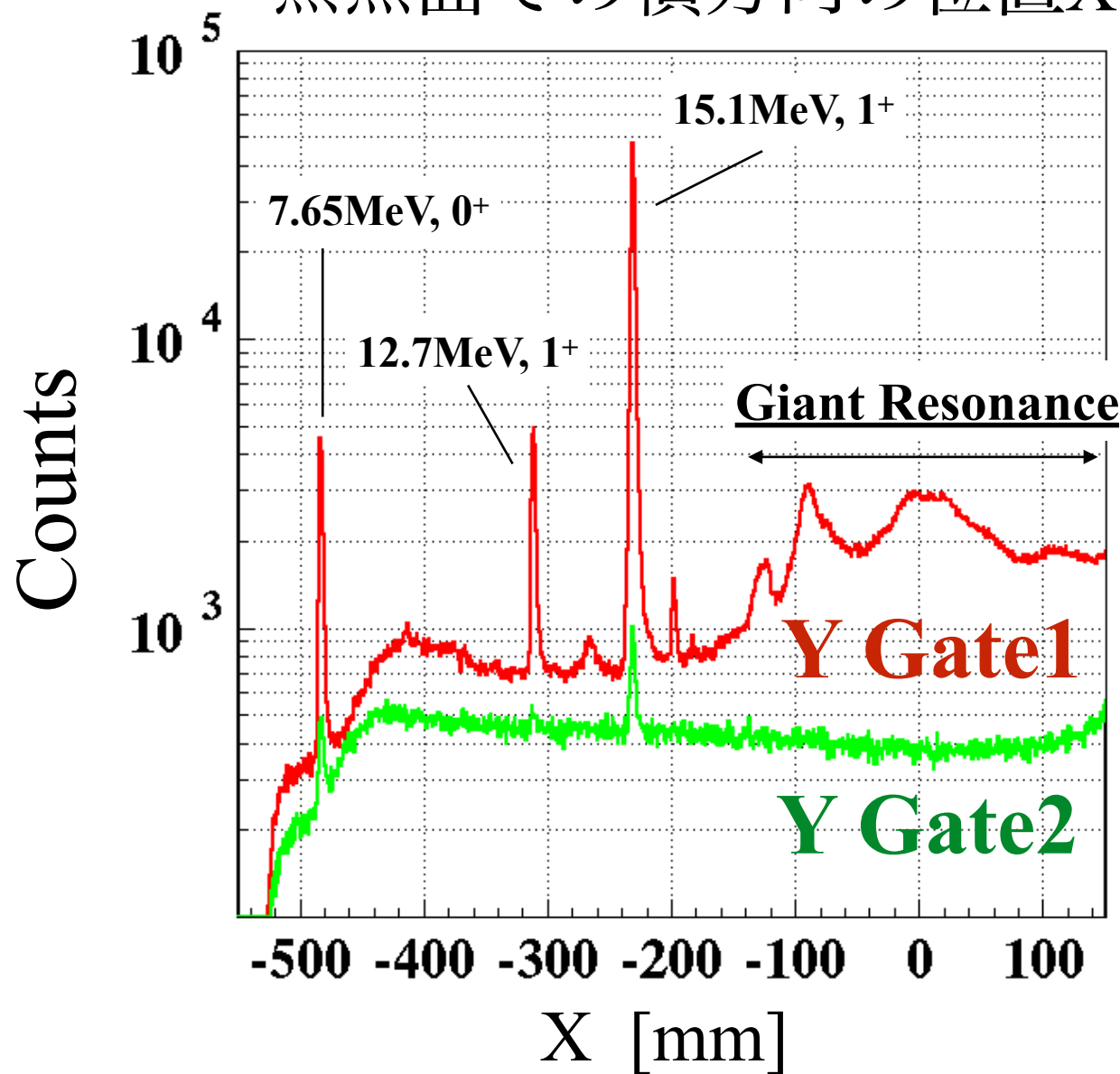
焦点面での縦方向の位置Y



バックグラウンドはY方向に一様に分布

$$Y \text{ Gate1} - Y \text{ Gate2} = \text{TRUE}$$

焦点面での横方向の位置X



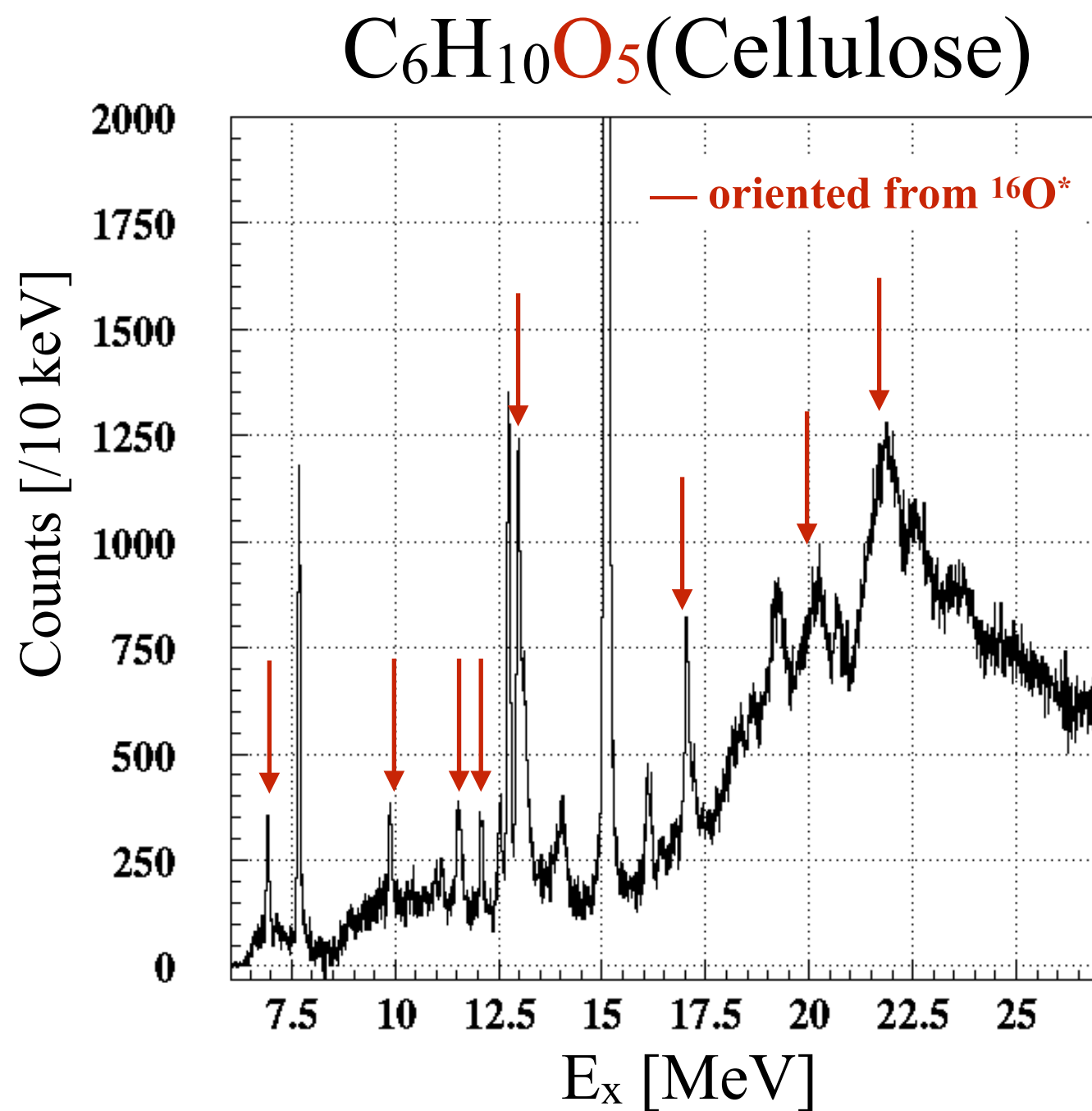
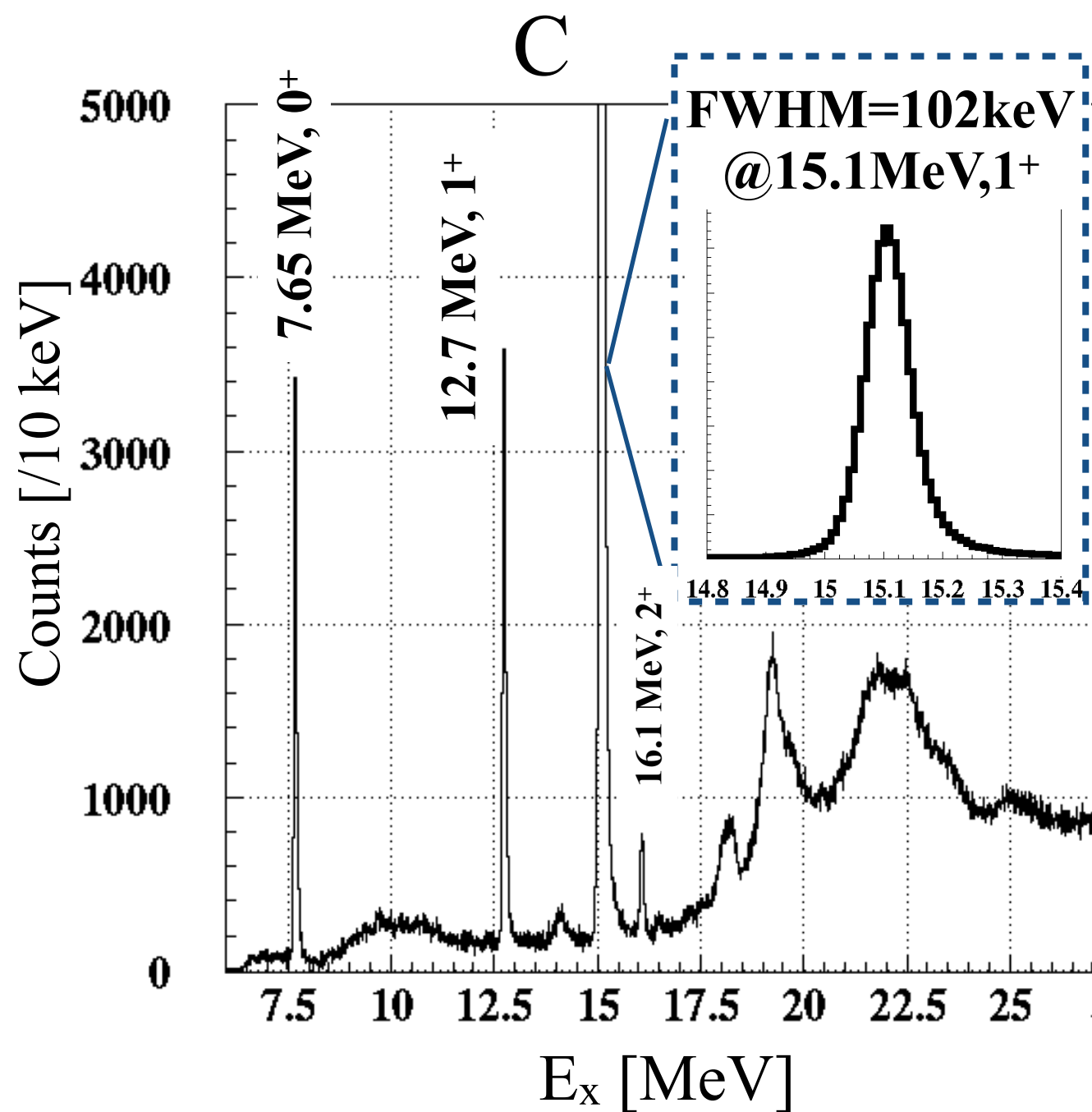
Xは散乱陽子の運動量に相当

バックグラウンドはY情報を用いて引き算

3.3. ワイヤーチェンバー解析：励起エネルギー

Xを用いて陽子の運動量を計算 → 原子核に与えられた励起エネルギー(E_x)が求まる

文献値と各ピークは40keV以内でよく合っている



3.4. ワイヤーチェンバー解析： ^{16}O の励起スペクトル

過去のデータと良く一致する為、 ^{12}C の寄与を系統誤差3%以内で引き算ができています

$\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$ データから ^{12}C による寄与を引く

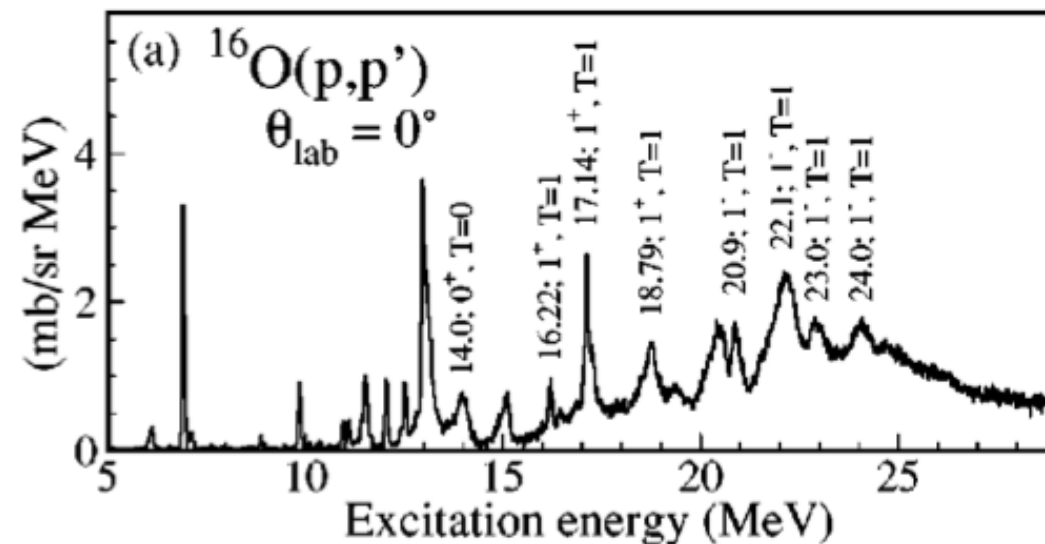
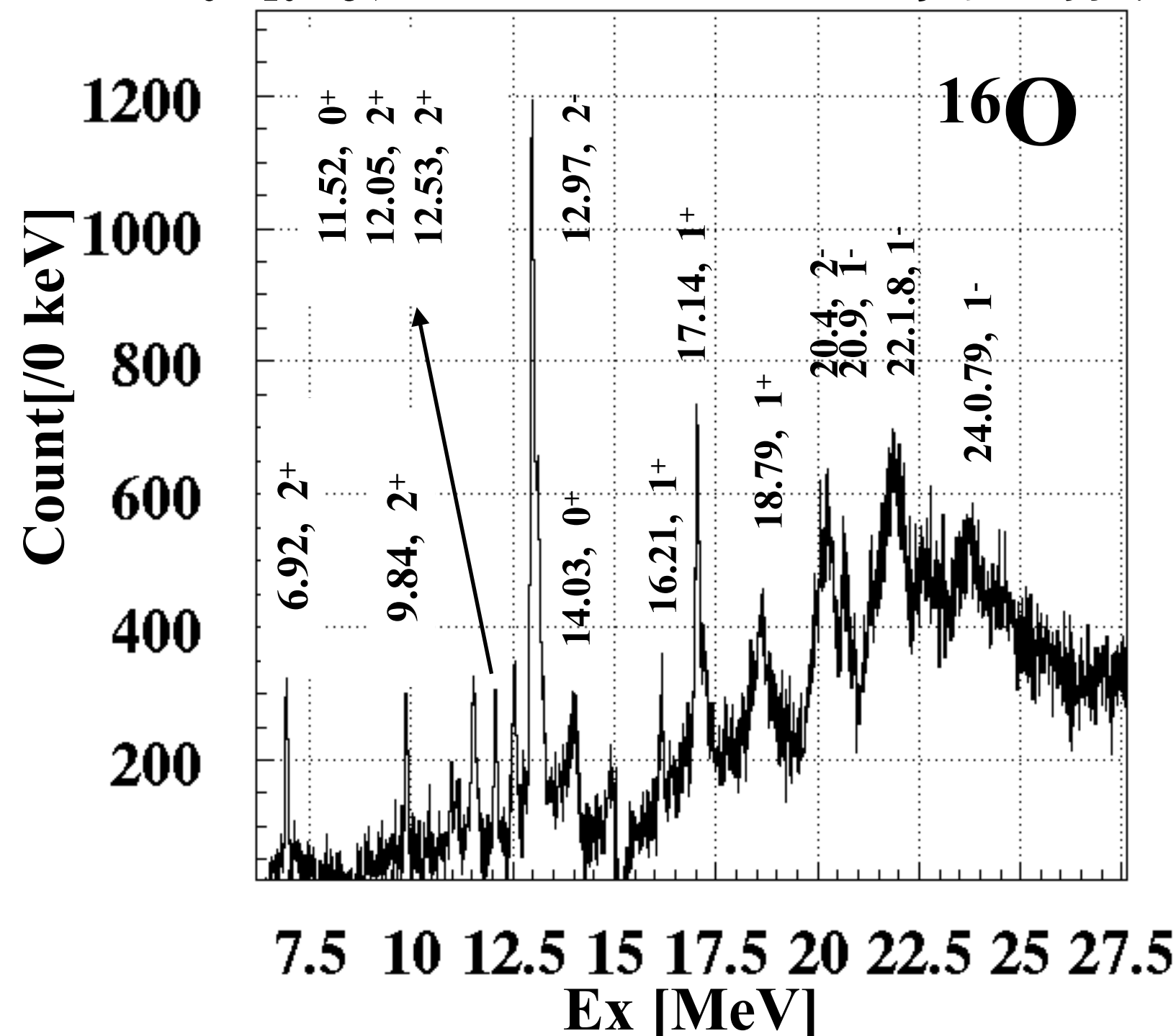
引き算係数の決定方法

- ① ^{12}C 由来のピークのカウンタ数
- ② 標的の厚み×ビーム流量

差は系統誤差として考慮(~3%)

H_2O (氷)標的で

取得されたデータと比較

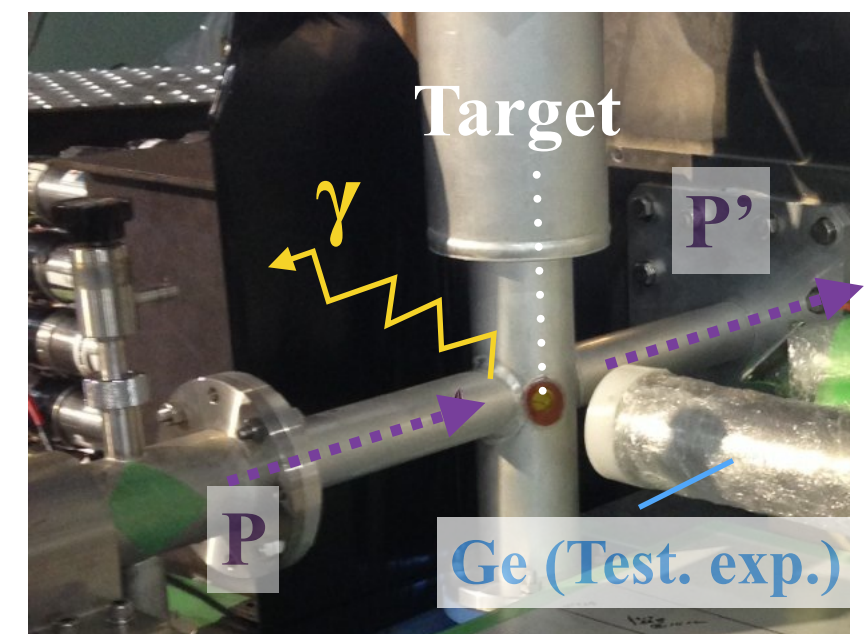


Taken from Ref. T. Kawabata
PHYSICAL REVIEW C, VOLUME 65, 064316
(2002)

4. γ 線検出器解析

1. 実験前 NaI γ 線検出器の評価
2. 磁気スペクトロメータとの同期
3. バックグラウンドの引き算
4. エネルギー較正
5. 検出器シミュレーション
6. γ 線応答関数 $P(E_\gamma, E)$ の定義・較正
7. 既知の励起状態から放出される γ 線

Plastic Scintillator
Particle Veto (3mm)

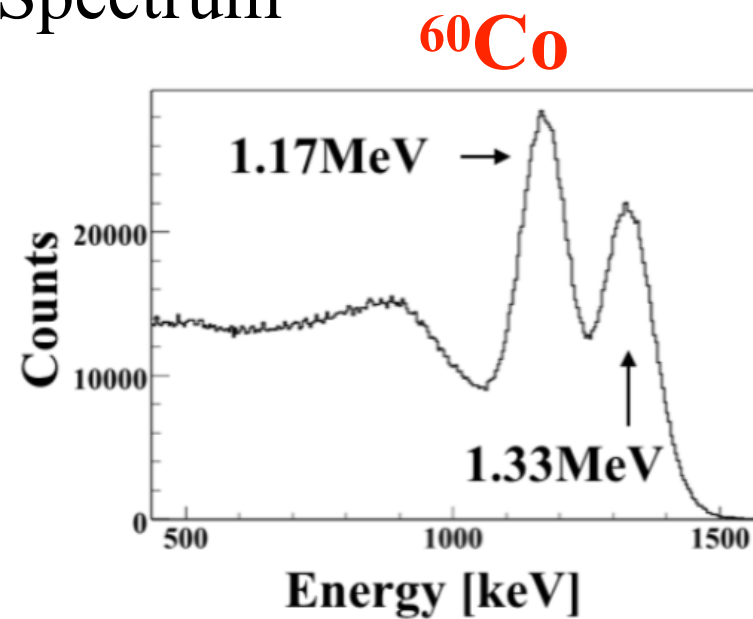
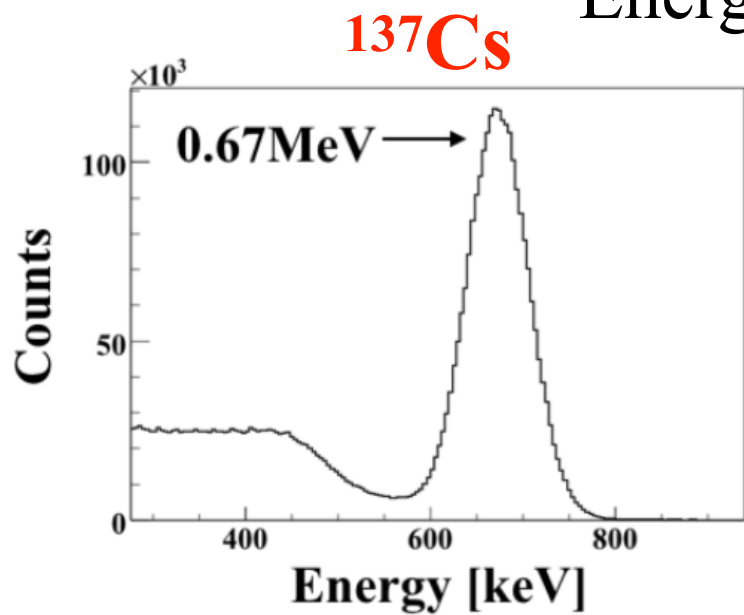


4.1. 実験前 γ 線検出器の性能評価：線型性・エネルギー分解能

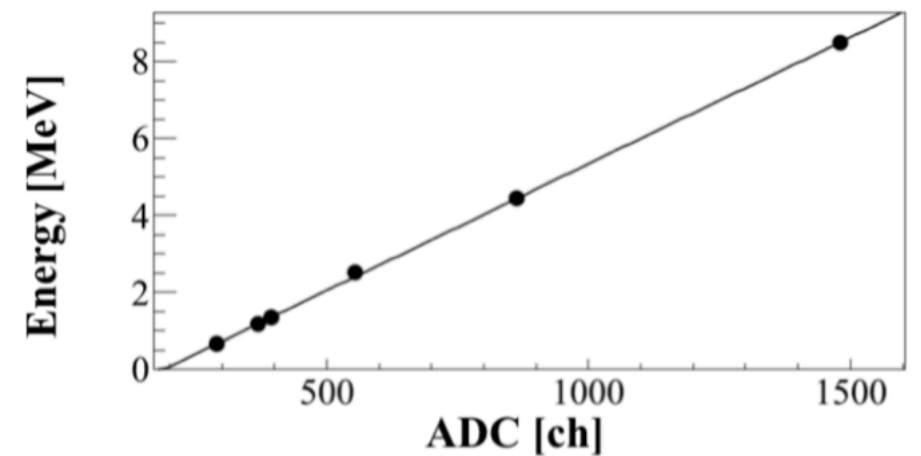
γ 線検出器の9MeVまでの線型性とエネルギー分解能は理解できた

- 実験前に γ 線源を用いて γ 検出器の線型性とエネルギー分解能の測定を行った

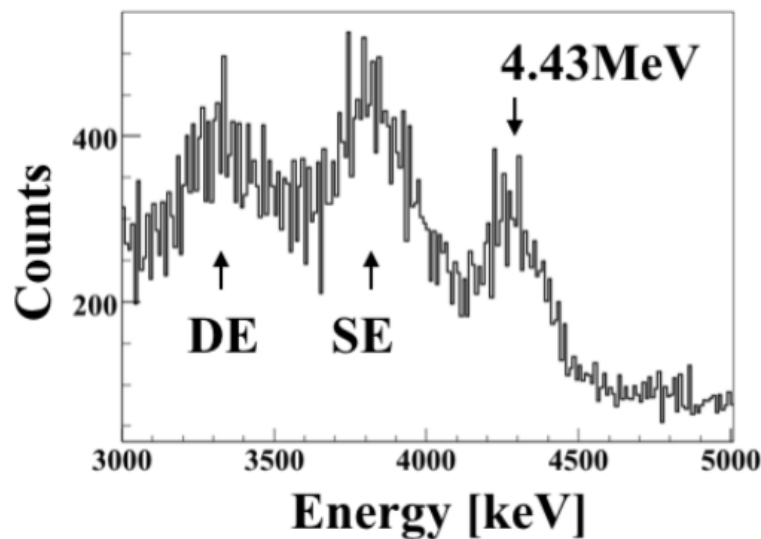
Energy Spectrum



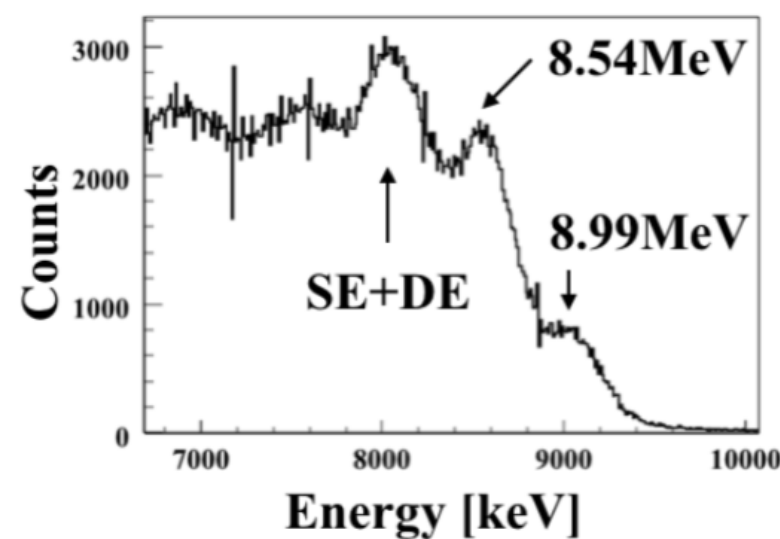
Pulse-height Linearity



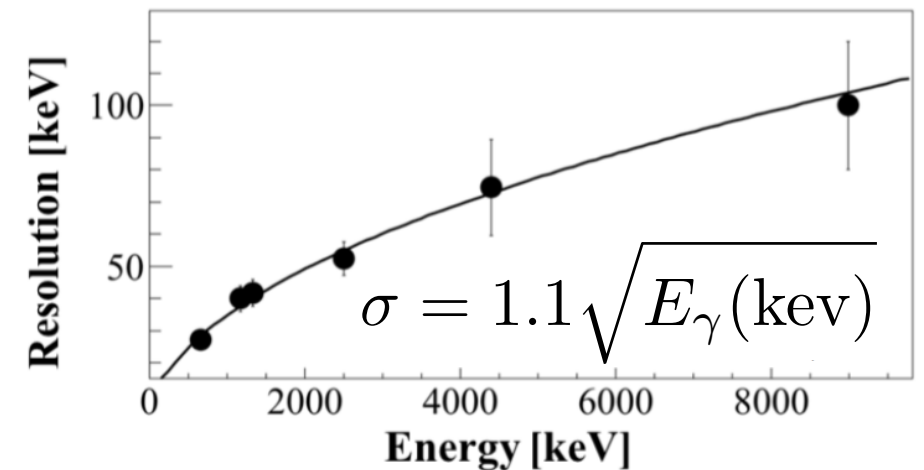
$^{241}\text{Am}+\text{Be}$



$^{252}\text{Cf}+\text{Ni}$



Energy Resolution (σ)



4.1. 実験前 γ 線検出器の性能評価：応答関数の評価

実験前に γ 線検出器の応答関数(Data/MC)をよく理解した

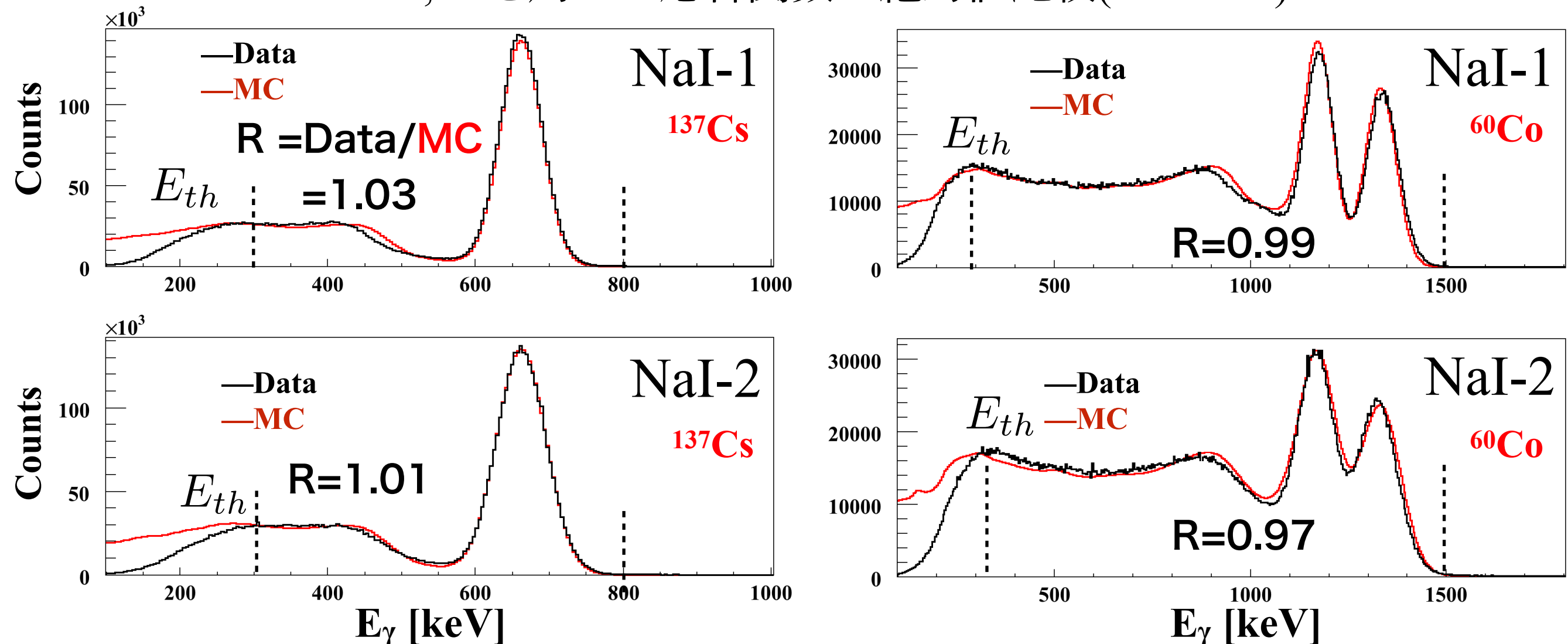
実験前の応答関数 $P(E_\gamma, E)$ の定義

$P(E_\gamma, E)$ = γ 線検出器から10cm離れたところから γ 線を一様に放出した時の γ 線検出器内でのエネルギー損失

検出効率

$$\eta_\epsilon(E_\gamma) = \int_{E_{th}} P(E_\gamma, E) dE$$

Cs, Coを用いた応答関数の絶対値比較(Data/MC)

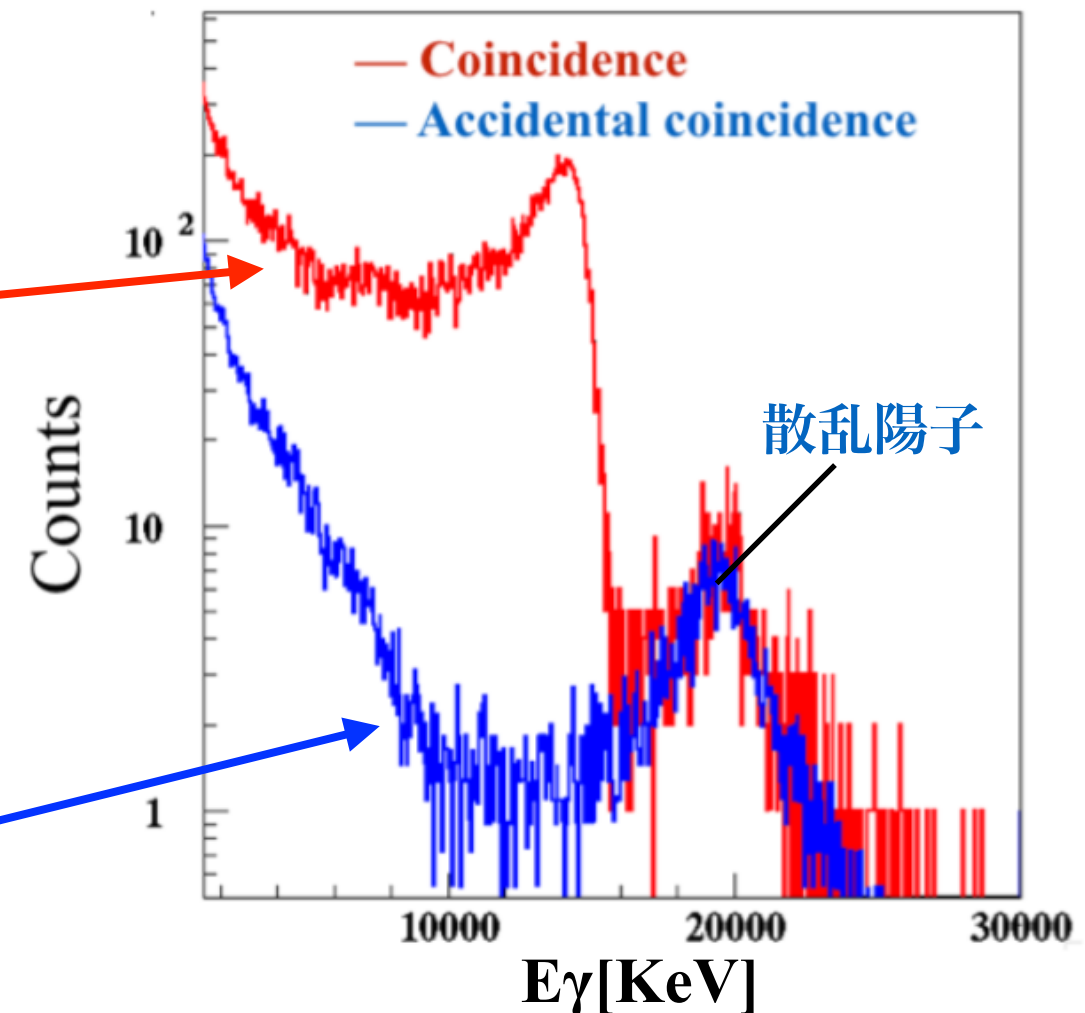
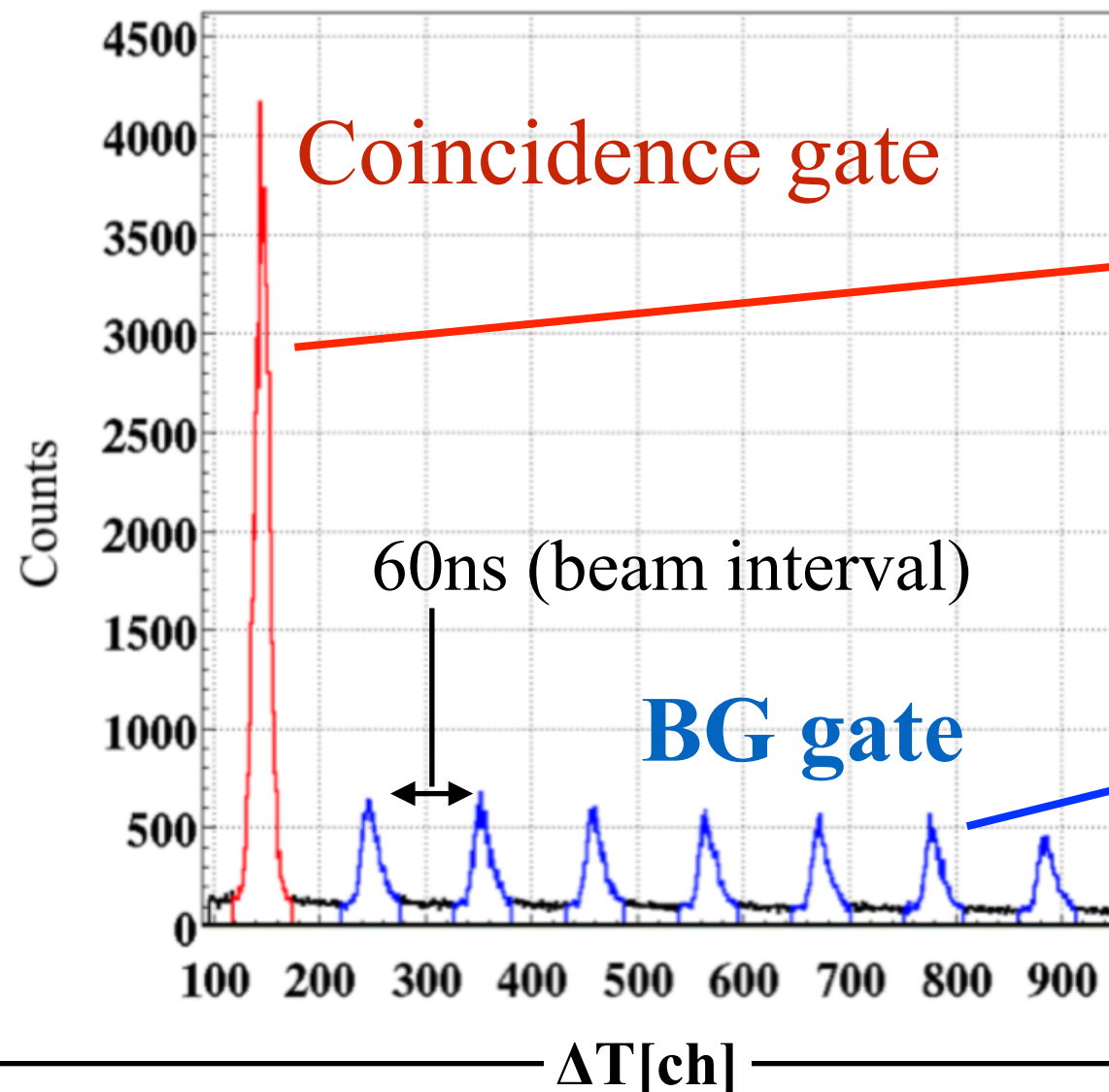


4.2&3.磁気スペクトロメータとの同期&バックグラウンド除去

- γ 線検出器の時間情報からスペクトロメータとの同期事象 (**Coincidence gate**)を取り出した。
- 偶発的同期事象(**BG gate**)は同期事象にも含まれている→引き算が必要

$\Delta T = [\text{GR-trigger}] - [\gamma\text{-trigger}]$
 γ トリガーとPSトリガーの時間差

* $\gamma\text{-trigger} = 25 \text{ ch OR}$
 $^{12}\text{C}, E_x = 15.11\text{MeV}$



B.G. は2%の誤差で引き算できている

4.4. エネルギー較正 : PMT Gain減少の較正

実験中の γ 線データ全てのGainの較正を行った

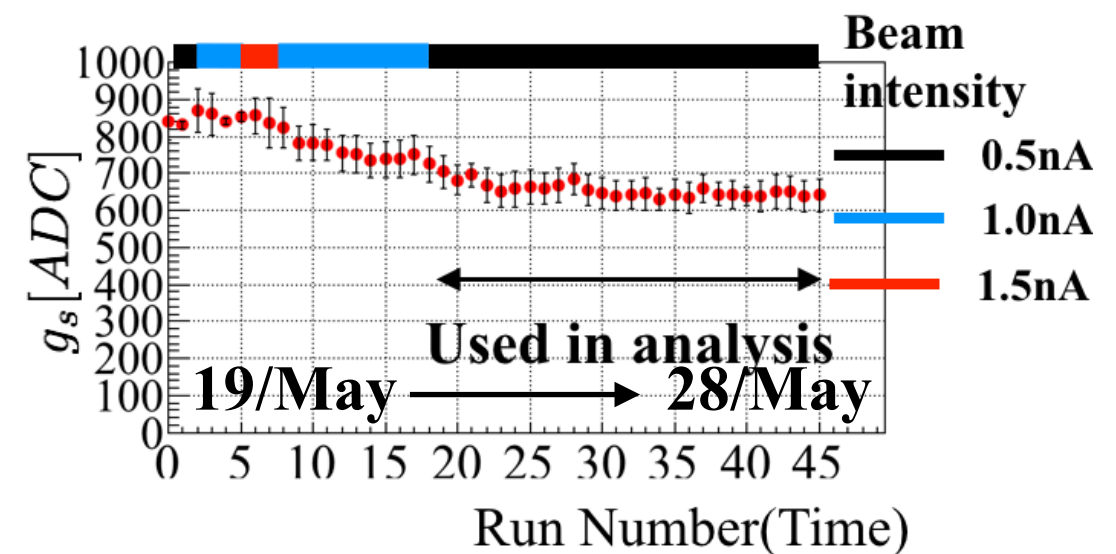
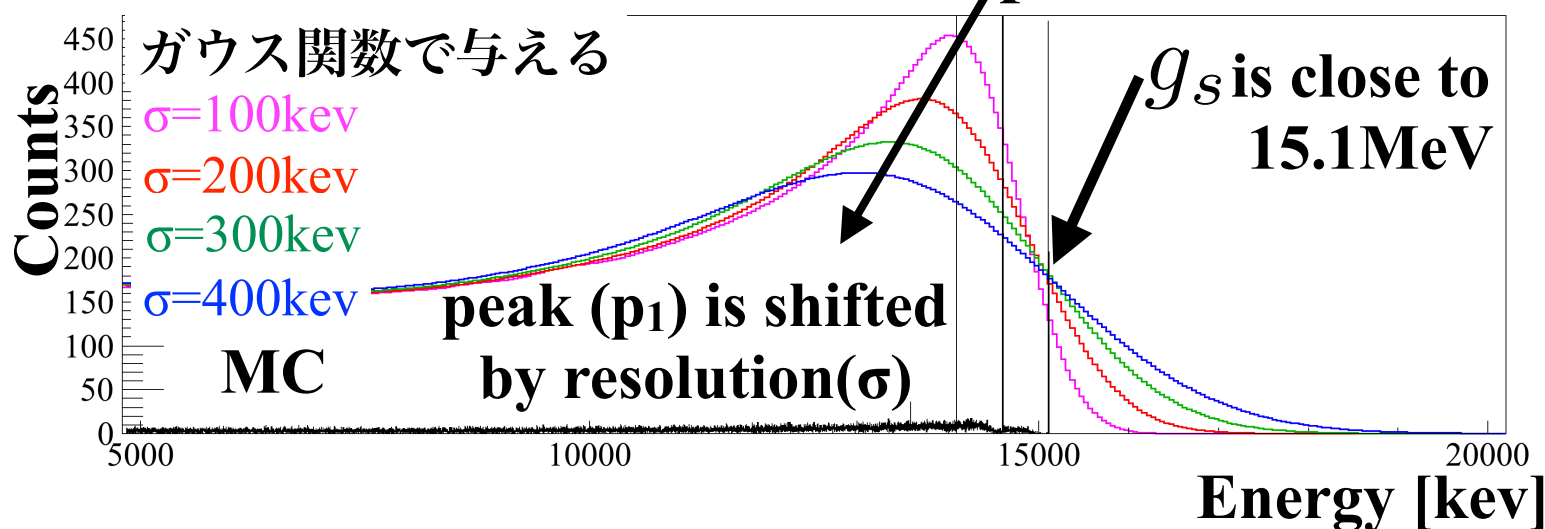
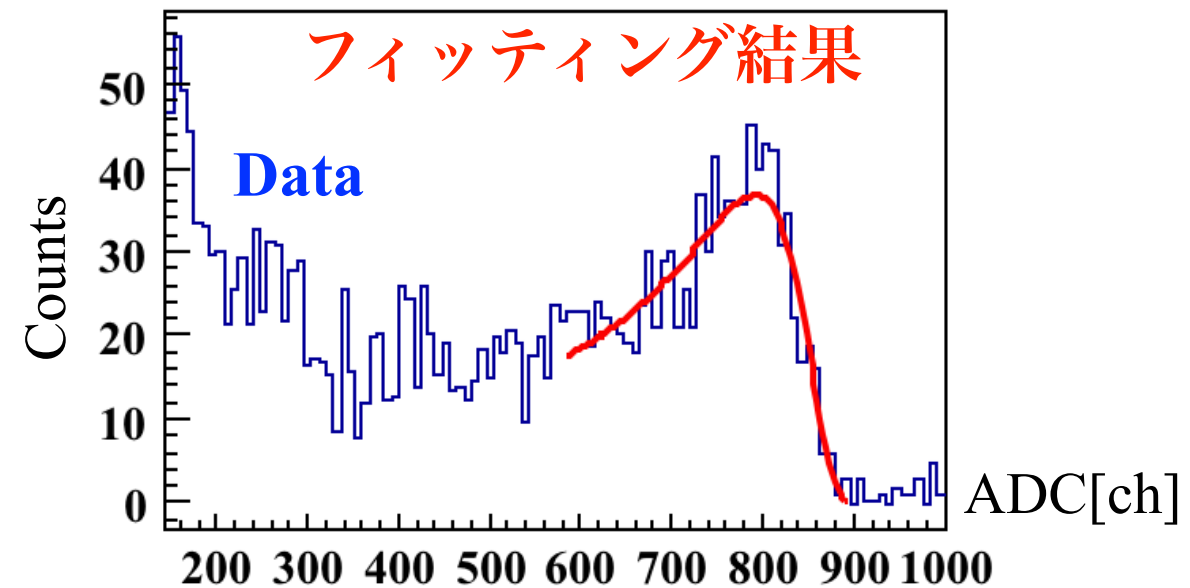
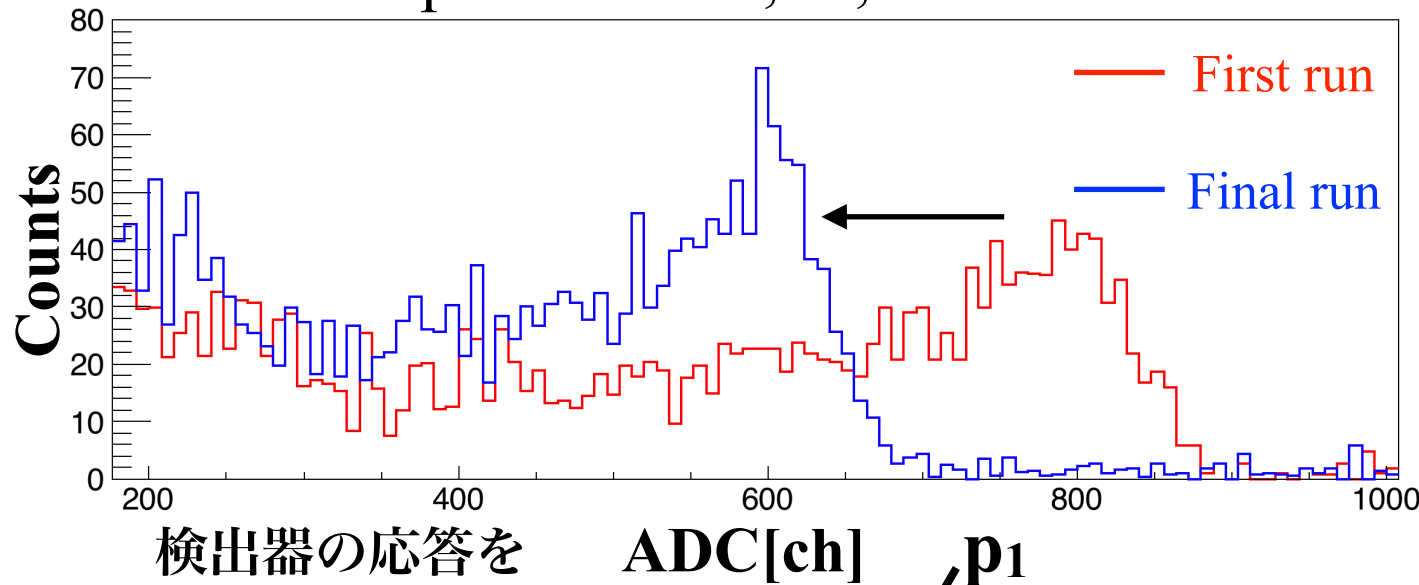
ビームタイム中に散乱陽子の影響でPMTのGainが徐々に減少している

→ 全ての実験データ中に見えている $^{12}\text{C } 1+ 15.11\text{MeV}$ からの γ 線で較正

$$f(\text{ADC}) = p_0 \exp\left(-\frac{(\text{ADC} - p_1)^2}{2\sigma^2}\right), \quad \sigma = p_3(\text{ADC} + p_1) + p_2$$

Gain パラメータの定義
 $g_s = p_1 + \sigma$

ADC Spectrum $^{12}\text{C}, 1^+, 15.1\text{MeV}$ state



4.4. エネルギー較正： γ 線エネルギー較正

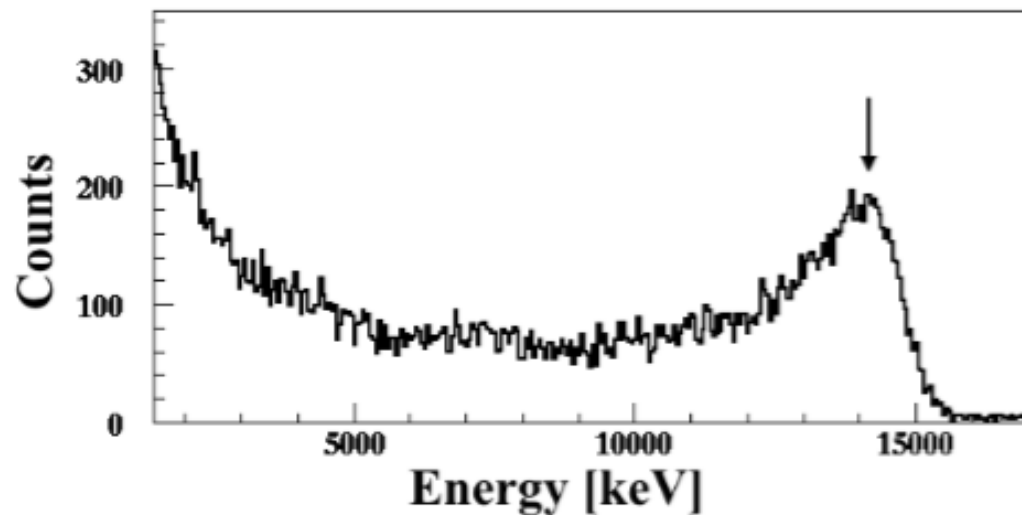
実験中の γ 線を用いてエネルギー較正することで γ 線検出器が15MeV

まで線形性があることがわかった

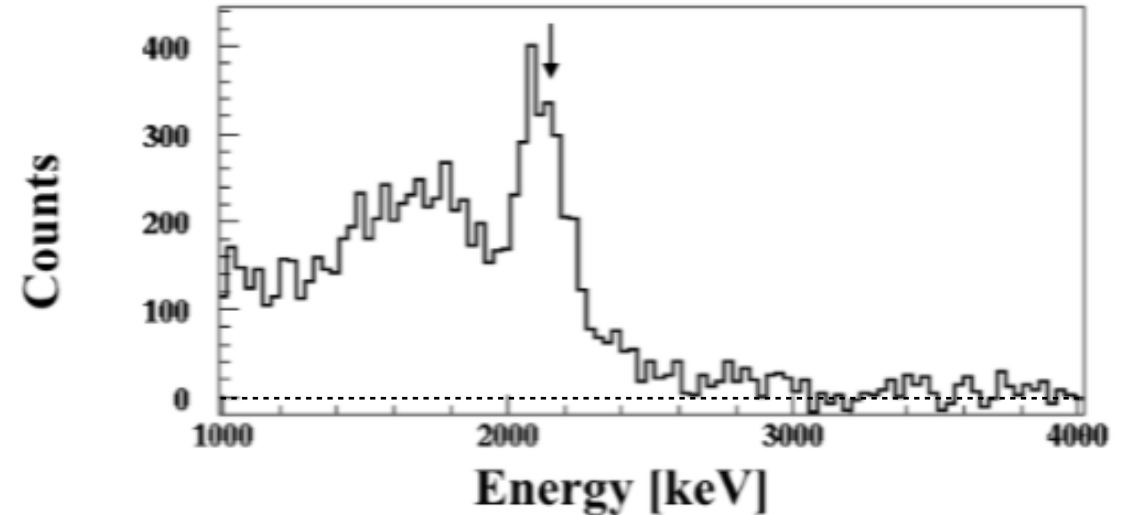
γ 線検出器のエネルギー較正はよく知られた準位からの γ 線を用いた

→一つの γ 線検出器かつRunで γ 線イベントを見れる十分な統計が必要

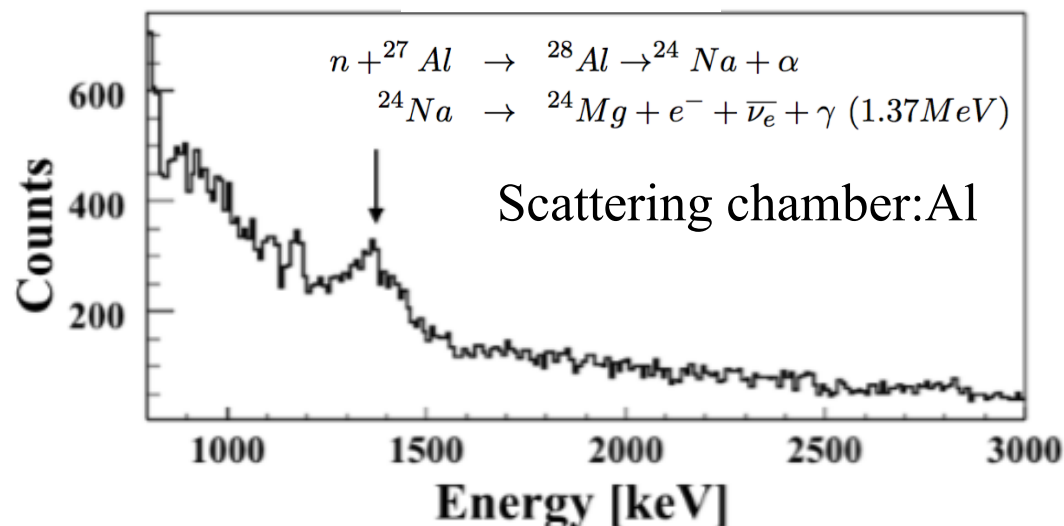
$^{12}\text{C}, 1^+, E_x=15.1\text{MeV}, E_\gamma=15.1\text{MeV}$



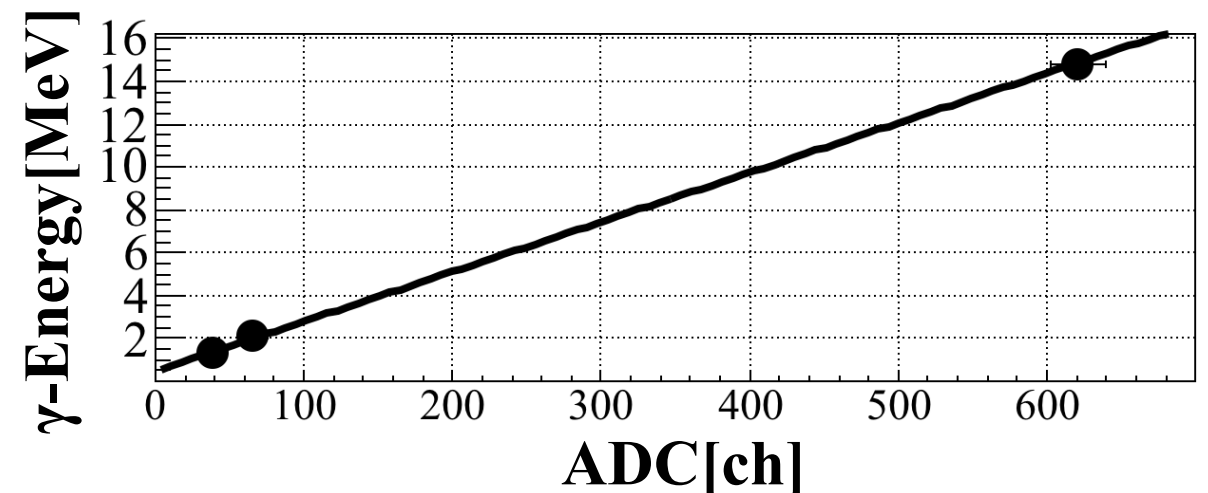
$^{12}\text{C}, E_x=18.0-20.4\text{ MeV}, E_\gamma=2.12\text{MeV}$



In beam background $E_\gamma \sim 1.37\text{ MeV}$



Calibration result of one Counter



4.5. γ 線検出器シミュレーション

周囲の物質も正確に再現

遮蔽物(鉛)

散乱層

γ 線検出器

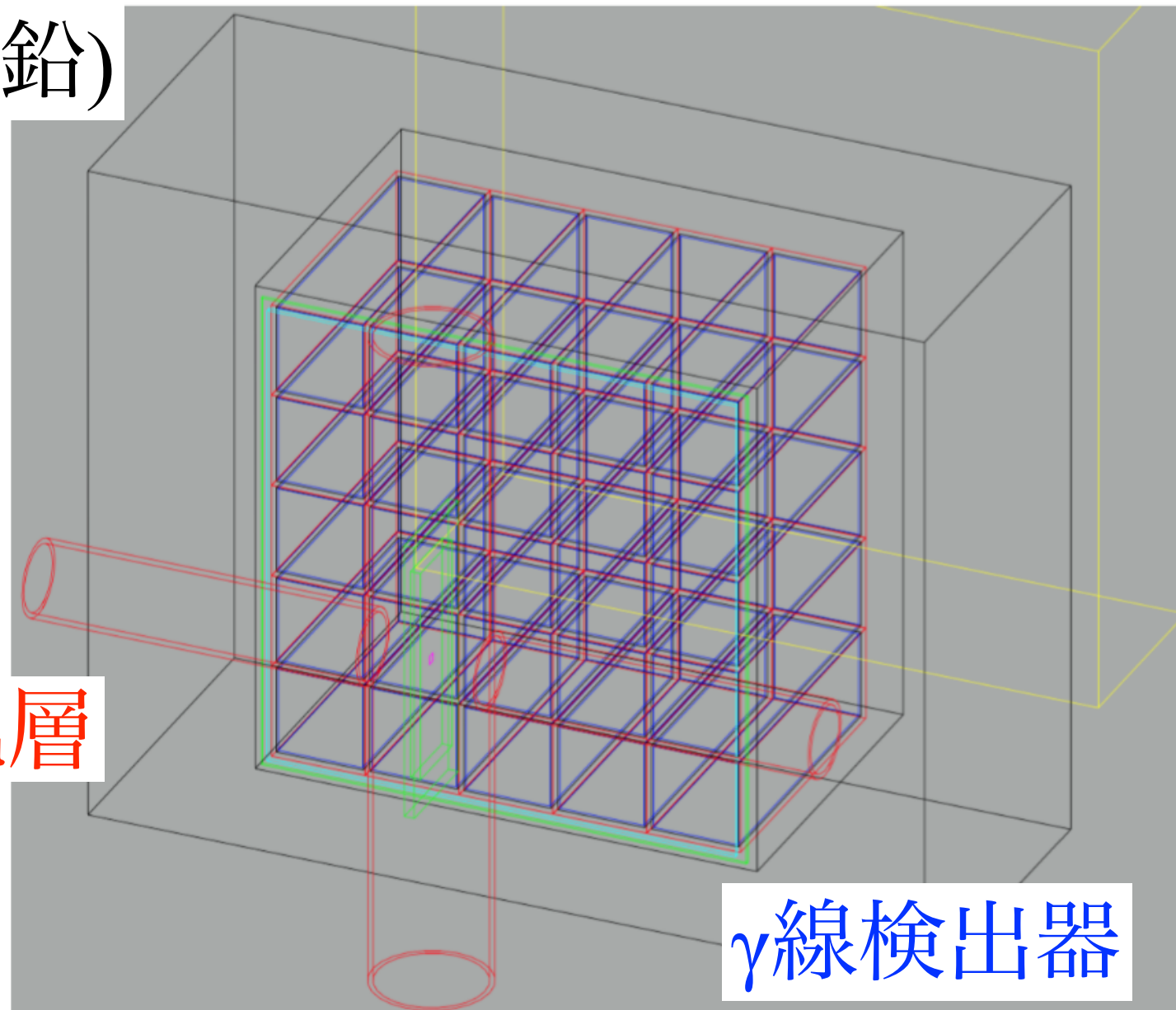


Figure 3.23: Geometrical setup in the simulation. Colors and material : blue = NaI, red = aluminum, black = lead, green = SUS, purple = target, light blue = plastic, yellow = CsI.

4.6. 実験中の γ 線の応答関数 $P(E_\gamma, E)$ の定義

- $P(E_\gamma, E)$ = 「実験において」、標的点から1個のエネルギー(E_γ)の γ 線を一様に放出したとき、10cm離れた位置にある γ 線検出器でエネルギー E が測定される確率応答関数、積分すると検出効率になる。

$$\int_{E_{th}=1.5MeV}^{E_{max}} P_j(E_\gamma, E) dE = \eta \epsilon^0(E_\gamma) \text{ 検出効率}$$

- $P(E_\gamma, E)$ の校正

- ✓ 実験前単体ではよく理解できた
- ✓ 実験ではDead time等を考量する必要がある
- ✓ γ 線分岐比(放出率)が既知の準位(E_x)を利用して校正する。

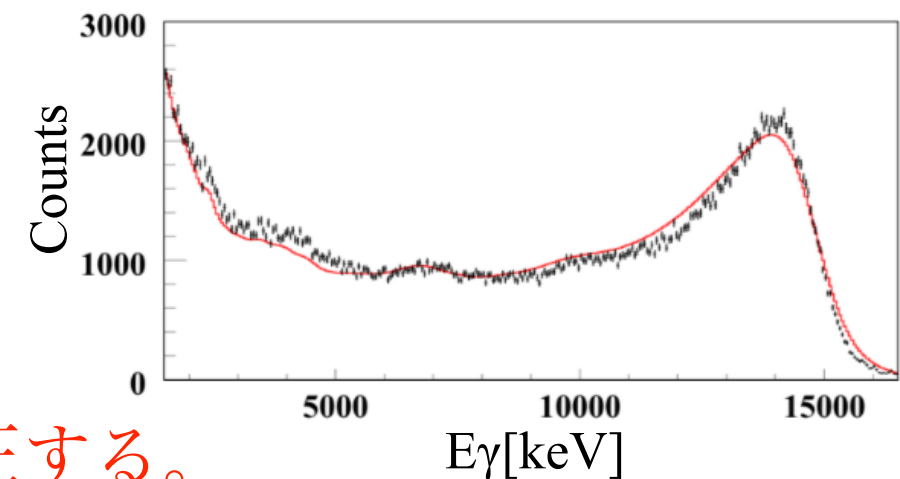
我々の実験の最大の特徴。

➡ ^{12}C $E_x=15.11MeV$: $Br=88\%$, ^{16}O $E_x=6.9MeV$: $Br=100\%$, $E_x=12.97MeV$: $Br=23\%$

- ✓ 校正値(C_f)を各検出器で決定

校正値の定義

$$N_\gamma(E_\gamma, E) = C_f \times N_{E_x} \times Br_\gamma \times P(E_\gamma, E) \quad C_f = \frac{N_\gamma(1.5MeV \sim)}{N_{MC}(1.5MeV \sim)} = 0.87$$

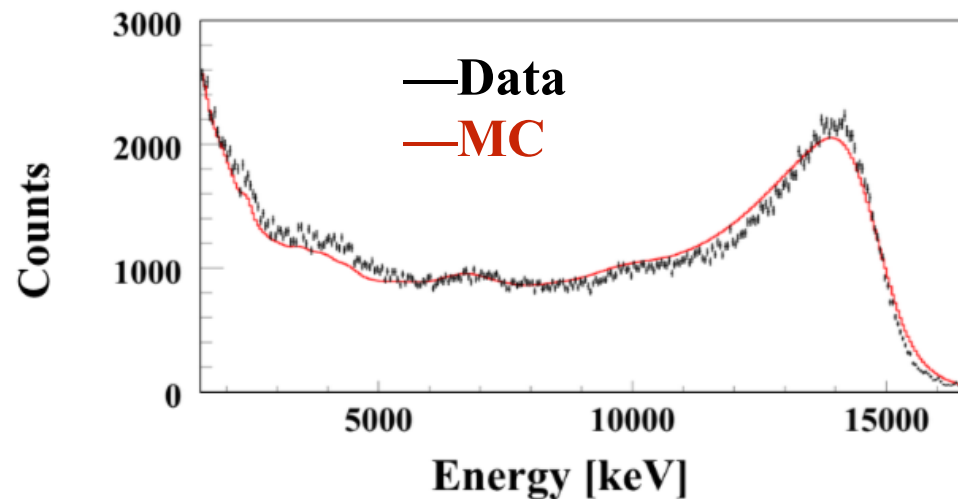


4.7. 既知の励起状態から放出される γ 線スペクトル

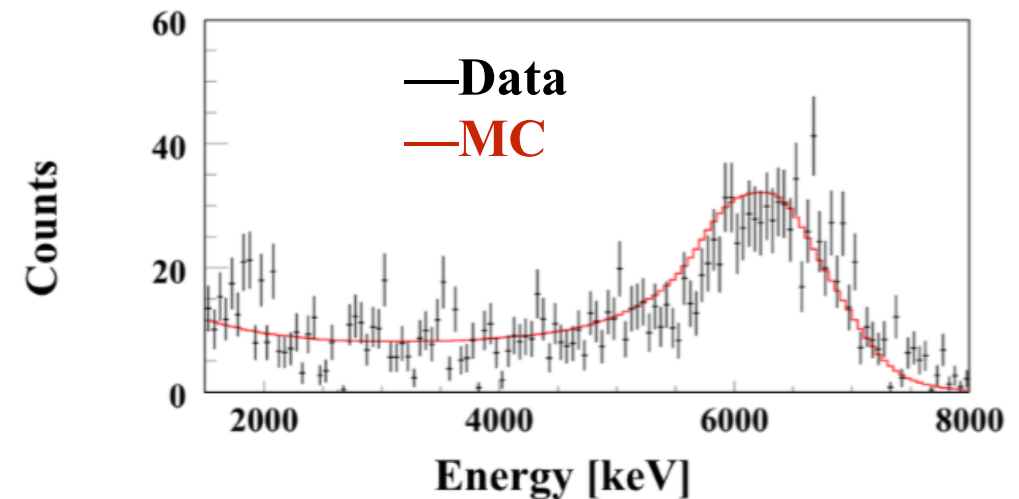
実験中の γ 線検出器の応答関数 $P(E_\gamma, E)$ をよく理解することができた

ビーム強度0.5nAの全Runを使用し 検出器シミュレーションと比較を行った

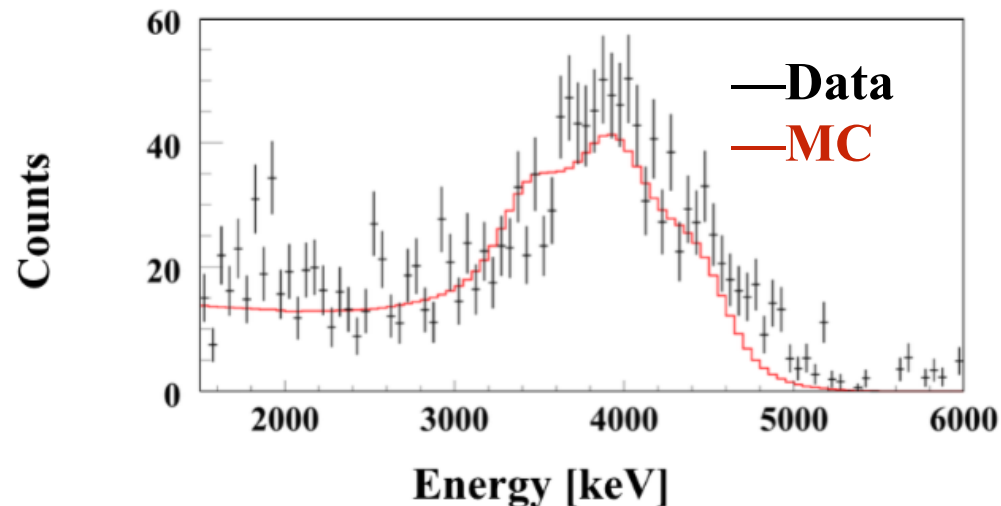
^{12}C , 1^+ , $E_x=15.1\text{MeV}$, $E_\gamma=15.1\text{MeV}$ and cascade



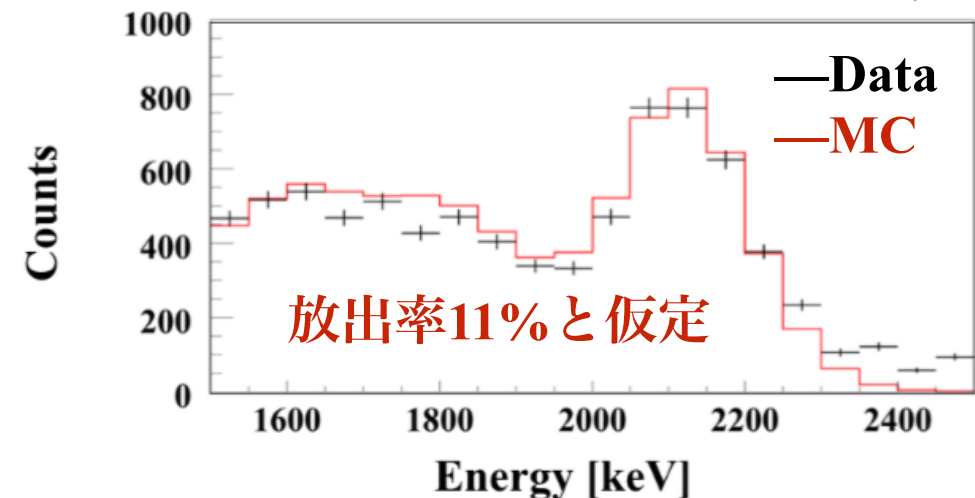
^{16}O , 2^+ , $E_x=6.9\text{MeV}$, $E_\gamma=6.9\text{MeV}$



^{16}O , 2^- , $E_x=12.97\text{MeV}$, α -decay, $E_\gamma=4.4\text{MeV}$



^{12}C , 2^- , $E_x=18-20.4\text{ MeV}$, p-decay, $E_\gamma=2.12\text{MeV}$

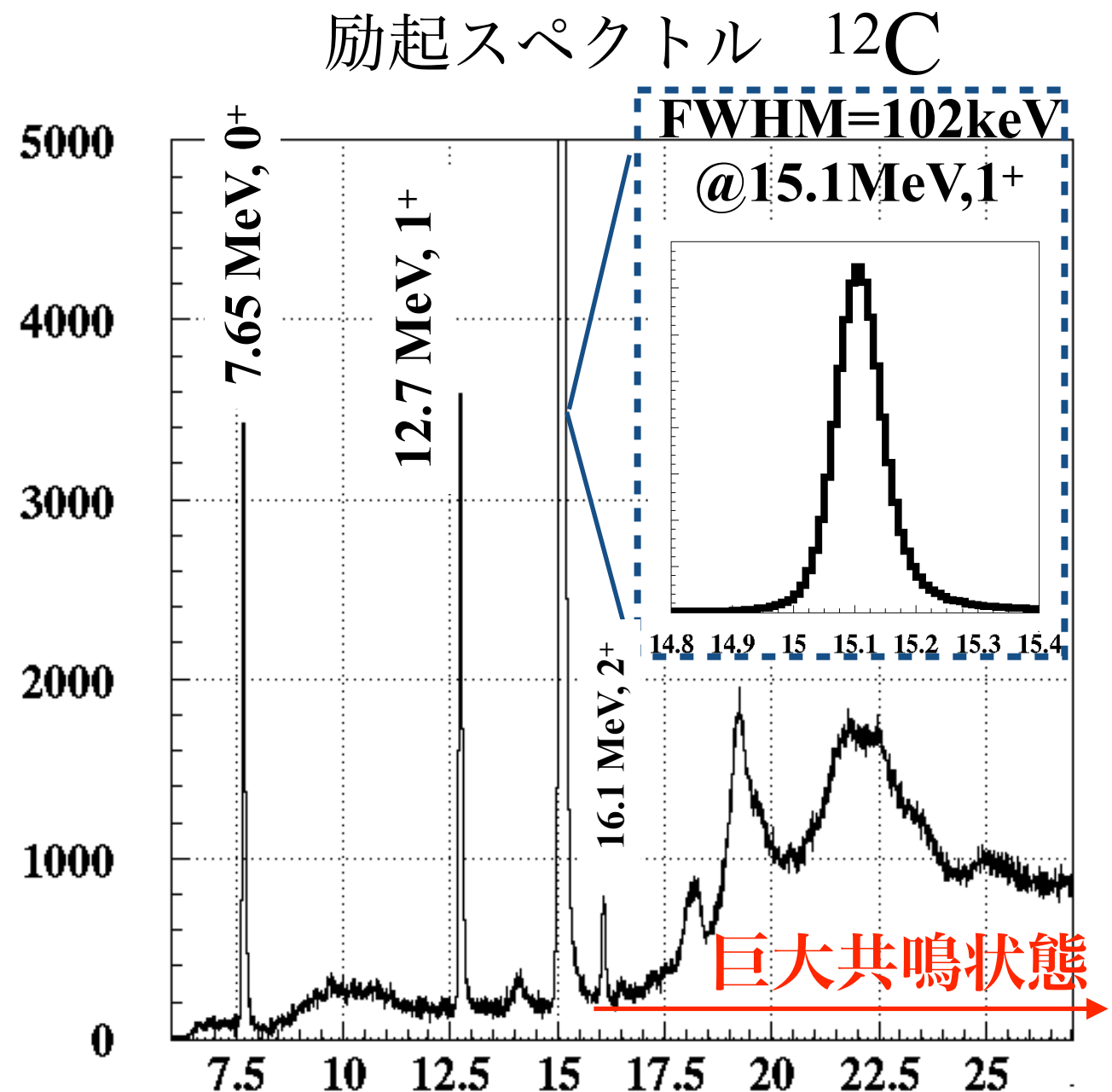
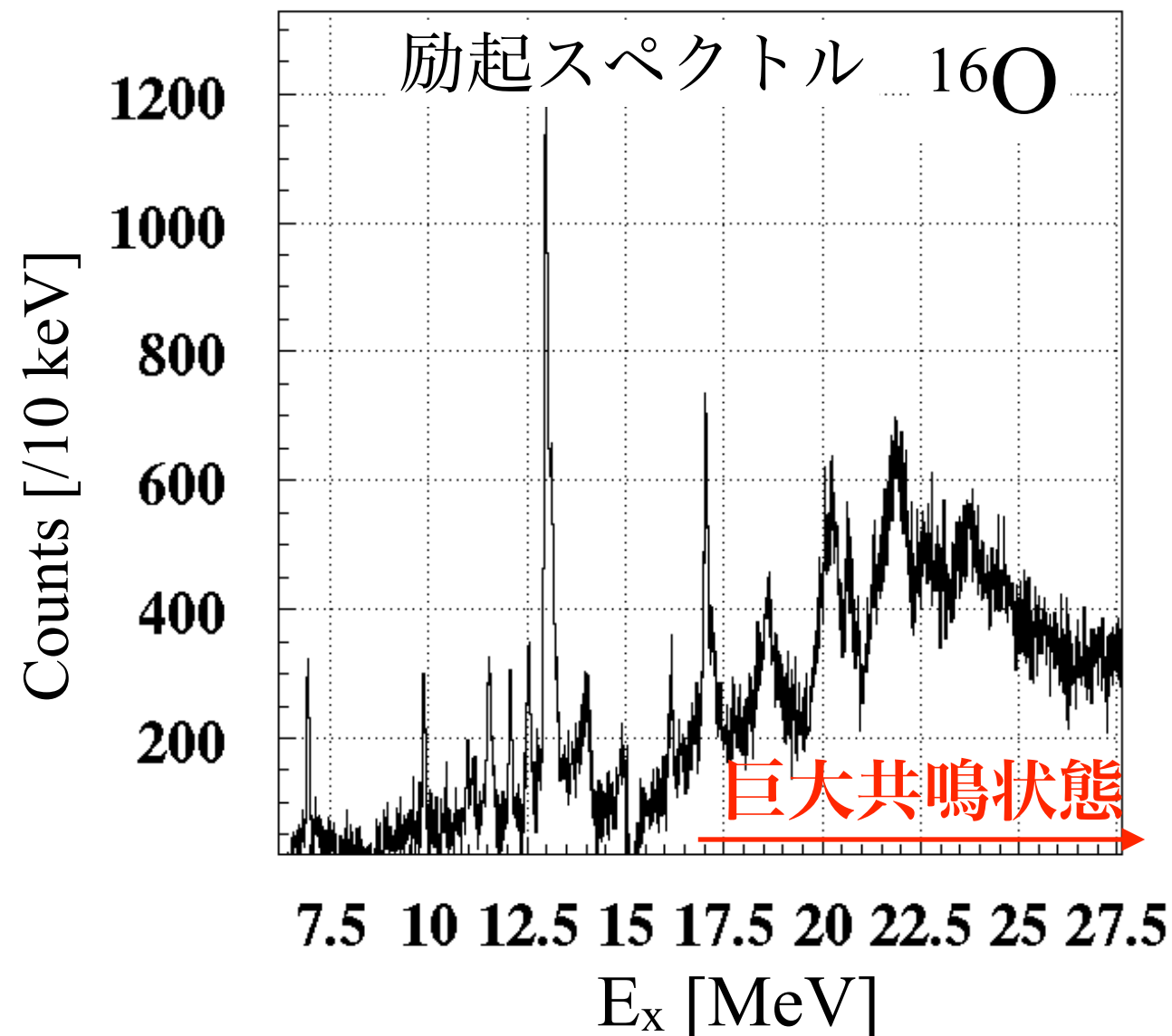


$$N_\gamma(E_\gamma, E) = C_f \times N_{E_x} \times Br_\gamma \times P(E_\gamma, E)$$

C_f : 較正係数 N_{E_x} : 励起数 Br_γ : γ 線放出率 $P(E_\gamma, E)$: γ 線応答関数

5. 巨大共鳴状態から粒子崩壊によって放出される γ 線

1. 各 E_x 毎の γ 線放出率の導出
2. 粒子崩壊からの γ 線の放出率
3. ^{16}O 励起状態から $^{12}\text{C}^*(15.1\text{MeV})\gamma$ 線
4. 理論計算との比較

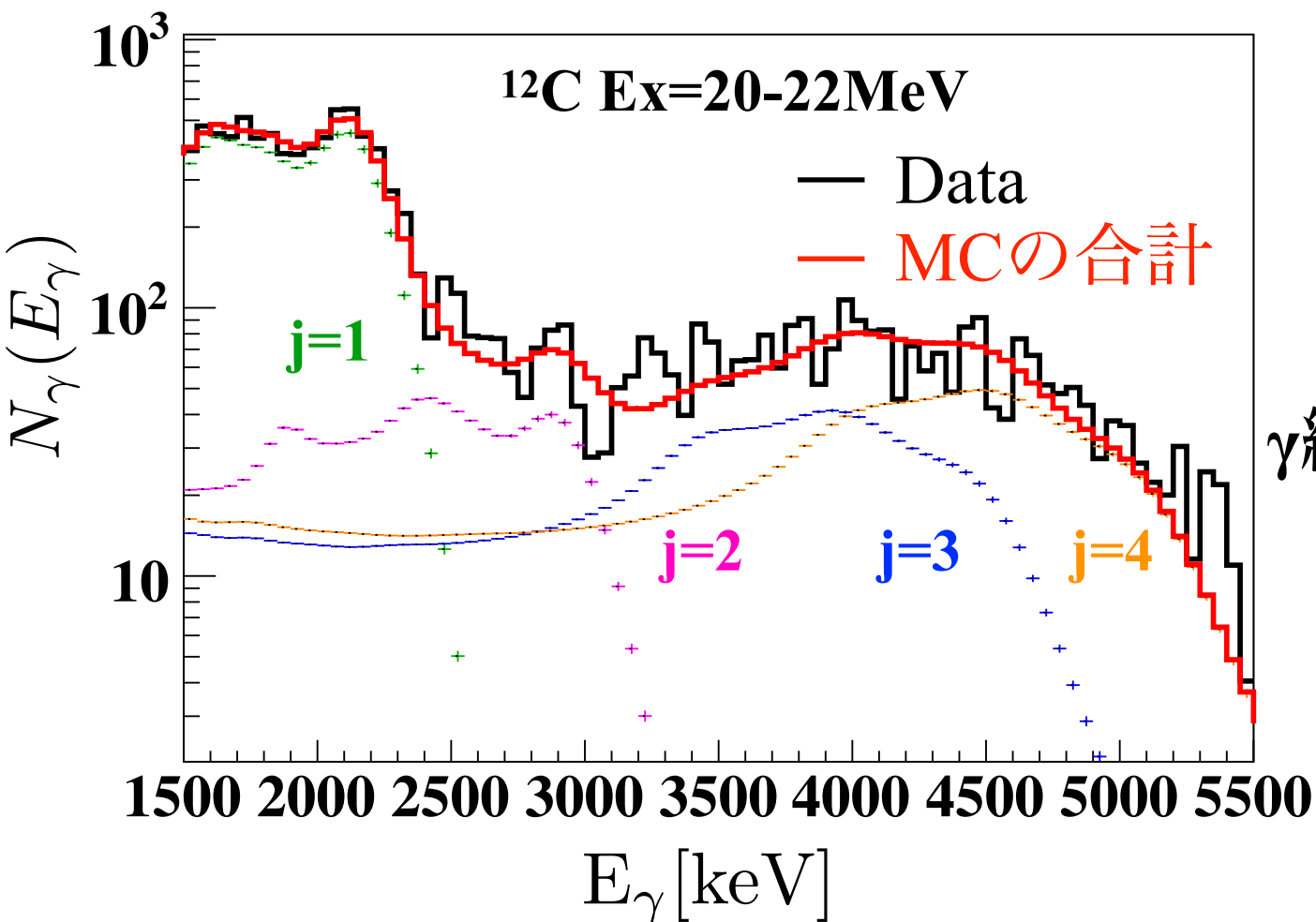


5.1. 各Ex毎の γ 線放出率の導出

γ 線エネルギー毎の放出率 Γ_γ/Γ を次のように導出する

方法： γ 線の応答関数 $P(E_\gamma, E)$ を用いてデータをフィットする。

$$N_\gamma(E_\gamma, E) = C_f \times N_{Ex} \sum_j Br_{\gamma j} P_j(E_\gamma, E) \quad \begin{cases} N_{Ex} & : \text{励起の数} \\ Br_j & : j^{\text{th}} \gamma \text{線の分岐比} \\ & (\text{パラメーター}) \end{cases}$$



$j =$	1	2	3	4
E_γ [MeV]	2.1	2.9	4.4	5.0

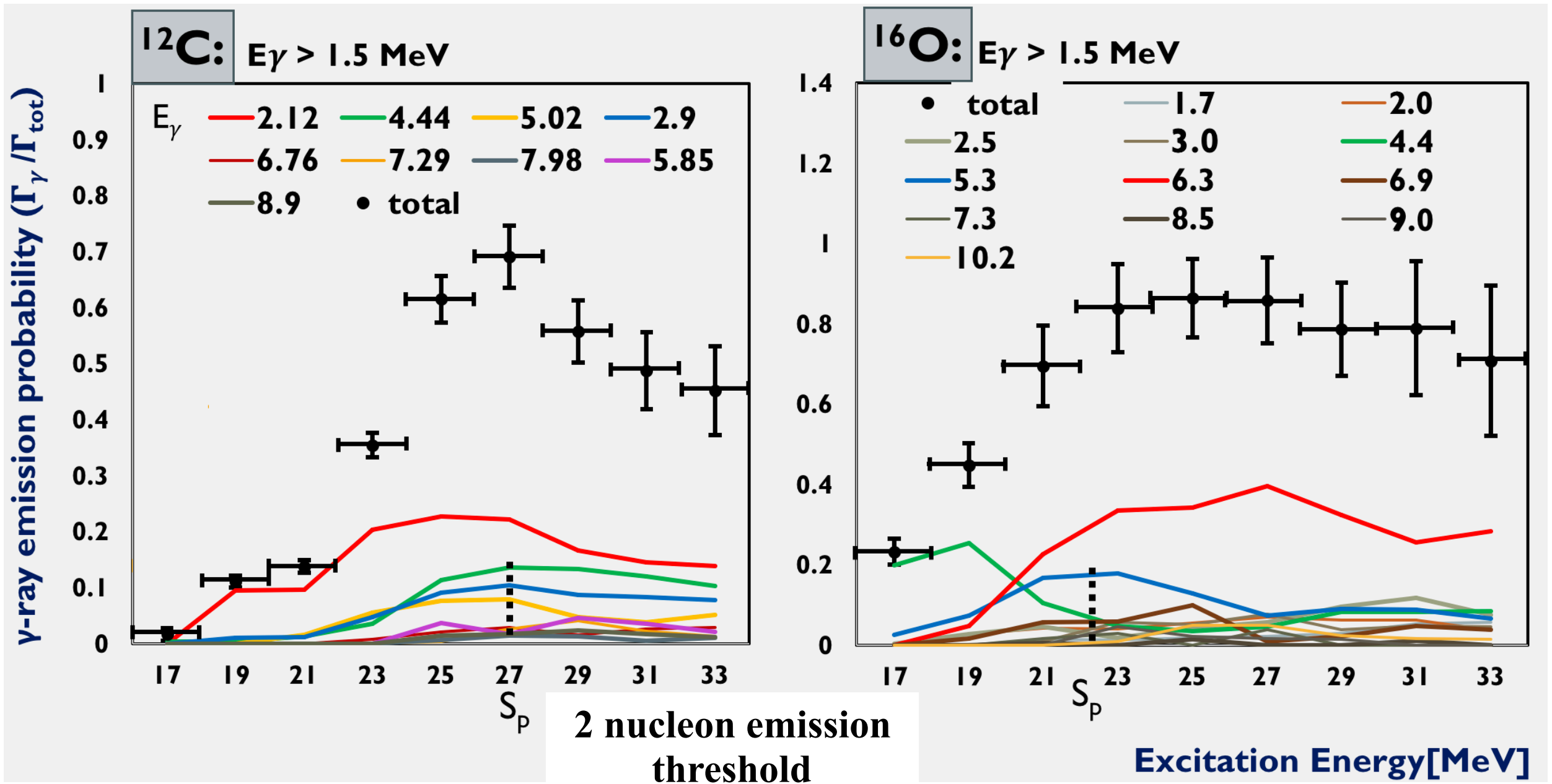
γ 線放出率：各 γ 線の分岐比 Br_j を足し上げ

$$\frac{\Gamma_\gamma}{\Gamma_{tot}}(Ex) = \sum_j Br_j$$

5.2. 粒子崩壊モードからの γ 線放出率

励起エネルギーの関数として γ 線放出率を観測したのは初めて

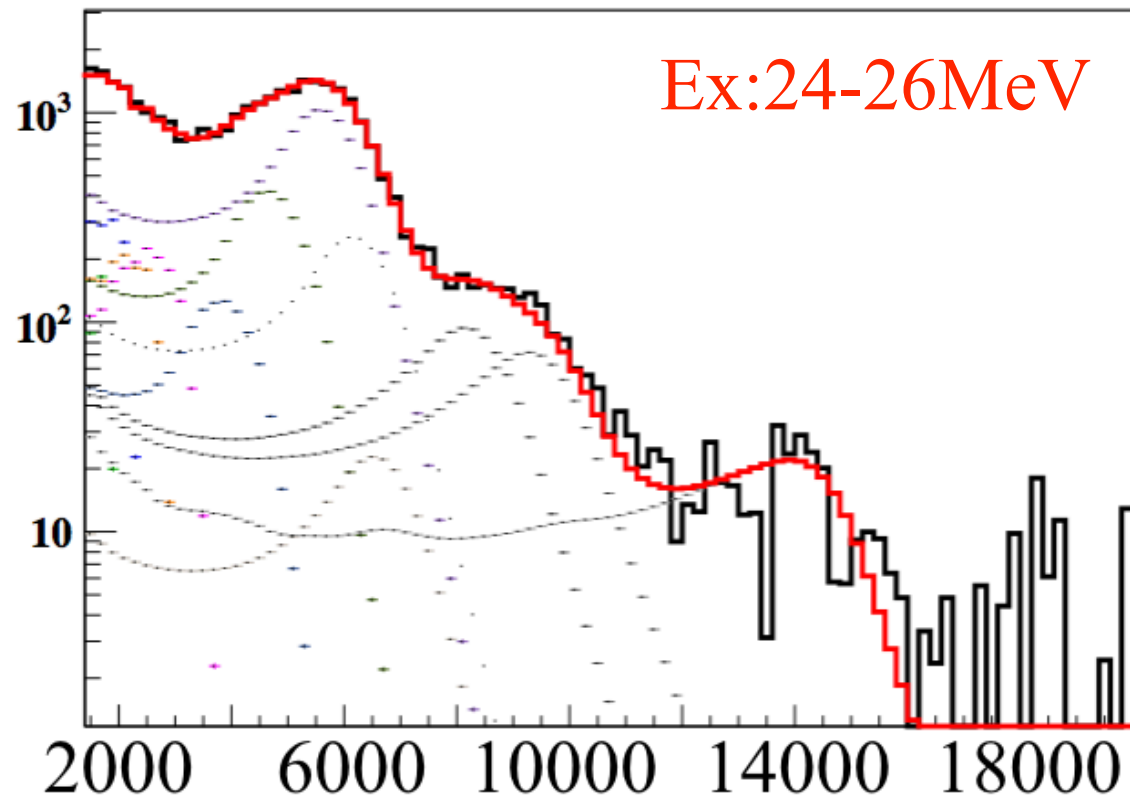
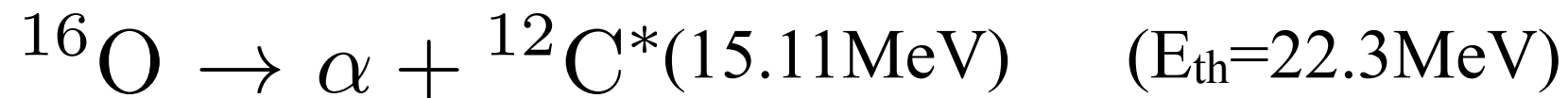
- 二核子放出の閾値($E_x=27,25\text{MeV}$) γ 線の放出率が(0.7,0.8)まで上昇
- 二核子放出の閾値を超えると γ 線放出率が減少



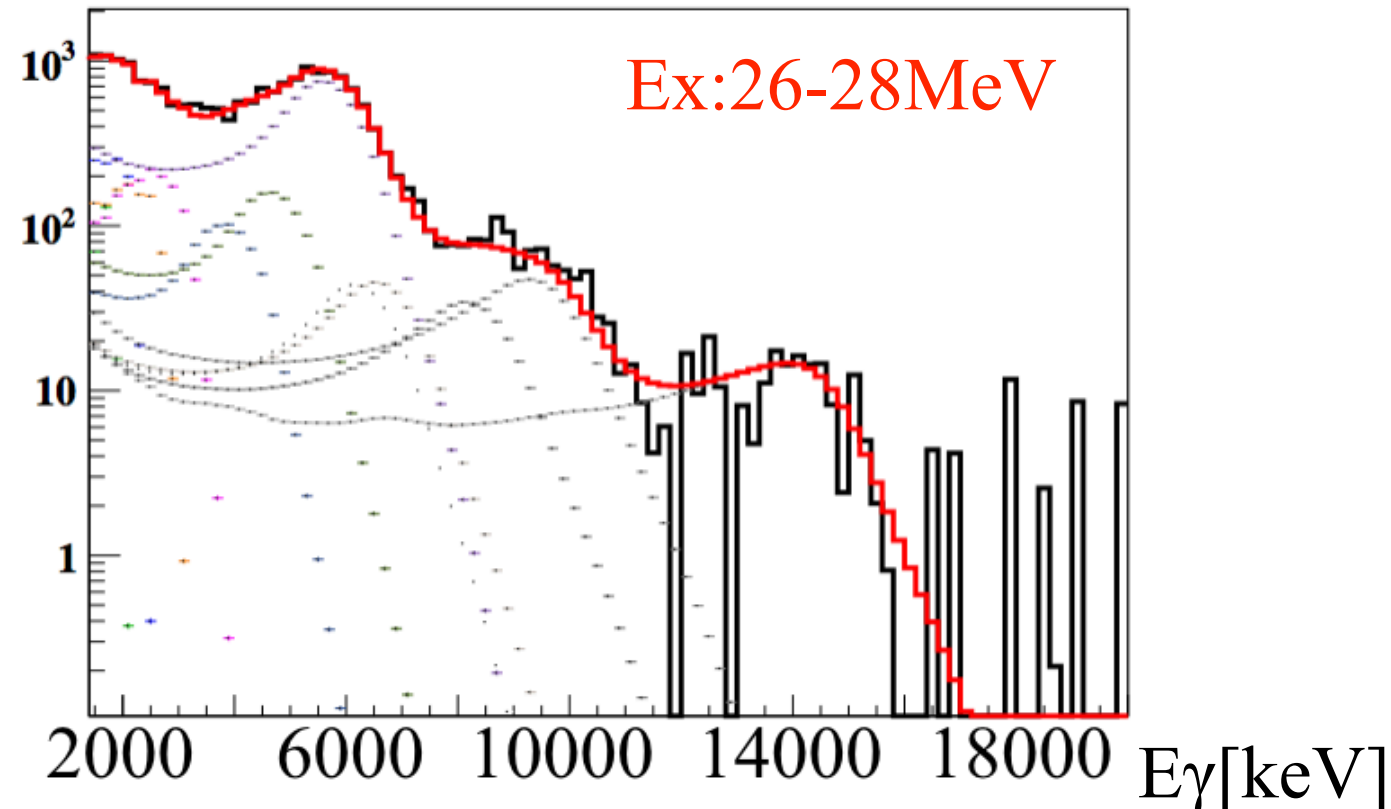
5.3. ^{16}O 励起状態からの $\text{C}^*(15.11\text{MeV})\gamma$ 線

^{16}O の励起状態から α 崩壊をして $^{12}\text{C}(15.11\text{MeV})$ の γ 線が見えている事が分かった。

- ^{16}O の α 崩壊の閾値は 7.15MeV
- 15.1MeV の γ 線が見え始めるのは $E_x=22.3\text{MeV}$ を超えてから



$$\text{B.R.}(15.1\text{MeV}) = (1.79 \pm 0.23) \times 10^{-2}$$

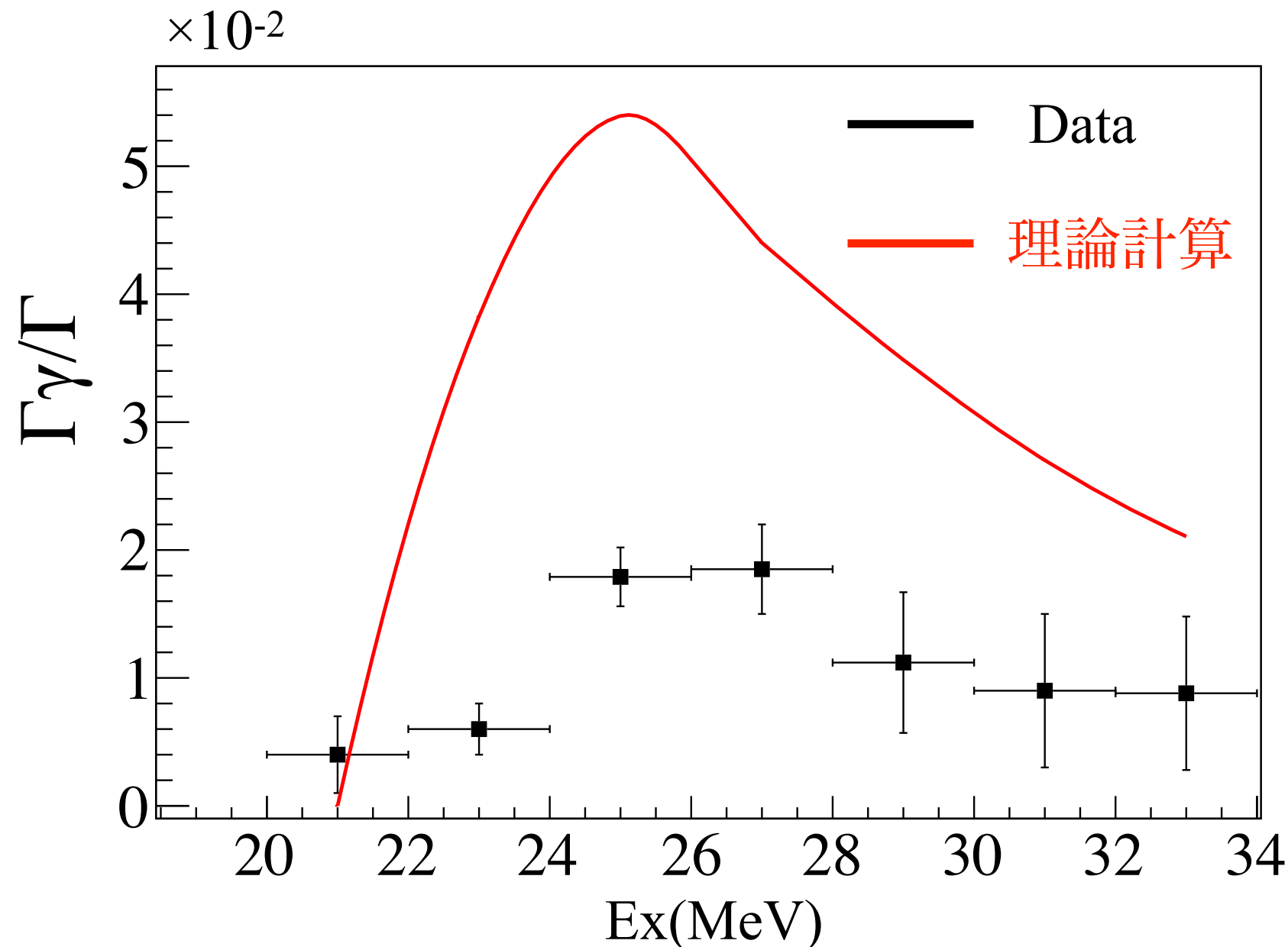


$$\text{B.R.}(15.1\text{MeV}) = (1.85 \pm 0.35) \times 10^{-2}$$

5.4. 15.1MeVの理論計算との比較

Ex = 24MeV~28MeVで有意な信号が観測されている

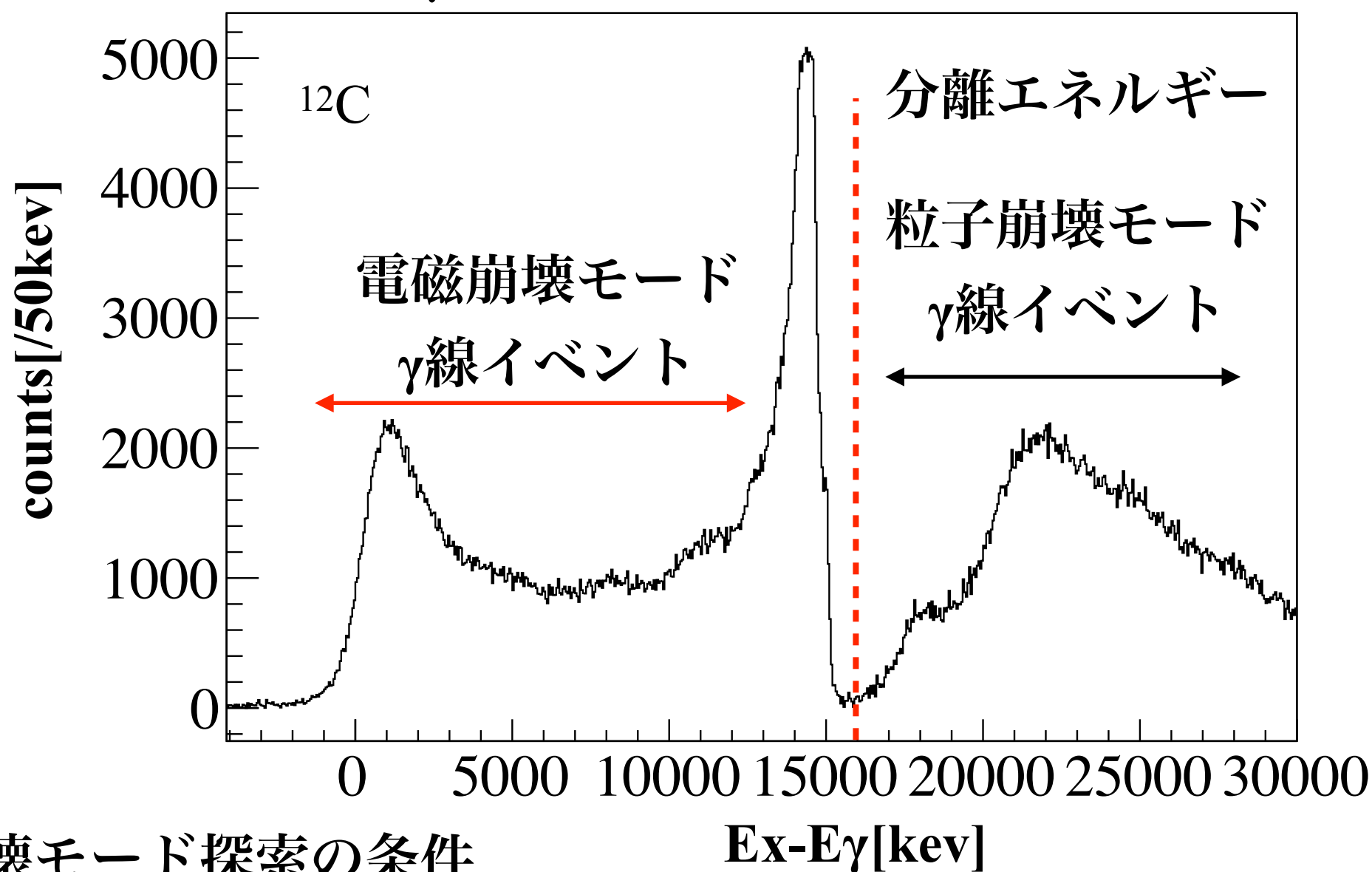
- GDR(T=1, J π =1-)の崩壊を使って計算
- 原子核の構造(波動関数)は考量していない



6.1. 巨大共鳴状態からの電磁崩壊モード探索①

$E_x - E_\gamma$ を横軸として電磁崩壊モードの探索を行った

(励起エネルギーと γ 線が精度よく測定されているため可能である)



電磁崩壊モード探索の条件

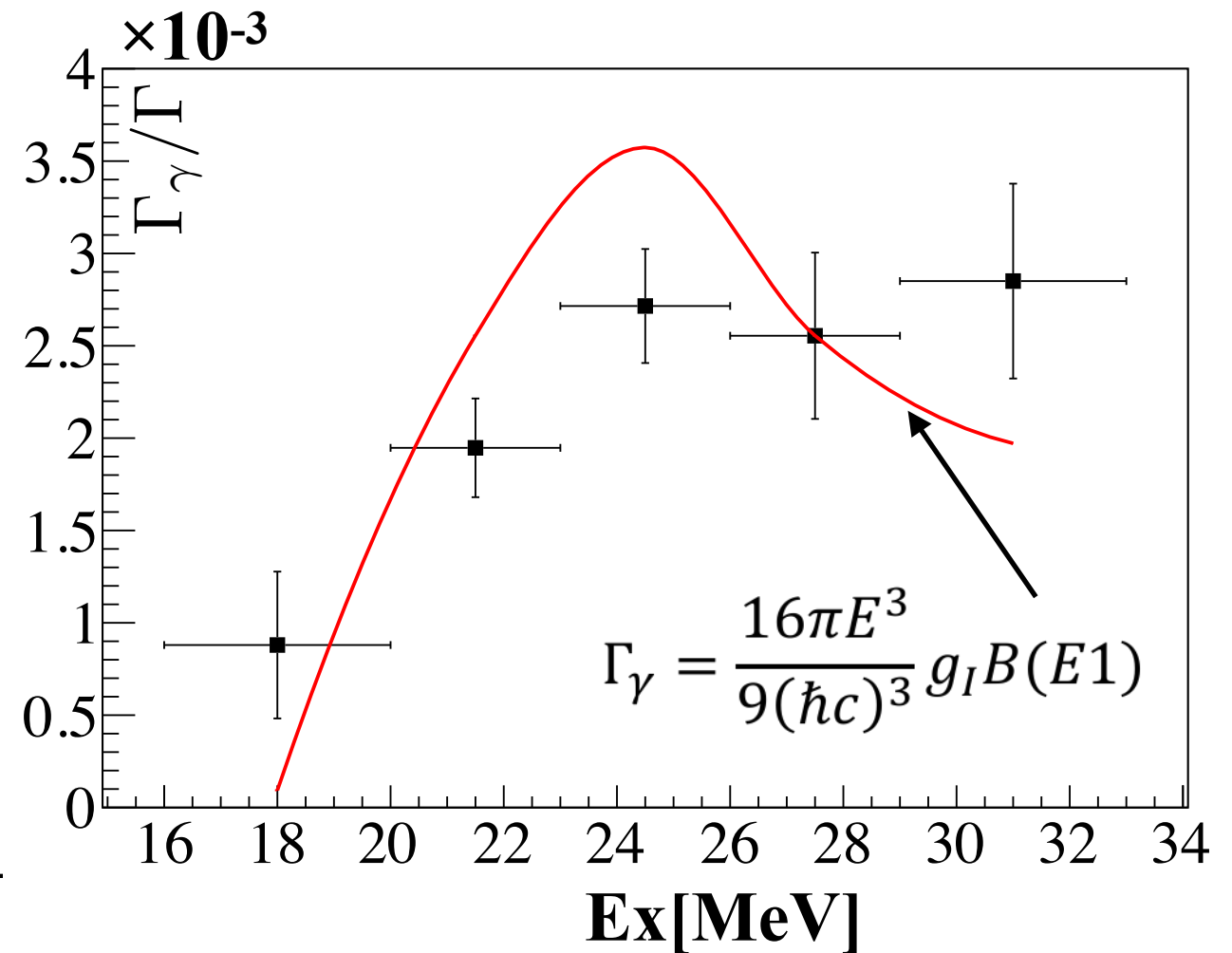
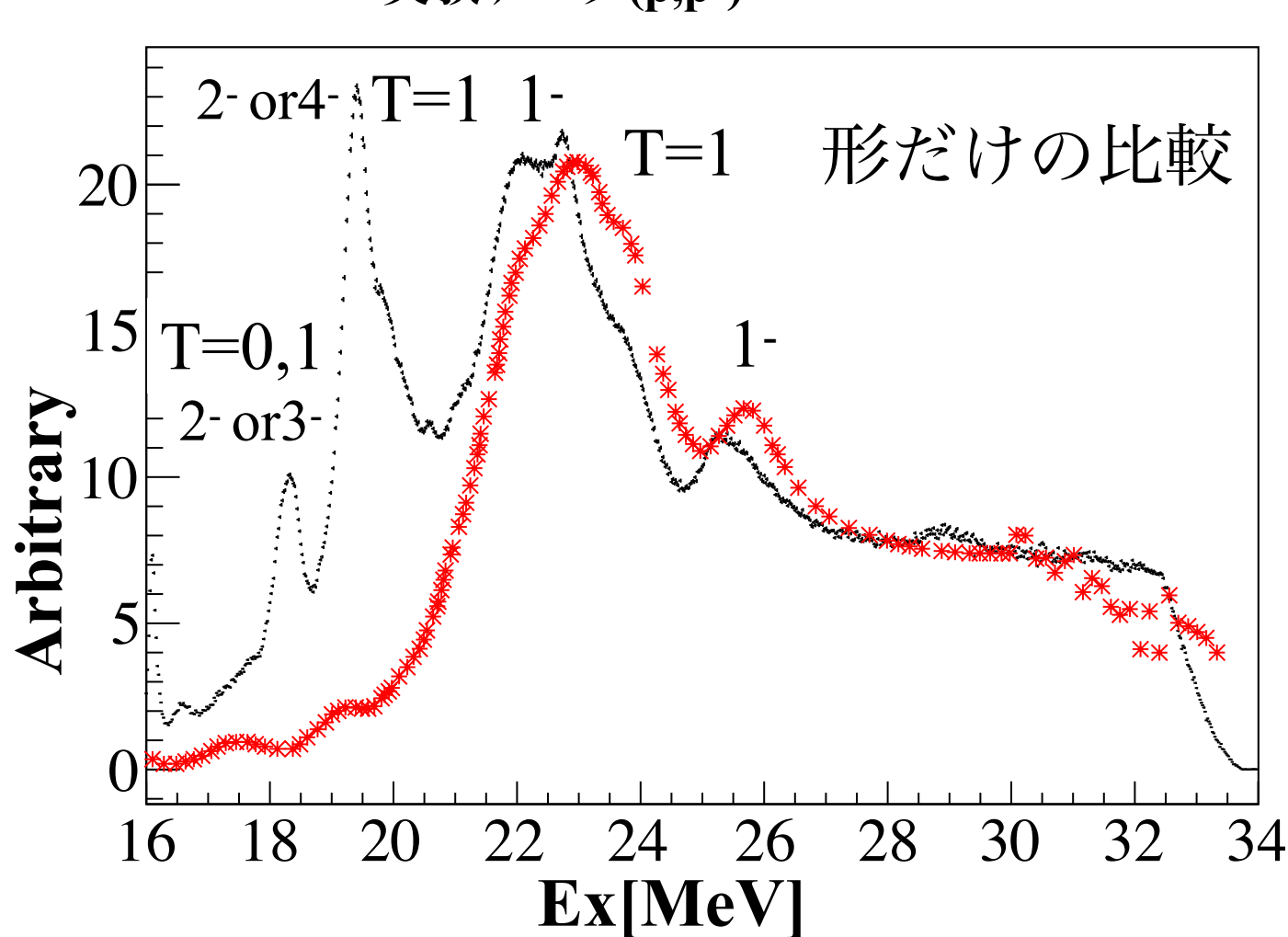
- **$E_x > 16\text{MeV}$** → 巨大共鳴状態
- **$E_\gamma > 11\text{MeV}$** → 粒子崩壊ではそれ以上のエネルギーの γ 線は放出されない

6.3. 実験データと理論計算の比較

励起エネルギーごとの γ 線放出率と理論計算の比較をした

— 炭素原子核の γ 線の吸収 (γ, tot)
E.G. Fuller, Physics Reports 127 (1985) 185-231
— 実験データ (p,p')

— (γ, tot)を元に計算したものを1/3倍
— 実験データ



- γ 線との結合に従って(E_x に応じて) γ 線の放出率も上昇するようである。
- この測定を契機にこれから理論的な発展も始まると思われる。

まとめ

- 2014年のE398実験においてに磁気スペクトロメータ”Grand Raiden”と γ 線検出器”NaI(Tl)”を用いて ^{12}C と ^{16}O の巨大共鳴状態から放出される γ 線を測定した。

各検出器の解析

- ^{12}C 、 ^{16}O の励起スペクトルは誤差40keVの精度で一致した。
- γ 線源や原子核励起状態から放出される γ 線の応答関数を理解した。

GR-NaI Coincidence results : 粒子崩壊

- 励起エネルギー16MeVから34MeVの間2MeV毎に粒子崩壊モードからの γ 線放出率(Γ_{γ}/Γ)を求めた。
- Langake(1996)が予測した ^{12}C や ^{16}O の粒子崩壊後の娘核の励起状態から γ 線が放出されことを**定量的に示した**。
- 二核子放出の閾値まで $^{12}\text{C} : \Gamma_{\gamma}/\Gamma(\text{Ex}=27\text{MeV})=0.7$ 、 $^{16}\text{O} : \Gamma_{\gamma}/\Gamma(\text{Ex}=23\text{MeV})=0.9$
 γ 線の放出率は上昇し、閾値を超えると減少する傾向がある。

まとめ

GR-NaI Coincidence results : 電磁崩壊

- 粒子崩壊では放出され得ない高エネルギーの γ 線イベントが見えており、 γ 線放出率は $(3.1 \pm 0.16(\text{sta}) \pm 0.4(\text{sys})) \times 10^{-3}$
- γ 線との結合に従って(E_x に応じて) γ 線の放出率が上昇している
- 2-SDRは、 $0^+(\text{GNR})$ に直接崩壊できない。
- 粒子崩壊で見えているGiant Resonance と電磁崩壊で見えているGDRを組み合わせると巨大共鳴状態の詳細解析ができる。